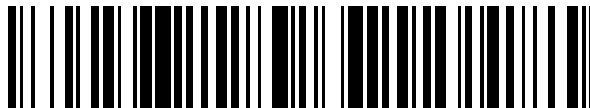


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 779 766**

51 Int. Cl.:

**H02J 3/18** (2006.01)

**F03D 7/02** (2006.01)

**F03D 9/25** (2006.01)

**H02J 3/38** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.11.2009 E 09014851 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.01.2020 EP 2202862**

54 Título: **Procedimiento y planta de generación de energía para estabilizar una red de distribución de electricidad**

30 Prioridad:

**18.12.2008 DE 102008062356**

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

**19.08.2020**

73 Titular/es:

**SENVION GMBH (100.0%)**

**Überseering 10**

**22297 Hamburg, DE**

72 Inventor/es:

**FORTMANN, JENS**

74 Agente/Representante:

**ELZABURU, S.L.P**

**ES 2 779 766 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 y planta de generación de energía para estabilizar una red de distribución de electricidad

5 La invención se relaciona con un procedimiento para estabilizar una red de distribución de electricidad después de la despejar de un fallo en la red. A la red de distribución de electricidad está conectada una planta de generación de energía, en particular una planta de energía eólica que alimenta de energía eléctrica a la red de distribución de electricidad a través de un convertidor. Este procedimiento detecta un fallo en la red de distribución de energía. Además, la invención se relaciona con una planta de generación de energía que a través de un convertidor que alimenta de energía eléctrica a una red de distribución de electricidad y que incluye una unidad de control.

10 Una causa más frecuente de un fallo en la red es un cortocircuito que se produce en algún lugar de la red de distribución de electricidad. Un cortocircuito conduce directamente a un hueco de tensión local. En fracciones de segundo, el hueco de tensión se propaga a largas distancias a través de la red de distribución de electricidad. Se suele reaccionar ante un fallo en la red aislando la sección parcial en la que se produjo el cortocircuito del resto de la red de distribución de electricidad. Antes de que la sección parcial en cortocircuito se aisle del resto de la red de distribución de electricidad,  
15 los generadores no tienen ninguna posibilidad de estabilizar la tensión. Ante todo, es particularmente importante para los generadores que durante esta fase no sean aislados de la red de distribución de electricidad.

Para la mayor estabilidad de la red de distribución de electricidad es decisiva la fase poco después de que la sección parcial con el cortocircuito haya sido aislada del resto de la red de distribución de electricidad. La tensión en la red de distribución de electricidad se eleva entonces de nuevo rápidamente, pero no inmediatamente a la tensión nominal,  
20 sino inicialmente a un valor de, por ejemplo, 75% de la tensión nominal. Aunque la red se encuentra de todos modos en estado crítico debido a la baja tensión, los mecanismos de control pueden hacer que la estabilización sea aún más difícil. Esto se aplica, por ejemplo, si para poder suministrar a los consumidores nuevamente la tensión nominal los cambiadores de tomas en carga cambian en el lado del consumidor la relación de elevación de tensión respecto de la red de alta tensión. El cambio de la relación de elevación de tensión causa un aumento de la corriente en la red de alta tensión y, por lo tanto, una nueva caída de la tensión en la red de alta tensión. La conmutación de los cambiadores de tomas en carga en el lado del consumidor conduce así a un efecto autoacumulativo que se contrapone a la completa restauración y estabilización de la red de distribución de electricidad. Este efecto autoacumulativo (desestabilizante) es particularmente problemático porque los generadores síncronos responsables de la carga de base sólo son capaces de proporcionar en esta fase la corriente reactiva necesaria para soportar la tensión en una medida muy limitada. El  
25 documento EP 1 892 412 A1 da a conocer un procedimiento para la operación de las plantas de energía eólica en el que a cada valor de potencia activa se le asigna un intervalo de potencia reactiva definido por una potencia reactiva mínima y una potencia reactiva máxima y la potencia reactiva real es controlable dentro de este intervalo, reduciéndose la potencia activa si una potencia reactiva nominal se encuentra fuera del intervalo de potencia reactiva asignado a la potencia activa real. El documento "Tapia, G. y otros: "A new simple and robust control strategy for wind farm reactive power regulation", Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Control Applications, Glasgow, Escocia, Reino Unido, septiembre 18-20, 2002" revela un procedimiento para la regulación de la energía reactiva. Sin embargo, los dos documentos mencionados anteriormente no se ocupan de las fallas de la red. El documento WO 2008/061698 A2 se refiere a un control de sistema polifásico inverso de una planta de energía eólica, en la que se realiza una división por fases de las variables de control en un sistema polifásico directo y un sistema polifásico inverso, por lo  
30 que el control en caso de un fallo en la red permite establecer una prioridad entre una estabilización de la red y una protección del sistema.

La invención tiene el objetivo de presentar un procedimiento y una planta de generación de energía que contribuyen cada vez más a estabilizar de nuevo la red de distribución de electricidad después de despejar de un fallo de la red. A partir del estado de la técnica mencionado anteriormente, el objetivo se logra por las características de las reivindicaciones independientes. Las formas de realización ventajosas se encuentran en las reivindicaciones secundarias.  
35

En el procedimiento de acuerdo con la invención, después de la detección de un fallo en la red, un regulador de estabilización se activa en la planta de generación de energía cuya respuesta a escalón de este controlador aumenta continuamente con el tiempo y regula la tensión de la energía eléctrica alimentada en función de una señal de tensión retornada. Una vez transcurrido un periodo especificado a partir de la activación del regulador de estabilización, se comprueba si la tensión se ha estabilizado. Si la tensión no se ha estabilizado suficientemente, la alimentación de corriente reactiva se incrementa más allá del límite previsto para el funcionamiento normal.  
40

En primer lugar, se explican algunos términos. Las plantas de generación de energía alimentadas por convertidor son actualmente principalmente aquellas en las que la energía se obtiene de las llamadas energías renovables. En particular, la planta de generación de energía se puede basar en la energía eólica, la energía solar, la biomasa, la energía térmica. Las plantas de generación de energía alimentadas por convertidor también se usan en las centrales  
45

eléctricas de acumulación por bombas, donde se desea una velocidad variable de la generación de energía primaria (en este caso las turbinas). Otro campo de aplicación son las centrales eléctricas que se alimentan de redes de diferentes frecuencias, por ejemplo, si una parte de la energía debe alimentar una red de energía ferroviaria y otra parte la red eléctrica regular. La invención abarca, pues, las plantas de generación de energía que alimentan sólo una parte de la energía eléctrica generada a la red de distribución de electricidad. El convertidor permite ajustar la tensión y la fase de la energía eléctrica alimentada a la red de distribución de electricidad, en gran medida independientemente de la generación de energía real.

El término "fallo en la red" se refiere a un fuerte hueco de tensión y no a las fluctuaciones que se producen durante el funcionamiento normal, por ejemplo, debido a un cambiador de tomas en carga. Particularmente se habla de un fallo en la red cuando la tensión se desvía en más de un 10% de la tensión nominal, en particular cuando la tensión cae más de un 10% en menos de 1 ms.

Incluso si el cortocircuito está lejos de la planta de generación de energía, el fallo en la red se detecta regularmente por un hueco de tensión en la planta de generación de energía. El hueco de tensión causado por el cortocircuito se extiende, concretamente, a largas distancias a través de la red de distribución de electricidad en fracciones de segundo. Por lo tanto, la detección de un hueco de tensión local es regularmente la opción más rápida para que la planta de generación de energía tome conocimiento de un cortocircuito. La invención también incluye la posibilidad de que la información respecto del cortocircuito llegue de otra manera a la planta de generación de energía.

Tras la detección de un fallo en la red, se activa un regulador de estabilización en la planta de generación de energía. El regulador de estabilización, que no está activado durante el funcionamiento normal, forma parte de un lazo de control cerrado. Una señal relativa a la tensión de la energía eléctrica suministrada se retroalimenta y se compara con la tensión nominal como variable de referencia. La diferencia entre los dos valores se entrega al regulador de estabilización como variable de entrada. La variable de salida del regulador de estabilización se utiliza para influir en la tensión a través del convertidor. La señal de salida del regulador de estabilización se llama respuesta a escalón cuando la variable de entrada salta de cero a un valor constante. Para un regulador de estabilización cuya respuesta a escalón aumenta con el tiempo, la variable de salida crece así con el tiempo si la variable de entrada permanece constante.

El procedimiento de acuerdo con la invención se basa en una pluralidad de conclusiones. En primer lugar, la red de distribución de electricidad se encuentra en un estado crítico después del fallo en la red y se decide en poco tiempo si se producirá una caída total o si la estabilización tiene éxito. En segundo lugar, el estado crítico significa que aumenta la probabilidad de inestabilidad oscilatoria, es decir, las oscilaciones en la frecuencia de la red. En tercer lugar, la decisión respecto de la reacción de la planta de generación de energía debe basarse en información muy incompleta. La planta de generación de energía nota que la tensión se desmorona, no dispone de otra información o ésta no es suficientemente fiable.

En vista de ello, el procedimiento de acuerdo con la invención propone un desarrollo en dos etapas. En un primer paso, el regulador de estabilización se activa después de que se detecta el fallo en la red. Aunque en este momento, la desviación entre el valor real y el valor nominal de la tensión suele ser grande, el regulador de estabilización no debe provocar un cambio repentino. O sea, los cambios repentinos aumentan el riesgo de inestabilidad oscilatoria. Si la desviación entre el valor real y el valor nominal se mantiene durante un periodo, es señal de que la estabilización inmediata de la red de distribución de electricidad no ha tenido éxito. Para sostener la tensión, la planta de generación de energía debe entonces alimentar tanta corriente reactiva como sea posible. De acuerdo con la invención, esto se logra mediante el uso de un regulador de estabilización con una respuesta a escalón ascendente. Esto evita cambios repentinos al principio, pero tiene un gran efecto en el caso de una desviación persistente entre el valor real y el valor nominal.

Después de que el regulador de estabilización ha estado activo durante un periodo de tiempo, se comprueba si esta medida ha llevado a la estabilización de la tensión. Si no es así, se inicia la segunda etapa del procedimiento. Mientras que en la primera etapa se siguen cumpliendo todos los requisitos del funcionamiento normal, es decir que, por ejemplo, se evitan las sobretensiones y se mantiene el suministro de potencia activa, en la segunda etapa se elimina un límite previsto para el funcionamiento normal, a fin de poder aumentar el suministro de corriente reactiva. Si en este momento, la red de distribución de electricidad aún no se ha logrado estabilizar suficientemente, el trasfondo de esto es que se debe asumir una situación crítica y un fallo grave. Así pues, la invención presenta un procedimiento que reacciona al fallo en la red de manera equilibrada a pesar de un estado de red inestable y una base de información incierta. De este modo, el procedimiento de acuerdo con la invención contribuye así con grandes perspectivas de éxito a una estabilización de la red.

En la segunda etapa del procedimiento, una primera opción es aumentar el suministro de corriente reactiva más allá del límite previsto para el funcionamiento normal incrementando el valor del valor nominal de tensión. Esto permite

5 aumentar la parte de corriente reactiva sin reducir la corriente activa. Los términos “corriente activa” y “corriente reactiva” se utilizan como sinónimos de las componentes activas y reactivas de la energía generada; el experto es consciente de que hay otras formas de representar esto, como el ángulo de fase  $\phi$  entre la corriente y la tensión o el coseno de este ángulo. Aunque el aumento valor nominal de la tensión pondrá la planta de generación de energía en un estado de sobrecarga, esto puede ser tolerado por un período limitado.

10 Una segunda opción para la segunda etapa del procedimiento de acuerdo con la invención es aumentar la inyección de corriente reactiva más allá de un límite destinado al funcionamiento normal, dando prioridad a la alimentación de corriente reactiva sobre la alimentación de corriente activa. En la primera etapa del procedimiento de acuerdo con la invención, la alimentación de la potencia activa tiene prioridad al igual que en el funcionamiento normal, sólo se alimenta tanta corriente reactiva como sea posible, además de la corriente activa. La prioridad de la corriente activa en esta fase tiene sentido porque los consumidores exigen mucha potencia activa después de la caída. Sin embargo, si la primera etapa del procedimiento de acuerdo con la invención no es suficiente para estabilizar suficientemente la red, es necesario adoptar otras medidas. Con la invención se propone ahora dar prioridad a la alimentación de la corriente reactiva en lugar de la corriente activa. A primera vista, parece absurdo reducir el suministro de corriente activa después de un fallo en la red. Sin embargo, la invención ha advertido que sostener la tensión es el aporte más importante para estabilizar la red. Por el contrario, la frecuencia influida por la alimentación de corriente activa es un fenómeno global. Así que si la corriente activa se pierde localmente, en muchos casos puede ser absorbida por una central eléctrica lejana. Sin embargo, si la tensión cae localmente, esto no puede ser compensado por una central eléctrica lejana.

20 En la primera etapa del procedimiento de acuerdo con la invención, la prioridad de la corriente activa se asegura estableciendo un límite superior para el ángulo de fase  $\phi$  entre la corriente y la tensión. El límite puede ser un límite explícitamente especificado para el ángulo de fase  $\phi$  o un límite físico que actúa como un límite para el ángulo de fase  $\phi$ . Si, por ejemplo, la corriente máxima permisible en la planta de generación de energía se alcanza en un ángulo de fase  $\phi$  determinado, esta limitación de la corriente actúa como una limitación del ángulo de fase  $\phi$ . El regulador de estabilización puede controlar hasta el límite, pero no más allá del mismo. El límite se selecciona de manera que la planta de generación de energía pueda hacer frente a la suma de la corriente activa y la corriente reactiva. Para evitar la sobrecarga de la planta de generación de energía en la segunda etapa del procedimiento de acuerdo con la invención, mediante la suspensión del límite del ángulo de fase  $\phi$  debe garantizarse que la corriente activa disminuya en paralelo si se supera el límite y se aumenta la alimentación de corriente reactiva. Por lo tanto, la alimentación de corriente reactiva se incrementa a expensas de la alimentación de corriente activa.

El aumento de la alimentación de corriente reactiva prevista en la segunda etapa del procedimiento de acuerdo con la invención más allá del límite para el ángulo de fase  $\phi$  previsto para el funcionamiento normal puede llevarse a cabo bajo el control del regulador de estabilización. También es posible nuevamente desactivar el regulador de estabilización en la segunda etapa del procedimiento y aumentar la alimentación de energía reactiva.

35 El límite del ángulo de fase  $\phi$  puede ser completamente eliminado en la segunda etapa del procedimiento. El ángulo de fase  $\phi$  podría entonces aumentar hasta a  $90^\circ$ , de modo que se alimente exclusivamente corriente reactiva. En muchos casos es más práctico establecer un límite superior para el ángulo de fase  $\phi$  y, por lo tanto, un límite inferior para la componente activa. Si la planta de generación de electricidad es una planta de energía eólica, el límite inferior puede establecerse en función de la velocidad del viento. También puede ser útil retrotraer el ángulo de fase  $\phi$  al valor original tan pronto como haya transcurrido un período especificado o se haya superado un límite especificado para la tensión.

45 En una versión ventajosa, el procedimiento de acuerdo con la invención se extiende a tres etapas. Si la tensión no se ha estabilizado suficientemente dentro de un primer período especificado como resultado de la primera etapa del procedimiento de acuerdo con la invención, en una segunda etapa se aumenta primero el valor nominal para la tensión. Como se explicó anteriormente, esto pone a la planta de generación de energía en un estado de sobrecarga, por lo que esto no se puede mantener de forma permanente. Después de que un segundo período de tiempo predeterminado haya transcurrido desde que se aumentó el valor nominal, se vuelve a comprobar si la tensión se ha estabilizada lo suficiente. Si no es el caso, en una tercera etapa del procedimiento de acuerdo con la invención se elimina un límite superior para el ángulo de fase  $\phi$  entre la corriente y el voltaje. Esto tiene la consecuencia de que la alimentación de corriente reactiva puede aumentarse a expensas de la alimentación de corriente activa. En este estado, la planta de generación de energía hace su mayor contribución posible para sostener localmente la tensión.

55 En un funcionamiento normal, el regulador de estabilización tendría consecuencias indeseables. Por lo tanto, el procedimiento de acuerdo con la invención prevé que el regulador de estabilización sea apagado de nuevo a tiempo. Una condición para desactivar el regulador de estabilización puede ser que el valor real de la tensión supere un umbral predeterminado. De lo contrario, existe el peligro de que una tensión que ya ha aumentado bruscamente después de despejado un fallo y que por lo tanto ya es demasiado alto, sea incrementado aún más mediante el regulador de

estabilización. Alternativa o adicionalmente, el regulador de estabilización también puede desactivarse si ha transcurrido un período especificado desde que se produjo el fallo de la red eléctrica o si la tensión pudo mantenerse dentro de una banda determinada durante un período determinado.

5 La planta de generación de energía suele generar energía eléctrica de baja o media tensión. La energía eléctrica generada con bajo voltaje también se transforma regularmente primero en media tensión antes de ser transformada en alta tensión para su transporte a grandes distancias. En el caso de una generación de baja tensión, la baja tensión está directamente influenciado por el lazo de control, mientras que la influencia en la media y alta tensión es indirecta. En el caso de una generación de media tensión, la media tensión está directamente influenciada por el lazo de control, mientras que la influencia en la alta tensión es indirecta. Además de la baja y media tensión, la alta tensión también se considera como la variable de referencia para el lazo de control. Si se selecciona la alta tensión como la variable de referencia, esto tiene la ventaja de que el control se basa directamente en la variable que es importante en última instancia. Debido al cambiador de tomas en carga, la relación entre la media tensión y la alta tensión no suele ser fija. Si la alta tensión sirve como variable de referencia, debe ser controlada a un valor anterior a la ocurrencia del fallo en la red y no a un valor generalmente fijo. En particular, este valor puede ser el límite inferior de la banda de tensión antes de que se produzca el fallo en la red. Si se conocen los datos de la red de media tensión y las características del transformador entre la red de media tensión y la red de alta tensión, las plantas de generación de energía son capaces de calcular la alta tensión. Alternativamente, si se dispone de un enlace de comunicación rápido, se puede medir la alta tensión y los valores medidos pueden ser transmitidos a las plantas de generación de energía.

20 Como se mencionó anteriormente, la tensión en la red de distribución de energía es un fenómeno más bien local. Si varias plantas de generación de energía adoptan simultáneamente medidas para sostener la tensión, esto puede causar que la tensión localmente se eleve rápidamente por encima del valor nominal, aunque la red en su conjunto no se haya estabilizado todavía. En vista de la tensión real por encima del valor nominal, el regulador de estabilización comienza de nuevo a bajar la tensión. Este efecto indeseable puede evitarse diseñando el regulador de estabilización de manera que sólo aumente la tensión.

25 Como se mencionó anteriormente, después de un fallo la red existe un mayor riesgo de fluctuaciones oscilatorias debido al estado poco claro de la red de distribución de electricidad. Por lo tanto, en general, se debe tratar que los componentes conectados a la red eviten los cambios repentinos. En el contexto de la invención, esta idea se reflejó primero en la elección de un regulador de estabilización que evita cambios bruscos al principio del procedimiento de acuerdo con la invención. Lo mismo se aplica a los demás cambios a los que se somete la planta de generación de energía durante el procedimiento de acuerdo con la invención. No deben ser abruptas, sino continuas a lo largo de un período, en varios escalones o en rampa. Esto se aplica en particular al valor nominal de la tensión cuando se baja de nuevo al valor normal al final del proceso de acuerdo con la invención, y al regulador de estabilización, que tampoco debería ser desactivado de golpe al final del procedimiento. Esto también se aplica a la reducción de la corriente activa cuando se ha eliminado el límite del ángulo de fase  $\phi$ , y al posterior nuevo aumento de la corriente activa. Si la planta de generación de energía es una planta de energía eólica, adicionalmente también puede ser sensato ajustar el ángulo de ataque de las palas del rotor cuando se reduce la potencia activa para así evitar que el rotor se acelere. También la reducción de la potencia reactiva debería llevarse a cabo con la suficiente lentitud para que otros participantes en la red puedan compensar los cambios. En general, los cambios pueden, por ejemplo, extenderse a lo largo de un período de al menos 2 s, preferiblemente de al menos 5 s, y más preferiblemente de al menos 10 s.

40 La invención también se refiere a una planta generadora de energía diseñada para llevar a cabo el procedimiento de acuerdo con la invención. Basándose en el mencionado estado actual de la técnica, la planta de generación de energía se caracteriza, de acuerdo con la invención, por el hecho de que se ha previsto un regulador de estabilización cuya respuesta a escalón aumenta con el tiempo y de que está diseñado para regular la tensión de la energía eléctrica alimentada en función de una señal de tensión retornada. Además, la unidad de control incluye un módulo de activación que activa el regulador de estabilización después de un fallo en la red y un detector para comprobar si la tensión se ha estabilizado después de que haya transcurrido un período predeterminado desde que se activó el regulador de estabilización. Por último, se proporciona un elemento de regulación para aumentar la alimentación de corriente reactiva más allá de un límite previsto para el funcionamiento normal si la comprobación mediante el detector muestra que la tensión no se ha estabilizado suficientemente. Es aconsejable que los elementos de la unidad de control estén estructuralmente interconectados. Los elementos también pueden estar separados entre sí.

55 El ejemplo más común de un regulador con respuesta a escalón ascendente es el llamado regulador I, donde la regulación se basa en un elemento integrado. El elemento integrador reacciona a un escalón constante con una variable de salida ascendente ilimitadamente. Por ejemplo, se puede lograr un efecto similar con un regulador P cuya ganancia aumenta con el tiempo. El regulador P responde con un escalón a un escalón constante. El regulador P responde con un salto a un salto constante. Con un regulador con una respuesta a escalón ascendente, la variable de salida sigue creciendo si continúa la desviación entre el valor nominal y el valor real. Por lo tanto, en la práctica, una variable fijada por un regulador con respuesta a escalón ascendente debe ser siempre limitada. En el caso de la planta

de generación de energía de acuerdo con la invención, este límite puede fijarse, por ejemplo, mediante un valor para el ángulo de fase  $\phi$  entre la corriente y la tensión que no debe ser superado. El regulador de estabilización de acuerdo con la invención sólo está activo después de un fallo en la red. En el funcionamiento normal, la tensión no está normalmente sujeto a un lazo de control cerrado. Si, en casos individuales, también en funcionamiento normal se ha previsto un lazo de control cerrado para la tensión, el regulador es un simple regulador P. Después de un fallo en la red, el regulador de estabilización de acuerdo con la invención puede estar previsto para el funcionamiento normal, ya sea adicional al o en lugar del regulador. Si se producen oscilaciones no deseadas en la red después de que se haya activado el regulador de estabilización, la proporción del regulador de estabilización en relación con la proporción del regulador para el funcionamiento normal puede disminuirse a fin de amortiguar la componente. También es posible reponer temporalmente el regulador de estabilización y cambiar al regulador para funcionamiento normal cuando la tensión ha subido por encima de un cierto límite. De esta manera se pueden evitar las sobretensiones. Si resulta que la tensión no está aún suficientemente estabilizada, se puede reactivar el regulador de estabilización.

A continuación, la invención se describe con referencia a los dibujos adjuntos, a modo de ejemplo de una forma de realización ventajosa. Muestran:

La figura 1, una red de distribución de electricidad con una planta de generación de energía de acuerdo con la invención;

la figura 2, una especificación de un generador para el comportamiento después de un fallo en la red;

la figura 3, una representación esquemática de un sistema de generación de electricidad de acuerdo con la invención;

la figura 4, una representación esquemática de un lazo de control con un regulador de estabilización de acuerdo con la invención; y

las figuras 5 a 7, diferentes formas de realización del procedimiento de acuerdo con la invención.

A una red de distribución de electricidad señalado en su totalidad con la referencia 10 está conectada una central eléctrica convencional 11, en la que la energía eléctrica se produce por medio de un generador síncrono SG. Una planta de generación de energía 14, que en este caso es una planta de energía eólica, también está conectada a la red de distribución de electricidad 10 y alimenta la energía eléctrica a la red de distribución de electricidad 10 a través de un convertidor. La red de distribución de electricidad 10 transmite la energía eléctrica a alta tensión a consumidores 12.

Entre dos puntos de conmutación 15, 16, la red de distribución de electricidad 10 se ramifica en un primer ramal 17 y un segundo ramal 18. Este diseño en forma de anillo de una red de distribución de electricidad es usual; asegura que dos puntos de conmutación no se separen completamente uno del otro a causa de la caída de una línea de conexión. Suponiendo que en el primer ramal 17 se produzca un cortocircuito en 13, el resultado será una caída total de tensión en toda la red de distribución de electricidad 10. El hueco de tensión se propaga en fracciones de segundo desde el defecto a tierra 13 hasta la central eléctrica convencional 11 y la planta de energía eólica 14.

Los puntos de conmutación 15, 16 están diseñados para determinar dentro de los 150 ms si el defecto a tierra ha ocurrido en el primer ramal 17 o en el segundo ramal 18 y para despejar el fallo desconectando el ramal en cuestión del resto de la red de distribución de electricidad 10. Una vez que la tensión durante el defecto a tierra ha caído a un valor de, por ejemplo, 15% de la tensión nominal, se elevará de nuevo muy rápidamente después de que el fallo haya sido despejado. Sin embargo, la tensión nominal no se restablece inmediatamente, sino un valor de, por ejemplo, el 80% de la tensión nominal. Durante el defecto a tierra es particularmente importante que la central eléctrica convencional 11 y la planta de energía eólica 14 no se desconecten de la red de distribución de electricidad. No pueden aportar mucho para sostener la tensión mientras el defecto a tierra esté presente. En la fase inmediatamente posterior al despeje del fallo, se decide si se produce un fallo total o si se logra estabilizar la red.

Estabilizar la red de distribución de electricidad 10 en esta fase no es fácil, porque una tensión disminuida en la red de alta tensión hace que la tensión caiga también en los consumidores. En los transformadores en los que la energía eléctrica de la red de alta tensión se transforma en baja para los consumidores, los cambiadores de tomas en carga están configurados de tal manera que cambian la relación de elevación de tensión respecto de la alta tensión si a los consumidores les llega una tensión demasiado baja. Es así que la red de alta tensión se ve sometida a un mayor efecto autoacumulativo que desestabiliza la red de distribución de electricidad.

La figura 2 muestra un ejemplo de los requisitos que los operadores de las redes de distribución de electricidad imponen a los generadores de alimentación para el comportamiento durante y después de un fallo de la red. La figura muestra en unidades relativas (p.u.) el desarrollo cronológico que puede tener la tensión aplicada sobre el eje y durante un fallo típico de la red. Desde la tensión nominal (1,0 p.u.), la tensión cae a una fracción del valor nominal después de la ocurrencia de un defecto a tierra. Después de despejarse el defecto a tierra, la tensión puede estar al 80% de la

tensión nominal (0.8 p.u.) durante 2 segundos, luego al 90% de la tensión nominal (0.9 p.u.) por 5 minutos, y después al 95% de la tensión nominal (0.95 p.u.). Los operadores de la red exigen que los generadores sólo desconecten los generadores de alimentación de la red si la tensión está por debajo de la curva que se muestra en la figura 2. Por lo tanto, los generadores de alimentación pueden desconectarse de la red si la tensión permanece por debajo del 90% de la tensión nominal durante más de 2 segundos después de que se haya declarado el fallo. Entre el 95% y el 104% de la tensión nominal, la planta de generación de energía debe permanecer permanentemente conectado a la red.

La figura 3 muestra esquemáticamente la estructura de una planta de energía eólica 14 de acuerdo con la invención. La energía cinética obtenida con un rotor 19 es convertida en energía eléctrica mediante un generador 20. La energía eléctrica se transmite a un transformador 22 a través de un convertidor 21. En el transformador 22, la energía eléctrica se transforma primero de baja tensión a media tensión para su posterior transporte. Si hay un hueco de tensión en la red de alta tensión, no mostrada en la figura 3, también baja la tensión en la red de media tensión, lo que se transmite a través del transformador 22 en el lado de baja tensión. En la planta de energía eólica 14 se ha previsto un sensor 23 que mide la tensión en la salida del convertidor 21 y transmite una correspondiente señal de tensión a un control del convertidor 24. Si se detecta un fallo en la red, es decir, un hueco de tensión de más del 10% en menos de 1 ms, se desencadena el procedimiento de acuerdo con la invención.

En la primera etapa del procedimiento de acuerdo con la invención, se activa un regulador de estabilización 25 mostrado en la figura 4. El regulador de estabilización 25 forma parte de un lazo de control cerrado en el que, como se indica en 26, se devuelve una señal respecto de la tensión de la energía eléctrica alimentada. Aquí se retorna una señal respecto de la baja tensión en la salida del convertidor 21; la invención también incluye el retorno de una señal respecto de la media tensión o alta tensión. La señal de tensión retornada se compara en 27 con la tensión nominal como variable de referencia y la diferencia alimenta el regulador de estabilización 25 como variable de entrada. El regulador de estabilización 25 es un controlador I cuya respuesta a escalón aumenta con el tiempo, es decir que su variable de salida aumenta si la diferencia entre la señal de tensión retornada y la variable de referencia persiste durante un período. La variable de salida también aumenta si la diferencia en sí misma como variable de entrada no aumenta. La respuesta a escalón del regulador de estabilización 25 se indica en el símbolo gráfico de contacto del circuito en la figura 4. La variable de salida del regulador de estabilización 25 se alimenta al control del convertidor 24 que, en función de la variable de salida, influye en la tensión y, en particular, aumenta la componente reactiva para sostener la tensión.

El curso del procedimiento de acuerdo con la invención se muestra en total esquemáticamente en la figura 5. Después de que la planta de energía eólica se ha puesto en marcha en 100, en 120 se comprueba constantemente si hay un fallo en la red. Si se detecta un fallo en la red, el regulador de estabilización 25 se activa en 140. Mientras que el control de estabilización 25 está activo, en 160 de nuevo se comprueba constantemente si la tensión se ha estabilizado suficientemente. Se asume una tensión suficientemente estabilizada si la tensión es superior al 95% de la tensión nominal durante un período de más de 5 segundos. Otro criterio para una tensión suficientemente estabilizada podría ser que durante al menos 5 segundos la tensión sea más alta que el límite inferior de la banda de tensión en la red de alta tensión. Si se mide la alta tensión o si se conoce la media tensión y el escalonamiento del transformador con tomas, esta tensión también puede ser calculada si se dispone de una medición de la corriente.

Cuando la tensión se ha estabilizado, el procedimiento de acuerdo con la invención se termina en 180 y la planta de energía eólica 14 vuelve a su estado de funcionamiento normal. Si la tensión no se estabiliza suficientemente en un plazo de 2 a 10 segundos después de la activación del regulador de estabilización 25, la segunda etapa del procedimiento de acuerdo con la invención se activa en 200. En la segunda etapa, en este ejemplo de realización, la tensión nominal se incrementa en un 5% en comparación con el valor nominal actual, por ejemplo, de 100% a 105%. La planta de energía eólica 14 puede así alimentar una corriente reactiva adicional sin tener que reducir la corriente activa. El regulador de estabilización 25 sigue activo y ahora regula la tensión al nuevo punto nominal. En 210 se comprueba de nuevo si la segunda etapa del procedimiento de acuerdo con la invención conduce a una estabilización suficiente de la tensión. Si este es el caso, el procedimiento de acuerdo con la invención se termina en 180 y la planta de energía eólica 14 se transfiere al estado de funcionamiento normal. La planta de energía eólica 14 sólo puede soportar el aumento de carga causado por el aumento de la tensión nominal durante un período de 2 minutos. Después de los 2 minutos, el procedimiento de acuerdo con la invención se termina en 220, incluso si la tensión todavía no se haya estabilizado.

De acuerdo con la figura 6, el procedimiento de acuerdo con la invención también puede llevarse a cabo de forma alternativa. Una vez más, tras el inicio del procedimiento se realiza en 120 una comprobación continua para determinar si hay un fallo en la red y, si es necesario, se activa en 140 el regulador de estabilización 25. Simultáneamente, se desactiva un regulador P que antes era responsable de la regulación de la tensión. Si la tensión real es inferior a la tensión nominal, el regulador de estabilización 25 recibe la diferencia correspondiente como variable de entrada. La variable de salida aumenta si la diferencia permanece durante un período. El convertidor 21 convierte una variable de salida creciente del regulador de estabilización 25 en el caso de una componente reactiva creciente. Mientras que la

- variable de salida del regulador de estabilización 25 puede, teóricamente, aumentar mucho; la capacidad del convertidor para aumentar la componente reactiva es limitada. En el ejemplo de realización, el límite para la componente reactiva se establece por el hecho de que el ángulo de fase  $\phi$  entre la corriente y la tensión no debe exceder de  $18^\circ$ . Si la tensión real es próxima al 80% de la tensión nominal, esta diferencia hace que el límite de  $\phi = 18^\circ$  se alcance en menos de un segundo.
- 5 Si resulta que debido a la componente reactiva aumentada en 160 se ha logrado estabilizar la tensión, el regulador de estabilización 25 se desactiva de nuevo en 170, por lo que el proceso de desactivación tiene lugar durante un período de 10 segundos. Al desactivar el regulador de estabilización 25 durante un período extenso, se reduce el riesgo de oscilaciones en la red de distribución de electricidad 10.
- 10 Si la primera etapa no alcanza para estabilizar la red de distribución de electricidad 10, la segunda etapa del procedimiento de acuerdo con la invención se inicia en 200 eliminando el límite de  $\phi = 18^\circ$ . Esto hace que la alimentación de la corriente reactiva tenga prioridad sobre la alimentación de la corriente activa. El convertidor 21 puede ahora llegar hasta  $\phi = 90^\circ$  con el correspondiente valor de salida del regulador de estabilización 25, de modo que sólo se alimenta la corriente reactiva y no la corriente activa. Si esta medida reduce la potencia activa alimentada, el ángulo de pala aumenta si no se puede evitar por otros medios un aumento de la velocidad del generador. Si la comprobación en 210 muestra que la tensión se ha estabilizado con éxito, la planta de energía eólica se vuelve a poner en funcionamiento normal en 170 durante un período de 30 segundos. Si no se logra estabilizar la tensión en el lapso de 5 minutos, la planta de energía eólica se apaga en 215 si es necesario.
- 15 Con el procedimiento alternativo que se muestra en la figura 7, el procedimiento de acuerdo con la invención incluye tres etapas. Primero, en 140 se activa el regulador de estabilización 25 y en 160 se comprueba si esta medida conduce al éxito en el tiempo especificado. Si no es así, en 200 se inicia una segunda etapa del procedimiento de acuerdo con la invención y se aumenta el valor nominal de la tensión. Si esto también falla dentro de 2 a 10 segundos, se reduce de nuevo el valor nominal al valor normal en varios escalones dentro de los 10 segundos. A continuación, en 212 se inicia la tercera etapa del procedimiento de acuerdo con la invención y se aumenta el límite del ángulo de fase  $\phi$  de  $18^\circ$  a  $70^\circ$ . Con un ángulo de fase de  $\phi = 70^\circ$ , la planta de energía eólica 14 alimenta la mayor parte de la corriente reactiva y sólo una pequeña parte de la corriente activa. Una vez eliminado el límite de  $\phi = 18^\circ$ , el ángulo de fase no se incrementa de una sola vez, sino de forma continua para que el riesgo de vibraciones se mantenga bajo. Paralelamente al aumento del ángulo de fase  $\phi$ , el ángulo de ataque de las palas del rotor se cambia para evitar que aumente la velocidad del rotor. O sea, en esta forma de realización, la reacción se gradúa en tres pasos para reducir las consecuencias de un fallo en la red.
- 20
- 25
- 30



**REIVINDICACIONES**

- 5 1. Procedimiento para estabilizar una red de distribución de electricidad (10) después de despejar un fallo en la que la red de distribución de electricidad (10) está conectada a una planta de generación de energía (14), en particular una planta de energía eólica, que a través de un convertidor (21) alimenta energía eléctrica a la red de distribución de electricidad (10), mediante los pasos siguientes:
- a. detectar el fallo en la red de distribución de electricidad (10);
- 10 b. activar un regulador de estabilización (25) en la planta de generación de energía (14) después de la detección de acuerdo con el paso a., en donde una respuesta a escalón del controlador (25) aumenta con el tiempo y en donde el regulador de tensión (25) regula la tensión de la energía eléctrica alimentada, en función de una señal de tensión (26) retornada;
- c. verificar si la tensión se ha estabilizado de acuerdo con el paso b. después de que haya transcurrido un período predeterminado desde que se activó el regulador de estabilización (25); y
- d. aumentar la alimentación de corriente reactiva por encima de un límite previsto para el funcionamiento normal si resulta que la verificación de acuerdo con el paso c. indica que la tensión aún no se ha estabilizado.
- 15 2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por que en el paso d., la alimentación de corriente reactiva aumenta así por encima del límite previsto para el funcionamiento normal, que aumenta el valor nominal para la tensión.
3. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por que en el paso d., la alimentación de corriente reactiva aumenta así por encima del límite previsto para el funcionamiento normal, que se da prioridad a la alimentación de corriente reactiva respecto
- 20 4. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 3, caracterizado por que se elimina el límite superior para el ángulo de fase  $\phi$  entre corriente y tensión.
5. Procedimiento de acuerdo con las reivindicaciones 3 o 4, caracterizado por que la planta de generación de energía (14) es una planta de energía eólica con una pluralidad de palas de rotor y por que paralelamente a la reducción de la potencia activa se cambia el ángulo de ataque de las palas de rotor.
- 25 6. Procedimiento para estabilizar una red de distribución de electricidad (10) después de despejar un fallo en la que la red de distribución de electricidad (10) está conectada a una planta de generación de energía (14), en particular una planta de energía eólica, que a través de un convertidor (21) alimenta energía eléctrica a la red de distribución de electricidad (10), mediante los pasos siguientes:
- 30 a. detectar el fallo en la red de distribución de electricidad (10);
- b. activar un regulador de estabilización (25) en la planta de generación de energía (14) después de la detección de acuerdo con el paso a., en donde una respuesta a escalón del controlador (25) aumenta con el tiempo y en donde el regulador de tensión (25) regula la tensión de la energía eléctrica alimentada, en función de una señal de tensión (26) retornada;
- 35 c. verificar si la tensión se ha estabilizado de acuerdo con el paso b. después de que haya transcurrido un primer período predeterminado desde que se activó el regulador de estabilización (25); y
- d. aumentar el valor nominal de la tensión en el caso que la tensión aún no se ha estabilizado en el paso c;
- e. verificar si la tensión se ha estabilizado después de transcurrido un segundo periodo predeterminado desde el aumento del valor nominal;
- 40 f. aumentar un límite superior para el ángulo de fase  $\phi$  entre corriente y tensión en el caso en que en el paso e. la tensión aún no está estabilizada.
7. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 6, caracterizado por que se desactiva el regulador de tensión (25) cuando el valor real de la tensión supera un umbral predeterminado.
- 45 8. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizado por que el regulador de estabilización (25) usa la tensión del lado de alta tensión como variable de referencia.

9. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 8, caracterizado por que el regulador de estabilización (25) usa como valor nominal la tensión existente en el lado de alta tensión antes del fallo o bien el límite inferior correspondiente de la banda de tensión
- 5 10. Planta de generación de energía que a través de un convertidor (21) alimenta energía eléctrica a la red de distribución de electricidad (10), con una unidad de control (24), caracterizada por que:
- a. se ha previsto un regulador de estabilización (25);
- i. cuya respuesta a escalón aumenta con el tiempo; y
- ii. está diseñada para regular la tensión de la energía eléctrica alimentada, en función de una señal de tensión (26) retornada;
- 10 b. la unidad de control (24) presenta las características siguientes:
- i. un módulo de activación que activa el regulador de estabilización (25) después de un fallo en la red;
- ii. un detector (23) para verificar si la tensión se ha estabilizado después de transcurrido un periodo desde la activación del regulador de estabilización (25); y
- 15 iii. un elemento de regulación para aumentar la alimentación de corriente reactiva más allá de un límite previsto para el funcionamiento normal en el caso de que después de verificar mediante el detector que la tensión no se ha estabilizado lo suficiente.
11. Planta de generación de energía de acuerdo con la reivindicación 10, caracterizada por que el regulador de estabilización (25) es un regulador I.
- 20 12. Planta de generación de energía de acuerdo con la reivindicación 10, caracterizada por que el regulador de estabilización (25) es un regulador P con ganancia en función del tiempo.
13. Planta de generación de energía de acuerdo con una de las reivindicaciones 10 a 12, caracterizada por que el regulador de estabilización (25) está diseñado para que actúe exclusivamente para el aumento de tensión.
14. Planta de generación de energía de acuerdo con una de las reivindicaciones 10 a 13, caracterizado por que está diseñada para llevar a cabo el procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 2 a 9.

25

Fig. 1

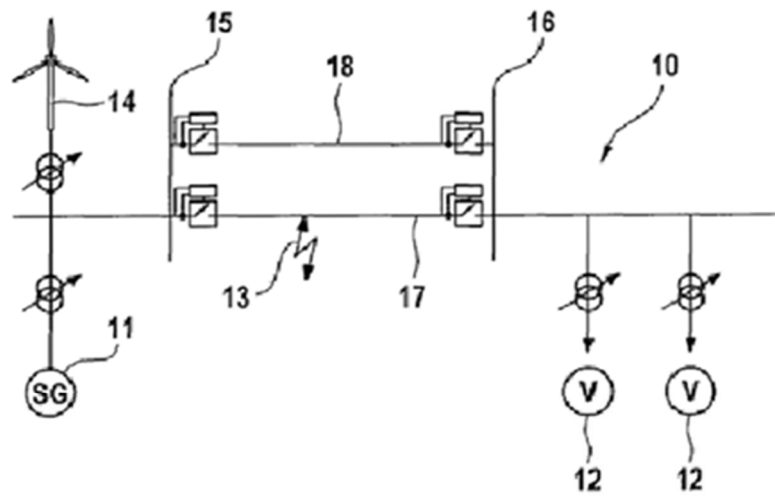


Fig. 2

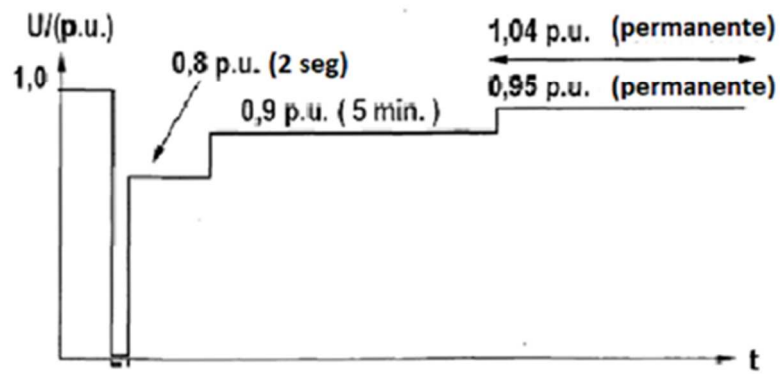


Fig. 3

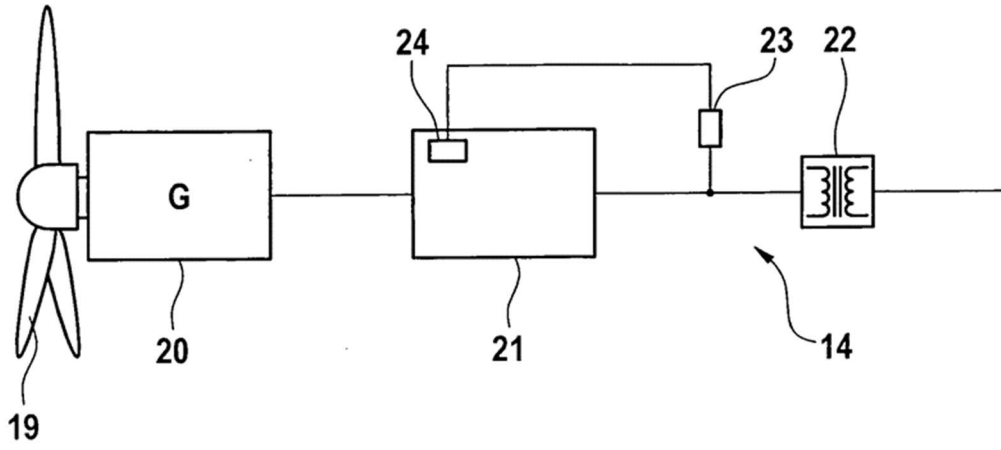
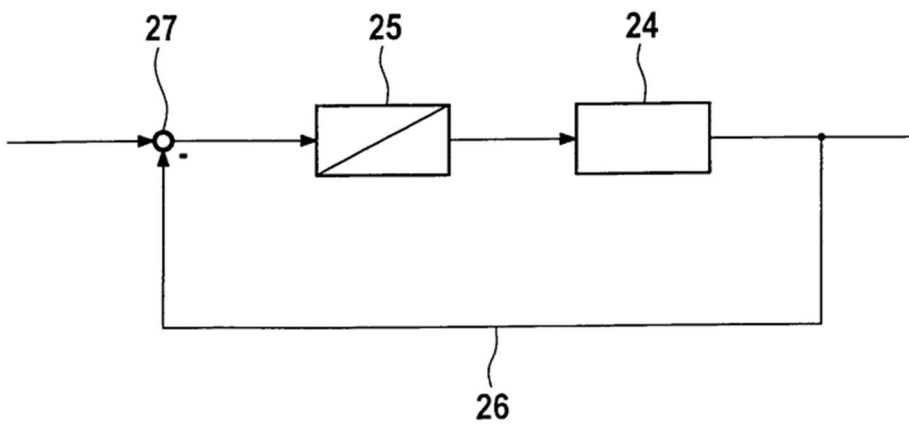
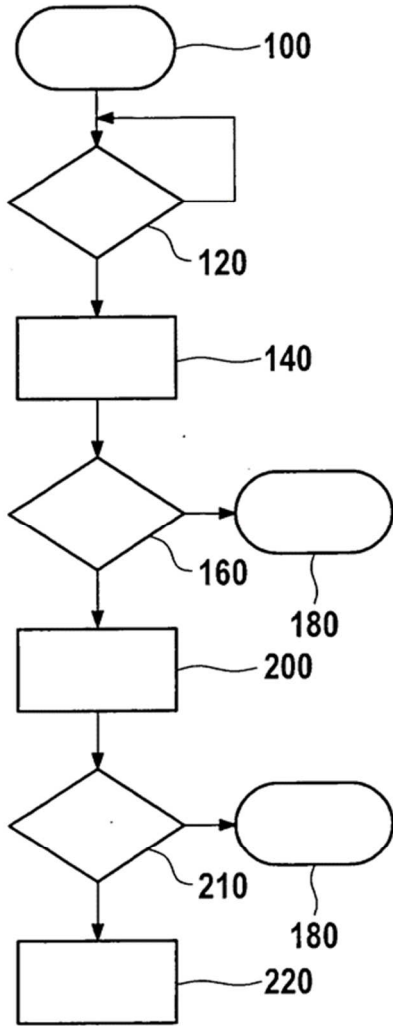


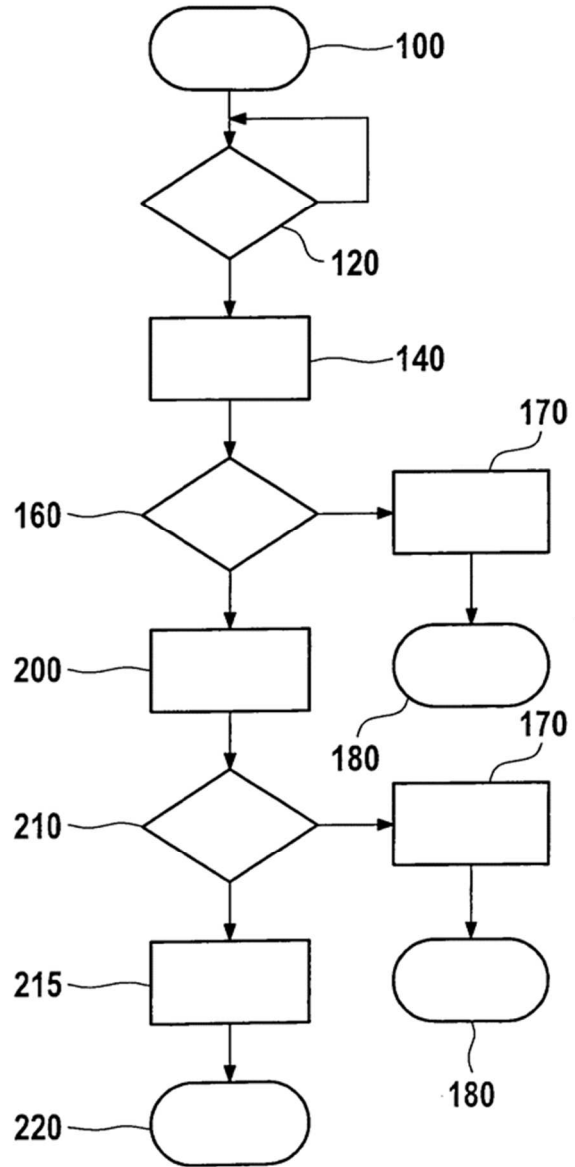
Fig. 4



**Fig. 5**



**Fig. 6**



**Fig. 7**

