

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 959 265**

51 Int. Cl.:

G01R 21/00 (2006.01)

G01R 21/133 (2006.01)

G01R 21/06 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **14.06.2017 PCT/EP2017/000698**

87 Fecha y número de publicación internacional: **20.12.2018 WO18228655**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.06.2017 E 17734983 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **02.08.2023 EP 3639044**

54 Título: **Determinación de la potencia activa en base a la frecuencia de conmutación**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
22.02.2024

73 Titular/es:

HOTTINGER BRUEL & KJAER BENELUX B.V.
(100.0%)
Schutweg 15A
5145 NP Waalwijk, NL

72 Inventor/es:

STOCK, ALEXANDER;
TEIGELKÖTTER, JOHANNES;
KOWALSKI, THOMAS;
STAUDT, STEFAN;
ACKERMANS, PETER y
LANG, KLAUS

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 959 265 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Determinación de la potencia activa en base a la frecuencia de conmutación

5 La presente invención se refiere a un procedimiento para la determinación en base a la frecuencia de conmutación de la potencia activa de un dispositivo eléctrico, en particular un dispositivo eléctrico superconductor, y a un dispositivo para llevar a cabo dicho procedimiento.

10 El grado de eficiencia de un sistema eléctrico es uno de los parámetros más importantes de dicho sistema. En general, la eficiencia de un sistema es la relación entre la potencia entregada a suministrada. En los sistemas eléctricos se define como potencia la denominada potencia activa, que caracteriza el flujo de energía medio por unidad de tiempo en un sistema. Según la definición básica

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} u(\tau) \cdot i(\tau) dt$$

15 de DIN 40110-1:1994-03: magnitudes de corriente alterna; circuitos de dos hilos, 03.1994, la media temporal de la potencia instantánea (producto de la tensión y la corriente) se forma cíclicamente, utilizándose el período de oscilación fundamental T de las variables eléctricas alternas como período para formar el valor promedio y suponiéndose un estado de efecto transitorio del sistema.

20 Los superconductores se pueden utilizar en diversos sistemas eléctricos para evitar pérdidas de energía debido a resistencias óhmicas y aumentar así la eficiencia. Nuevos avances, como el descubrimiento, publicado en 2015 por investigadores del Instituto Max Planck de Química de Maguncia y de la Universidad Johannes Gutenberg de Maguncia, de que el sulfuro de hidrógeno (H₂S) se vuelve superconductor a -70 °C bajo alta presión, justifican LA afirmación de la esperanza de que la superconductividad a temperatura ambiente sea posible en un futuro previsible. Esto permitiría utilizar el efecto de superconductividad en casi cualquier sistema eléctrico. Sin embargo, el uso de superconductores ya es posible hoy en día, por ejemplo, en sistemas de resonancia tomográfica magnética, en máquinas eléctricas como motores o generadores y para otras aplicaciones en las que ya se pueden utilizar superconductores con un esfuerzo técnico razonable.

30 Los superconductores pueden cambiar involuntariamente de su estado superconductor a su estado normalmente conductor por diversas razones. Esto puede suceder, por ejemplo, si falla la refrigeración del superconductor o se produce otro fallo de funcionamiento. La transición abrupta que luego ocurre del estado superconductor al estado normalmente conductor también se conoce como extinción. La conducción normal suele comenzar en una sección del superconductor y luego se extiende más. La resistencia óhmica presente en el estado normalmente conductor del superconductor crea rápidamente altas tensiones y temperaturas. Como resultado, pueden producirse descargas eléctricas y sobrecalentamiento del superconductor, lo que en última instancia puede conducir a la destrucción del superconductor. Por lo tanto, cuando se utiliza un superconductor, es importante evitar la extinción y/o sus efectos negativos y posiblemente fatales.

40 Se conocen medidas que, en caso de extinción, previenen o al menos mitigan sus consecuencias negativas. Por ejemplo, el superconductor puede estar rodeado por una capa conductora normal cuya resistencia óhmica esté por debajo de la resistencia óhmica del superconductor en su estado normalmente conductor, o puede conectarse una resistencia óhmica separada en paralelo al superconductor. De este modo se puede garantizar que, en el caso de una transición por zonas del superconductor desde el estado superconductor al estado normalmente conductor, se produzca un cortocircuito a través de la capa conductora normal que lo rodea o de la resistencia óhmica separada y, como resultado, el superconductor solo se calienta lentamente. Sin embargo, la constante de tiempo eléctrica de una bobina superconductora aumenta significativamente cuando se le conecta una resistencia óhmica en paralelo.

50 También se conocen diversas medidas para detectar una extinción. Entonces se puede monitorizar, p. ej., la tensión aplicada al superconductor, la corriente que fluye a través del superconductor o el campo magnético generado por el superconductor mediante sensores especiales para detectar un cambio repentino en una de estas magnitudes, que puede ser causado por una extinción. Cuando se detecta una extinción de esta manera, se puede interrumpir el suministro de energía al superconductor para evitar efectos negativos. Tales medidas se describen, por ejemplo, en el documento US 3.336.526 A. Sin embargo, con este enfoque conocido siempre se necesitan sensores adicionales, como por ejemplo voltímetros para monitorizar la tensión o sensores Hall para monitorizar el campo magnético. Los documentos WO 2010/018424 A1 y US 5 301 121 A divulgan enfoques relevantes para determinar una potencia activa de un dispositivo eléctrico multifásico.

El objeto de la invención es proporcionar un procedimiento y un dispositivo para su implementación, que permitan una rápida detección de extinción en un dispositivo eléctrico superconductor sin el uso de sensores adicionales y, además de ello, puedan determinar la eficiencia del dispositivo eléctrico de manera muy dinámica.

5 Este objeto se logra con el procedimiento según la reivindicación 1 independiente y el dispositivo según la reivindicación 9 independiente. En las reivindicaciones dependientes se indican perfeccionamientos ventajosos.

Según la reivindicación 1, en un procedimiento para la determinación en base a la frecuencia de conmutación de una potencia activa de un dispositivo eléctrico multifásico, que se suministra a través de un convertidor de potencia con una tensión que tiene una oscilación fundamental variable en frecuencia y amplitud con una oscilación fundamental período de oscilación T o que suministra dicha tensión al convertidor de potencia, tensiones $u_{1i} = u_1(i \cdot T_{\text{MUESTREO}})$ a $u_{xi} = u_x(i \cdot T_{\text{MUESTREO}})$ y corrientes $i_{1i} = i_1(i \cdot T_{\text{MUESTREO}})$ a $i_{xi} = i_x(i \cdot T_{\text{MUESTREO}})$ de las fases eléctricas se mide en tiempos $i \cdot T_{\text{MUESTREO}}$, en donde x es un número de fases eléctricas y T_{MUESTREO} es un tiempo de muestreo de un dispositivo de medición utilizado para la medición. Se guardan las tensiones medidas u_{1i} a u_{xi} y las corrientes i_{1i} a i_{xi} . Las potencias instantáneas $p_i = p(i \cdot T_{\text{MUESTREO}})$ se calculan como la suma respectiva de los productos $u_{1i} \cdot i_{1i}$ a $u_{xi} \cdot i_{xi}$ de las tensiones y corrientes medidas para el momento correspondiente. Se determina un período de conmutación T_s del convertidor de potencia. A continuación se determina una potencia activa P_s del dispositivo eléctrico como la media de las potencias instantáneas p_i en momentos dentro del período de conmutación T_s .

20 Con el procedimiento se puede determinar una potencia activa P_s del aparato eléctrico después del período de conmutación T_s del convertidor de potencia y, por tanto, muy rápidamente. Dado que esta potencia activa cambia bruscamente en caso de una extinción de un superconductor del dispositivo eléctrico, mediante la monitorización de la potencia activa P_s se puede detectar una extinción con suficiente rapidez, lo que no es posible con la determinación de la potencia activa significativamente más lenta de acuerdo con la definición básica explicada anteriormente. En este caso, no se necesitan sensores adicionales, porque para la detección de extinción se utiliza al mismo tiempo la potencia activa P_s , que ya está determinada para determinar el rendimiento del dispositivo eléctrico.

Determinando la potencia activa P_s del aparato eléctrico después del período de conmutación T_s del convertidor de potencia y, por tanto, después de una fracción del período fundamental T, también es posible determinar de forma muy dinámica el rendimiento del aparato eléctrico. Determinando rápidamente la potencia activa P_s en base al período de conmutación T_s del convertidor, también se pueden detectar cambios bruscos en la potencia activa durante los cambios del punto de funcionamiento y los procesos de compensación. Asimismo, se pueden detectar transitorios en la potencia instantánea $p(t)$ que no se pueden reconocer al determinar la potencia activa de acuerdo con la definición básica explicada anteriormente, que solo se aplica al estado de efecto transitorio del sistema eléctrico.

35 En el estado de efecto transitorio y bajo el supuesto ideal de una frecuencia de conmutación infinitamente alta de un convertidor de potencia operado con modulación de ancho de pulso sinusoidal, la potencia activa P_s determinada en base al período de conmutación T_s del convertidor de potencia, es decir, la potencia activa en base a la frecuencia de conmutación, corresponde a la potencia activa P determinada en base al período de oscilación fundamental T de acuerdo con la definición básica explicada anteriormente, es decir, la potencia activa en base a la frecuencia de oscilación fundamental. Por lo tanto, el procedimiento permite una determinación dinámica y precisa de la potencia activa del dispositivo eléctrico.

45 La concordancia con la potencia activa P determinada en base al período de oscilación fundamental T en estado de efecto transitorio bajo el supuesto ideal descrito también, se aplica a una determinación de la potencia activa P_s en un múltiplo entero del período de conmutación T_s del convertidor de potencia. Sin embargo, las desviaciones del período de conmutación T_s o de un múltiplo entero del mismo en la determinación de la potencia activa P_s conducen a una concordancia cada vez más deficiente. Si se desea una determinación más dinámica y al mismo tiempo más precisa de la potencia activa, la potencia activa P_s se determina por lo general exactamente para un período de conmutación T_s del convertidor de potencia, es decir, como la media de todas las potencias instantáneas para puntos en tiempo en el período de conmutación T_s .

Según la reivindicación 2, el dispositivo eléctrico es un dispositivo eléctrico con un superconductor y la potencia activa específica P_s se analiza para detectar una transición del superconductor del estado superconductor al estado normalmente conductor en al menos una parte del superconductor. Si se detecta una transición al estado normalmente conductor, se interrumpe el flujo de energía entre el dispositivo eléctrico y el convertidor de potencia. Como se ha descrito anteriormente, se puede determinar muy rápidamente una potencia activa P_s del dispositivo eléctrico y, por lo tanto, también se puede detectar una extinción del superconductor. La posterior interrupción del flujo de energía entre el dispositivo eléctrico y el convertidor de potencia puede evitar la destrucción del superconductor.

60

Según reivindicación 3, en el paso de determinación, el período de conmutación T_s se determina en base a la curva de una tensión de salida del convertidor de potencia para una de las fases eléctricas. Así, para determinar el período de conmutación T_s se utiliza también una magnitud ya medida en relación con la determinación de la potencia activa.

5 Según la reivindicación 4, es válido que $T_s \leq T/5$, es decir, la duración del período de conmutación T_s es como máximo el 20 % de la duración del período de oscilación fundamental T o bien la frecuencia de conmutación del convertidor es al menos cinco veces mayor que la frecuencia de la oscilación fundamental. Incluso con una frecuencia de conmutación del convertidor de potencia de esta magnitud, que rara vez ocurre en la práctica, es posible una
10 determinación de la potencia activa significativamente más rápida, que es suficiente para la detección de extinción y la detección de cambios bruscos en la potencia activa.

Según la reivindicación 5, $T_s \leq T/100$, es decir, la duración del período de conmutación T_s es como máximo el 1 % de la duración del período de oscilación fundamental T o bien la frecuencia de conmutación del convertidor de potencia es al menos 100 veces mayor que la frecuencia de la oscilación fundamental. Con una frecuencia de conmutación del
15 convertidor de potencia de este orden de magnitud, es posible una detección de extinción aún más rápida y una detección de cambios de potencia activa aún más dinámicos.

Según la reivindicación 6, la potencia activa P_s determinada se analiza para detectar un transitorio en la potencia instantánea $p(t)$. Si se detecta dicho transitorio, se determina un valor de potencia máxima. A continuación, se
20 determina si el valor de potencia máxima alcanzado supera un valor límite para una potencia máxima breve. De esta manera, también se pueden detectar transitorios que provocan que se supere la potencia máxima y que no pueden reconocerse al determinar la potencia activa en base al período de oscilación fundamental T . Esto permite tener en cuenta dichos excesos de carga que, al igual que otros excesos de carga, pueden conducir a daños en diferentes componentes del sistema.

Según la reivindicación 7, la potencia activa P_s determinada se analiza para detectar una transición entre diferentes puntos de funcionamiento del dispositivo eléctrico. La transición detectada se tiene en cuenta a la hora de regular la potencia activa del dispositivo eléctrico. Esto permite mejorar la dinámica y la calidad de la regulación.

Según la reivindicación 8, los pasos del proceso se repiten cíclicamente. Esto significa que la potencia activa P_s se puede volver a determinar continuamente y los análisis basados en ella se pueden mantener siempre actualizados.

El dispositivo según la reivindicación 9 para llevar a cabo el procedimiento tiene las mismas ventajas que el procedimiento en sí, ventajas que ya se han descrito anteriormente en relación con el procedimiento. Esto también se
35 aplica al sistema según la reivindicación 10, incluido el dispositivo.

La invención se explica a continuación con más detalle mediante un ejemplo de realización en combinación con dibujos esquemáticos. Muestran:

- 40 la Fig. 1, un esquema funcional simplificado de un sistema eléctrico;
- la Fig. 2, un diagrama de flujo con pasos de un procedimiento para determinar la potencia activa de un dispositivo eléctrico en base a la frecuencia de conmutación;
- la Fig. 3, la potencia instantánea $p(t)$, la potencia activa P en base a la frecuencia de oscilación fundamental y la potencia activa P_s en base a la frecuencia de conmutación;
- 45 la Fig. 3^a, la potencia activa P_s en base a la frecuencia de conmutación resaltada;
- la Fig. 3b, la potencia activa P basada en frecuencia de oscilación fundamental resaltada; y
- la Fig. 4, relaciones de potencia al variar un intervalo de promedio.

La Fig. 1 muestra un esquema funcional simplificado de un sistema eléctrico de acuerdo con un ejemplo de realización, que incluye una fuente o sumidero de energía 1, un convertidor de potencia 2 con una frecuencia de conmutación f_s y un período de conmutación T_s , un dispositivo eléctrico 3 y un dispositivo de procesamiento 4. Se trata de un sistema multifásico con fases eléctricas 1 a x , por ejemplo el conocido sistema trifásico. Por lo tanto, el dispositivo eléctrico 3 es también un dispositivo eléctrico multifásico.

El dispositivo eléctrico 3 puede ser una bobina, una máquina eléctrica como por ejemplo un accionamiento eléctrico (motor eléctrico y eventualmente también un engranaje) o un generador u otro componente eléctrico, presentando el dispositivo eléctrico 3 preferiblemente un superconductor. Dependiendo de la situación, la energía eléctrica fluye desde la fuente o sumidero de energía 1 a través del convertidor de potencia 2 al dispositivo eléctrico 3 o viceversa, lo que se muestra mediante flechas dobles entre la fuente o sumidero de energía 1 y el convertidor de potencia 2, así como entre el convertidor de potencia 2 y el dispositivo eléctrico 3. En el primer caso se utiliza una fuente de energía 1 y el
60 convertidor de potencia 2 genera a partir de la energía eléctrica suministrada por ella una tensión que presenta una oscilación fundamental variable en frecuencia y amplitud con un período de oscilación fundamental T y la suministra

al dispositivo eléctrico 3. En el último caso, se utiliza un sumidero de energía 1 y la energía eléctrica le es suministrada por el convertidor de potencia 2, que genera a partir de dicha tensión suministrada por el dispositivo eléctrico 3.

5 La frecuencia de conmutación f_s del convertidor de potencia 2 es al menos cinco veces mayor que la frecuencia de la oscilación fundamental y por lo general al menos cien veces mayor que la frecuencia de la oscilación fundamental o incluso significativamente mayor, de modo que su período de conmutación T_s es siempre considerablemente más corto que el período de oscilación fundamental T de la oscilación fundamental. El convertidor de potencia 2 puede ser, por ejemplo, un convertidor de frecuencia.

10 En el dispositivo de procesamiento 4 o en el convertidor de potencia 2 se puede integrar un dispositivo de medición no representado en la Fig. 1. Éste también puede estar previsto como elemento independiente. Una línea continua entre el dispositivo de procesamiento 4 y el convertidor de potencia 2 y una línea discontinua entre el dispositivo de procesamiento 4 y la doble flecha que conecta el convertidor de potencia 2 y el dispositivo eléctrico 3 simbolizan, por un lado, que el dispositivo de procesamiento 4 o bien un dispositivo de medición integrado en él puede detectar valores de medición que provienen directamente del convertidor de potencia 2 y/o valores de medición, como valores de tensión y de corriente, que se producen en la conexión desde convertidor eléctrico 2 y dispositivo eléctrico 3. Por otra parte, estas dos líneas también simbolizan que en la conexión entre el convertidor de potencia 2 y el dispositivo eléctrico 3 se pueden suministrar señales de control desde el dispositivo de procesamiento 4 al convertidor de potencia 2 y/o a elementos no mostrados en la Fig. 1, para, p. ej., interrumpir el flujo de energía hacia o desde el dispositivo eléctrico 3 mediante elementos de conmutación apropiados tales como transistores de efecto de campo metal-óxido-semiconductores (MOSFET).

25 En el caso del dispositivo de procesamiento 4 se puede tratar, por ejemplo, de un dispositivo tal como un módulo de un sistema de detección de datos de medición, un microcontrolador o un dispositivo similar. El dispositivo de procesamiento 4 puede, p. ej., ser un módulo en tiempo real de un sistema de detección de datos de medición. No tiene que estar presente como elemento separado o ser parte de un sistema de detección de datos de medición separado, tal como se muestra a modo de ejemplo en la Fig. 1, sino que también puede estar integrado en el convertidor de potencia 2 u otro componente del sistema eléctrico de acuerdo con el ejemplo de realización. Procesa valores como, por ejemplo, los valores medidos proporcionados por el dispositivo de medición, y esto puede suceder en tiempo real. Puede generar señales de control, lo que también es posible en tiempo real. El dispositivo de procesamiento 4 también puede ser capaz de almacenar temporalmente o de forma permanente valores medidos y valores procesados, aunque este almacenamiento también puede tener lugar en otra ubicación.

35 La Fig. 2 muestra un diagrama de flujo con los pasos de un procedimiento para la determinación en base a la frecuencia de conmutación de una potencia activa P_s del dispositivo eléctrico 3. En un paso S1, las tensiones $u_{1i} = u_1(i \cdot T_{\text{MUESTREO}})$ a $u_{xi} = u_x(i \cdot T_{\text{MUESTREO}})$ y las corrientes $i_{1i} = i_1(i \cdot T_{\text{MUESTREO}})$ a $i_{xi} = i_x(i \cdot T_{\text{MUESTREO}})$ de las fases eléctricas 1 a x para los tiempos $i \cdot T_{\text{MUESTREO}}$ medidos, en donde T_{MUESTREO} es un tiempo de muestreo para el dispositivo de medición utilizado para la medición. En un paso S2, se almacenan las tensiones medidas u_{1i} a u_{xi} y las corrientes i_{1i} a i_{xi} , pudiendo tratarse de un almacenamiento permanente o temporal. Los valores pueden almacenarse o almacenarse temporalmente en una memoria en el dispositivo de procesamiento 4 o en otra ubicación. En un paso S3 se calculan las potencias instantáneas $p_i = p(i \cdot T_{\text{MUESTREO}})$ para cada vez $i \cdot T_{\text{MUESTREO}}$ como la suma respectiva de los productos $u_{1i} \cdot i_{1i}$ a $u_{xi} \cdot i_{xi}$ de las tensiones y corrientes medidas para el tiempo correspondiente, lo cual puede suceder en el dispositivo de procesamiento 4. En un paso S4 se determina el período de conmutación T_s del convertidor de potencia 2, lo que puede realizarse, por ejemplo, en base a la curva de una tensión de salida del convertidor de potencia 2 para una de las fases eléctricas 1 a x. P. ej., en el cruce por cero de una de las tensiones $u_1(t)$ a $u_x(t)$ u otra tensión entre una de las fases eléctricas y un punto de referencia adecuado tal como el punto estrella del dispositivo eléctrico 3 o un punto de referencia se puede apagar la fuente o sumidero de energía 1. En un paso S5, la potencia activa P_s del dispositivo eléctrico 3 se determina entonces como el promedio temporal de las potencias instantáneas p_i en momentos dentro del período de conmutación T_s , es decir, para $i \in [1, T_s/T_{\text{MUESTREO}}]$. En otras palabras, se determina la potencia activa P_s en base a la frecuencia de conmutación. Esto se realiza de nuevo para cada período de conmutación adicional T_s . Si el dispositivo de procesamiento 4 está diseñado de manera correspondiente, todos los pasos S1 a S5 pueden ser realizados por el dispositivo de procesamiento 4.

55 En un paso S6, se analiza la potencia activa P_s determinada para detectar una transición del superconductor del dispositivo eléctrico 3 desde el estado superconductor al estado normalmente conductor en al menos una parte del superconductor. En un paso S7, cuando se detecta una transición al estado normalmente conductor, se interrumpe un flujo de energía entre el convertidor de potencia 2 y el dispositivo eléctrico 3. Estos pasos se llevan a cabo cuando el dispositivo eléctrico 3 presenta un superconductor. El análisis y control de la interrupción del flujo de energía se puede llevar a cabo mediante el dispositivo de procesamiento 4, pudiendo implementarse la interrupción real del flujo de energía a través de los elementos de conmutación mencionados anteriormente, tal como por ejemplo MOSFET.

En un paso S8, se analiza la potencia activa P_s determinada para detectar un transitorio en la potencia instantánea $p(t)$. En el paso S9, se determina un valor máximo de potencia alcanzado durante el transitorio detectado. A continuación se determina en un paso S10 si el valor de potencia máxima alcanzado excede un valor límite para una potencia máxima breve. Estos pasos pueden ser llevados a cabo por el dispositivo de procesamiento 4. Solo son necesarios si se desea monitorizar la superación del valor límite, p. ej., prevenir posibles daños a los componentes eléctricos causados por tal exceso o al menos poder detectarlo a tiempo.

En un paso S11 se analiza la potencia activa P_s determinada para detectar una transición entre diferentes puntos de funcionamiento del dispositivo eléctrico 3. En un paso S12, la potencia activa del dispositivo eléctrico 3 se regula teniendo en cuenta la transición detectada. El análisis y la regulación pueden realizarse mediante el dispositivo de procesamiento 4. No siempre es necesario realizarlos, sino solo cuando es necesario regular la potencia activa.

Los pasos descritos anteriormente se pueden repetir completa o parcialmente de forma cíclica. Asimismo, entre o después de estos pasos, se pueden llevar a cabo pasos adicionales que no se describen en detalle.

La potencia activa en base a la frecuencia de conmutación explicada anteriormente es una nueva definición de la cantidad de potencia activa. Se calculan como se describió anteriormente determinando el promedio temporal de las potencias instantáneas para el período de conmutación T_s , que también puede expresarse mediante la ecuación

$$P_s = \frac{1}{T_s} \cdot \int_t^{t+T_s} u(\tau) \cdot i(\tau) d\tau$$

La tensión de salida, en el caso de uso descrito anteriormente y en muchos otros, del convertidor de potencia 2 se genera por medio de un procedimiento de modulación de ancho de pulso. Como funciones de modulación se suelen utilizar señales sinusoidales, a las que se les añade un sistema cero adecuado para este rango en base al punto de funcionamiento del dispositivo eléctrico. En otras palabras, normalmente se utiliza modulación de ancho de pulso sinusoidal.

Para el dispositivo eléctrico 3 mostrado en la Fig. 1, en el que el punto estrella no está en contacto, el sistema de tensión cero no contribuye a la potencia instantánea ni a la potencia activa. En este caso se puede demostrar matemáticamente que en estado estable y bajo el supuesto ideal de una frecuencia de conmutación f_s infinitamente alta y el convertidor de potencia 2 en forma de convertidor de frecuencia funciona con una modulación de ancho de pulso sinusoidal (con cualquier sistema cero), el cálculo de la potencia activa en base a la frecuencia de conmutación se corresponde de forma analítica exactamente con el cálculo de la potencia activa en base a la frecuencia de oscilación fundamental y, por lo tanto,

$$\lim_{f_s \rightarrow \infty} P_s = P$$

es válido.

En este caso ideal teórico resulta clara la analogía entre las dos definiciones diferentes de potencia activa. En el cálculo de la potencia activa en base a la frecuencia de conmutación, el valor promedio se forma durante un período mucho más corto que el período de oscilación fundamental T . La potencia activa en base a la frecuencia de conmutación es, por tanto, una magnitud de potencia activa que, por un lado, registra la dinámica de un sistema eléctrico y, por otro lado, en las condiciones generales antes mencionadas, en estado de efecto transitorio, proporciona los mismos resultados que el cálculo típico de potencia activa de acuerdo con la definición básica explicada en la introducción. Como se mencionó, esta último se define exclusivamente para este estado de efecto transitorio.

La Fig. 3 muestra la potencia instantánea $p(t)$, la potencia activa P_s en base a la frecuencia de oscilación fundamental y la potencia activa P_s en base a la frecuencia de conmutación. Para mayor claridad, la potencia activa P_s en base a la frecuencia de conmutación también está resaltada en la Fig. 3a y la potencia activa P_s en base a la frecuencia de oscilación fundamental está resaltada en la Fig. 3b.

A causa del intervalo de promedio mucho más corto, el cálculo de la potencia activa en base a la frecuencia de conmutación proporciona valores de potencia activa significativamente más dinámicos. Esto se puede ver en la Fig. 3, Fig. 3a y Fig. 3b en la vista ampliada que se muestra en la parte inferior izquierda. En el peor de los casos, una modificación de la potencia activa P en base a la frecuencia de oscilación fundamental se indica con un retraso correspondiente al período de oscilación fundamental T . Por el contrario, una modificación de la potencia activa P_s en base a la frecuencia de conmutación se indica con un retraso como máximo del período de conmutación T_s . La potencia

activa P_s en base a la frecuencia de conmutación permite así reconocer el aumento de carga o el nuevo punto de funcionamiento aproximadamente al mismo tiempo que la potencia instantánea $p(t)$.

5 En el rango medio, es decir, en un punto de funcionamiento estacionario, la potencia activa P en base a la frecuencia de oscilación fundamental y la potencia activa P_s en base a la frecuencia de conmutación son casi idénticas.

10 En la transición del punto de funcionamiento hacia la marcha sin carga, el cálculo de potencia activa en base a la frecuencia de conmutación también detecta los transitorios de la potencia instantánea $p(t)$, de modo que estos puedan reconocerse en la potencia activa P_s en base a la frecuencia de conmutación. Por otro lado, los transitorios de la potencia instantánea $p(t)$ no son reconocibles en la potencia activa en base a la oscilación fundamental P en base a la frecuencia de oscilación fundamental, dado que a causa de la promediación a largo plazo ya no se incluyen. Esto se puede ver en la Fig. 3, Fig. 3a y Fig. 3b en la vista ampliada que se muestra en la parte inferior derecha.

15 Además, en la Fig. 3, Fig. 3a y Fig. 3b, en la representación ampliada abajo a la derecha se puede ver que la potencia activa P en base a la frecuencia de oscilación fundamental puede adoptar un valor intermedio poco realista, ya que durante una carga Mediante una detección del paso por cero se produce un ciclo de oscilación fundamental, pero la señal dentro de este ciclo no se corresponde con la señal que continúa periódicamente del punto de funcionamiento estacionario y, por lo tanto, la potencia activa P no está definida.

20 Precisamente en accionamientos eléctricos alimentados por convertidores, el perfil de carga dependiente del uso es por lo general muy variable, así, por ejemplo, en un vehículo eléctrico que se mueve en el tráfico normal. Por lo tanto, a menudo no es posible determinar la eficiencia en base al cálculo típico de la potencia activa de acuerdo con la definición básica explicada en la introducción. Otro objetivo de la evaluación de mediciones es la detección fiable de transitorios de potencia, por ejemplo para la detección de sobrecargas. La determinación de la potencia activa en base a la frecuencia de conmutación es muy adecuada para estos requisitos y, por lo tanto, también puede utilizarse para otras aplicaciones además de la detección de extinción.

30 Si en el cálculo de la potencia activa en base a la frecuencia de conmutación no se alcanza el período de conmutación T_s y, por tanto, se acorta aún más el intervalo de promediación del cálculo de la potencia, es conduce a resultados inadecuados. En este caso, la potencia activa P_s en base a la frecuencia de conmutación en estado de efecto transitorio no coincide con la potencia activa P_s en base a la frecuencia de oscilación fundamental convencional, incluso bajo las condiciones marco idealizadas descritas anteriormente. En el caso de un punto de funcionamiento estacionario, el valor de potencia activa tampoco es aproximadamente constante. De esta manera se obtiene una cantidad de potencia que no puede interpretarse ni como potencia instantánea ni como potencia activa. Por lo tanto, la nueva definición descrita de la potencia activa basada en el período de conmutación T_s ya no puede asociarse con la definición original de la potencia activa.

40 En la Fig. 4 se muestran las relaciones de potencia con una variación del intervalo de promedio. Se trata de los resultados del cálculo de la potencia instantánea $p(t)$, la potencia activa P en base a la frecuencia de oscilación fundamental, la potencia activa en base a la frecuencia de conmutación P_s y una potencia activa P_{vs} en la que el intervalo de promediación se ha multiplicado por el factor u en comparación con el período de conmutación T_s , es decir,

$$P_{vs} = \frac{1}{v \cdot T_s} \cdot \int_t^{t+v \cdot T_s} u(\tau) \cdot i(\tau) d\tau$$

45 es válido.

50 La simulación, en cuyos resultados se basa la Fig. 4, se realizó a modo de ejemplo con una frecuencia de oscilación fundamental f de 50 Hz, una frecuencia de conmutación f_s de 8 kHz, una tensión de circuito intermedio de 600 V y corrientes de fase sinusoidales con una amplitud de 50 A. El resultado muestra que la potencia activa P_s en base a la frecuencia de conmutación para el intervalo de promediación correspondiente al período de conmutación T_s se corresponde muy bien con la potencia activa P en base a la frecuencia de oscilación fundamental (ver el lado izquierdo de la Fig. 4 en el centro). Por otro lado, todos los intervalos de promediación que no son un múltiplo entero del período de conmutación T_s proporcionan resultados inadecuados que son difíciles de interpretar (ver el lado izquierdo de la Fig. 4 a continuación y el lado derecho completo de la Fig. 4). Por tanto, el incumplimiento del período de conmutación T_s o de un múltiplo entero del mismo como intervalo de promediación tiene un efecto negativo en el cálculo de la potencia activa en base a la frecuencia de conmutación.

5 En efecto, en la modulación de duración de pulsos sinusoidal, el valor promedio de la tensión durante un período de conmutación corresponde aproximadamente al valor de la función de referencia sinusoidal. Para cantidades puramente sinusoidales, la potencia instantánea en estado de efecto transitorio es constante en cualquier momento y corresponde a la potencia activa. Promediando el período de conmutación se aproxima en la modulación sinusoidal al cálculo correspondiente para variables realmente sinusoidales.

10 El cálculo de potencia activa en base a la frecuencia de conmutación permite realizar análisis y evaluaciones adicionales. Dado que, como se muestra en la Fig. 3 y la Fig. 3a, la potencia activa P_s en base a la frecuencia de conmutación contiene la información sobre un exceso de oscilación transitorio durante los cambios del punto de funcionamiento y los procesos de compensación, la dinámica y la calidad del control se pueden aumentar en aplicaciones en las que se controla la potencia activa. El cálculo de la potencia activa en base a la frecuencia de conmutación también permite detectar picos de potencia durante los procesos de compensación transitoria, que no se detectan con el cálculo de la potencia activa convencional en base a la frecuencia de oscilación fundamental. Estos pueden analizarse para la monitorización del sistema en relación con el límite de carga máximo a corto plazo. Si se implementa un modelo de máquina en un dispositivo de medición, que mediante las variables medidas y una adaptación de parámetros derivada de ellas se sigue hasta la máquina real, éste se puede adaptar mucho más rápidamente a la máquina real debido al intervalo de promediación considerablemente más corto. Además de estos ejemplos, son posibles otras aplicaciones.

20 Resumiendo, la presente invención se refiere a un procedimiento para la determinación en base a la frecuencia de conmutación de la potencia activa de un dispositivo eléctrico 3, en particular un dispositivo eléctrico superconductor, y a un dispositivo 4 para llevar a cabo el procedimiento. El dispositivo eléctrico 3 es un dispositivo eléctrico multifásico y se suministra a través de un convertidor de potencia 2 conectado a una fuente o sumidero de energía 1 con una tensión que tiene una oscilación fundamental de frecuencia y amplitud variable con un período de oscilación fundamental T o suministra tal tensión al convertidor de potencia 2. La determinación de la potencia activa en base a
25 la frecuencia de conmutación permite una detección rápida de la extinción sin necesidad de sensores adicionales y también una determinación dinámica y precisa de la eficiencia del dispositivo eléctrico 3.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Procedimiento para determinar, en base a la frecuencia de conmutación, la potencia activa de un dispositivo eléctrico multifásico (3), que se alimenta a través de un convertidor de potencia (2) con una tensión que presenta una oscilación fundamental variable en frecuencia y amplitud con una período de oscilación fundamental T , o el convertidor de potencia (2) presenta tal tensión, comprendiendo el procedimiento los siguientes pasos:
- Medición (S1) de tensiones $u_{ti} = u_1(i \cdot T_{\text{MUESTREO}})$ a $u_{xi} = u_x(i \cdot T_{\text{MUESTREO}})$ y corrientes $i_{ti} = i_1(i \cdot T_{\text{MUESTREO}})$ a $i_{xi} = i_x(i \cdot T_{\text{MUESTREO}})$ de las fases eléctricas para tiempos $i \cdot T_{\text{MUESTREO}}$, donde x es un número de fases eléctricas y T_{MUESTREO} es un tiempo de muestreo de un dispositivo de medición utilizado para la medición;
 - 10 - Guardar (S2) las tensiones medidas u_{ti} a u_{xi} y las corrientes i_{ti} a i_{xi} ;
 - Calcular (S3) las potencias instantáneas $p_i = p(i \cdot T_{\text{MUESTREO}})$ como la suma respectiva de los productos $u_{ti} \cdot i_{ti}$ a $u_{xi} \cdot i_{xi}$ de las tensiones y corrientes medidas para el momento correspondiente;
 - Determinar (S4) un período de conmutación T_s del convertidor de potencia (2); y
 - 15 - Determinar (S5) una potencia activa P_s del dispositivo eléctrico (3) como la media de las potencias instantáneas p_i en los momentos dentro del período de conmutación T_s .
2. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que el dispositivo eléctrico (3) es un dispositivo eléctrico con un superconductor y se llevan a cabo los siguientes pasos:
- 20 - Analizar (S6) la potencia activa P_s determinada para detectar una transición del superconductor desde el estado superconductor al estado normalmente conductor en al menos una parte del superconductor; e
 - Interrumpir (S7) un flujo de energía entre el convertidor de potencia (2) y el dispositivo eléctrico (3) cuando se detecta una transición al estado normalmente conductor.
- 25 3. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que en el paso de determinar (S4) el período de conmutación T_s se determina en base a la curva de una tensión de salida del convertidor de potencia (2) para una de las fases eléctricas.
4. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en donde se aplica $T_s \leq T/5$.
- 30 5. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en donde se aplica $T_s \leq T/100$.
6. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, con los pasos:
- Analizar (S8) la potencia activa P_s determinada para detectar un transitorio en la potencia instantánea $p(t)$;
 - 35 - Determinar (S9) un valor pico de potencia alcanzado durante el transitorio detectado; y
 - Determinar (S10) si el valor de potencia pico alcanzado supera un valor límite para una potencia máxima a corto plazo.
7. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, con los pasos:
- 40 - Analizar (S11) la potencia activa P_s determinada para detectar una transición entre diferentes puntos de funcionamiento del dispositivo eléctrico (3); y
 - Regular (S12) la potencia activa del dispositivo eléctrico (3) teniendo en cuenta la transición detectada.
8. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que los pasos del procedimiento se repiten cíclicamente.
- 45 9. Dispositivo (4) para llevar a cabo un procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores.
10. Sistema con una fuente o sumidero de energía (1), un convertidor de potencia (2), un dispositivo eléctrico (3) y un dispositivo (4) según la reivindicación 9.
- 50

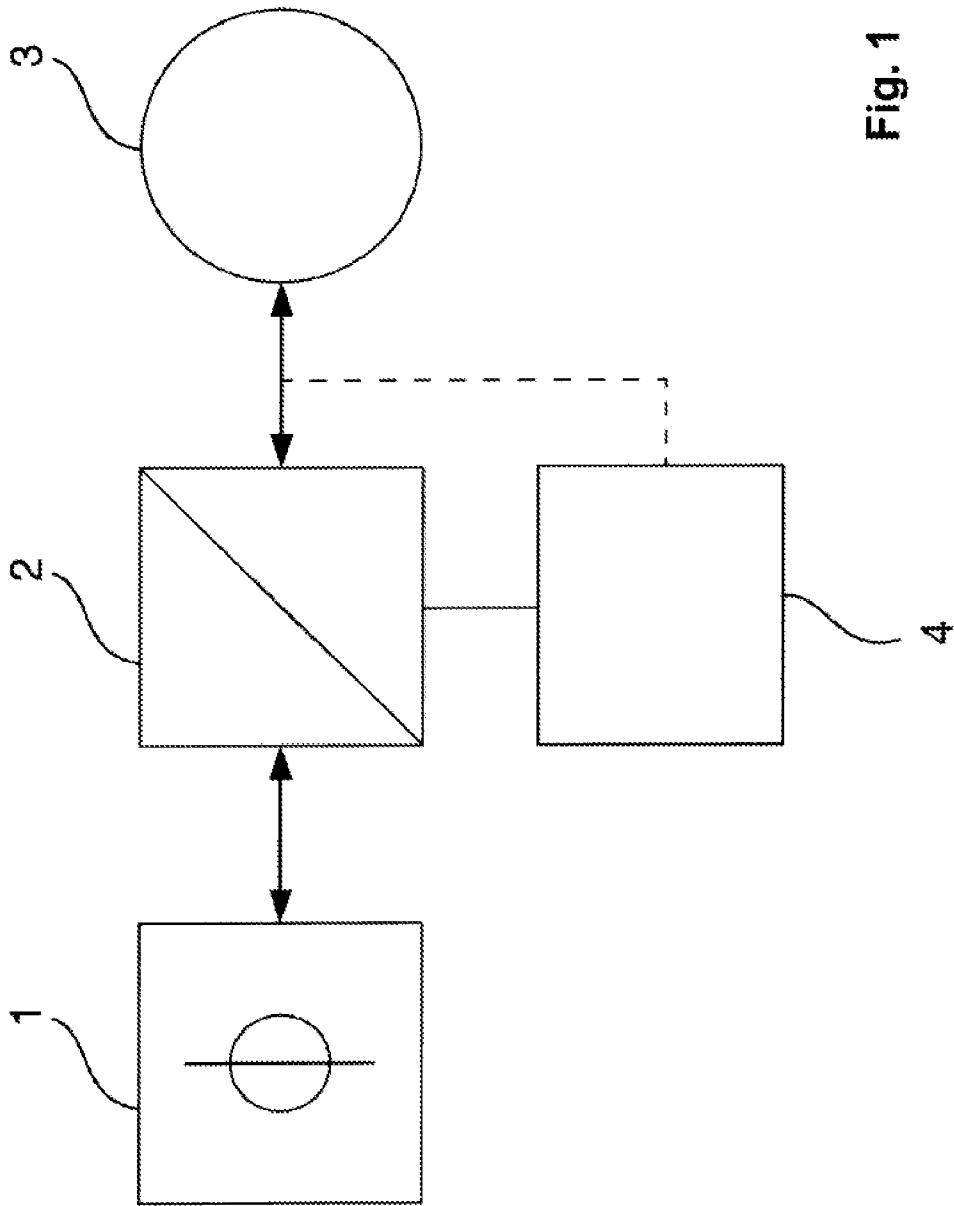


Fig. 1

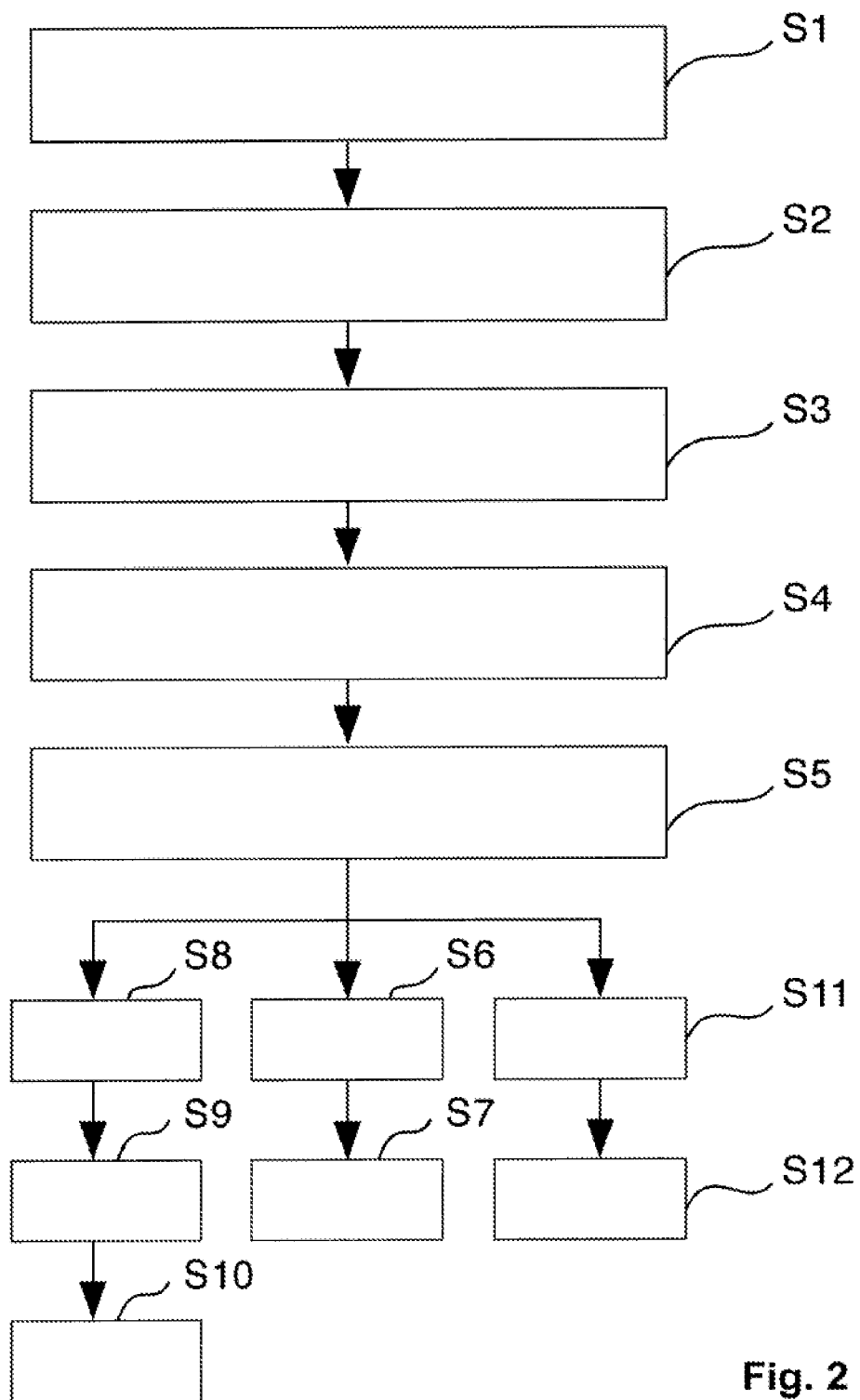


Fig. 2

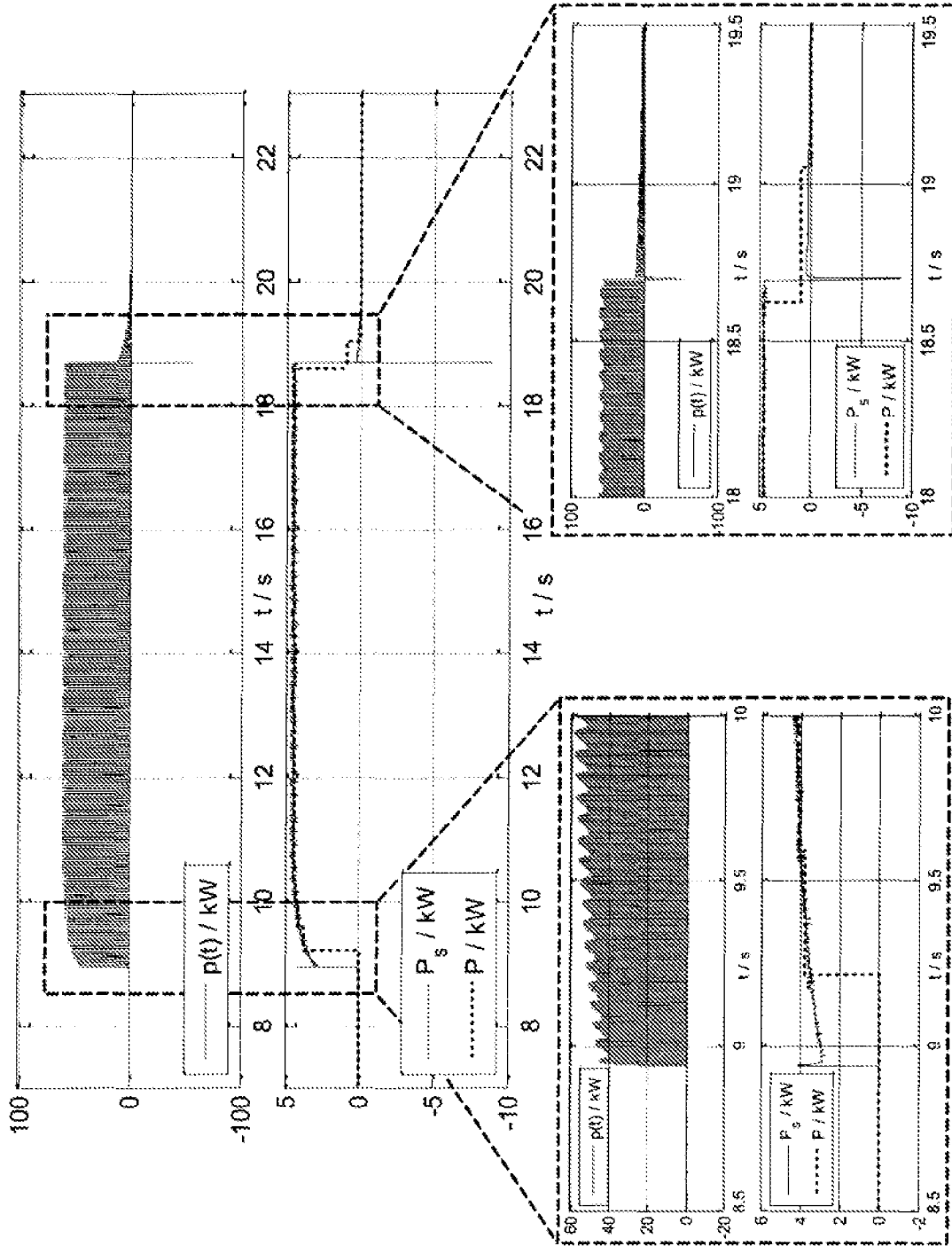


Fig. 3

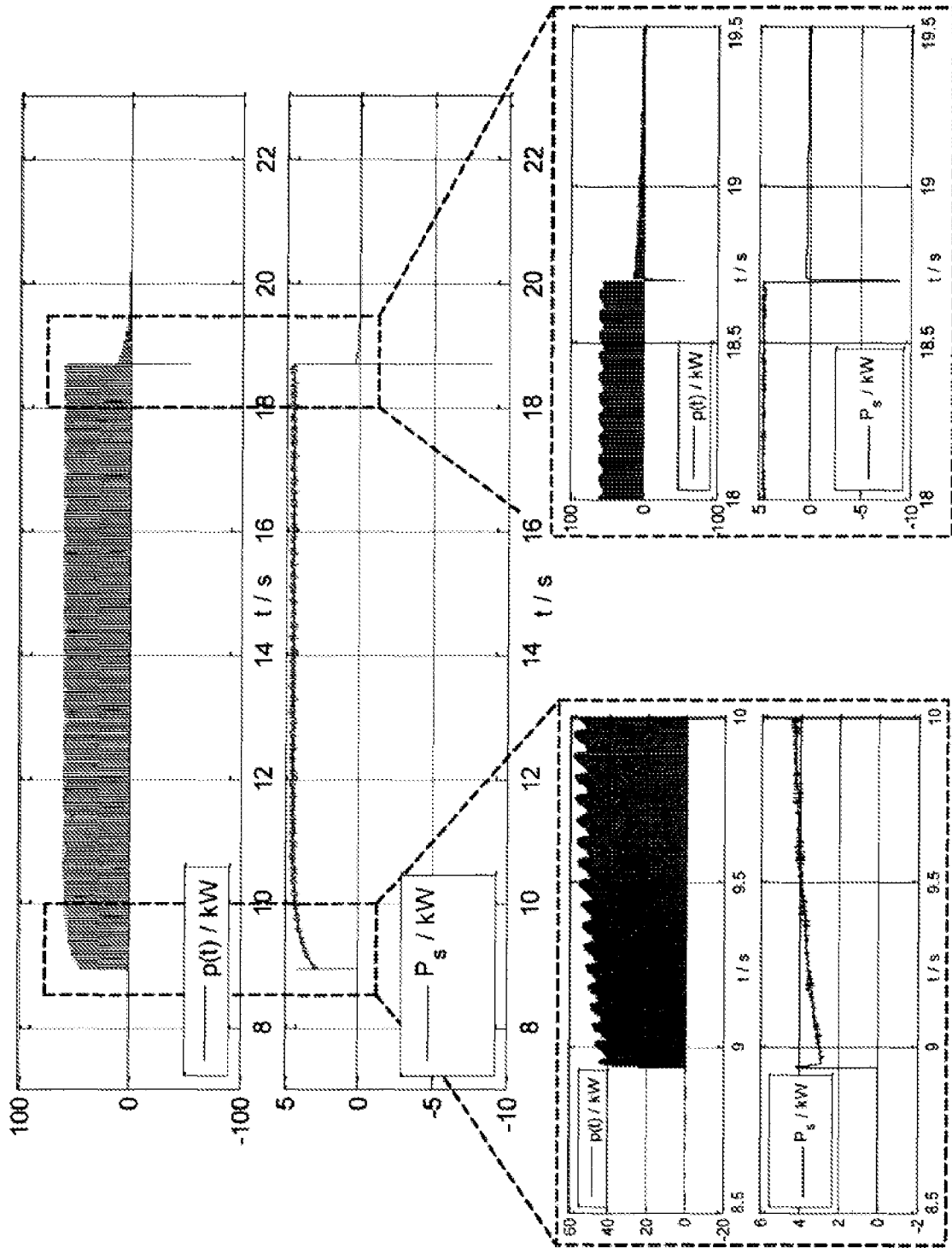


Fig. 3a

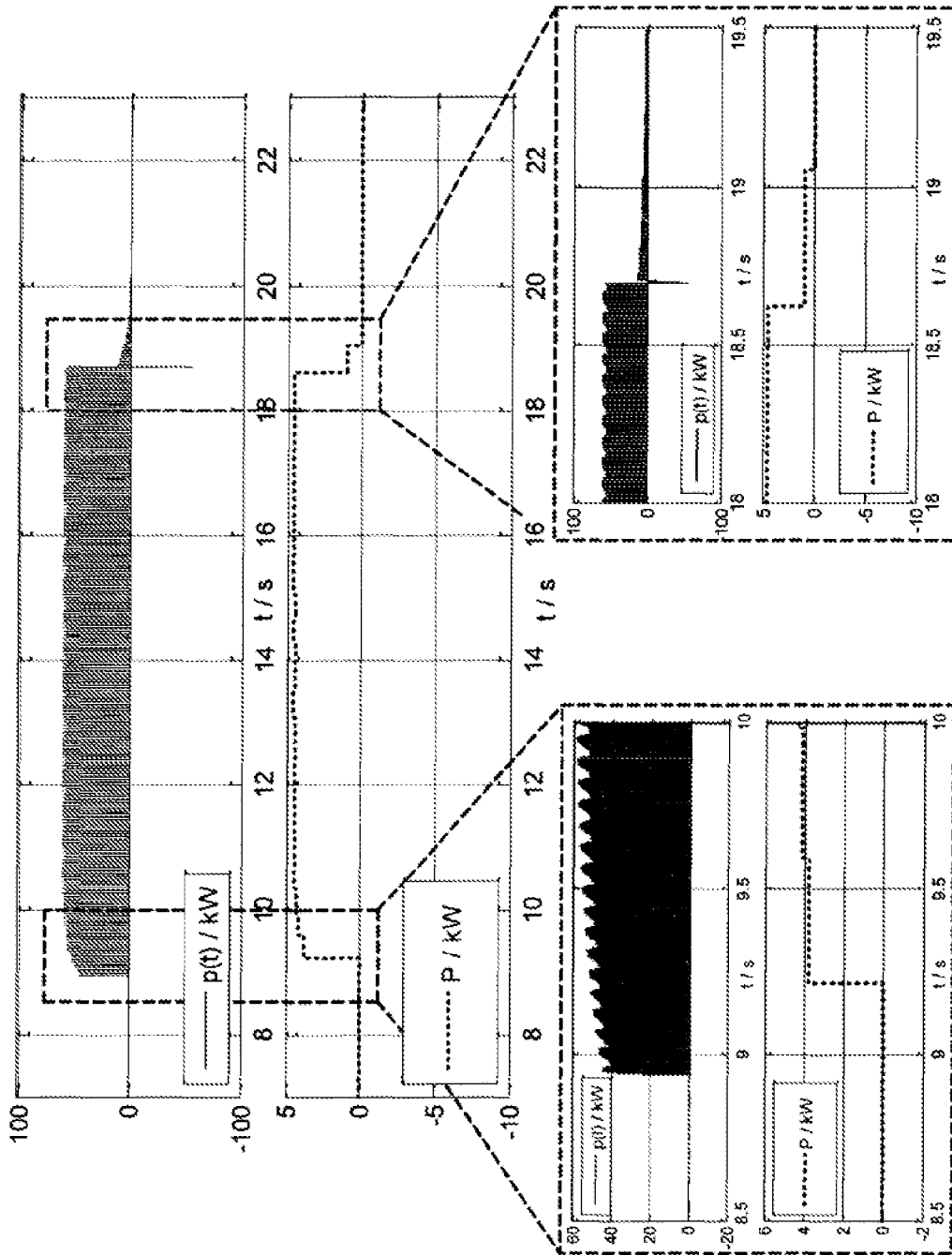


Fig. 3b

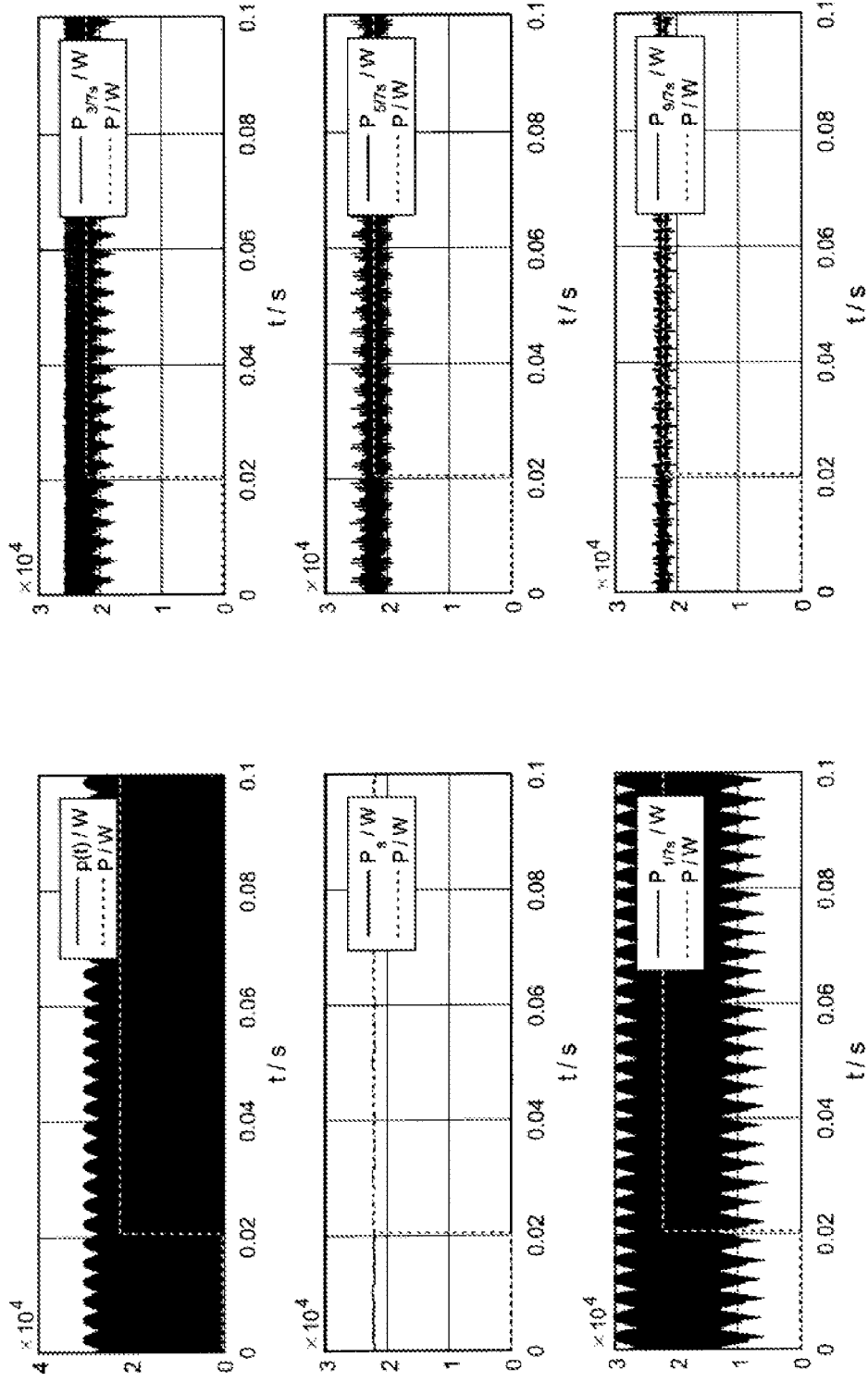


Fig. 4