

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 637 271**

51 Int. Cl.:

G01R 31/42 (2006.01)

G01R 19/25 (2006.01)

G01R 31/34 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **09.09.2014 PCT/EP2014/069182**

87 Fecha y número de publicación internacional: **26.03.2015 WO15039925**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **09.09.2014 E 14766425 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.05.2017 EP 3047291**

54 Título: **Procedimiento y conjunto para la determinación de las características eléctricas de un aerogenerador**

30 Prioridad:

17.09.2013 DE 102013218645

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

11.10.2017

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

LETAS, HEINZ-HERMANN

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 637 271 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 conjunto para la determinación de las características eléctricas de un aerogenerador

La invención se refiere a un procedimiento para la determinación de las características eléctricas de un aerogenerador. El aerogenerador se diseña para introducir, a través de un circuito de potencia, energía eléctrica en una red de conexión. La invención se refiere además a un conjunto correspondiente.

Cuando los aerogeneradores introducen corriente eléctrica en una red de conexión, esta operación no siempre se produce con una tensión sinusoidal ideal. Con el funcionamiento del generador o del convertidor se pueden producir oscilaciones armónicas que difieren de la frecuencia básica de la red de conexión y que se superponen a la oscilación fundamental. Estas oscilaciones armónicas no se desean dado que pueden influir negativamente en la estabilidad de la red de conexión, véase EP 1 224 721 B1, Badrzadeh et. al., Power System Harmonic Analysis in Wind Power Plants, ISBN 978-1-4673-0332-3.

Un valor característico de corriente eléctrica del aerogenerador que representa las oscilaciones armónicas producidas por el aerogenerador interesa bajo varios puntos de vista. Los operadores de las redes determinan valores límite para las oscilaciones armónicas que los aerogeneradores no pueden rebasar cuando introducen energía eléctrica en la red de conexión. Por medio del valor característico de corriente se puede comprobar si el aerogenerador cumple los valores límite de oscilaciones armónicas. Un valor característico de corriente de este tipo se puede considerar además en el diseño de aerogeneradores o parques eólicos, concibiendo el aerogenerador o el parque eólico de manera que el porcentaje de oscilaciones armónicas no deseadas sea el menor posible.

Cuando un aerogenerador introduce energía eléctrica en la red de conexión es posible llevar a cabo una medición de la corriente eléctrica y determinar en qué medida contiene oscilaciones armónicas. Sin embargo, no es posible que de una medición como ésta se saquen conclusiones directas acerca de las características eléctricas del aerogenerador, puesto que existe una interacción entre la red de conexión y el aerogenerador. Si se comprueba a través de la medición que existen oscilaciones armónicas, no se puede determinar si son causadas por la red de conexión o por el aerogenerador.

En Morales et. al., "Assessment of Wind Power Quality: Implementation of IEC61400-21 Procedures" (disponible en: http://www.icrepq.com/full-paper-icrep/333_MORALES.pdf) se describe un procedimiento para la comprobación de la calidad de la potencia introducida que coincide con la norma IEC 61400-21.

La invención tiene por objeto presentar un procedimiento y un conjunto por medio de los cuales se pueda determinar en qué medida un aerogenerador produce oscilaciones armónicas. Partiendo del estado de la técnica antes indicado, la tarea se resuelve con las características de las reivindicaciones independientes. Otras formas de realización ventajosas se encuentran en las reivindicaciones dependientes.

En el procedimiento se realiza una medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia cuando el aerogenerador se encuentra en un estado activo en el que introduce corriente eléctrica en la red de conexión a través del circuito de potencia. En el procedimiento se realiza además una medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia cuando el aerogenerador se encuentra en un estado pasivo en el que no introduce corriente eléctrica en la red de conexión. Carece de importancia si la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia se lleva a cabo antes o después de la medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia.

A partir de la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia y una impedancia compleja dependiente de la frecuencia del circuito de potencia del aerogenerador se determina un valor de precarga de la red. Un valor característico de corriente del aerogenerador se determina como diferencia a partir de la medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia y del valor de precarga de la red.

En primer lugar se van a explicar algunos términos. Una medición de corriente o una medición de tensión es compleja dependiente de la frecuencia cuando el valor de medición contiene una información tanto sobre la amplitud como sobre la fase del valor medido. De manera correspondiente se habla de una impedancia compleja dependiente de la frecuencia cuando ésta se conoce en cuanto a cuantía y fase.

El término de circuito de potencia define los componentes eléctricos que conducen la corriente eléctrica producida por el aerogenerador a la red de conexión. Entre ellos cuentan, por ejemplo, el generador y el convertidor. En el marco de la invención sólo se consideran como pertenecientes al circuito de potencia los componentes eléctricos dispuestos entre el punto de medición de la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia y el árbol del rotor.

La invención se basa en las siguientes ideas. Con la medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia se registran las oscilaciones armónicas existentes en el punto de medición, siendo sin embargo imposible diferenciar entre el porcentaje causado por el aerogenerador y el porcentaje procedente de la red de conexión. Por esta razón se determina el valor de precarga de la red que corresponde al porcentaje causado por la red de conexión. Calculando la diferencia entre el valor total conocido por la medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia y el valor de precarga de la red, se obtiene el valor característico de corriente según la invención representativo del porcentaje de oscilaciones armónicas producidas por el aerogenerador.

El valor de precarga de la red no accesible mediante una medición directa se determina en el procedimiento según la invención por una vía indirecta. Para la determinación indirecta se emplean, por una parte, la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia y, por otra parte, la impedancia compleja dependiente de la frecuencia del circuito de potencia. De la medición de la tensión resulta cuáles son las oscilaciones armónicas de la red de conexión. Si se conoce la impedancia compleja dependiente de la frecuencia del circuito de potencia se pueden calcular las corrientes de oscilaciones armónicas que las oscilaciones armónicas de la red de conexión transmiten al circuito de potencia.

En el procedimiento según la invención la impedancia compleja dependiente de la frecuencia del circuito de potencia se da por conocida. La determinación de la impedancia compleja dependiente de la frecuencia del circuito de potencia es posible gracias a las características eléctricas conocidas de los componentes del circuito de potencia. Si se conocen, por ejemplo, las características eléctricas del generador y del convertidor, se puede calcular la impedancia compleja dependiente de la frecuencia del respectivo componente. Al juntar la impedancia compleja dependiente de la frecuencia de varios componentes, se obtiene la impedancia compleja dependiente de la frecuencia del circuito de potencia. El valor característico de corriente determinado según la invención del aerogenerador comprende una información sobre el porcentaje de oscilaciones armónicas producidas por el aerogenerador. Por lo tanto, el valor característico de corriente se puede asignar al aerogenerador como parámetro. El valor característico de corriente determinado según la invención se puede utilizar para distintos fines. Por medio del valor característico de corriente se puede comprobar, por ejemplo, si el aerogenerador cumple las condiciones del operador de red. También es posible emplear el valor característico de corriente para optimizar el aerogenerador. Los parámetros del convertidor o de un filtro se pueden variar, por ejemplo, de manera que se generen menos oscilaciones armónicas. Además es posible optimizar el funcionamiento de un parque eólico por medio del valor característico de corriente determinado. En un parque eólico se pueden unir, por ejemplo, varios aerogeneradores de modo que determinadas oscilaciones armónicas sean de fases opuestas, o sea, que se compensen mutuamente.

Para facilitar los cálculos necesarios para la determinación del valor característico de corriente según la invención resulta ventajoso que la medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia y la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia se realicen en el mismo punto de medición. Se habla del mismo punto de medición si los puntos de medición de la medición de corriente y de la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia se eligen de manera que entre ambos no exista ninguna diferencia de potencial importante. Esto significa en especial que entre el punto de medición de la medición de corriente y el punto de medición de la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia no se encuentran componentes del circuito de potencia.

En cualquier caso no se puede excluir que para la medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia y para la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia se empleen puntos de medición diferentes. La corriente eléctrica producida por el aerogenerador se conduce normalmente por un transformador mediante el cual la tensión se transforma de un valor más bajo (tensión baja) a un valor más alto (tensión media). Sería por ejemplo posible realizar la medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia por el lado de baja tensión del transformador y la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia por el lado de tensión media del transformador y viceversa. La consecuencia es que el valor de precarga de la red y la corriente total se determinan para distintos puntos, por lo que la diferencia directa es poco representativa. Para obtener un valor característico de corriente representativo es preciso que una de las dos mediciones se traslade matemáticamente al punto en el que se haya realizado la otra medición, con lo que se obtiene un valor comparable al que se hubiera obtenido realizando la medición directamente allí. En el ejemplo arriba indicado esto significaría aplicar la función de transmisión del transformador para la medición en cuestión.

Si durante el funcionamiento normal el rotor del aerogenerador se para, el generador ciertamente ya no produce ninguna corriente eléctrica que se podría introducir en la red a través del circuito de potencia, pero el circuito de potencia todavía puede estar conectado eléctricamente a la red de conexión. Las impedancias del circuito de potencia presentan todavía una interacción con la red de conexión, lo que puede falsear la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia. Con preferencia, el aerogenerador se conduce por este motivo a un estado en el que el circuito de potencia se encuentra eléctricamente separado de la red de conexión, antes de realizar la compleja medición de tensión. Por separación eléctrica se entiende que no se pueden transmitir señales de la red de conexión al circuito de potencia. Se puede prever que para la separación eléctrica se abra un seccionador. El punto de medición para la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia se elige de modo que el punto de separación se encuentre entre el circuito de potencia y el punto de medición. De esta forma la tensión de la red de conexión se mide de manera auténtica. Un seccionador de este tipo es especialmente recomendable para instalaciones DFIG con máquina asincrónica de alimentación doble en las que existe una conexión eléctrica directa entre el transformador y el generador. Los así llamados aerogeneradores inversores, en los que toda la energía eléctrica producida con el generador pasa por el convertidor, se pueden diseñar de manera que la separación eléctrica se produzca con la parada del rotor incluso sin un seccionador adicional.

La impedancia compleja dependiente de la frecuencia se refiere al circuito de potencia que la red "ve". Se trata, por lo tanto, de los componentes eléctricos dispuestos entre el punto de medición de la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia y el árbol de rotor. El generador y el convertidor siempre forman parte de los mismos. Se pueden disponer otros componentes eléctricos, por ejemplo filtros. La inclusión del transformador en la impedancia compleja dependiente de la frecuencia depende de si el punto de medición de la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia se ha dispuesto por el lado de tensión baja o por el lado de tensión media del

transformador. En una medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia por el lado de tensión baja el transformador no forma parte del circuito de potencia que la red de conexión ve, y la impedancia compleja dependiente de la frecuencia del transformador no se tiene en cuenta. En una medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia por el lado de tensión media la red de conexión ve el transformador y la impedancia compleja dependiente de la frecuencia del transformador se tiene que tener en cuenta.

Si la impedancia compleja dependiente de la frecuencia del circuito de potencia se determina matemáticamente, se producen en la impedancia compleja dependiente de la frecuencia normalmente polos y ceros. Si en el cálculo del valor de precarga de la red la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia se divide entre la impedancia compleja dependiente de la frecuencia, se obtienen matemáticamente corrientes muy altas que en realidad no se producen. Un resultado realista se consigue eliminando antes del cálculo del valor de precarga de la red los ceros de la impedancia compleja dependiente de la frecuencia. Para ello se puede fijar un valor umbral apropiado y equiparar el valor de la impedancia a este valor umbral en todos los casos en los que el valor calculado sería más pequeño.

Por medio del convertidor se puede variar el ángulo de fase entre la corriente y la tensión. En principio, el procedimiento se puede realizar con diferentes ángulos de fase entre corriente y tensión. Sin embargo, para excluir efectos perturbadores y para facilitar el cálculo es ventajoso que para la medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia la frecuencia básica de la corriente y la frecuencia básica de la tensión estén en fase. Para el ángulo de fase φ se considera $\varphi = 0$ o $\cos \varphi = 1$.

En el valor característico de corriente entra una información falseada si durante la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia se producen otras oscilaciones armónicas en la red de conexión que durante la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia. Por consiguiente conviene prestar atención a que el estado de la medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia y de la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia sea en lo posible el mismo. La inseguridad se puede reducir realizando la medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia y la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia respectivamente en una pluralidad de períodos de medición, alternando entre los períodos de medición las mediciones de corriente y las mediciones de tensión. Si los resultados de las mediciones en los distintos períodos de medición difieren claramente de la medida, estos períodos de medición se pueden eliminar y no se tienen en cuenta.

La medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia y la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia se registran normalmente como serie de tiempo en la que el valor (amplitud) de corriente y tensión se indica a través del tiempo. Una serie de tiempo de este tipo contiene respectivamente la información sobre la frecuencia, la amplitud y la fase de la oscilación, por lo que se trata de una medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia y de una medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia en el sentido de la invención. Para los cálculos posteriores conviene que la medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia y la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia se transformen de la representación de tiempo en una representación de frecuencia. En la representación de frecuencia se indican la amplitud y la fase sobre la frecuencia. La medición compleja dependiente de la frecuencia se puede ilustrar, por ejemplo, en forma de dos diagramas, mostrando uno de los diagramas la amplitud sobre la frecuencia y el otro diagrama el ángulo de fase sobre la frecuencia. En otra forma de representación se asignaría a cada frecuencia un indicador en el plano complejo. Esta representación corresponde a una sola fase del sistema de corriente trifásica. Otras representaciones se pueden realizar para las demás fases del sistema de corriente trifásica, siendo posible que los valores difieran unos de otros.

Si en la representación de la frecuencia se indica también la impedancia compleja dependiente de la frecuencia determinada por cálculo a partir de las características eléctricas conocidas del circuito de potencia, los pasos de cálculo necesarios se pueden llevar a cabo fácilmente. Para la determinación del valor de precarga de la red la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia se divide entre la impedancia compleja dependiente de la frecuencia. A continuación se resta el valor de precarga de la red de la medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia.

Dado que por regla general una transformación entre la representación de tiempo y la representación de frecuencia se puede realizar generalmente sin pérdida de información, sería también posible realizar todos los cálculos en la representación de tiempo y prescindir de la transformación en la representación de frecuencia. No obstante, la impedancia compleja dependiente de la frecuencia se puede determinar con mayor facilidad en la representación de frecuencia, por lo que el camino a través de la representación de frecuencia suele conducir más rápidamente al destino.

Al realizar el cálculo según la invención de esta manera, se obtiene un valor característico de corriente que contiene información sobre el valor y la fase de la corriente introducida. Puesto que los porcentajes de corriente causados por la red de conexión se han eliminado mediante el valor de precarga de la red de la corriente total, el mismo sólo se refiere a los porcentajes de corriente producidos por el propio aerogenerador. Si el valor característico de corriente se encuentra en la representación de frecuencia, se puede ver para cada frecuencia cuál es la amplitud de la corriente introducida y cuál es la posición de fase en relación con la oscilación fundamental.

En especial, el valor característico de corriente contiene normalmente una información sobre las oscilaciones armónicas de la oscilación fundamental cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia básica. Entre las

oscilaciones armónicas cuentan especialmente las oscilaciones armónicas típicas de generador en los generadores asincrónicos de alimentación doble, que con referencia a la oscilación fundamental son de fase sincronizada. El valor característico de corriente contiene además normalmente información sobre las así llamadas oscilaciones interarmónicas cuyas frecuencias no forman ningún múltiplo entero de la frecuencia básica y que en relación con la frecuencia básica no son de fase sincronizada. Las oscilaciones armónicas típicas de generador adquieren con vistas a la estabilidad de la red de conexión una importancia especial, dado que se pueden propagar ampliamente por la red de conexión junto con la frecuencia básica. Las oscilaciones armónicas de fase no sincronizada resultan menos críticas, dado que decrecen más rápidamente en la red de conexión.

El valor característico de corriente determinado según la invención puede ser útil en varios aspectos. En primer lugar es posible asignar al aerogenerador un parámetro que contiene parcial o totalmente la información obtenida del valor característico de corriente. No es necesario que la información del valor característico de corriente se utilice por completo para cada aplicación. Para una comprobación de la compatibilidad del aerogenerador con los requisitos del operador de la red interesa en primera lugar la amplitud de la oscilación armónica, mientras que la posición de fase tiene menos importancia. Para esta aplicación basta, por lo tanto, con un parámetro que contenga únicamente una información sobre la amplitud.

En otro caso de aplicación el valor característico de corriente puede servir para optimizar el funcionamiento del aerogenerador. Se pueden cambiar, por ejemplo, los parámetros de funcionamiento de un componente del circuito de potencia de modo que se reduzca el porcentaje de determinadas oscilaciones armónicas en la corriente introducida. Alternativamente los parámetros de servicio se pueden variar de forma que se desplace la fase de determinadas oscilaciones armónicas, con lo que se oponen a las oscilaciones armónicas ya existentes en la red de conexión. Las oscilaciones armónicas se neutralizan, reduciéndose en conjunto el porcentaje de oscilaciones armónicas en la red de conexión. Para este fin resulta de ayuda que el procedimiento según la invención se realice no sólo una vez, sino varias veces. Durante el funcionamiento del aerogenerador se puede realizar, por ejemplo, en intervalos regulares, una medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia y, en fases de parada del aerogenerador, mediciones de tensión compleja dependiente de la frecuencia. Así el aerogenerador puede reaccionar de manera apropiada en caso de que las características de la red de conexión cambien, por ejemplo a causa de la conexión de otros aerogeneradores adicionales a la red de conexión.

Una tercera posibilidad podría consistir en la consideración del valor característico de corriente en el diseño de un parque eólico. En la construcción de un parque eólico se podrían disponer, por ejemplo, varios aerogeneradores a una distancia entre sí de manera que las oscilaciones armónicas se neutralicen, al menos en parte, unas a otras. El objeto de este procedimiento es, como mínimo, dos aerogeneradores, preferiblemente más de dos aerogeneradores. La posibilidad de que las oscilaciones armónicas se neutralicen mutuamente a una distancia adecuada de los aerogeneradores entre sí existe principalmente en caso de oscilaciones armónicas de fase no sincronizada, cuya fase se desplaza en la red de conexión respecto a la oscilación fundamental. En las oscilaciones armónicas de fase sincronizada, cuya posición de fase respecto a la oscilación fundamental es constante, esta posibilidad se da menos. Alternativa o adicionalmente se puede prever, para la neutralización mutua de las oscilaciones armónicas, un transformador giratorio concebido para el desplazamiento específico de la posición de fase de determinadas oscilaciones armónicas.

La invención se refiere además a un conjunto para la determinación de las características eléctricas de un aerogenerador. El conjunto comprende un aerogenerador diseñado para introducir corriente eléctrica en una red de conexión a través de un circuito de potencia. El conjunto comprende además un sensor de corriente para la realización de una medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia en un estado activo del aerogenerador, en el que el aerogenerador introduce corriente eléctrica en la red de conexión a través del circuito de potencia, y un sensor de tensión en un estado pasivo del aerogenerador en el que el aerogenerador no introduce corriente eléctrica en la red de conexión a través del circuito de potencia. El conjunto comprende también un módulo de cálculo concebido para determinar a partir de la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia y de la impedancia compleja dependiente de la frecuencia del circuito de potencia del aerogenerador un valor de precarga de la red, así como para determinar a partir de la diferencia entre la medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia y el valor de precarga de la red un valor característico de corriente del aerogenerador. El conjunto se puede perfeccionar con otras características que se describen en relación con el procedimiento según la invención.

La invención se describe a continuación a modo de ejemplo con referencia a los dibujos adjuntos y por medio de una forma de realización ventajosa. Se ve en la

Figura 1 una representación esquemática de un parque eólico en el que se puede llevar a cabo el procedimiento según la invención;

Figura 2 una medición de corriente en representación de tiempo;

Figura 3 una medición de corriente en representación de frecuencia;

Figura 4 una representación esquemática de un aerogenerador;

Figura 5 una representación de la impedancia compleja dependiente de la frecuencia de un circuito de potencia;

Figura 6 un conjunto según la invención;

Figuran 7 una sección de un parque eólico diseñado según la invención.

En un parque eólico según la figura 1 se conectan una pluralidad de aerogeneradores 14, 15 a una red de conexión 16 interna del parque eólico. En la red de conexión 16 se registra una tensión medida de, por ejemplo, 20 kV. Antes de la transmisión a una red de transmisión pública 17 la tensión se transforma con un transformador 18 en alta tensión de, por ejemplo, 380 kV. A la red de transmisión 17 se conecta una pluralidad de consumidores 20 que en la figura 1 sólo se indican esquemáticamente.

Al medir la corriente eléctrica introducida, por ejemplo, por el aerogenerador 14 en la red de conexión 16, se pueden indicar los valores de medición de corriente a lo largo del tiempo. Un ejemplo sencillo de un resultado de una medición de este tipo se representa en la figura 2. La curva real de los valores de medición de corriente según la figura 2A consiste en una superposición de una oscilación fundamental (Fig. 2B) y una oscilación armónica (Fig. 2C). La frecuencia básica corresponde a la frecuencia de la tensión en la red de conexión y puede ser, por ejemplo, de 50 Hz. La oscilación armónica mostrada en la Fig. 2C tiene una frecuencia de 200 Hz, lo que permite una buena ilustración de la superposición. En la práctica la quintuple oscilación armónica (250 Hz) y la séptuple oscilación armónica (350 Hz) tienen una relevancia mayor que la cuádruple oscilación armónica (200 Hz). La frecuencia de la oscilación armónica es un múltiplo entero de la frecuencia básica, se trata por lo tanto de una oscilación armónica de fase sincronizada respecto a la oscilación fundamental. El pasaje por cero de la oscilación fundamental coincide con el pasaje por cero de la oscilación armónica, por lo que las dos oscilaciones están en fase con un ángulo de fase de $\varphi = 0$. Dado que el resultado de medición contiene información tanto sobre el valor de la oscilación armónica como sobre la fase de la oscilación armónica respecto a la oscilación fundamental, se trata de una medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia en el sentido de la invención.

En el ejemplo ilustrativo simplificado de la figura 2A la curva consiste en una simple superposición de la oscilación fundamental y una única oscilación armónica de frecuencia cuádruple. En una medición real se superpondría a la oscilación fundamental una pluralidad de oscilaciones armónicas e interarmónicas cuya amplitud sería siempre mucho más pequeña que la que se representa en la figura 2C.

Si en una medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia del aerogenerador 14 se obtiene un resultado de medición como el de la figura 2, que además de la oscilación fundamental contiene oscilaciones armónicas, no se puede deducir si las oscilaciones armónicas han sido causadas por el aerogenerador 14 o si proceden de la red de conexión. Si en la red de conexión 16 existieran oscilaciones armónicas, éstas inducirían corrientes de frecuencia correspondiente en el circuito de potencia del aerogenerador 14. En la medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia se observarían, por lo tanto, oscilaciones armónicas a pesar de que el propio aerogenerador 14 no haya provocado ningún tipo de oscilaciones armónicas.

El procedimiento según la invención sirve para determinar el porcentaje de oscilaciones armónicas causadas por el aerogenerador. Del valor total de oscilaciones armónicas accesible gracias a la medición se deduce el valor de precarga de la red que representa el porcentaje de oscilaciones armónicas procedente de la red de conexión.

En la representación esquemática del aerogenerador 14 de la figura 4, un engranaje 22 multiplica el giro de un rotor 21 para conseguir un número de vueltas mayor para el accionamiento de un generador 23. La corriente eléctrica producida por el generador 23 se transmite a través de una conexión trifásica a un transformador U 25 que adapta la tensión a la tensión media de la red de conexión 16. Se trata de una máquina asincrónica de doble alimentación (DFIG) en la que un filtro 29 y un convertidor 24 se conectan en paralelo con el generador 23. El convertidor 24 comprende un Machine Side Converter 241 y un Line-Side-Converter 242 conectados entre sí a través de un circuito intermedio de corriente continua.

Por el lado de tensión media del transformador 25 se dispone un sensor de corriente 26 concebido para medir la corriente introducida y para registrarla a lo largo del tiempo. Mediante una transformación Fourier los valores de medición se pueden transformar de la representación de tiempo en la representación de frecuencia. Un ejemplo del resultado de la medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia de la representación de frecuencia se muestra en la figura 3. La representación se limita a las oscilaciones armónicas de la frecuencia básica de 50 Hz. Para cada oscilación armónica se indica en un primer diagrama, en forma de barras, la amplitud, es decir, el valor de la corriente, y en un segundo diagrama el ángulo de fase φ entre la oscilación armónica en cuestión y la oscilación fundamental. La magnitud de referencia del ángulo de fase φ es la oscilación armónica. Se prescinde de la representación de la frecuencia básica de 50 Hz. Se obtiene información correspondiente por medio de la transformación en la representación de frecuencia para las oscilaciones interarmónicas. En la figura 3 se muestran únicamente las oscilaciones armónicas entre 100 Hz y 1000 Hz. En la práctica el análisis se puede realizar para una gama de frecuencias mayor, por ejemplo de 0,1 kHz a 10 kHz.

Finalizada la medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia el aerogenerador 14 se para y se abre un seccionador 27. Con un sensor de tensión 28 se mide a lo largo del tiempo la tensión de la red de conexión 16. Cuando el seccionador 27 está cerrado, no existe una diferencia de potencial relevante entre el sensor de corriente 26 y el sensor de tensión 28, por lo que en el sentido de la invención se trata del mismo punto de medición. La medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia contiene una información sobre el valor y la fase de las oscilaciones. Por medio de una transformación Fourier los resultados de medición se pueden transformar de la

representación de tiempo en la representación de frecuencia, resultando una representación similar a la de la figura 3. A cada oscilación armónica se asignan, por lo tanto, un valor y una fase.

Si el interruptor 27 estuviera cerrado, la tensión de la red de conexión 16 induciría una corriente en el circuito de potencia del aerogenerador. El circuito de potencia del aerogenerador 14 comprende los componentes eléctricos que conducen la corriente eléctrica producida por medio del generador 23 hasta el punto de medición del sensor de tensión 28. En el ejemplo de realización de la figura 4, el generador 23, el convertidor 24 y el transformador 25 forman parte del circuito de potencia. Se conocen las características eléctricas de cada uno de los componentes del circuito de potencia, de modo que para cada componente se puede determinar mediante cálculo una impedancia compleja como función de la frecuencia f . A partir de las impedancias complejas Z_{gen} del generador 23, Z_{inv} del convertidor 24, Z_{tra} del transformador 25 y Z_{flt} del filtro 29 se puede determinar la impedancia compleja Z_{ges} del circuito de potencia:

$$Z_{ges} = \frac{1}{\left(\frac{1}{Z_{gen}} + \frac{1}{Z_{inv}} + \frac{1}{Z_{flt}} \right)} + Z_{tra}$$

Un ejemplo de una impedancia compleja Z_{ges} así determinada del circuito de potencia 23, 24, 25, 29 se representa en la figura 5 con líneas de puntos en dos diagramas. El diagrama superior muestra el valor de la impedancia compleja Z_{ges} sobre la frecuencia f en la gama de 100 Hz a 10 kHz. La representación es logarítmica en ambos ejes. El diagrama inferior muestra el ángulo de fase φ sobre la frecuencia f , representándose la frecuencia de forma logarítmica. La línea de puntos coincide en parte con la línea continua, por lo que en estas secciones no se puede diferenciar de la línea continua.

El valor de la impedancia compleja dependiente de la frecuencia Z_{ges} presenta dos ceros aproximadamente en 2,2 KHz y en 4,5 KHz en los que el valor de la impedancia compleja dependiente de la frecuencia Z_{ges} es muy pequeño. Para excluir errores en la división entre la impedancia compleja dependiente de la frecuencia Z_{ges} se eliminan los ceros, por ejemplo poniendo todos los valores, en los que el valor de la impedancia compleja dependiente de la frecuencia es inferior a 0,1, a 0,1. Esto se indica en la figura 5 con una línea continua.

Para el cálculo del valor de precarga de la red la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia se divide entre la impedancia compleja dependiente de la frecuencia Z_{ges} .

Como diferencia entre la medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia y el valor de precarga de la red se obtiene el valor característico de corriente del aerogenerador 14. Al formar la diferencia no se deduce solamente el valor de los dos valores de corriente, sino que la diferencia se forma por medio de los vectores que se pueden formar a partir del valor y del ángulo de fase en el plano complejo. El valor característico de corriente como resultado de la diferencia es, por lo tanto, nuevamente un valor de corriente complejo dependiente de la frecuencia que contiene información sobre el valor y la fase. El valor característico de corriente se puede representar gráficamente de forma similar a la de la figura 3.

El valor característico de corriente se puede utilizar, por ejemplo, para comprobar la compatibilidad del aerogenerador 14 con los requisitos formulados por el operador de la red. Los requisitos del operador de la red se pueden representar de manera que para determinadas oscilaciones armónicas de la corriente se indiquen determinados valores que el aerogenerador 14 no puede rebasar durante la introducción de corriente. Mediante la comparación del respectivo valor del valor característico de corriente, se puede realizar fácilmente la comparación con el valor límite del operador de la red para cada oscilación armónica. Para ello basta con considerar los valores del valor característico de corriente, mientras que los valores de fase no son relevantes. Por consiguiente, a efectos de comparación se puede asignar al aerogenerador 14 un parámetro de corriente que contenga sólo una parte de la información del valor característico de corriente.

Si los valores límite del operador de la red no se refieren a uno de los aerogeneradores, sino a todo el parque eólico, se pueden sumar los valores de los distintos aerogeneradores. Si la oscilación armónica de 250 Hz está sujeta, por ejemplo, a un valor límite de 20 A, se pueden conectar en el parque eólico diez aerogeneradores que introducen esta oscilación armónica con 2 A sin que se supere el valor límite. Los valores límite de los operadores de red se calculan con frecuencia, de manera que las oscilaciones armónicas tengan una importancia mayor que las oscilaciones interarmónicas.

En la forma de realización de la figura 6 el sensor de corriente 26, el seccionador 27 y el sensor de tensión 28 se disponen por el lado de baja tensión del transformador 25. El conjunto comprende un módulo de cálculo 30, en el que se ejecutan automáticamente los demás pasos del procedimiento según la invención. El módulo comprende una primera memoria 31 en la que se almacena la impedancia compleja dependiente de la frecuencia del circuito de potencia. La impedancia compleja dependiente de la frecuencia se refiere al circuito de potencia que la red de conexión 16 "ve" desde el punto de medición de la medición de tensión. En el ejemplo de realización de la figura 6 el circuito de potencia comprende únicamente el generador 23, el convertidor 24 y el filtro 29, pero no el transformador 25. La impedancia compleja dependiente de la frecuencia Z_{ges} se calcula a partir de las impedancias complejas dependientes de la frecuencia del generador Z_{gen} , del convertidor Z_{inv} y del filtro Z_{flt} de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$Z_{ges} = \frac{1}{\left(\frac{1}{Z_{ges}} + \frac{1}{Z_{inv}} + \frac{1}{Z_{jt}} \right)}$$

La línea continua de la figura 5 muestra un ejemplo de la impedancia compleja dependiente de la frecuencia de este circuito de potencia. En la impedancia compleja dependiente de la frecuencia Z_{ges} almacenada en la memoria 31 los ceros del valor de impedancia se han eliminado y subido al valor 0,1.

- 5 Un módulo de división 32 se ha concebido para realizar la división entre la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia y la impedancia compleja dependiente de la frecuencia a fin de determinar el valor de precarga de la red. Un módulo de diferencia 33 constituye la diferencia entre la medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia y el valor de precarga de la red para determinar el valor característico de corriente. El valor característico de corriente se almacena en una segunda memoria 34.
- 10 En la figura 7 se muestra una sección de un parque eólico en cuyo diseño se ha tenido en cuenta el valor característico de corriente del aerogenerador 14 almacenado en la memoria 34. Del valor característico de corriente resulta que una determinada oscilación interarmónica de la corriente producida por el aerogenerador 14 destaca especialmente. Una línea de conexión al aerogenerador 15 se configura por medio de un transformador giratorio 36 de manera que las correspondientes oscilaciones armónicas de los dos aerogeneradores 14, 15 sean opuestas, es decir, que se neutralicen mutuamente. En lugar del camino directo representado de forma discontinua, la línea de conexión elige el camino a través del transformador giratorio 36, por lo que en el punto de enlace 35 se produce el cambio de fase deseado de esta oscilación armónica.
- 15

20

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para la determinación de las características eléctricas de un aerogenerador (14, 15), diseñándose el aerogenerador (14, 15) para introducir a través de un circuito de potencia (23, 24, 25, 29) corriente eléctrica en una red de conexión (16), con los siguientes pasos:
 - a. realización de una medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia (26) en un estado activo del aerogenerador (14, 15), en el que el aerogenerador (14, 15) introduce a través del circuito de potencia (23, 24, 25, 29) corriente eléctrica en la red de conexión (16);
 - b. realización de una medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia (28) en un estado pasivo del aerogenerador (14, 15), en el que el aerogenerador (14, 15) no introduce a través del circuito de potencia (23, 24, 25, 29) ninguna corriente eléctrica en la red de conexión (16);
 - c. determinación de un valor de precarga de la red a partir de la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia (28) y de una impedancia compleja dependiente de la frecuencia (Z_{ges}) del circuito de potencia (23, 24, 25, 29) del aerogenerador (14, 15), correspondiendo el valor de precarga de la red al porcentaje de oscilaciones armónicas provocadas por la red de conexión (16);
 - d. determinación de un valor característico de corriente del aerogenerador (14, 15) como diferencia de la medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia (26) y del valor de precarga de la red.
2. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado por que para la medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia (26) y para la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia (28) se emplea el mismo punto de medición.
3. Procedimiento según la reivindicación 1 ó 2, caracterizado por que la medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia (26) y la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia (28) se realizan por el lado de baja tensión del transformador (25).
4. Procedimiento según la reivindicación 1 ó 2, caracterizado por que la medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia (26) y la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia (28) se realizan por el lado de tensión media del transformador (25).
5. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado por que antes de la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia (28) se abre un seccionador (27) entre el circuito de potencia (23, 24) y la red de conexión (16).
6. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado por que antes del cálculo del valor de precarga de la red se eliminan los ceros de la impedancia compleja dependiente de la frecuencia (Z_{ges}).
7. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 6, caracterizado por que durante la medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia (26) la corriente introducida está en fase con la tensión.
8. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizado por que la medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia (26) y la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia (28) se realizan respectivamente en una pluralidad de períodos de medición, alternando en los períodos de medición entre mediciones de corriente (26) y mediciones de tensión (28).
9. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizado por que la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia (28) se registra como serie de tiempo y por que antes de la determinación del valor de precarga de la red se lleva a cabo una transformación de la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia (28) en una representación de frecuencia.
10. procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 9, caracterizado por que el valor característico de corriente contiene un valor para la amplitud de una oscilación armónica y por que este valor se compara con un valor límite especificado por el operador de red.
11. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 10, caracterizado por que el valor característico de corriente contiene un valor para el ángulo de fase entre una oscilación armónica y la oscilación fundamental y por que un parámetro de funcionamiento del circuito de potencia (23, 24, 25, 29) se adapta de manera que el ángulo de fase de la oscilación armónica se cambie.
12. procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 11, caracterizado por que el valor característico de corriente contiene un valor para el ángulo de fase y la amplitud de una oscilación interarmónica y por que en la construcción de un parque eólico se conecta una pluralidad de aerogeneradores (14, 15) de manera que las oscilaciones interarmónicas introducidas por estos aerogeneradores (14, 15) se neutralicen al menos en parte.
13. Conjunto para la determinación de las características eléctricas de un aerogenerador (14, 15) que comprende un aerogenerador (14, 15) diseñado para introducir a través de un circuito de potencia (23, 24, 25, 29) corriente

eléctrica en una red de conexión (16), un sensor de corriente (26) para la realización de una medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia en un estado activo del aerogenerador (14, 15) en el que el aerogenerador (14, 15) introduce a través del circuito de potencia (23, 24, 25, 29) corriente eléctrica en la red de conexión (16), un sensor de tensión (28) para la realización de una medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia en un estado pasivo del aerogenerador (14, 15) en el que el aerogenerador (14, 15) no introduce a través del circuito de potencia (23, 24, 25, 29) ninguna corriente eléctrica en la red de conexión (16), y un módulo de cálculo (30) concebido para determinar a partir de la medición de tensión compleja dependiente de la frecuencia (28) y a partir de una impedancia compleja dependiente de la frecuencia (Z_{ges}) del circuito de potencia (23, 24, 25, 29) del aerogenerador (14, 15) un valor de precarga de la red, correspondiendo el valor de precarga de la red al porcentaje de oscilaciones armónicas causadas por la red de conexión (16), así como para determinar a partir de la diferencia entre la medición de corriente compleja dependiente de la frecuencia (26) y el valor de precarga de la red un valor característico de corriente del aerogenerador (14, 15).

15

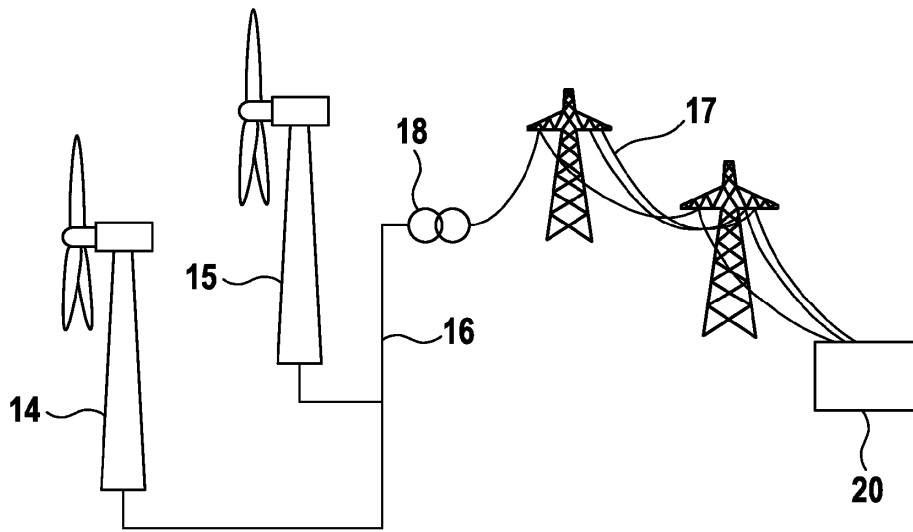


Fig. 1

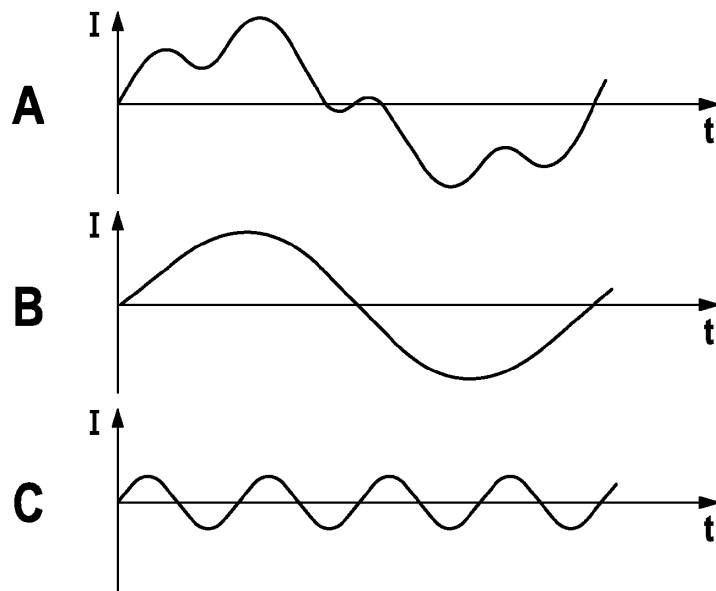


Fig. 2

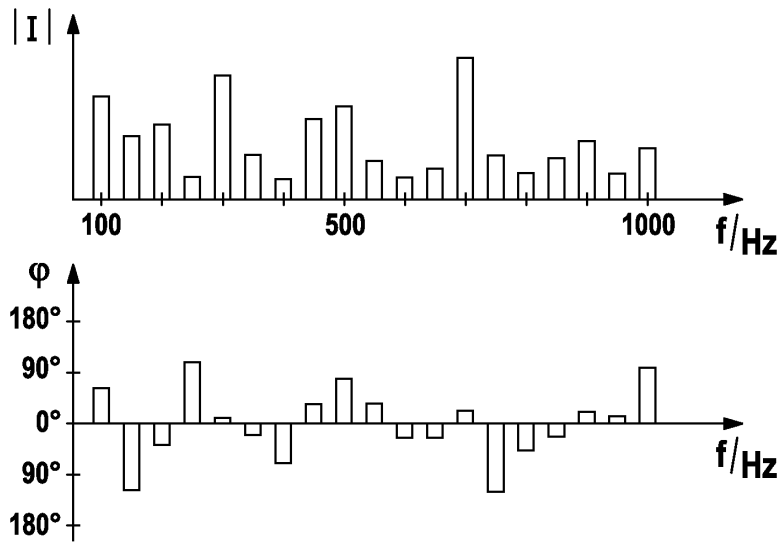


Fig. 3

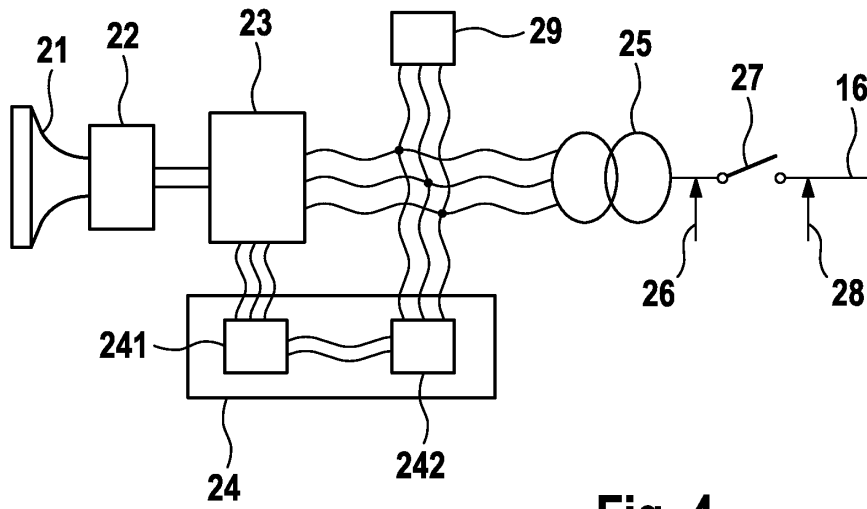


Fig. 4

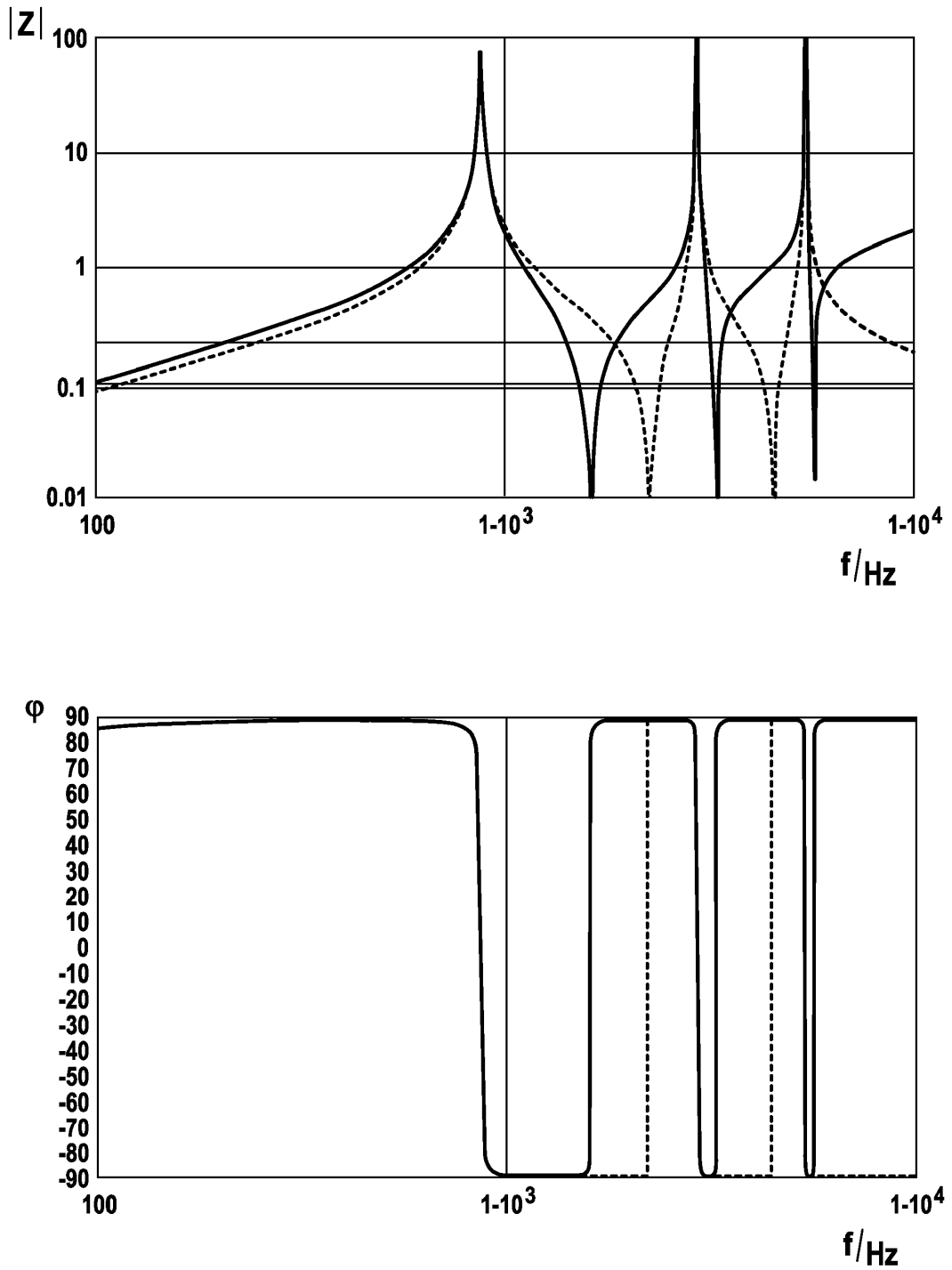


Fig. 5

