

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 980 565**

51 Int. Cl.:

G05B 15/02 (2006.01)

H02J 3/14 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **30.04.2020** **PCT/GB2020/051064**

87 Fecha y número de publicación internacional: **12.11.2020** **WO20225533**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.04.2020** **E 20724920 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.04.2024** **EP 3963409**

54 Título: **Un método y sistema de control para operar un componente eléctrico**

30 Prioridad:

03.05.2019 GB 201906325

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

02.10.2024

73 Titular/es:

OPEN ENERGI LIMITED (100.0%)
Chertsey Road, Sunbury on Thames, Middlesex
TW16 7BP , GB

72 Inventor/es:

BIRONNEAU, MICHAEL y
MACKAY, JAMES

74 Agente/Representante:

UNGRÍA LÓPEZ, Javier

ES 2 980 565 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

Un método y sistema de control para operar un componente eléctrico

Esta invención se relaciona con un método y sistema adaptados para controlar la operación de componentes eléctricos, tanto generadores como cargas, que se acoplan a una red de suministro de potencia eléctrica con el fin de permitir que los componentes participen simultáneamente en dos estrategias diferentes de consumo o generación de potencia. Es de particular relevancia para cargas eléctricas de un tipo que tienen algún mecanismo para almacenar energía y que por lo tanto tienden a operarse para minimizar el consumo de energía durante los períodos de fijación de precios pico o durante períodos que, por alguna otra razón, conllevan una sanción financiera. Es de relevancia similar para los generadores que son capaces de mantener potencia en reserva, lo cual permite la programación de los momentos en que la potencia generada se alimenta a la red con el fin de maximizar los ingresos. La presente invención permite que tales prácticas sean compatibles con la provisión de un servicio que ayude a equilibrar el suministro eléctrico con la demanda.

En cualquier red de distribución de potencia eléctrica, es importante equilibrar la potencia suministrada a la red con la extraída de ella. Cualquier desequilibrio, incluso en un corto plazo, puede dar como resultado problemas que oscilan desde una caída en la eficiencia de transmisión de potencia, fluctuaciones impredecibles en suministro de electricidad hasta efectos más graves tales como apagones de potencia.

Una red de electricidad moderna, tal como la Red Nacional del Reino Unido, se equilibra sobre una base de segundo a segundo con mucha sofisticación. Cualquier desequilibrio entre la generación de potencia y el consumo de potencia por las cargas en la red se manifiesta en una desviación de una característica operativa del suministro de electricidad de su valor establecido, previsto. La monitorización de tal parámetro permite que se detecten y por lo tanto corrijan desequilibrios. Más comúnmente, es que para este propósito se monitorice la frecuencia de electricidad suministrada por la Red. En el Reino Unido, la red de electricidad se suministra a 50 Hz. Si las cargas agregadas en la red extraen más potencia de la suministrada, la frecuencia caerá. En términos generales, este efecto puede entenderse como que el aumento de carga en un generador hace que el generador funcione (gire) más lentamente. Por el contrario, si un desequilibrio es causado por una sobregeneración, la frecuencia aumentará por encima de su valor nominal de 50 Hz.

Hay numerosos factores que pueden provocar un desequilibrio en una red eléctrica. Pueden ser del lado de la oferta, por ejemplo problemas técnicos en un generador, o del lado de la demanda, por ejemplo un aumento en la demanda durante un evento deportivo televisado. En cualquier caso, se pueden aplicar correcciones ajustando la potencia generada o consumida. Para corregir en el lado de la oferta, la red generalmente tiene disponible para ello un sistema de respaldo de activos (generadores) que pueden conectarse o desconectarse de la red a pedido. Por el lado de la demanda, la red tendrá además un mecanismo mediante el cual al menos una selección de cargas en la red puede operarse en diferentes niveles de potencia. La respuesta puede ser dinámica, operando en respuesta a los cambios segundo a segundo en la frecuencia operativa o no dinámica, que usualmente es un servicio discreto activado en respuesta a una desviación de frecuencia predefinida. En el Reino Unido, los proveedores de servicios de equilibrio de la red eléctrica llevan a cabo su propia monitorización de desviaciones de frecuencia. En otras jurisdicciones, el propio operador de red monitoriza los signos de desequilibrio y se comunicará con los proveedores, indicando directamente el servicio de equilibrio requerido. Incentivos financieros se ofrecen por el operador de red a los generadores y cargas que estén dispuestos y sean capaces de proporcionar servicios de equilibrio.

Con el desplazamiento de generación de electricidad 100% alimentada en carbón a formas de energía renovables, la tarea de mantener un nivel predecible de suministro se hace más difícil. Mientras que una central eléctrica generalmente solo se desconectaría en el caso relativamente improbable de una avería, las fuentes renovables son fundamentalmente menos fiables. Los parques eólicos son menos productivos si el viento es bajo; también deben apagarse en el caso de vientos particularmente fuertes; generación de energía solar se reduce en el caso de nubes y la generación hidroeléctrica también es dependiente del clima. El nivel de oferta es, al igual que la demanda, por lo tanto cada vez más difícil de predecir. Esto ha provocado un requisito aumentado de equilibrio proporcionado por el lado de la demanda de la red de distribución. En general, hay una necesidad de un sistema de equilibrio flexible que responda rápidamente a los desequilibrios.

En un nivel práctico, una red eléctrica debe incorporar un rango de mecanismos para ajuste de potencia. Para esta invención, se extrae una distinción entre aquellos componentes que son operables con un consumo de potencia totalmente variable, por ejemplo una batería, y aquellos componentes binarios, tales como refrigeradores, que solo pueden operar en dos niveles de potencia: encendido y apagado. Estos componentes pueden ambos proporcionar un servicio de equilibrio a la red, pero los mecanismos son diferentes.

En el documento US2016/0013676 se describe un mecanismo de ajuste de potencia que usa un sistema de batería. La batería aumenta o disminuye la potencia suministrada a una red (o retirada de la red) con el fin de contrarrestar las desviaciones en la frecuencia de red a partir de un valor nominal. Una batería tiene la capacidad de almacenar carga, y por tanto energía, en su interior. De este modo una medición del estado de carga (SoC) de la batería proporciona una indicación de la disponibilidad de la batería para responder a los desequilibrios de red. Generalmente, una batería que está participando en un servicio que responde a frecuencia estará proporcionando este servicio continuamente, a menos que su SoC se mueva fuera de un rango predefinido.

Otro mecanismo puede ser proporcionado por un grupo de cargas que pueden operarse durante períodos cortos a potencia reducida, sin una caída notable en el rendimiento. Las respuestas agregadas, usualmente en subgrupos de las cargas receptivas disponibles, contribuyen a equilibrar el suministro y demanda. Los subgrupos se seleccionan de tal manera que se exija potencia reducida de cargas individuales solo durante un período de tiempo limitado. Este mecanismo permite que una cartera de activos eléctricos participe en servicios receptivos como un grupo, incluso aunque ningún activo individual cumpliría, por sí solo, los criterios técnicos establecidos por la red eléctrica para proporcionar tal servicio.

Métodos de ejemplo que facilitan la participación de cargas binarias en un servicio que responde a frecuencia se describen en los documentos GB 2361118, WO 2006/128709 y WO 2013/017896 (los "algoritmos Open Energi FFR"). Todos estos documentos describen algoritmos de selección que pueden usarse para determinar qué cargas desde dentro de un gran grupo de cargas binarias deben proporcionar la respuesta que se necesita en un momento dado. El grupo de cargas está bajo el control de un dispositivo autónomo que opera independientemente del control externo. Cuando el dispositivo de control detecta un desequilibrio en la frecuencia de red, altera la potencia consumida por las cargas eléctricas con las cuales está integrado con el fin de contrarrestar el desequilibrio detectado a través de la red. El consumo de potencia se modifica al permitir que cambie la energía almacenada dentro de la carga. Es decir, cada carga tiene una capacidad de almacenamiento de energía que varía con respecto al ciclo de trabajo de la carga. La capacidad de almacenamiento de energía de la carga eléctrica permite un ajuste ocasional del consumo de energía de la carga sin comprometer significativamente el rendimiento operativo de la carga eléctrica. Para cada carga eléctrica, los umbrales de capacidad de almacenamiento de energía rigen cuándo una carga eléctrica está disponible para contribuir al servicio de carga receptivo.

Con los algoritmos anteriores de la técnica anterior, la selección de las cargas eléctricas para suministrar un servicio de carga receptivo en respuesta a un desequilibrio detectado de la red se realiza a través del uso de umbrales de activación de frecuencia asignados a cada carga por el dispositivo de control. Los umbrales pueden variar suave o discretamente con el tiempo y pueden determinarse teniendo en cuenta un número de factores tales como la cantidad de energía almacenada en la carga en el momento en que se requiere la respuesta, tiempo transcurrido desde la última vez que se recurrió a la carga para proporcionar un servicio de carga receptivo y la naturaleza de las fluctuaciones recientes en la frecuencia de red.

Cuanto mayor sea el número y variedad de componentes eléctricos que están disponibles para participar en un servicio de equilibrio, mejor será el equilibrio que se puede lograr entre proporcionar un servicio a la red de distribución y minimizar cualquier efecto nocivo sobre el comportamiento operativo normal de cada componente. Además, hay muchos procesos industriales que extraen una gran cantidad de potencia desde las redes de suministro de electricidad y si se les pudiera dar la oportunidad de proporcionar un servicio de carga receptivo, el beneficio para la red sería significativo.

Sin embargo hay un obstáculo económico importante para implementar un servicio que responde a frecuencia por un número de componentes que pueden conectarse a la red, que surge a través de las estrategias de fijación de precios de electricidad. Por ejemplo, generalmente cuesta más que una carga consuma electricidad en ciertos momentos pico del día. Esto ha alentado a muchas cargas del tipo que son capaces de almacenar reservas de energía a participar en comportamientos de "evitación de precios pico" o "apilamiento de ingresos". Es decir, aumentarán su consumo de potencia justo antes de un período pico con el fin de permitir que la energía almacenada aumente hacia su valor máximo permitido. Durante el período pico, se recurrirá a estas reservas de energía en preferencia a la potencia eléctrica de la red. La reducción en el consumo de electricidad durante un período pico permite una reducción global en el coste económico de operar la carga.

Una consideración similar surge para aquellos tipos de generadores de electricidad que son capaces de variar la cantidad de energía que se almacena en reserva. Por ejemplo, a menudo es deseable explotar la capacidad de almacenamiento de energía de una batería para asegurar que se suministre potencia a la red en los momentos cuando es más ventajoso financieramente hacerlo y, al igual que con la carga, esto se considera incompatible con la operación de un servicio que responde a frecuencia.

El sistema de almacenamiento de batería de la técnica anterior del documento US2016/0013676 describe una mejora de un servicio básico que responde a frecuencia que hace más probable que el SoC de batería se mantenga dentro de un rango para el cual se puede ofrecer el servicio receptivo. Esto se logra permitiendo que la batería se cargue/descargue cuando su SoC se mueve lejos de un rango central y haciendo un ajuste que responde a frecuencia al nivel de potencia de la operación de carga o descarga. Sin embargo esto es un sistema de gestión interno, que tiene una aplicación limitada a una batería de almacenamiento y no tiene en cuenta el efecto de proporcionar el servicio que responde a frecuencia en la gestión ideal de SoC.

Hay una necesidad percibida de una estrategia de implementación alternativa para un sistema que responda a los desequilibrios de red que permita la participación de componentes que, al mismo tiempo, se operen de acuerdo con algún otro esquema de consumo de potencia eléctrica. El documento US 2013/006431 divulga un procedimiento para el suministro, control y almacenamiento de potencia proporcionada por una planta de generación de energía renovable.

Por consiguiente la presente invención proporciona un método de control de operación de un componente conectado a una red de suministro de electricidad, siendo el componente ya sea un generador o carga de un tipo que sea capaz de almacenar energía en su interior y que sea operable en un rango de niveles de potencia entre cero y una potencia máxima C_D . El método comprende las etapas de:

- 5 (a) operar el componente durante un período de tiempo de tal manera que, dentro del período de tiempo, se hagan ajustes a una tasa a la cual se transfiere energía entre el componente y la red de suministro de acuerdo con una función de potencia de línea base $B(t)$; y

- (b) Operar simultáneamente el componente durante el período de tiempo de tal manera que, además, se hagan ajustes a la tasa a la cual se transfiere energía entre el componente y la red de suministro de acuerdo con una función de potencia de movimiento rápido $F(t)$, de tal manera que la función de potencia de movimiento rápido $F(t)$ se superpone a la función de potencia de línea base; en donde

la función de potencia de línea base $B(t)$ se deriva de una función de potencia de movimiento lento $D(t)$, de tal manera que para $\delta \ll 1$:

$$B(t) = \delta C_D, \text{ si } D(t) < \delta C_D,$$

- 15 $B(t) = D(t)$, si $\delta C_D \leq D(t) \leq (1 - \delta)C_D$, y

$$B(t) = (1 - \delta)C_D, \text{ si } D(t) > (1 - \delta)C_D; \text{ en donde}$$

- si se hacen ajustes en la tasa a la cual se transfiere energía entre el componente y la red de suministro de acuerdo con la función de potencia de movimiento lento $D(t)$, el componente se beneficiaría económicamente de una variación en un precio predominante de la electricidad en la red o una variación en un valor que pueda derivarse, directa o indirectamente, desde el suministro de electricidad en la red; y

ajustes hechos a la tasa a la cual se transfiere energía entre el componente y la red de suministro de acuerdo con la función de potencia de movimiento rápido $F(t)$ son ajustes que responden a y tales como para contrarrestar los desequilibrios entre la generación de potencia y consumo de potencia a través de la red de suministro de electricidad, teniendo estos ajustes una alta probabilidad de ser muy inferiores a la potencia máxima C_D .

- 25 Con esta invención, la función de potencia de movimiento rápido $F(t)$ se superpone a la función de potencia de línea base $B(t)$, que a su vez se deriva de la función de potencia de movimiento lento $D(t)$. Esto permite que el componente (generador o carga) siga simultáneamente dos estrategias diferentes de consumo de potencia, siendo la función de línea base $B(t)$ determinada de tal manera que el coste de desviarse de la función de potencia de movimiento lento $D(t)$ sea aceptable. En particular, la función de potencia de movimiento lento $D(t)$ está determinada por fuerzas financieras dentro del mercado de electricidad. Por ejemplo, puede ser el precio predominante, lo cual lleva a una estrategia tal como evitación de precio pico. Alternativamente, puede basarse en un derivado de mercado tal como un valor de penalización que se impone a un operador de carga por infringir obligaciones contractuales con la red. El operador de carga luego intentará y limitará la operación para evitar o reducir la exposición a esa penalización.

- 35 Para un generador o carga de velocidad variable, operable en un rango de niveles de potencia entre cero y una potencia máxima C_D , la función de potencia de línea base $B(t)$ se establece de tal manera que sea igual a la función de potencia de movimiento lento $D(t)$, siempre que los ajustes que responden a los desequilibrios de red tengan una alta probabilidad de ser muy inferiores a la potencia máxima C_D . Además, $B(t)$ se establece de tal manera que sea igual a la función de potencia de movimiento lento $D(t)$ a menos que $D(t)$ esté dentro de un rango δC_D , $\delta \ll 1$ de ya sea 0 o de la potencia máxima C_D y, si $D(t)$ está dentro de este rango, $B(t)$ se establece ya sea en δC_D o $(1 - \delta)C_D$ respectivamente.

- Aunque no es parte de esta invención, un método alternativo es la implementación con componentes binarios que están ya sea "apagados" o "encendidos" y por lo que son operables solo en dos niveles de potencia: 0 y C_D . Cada componente binario es uno de un grupo de componentes que se operan juntos para proporcionar un servicio que responde a los desequilibrios de red, siendo la responsabilidad de la respuesta distribuida alrededor del grupo de tal manera que cada componente, con alta probabilidad, solo proporcione el servicio receptivo de manera intermitente. En esta implementación, la función de potencia de línea base $B(t)$ se deriva tanto de la función de potencia de movimiento lento $D(t)$ como también de valores pasados de la función de potencia de movimiento rápido $F(t)$.

- Con esta implementación, el período de tiempo comprende preferiblemente una serie secuencial de períodos de liquidación y, para cada período de liquidación, $k = 1$ a N , después de la determinación del valor promedio \hat{D}_k de la función de potencia lenta $D(t)$ durante ese período de liquidación, la función de línea base $B(t)$ se deriva usando las etapas de:

a) Dividir el período de liquidación T_k en una serie secuencial de subintervalos;

b) Para cada período de subintervalo s_m , $m = 1$ a M si, al inicio del período de subintervalo s_m , el componente no está respondiendo a un desequilibrio de red:

(i) Determinar la transferencia de potencia total promedio \hat{P}_k entre el componente y la red de suministro antes del inicio de ese período de subintervalo;

5 (ii) Comparar la transferencia de potencia total promedio \hat{P}_k antes del subintervalo y determinado en la Etapa (b)(i) con el valor promedio \hat{D}_k de la función de potencia de movimiento lento $D(t)$ durante el período de liquidación; y

(iii) Si $\hat{P}_k > \hat{D}_k$ establecer la función de línea base $B(t)$ para ese subintervalo en cero; si $\hat{P}_k < \hat{D}_k$ establecer la función de línea base $B(t)$ para ese subintervalo en la potencia máxima C_D .

10 De esta forma, el efecto de $F(t)$ se mitiga determinando el valor de $B(t)$ para cada subintervalo mediante un método que tenga en cuenta su contribución al consumo de potencia en todos los subintervalos previos. Por lo tanto durante el período de liquidación, la desviación de la función de potencia de movimiento lento ideal se limitará a la desviación exhibida en un único subintervalo.

15 Además si, al inicio del período de subintervalo s_m , el componente está respondiendo a un desequilibrio de red, la función de potencia de línea base $B(t)$ para el período de subintervalo s_m se establece preferiblemente en el mismo valor que la función de potencia de línea base $B(t)$ para el subintervalo inmediato precedente s_{m-1} .

También se divulga, pero no está cubierto por esta invención, un método de control de operación de un componente sin batería conectado a una red de suministro de electricidad, siendo el componente ya sea un generador o carga de un tipo que sea capaz de almacenar energía en su interior, comprendiendo el método las etapas de:

20 (a) Monitorizar un parámetro físico del componente que sea indicativo de las reservas de energía almacenadas en su interior;

(b) Derivar una variable proxy Φ , $0 \leq \Phi \leq 1$, a partir del parámetro físico medido, representando la variable proxy Φ la fracción de energía almacenada mantenida en las reservas de energía en cualquier punto en el tiempo;

25 (c) Si la variable proxy Φ tiene un valor que está entre un límite umbral superior y un límite umbral inferior, controlar la operación del componente de acuerdo con una función de potencia de movimiento lento $D(t)$, en donde si se hacen ajustes a la tasa a la cual se transfiere energía entre el componente y la red de suministro de acuerdo con la función de potencia de movimiento lento $D(t)$, el componente se beneficiaría económicamente de una variación en un precio predominante de electricidad en la red o una variación en un valor que pueda derivarse, directa o indirectamente, desde el suministro de electricidad en la red; y

30 (d) Si la variable proxy Φ tiene un valor que está fuera de los límites umbrales superior o inferior, operar el componente con una potencia operativa que esté de acuerdo con retornar el parámetro a un valor entre los límites umbrales superior e inferior.

35 El uso de la variable proxy como indicador de energía almacenada dentro de la carga permite que se separe la regulación del consumo de potencia del componente de un conocimiento detallado de operación de componente. La variable proxy es, de esta forma, análoga con un SoC de batería. Esto proporciona una gran flexibilidad en la aplicación de funciones de consumo de potencia a toda forma de generadores y cargas. Además, el modelo de variable proxy es flexible cuando se aplica a sistemas en los cuales se debe usar adecuadamente más de un parámetro para proporcionar una indicación de reservas de energía de componentes. En tales casos, una variable proxy global puede definirse como un producto de las respectivas variables proxy de parámetros individuales.

40 En un aspecto alternativo, la presente invención proporciona un método de control de operación de un componente conectado a una red de suministro de electricidad, siendo el componente ya sea un generador o carga de un tipo que sea capaz de almacenar energía en su interior y que sea operable en un rango de niveles de potencia entre cero y una potencia máxima C_D , comprendiendo el método las etapas de:

a) Monitorizar un parámetro físico del componente que sea indicativo de las reservas de energía almacenadas en su interior;

45 b) Si el parámetro tiene un valor que está entre un límite umbral superior y un límite umbral inferior, controlar la operación del componente de acuerdo con el método de esta invención como se establece anteriormente; y

c) Si el parámetro tiene un valor que está fuera de los límites umbrales superior o inferior, operar el componente con una potencia de operación que esté de acuerdo con retornar el parámetro a un valor entre los límites umbrales superior e inferior.

50 En este aspecto, la invención proporciona un enfoque conveniente para asegurar que la operación simultánea del componente de acuerdo con dos estrategias de consumo de potencia no haga que el componente opere fuera de sus parámetros aceptables.

Preferiblemente, este método se basa en el uso de variables proxy. Se deriva una variable proxy Φ , $0 \leq \Phi \leq 1$, para el componente, representando la variable proxy la fracción de energía almacenable mantenida en las reservas de energía en cualquier punto en el tiempo y siendo derivada del parámetro físico medido, por lo que los límites umbrales de la operación de componente se definen en términos de la variable proxy.

5 En otro aspecto, la presente invención proporciona un sistema para controlar la operación de un componente conectado a una red de suministro de electricidad, siendo el componente ya sea un generador o carga de un tipo que sea capaz de almacenar energía en su interior y que sea operable en un rango de niveles de potencia entre cero y una potencia máxima C_D , comprendiendo el sistema:

10 un controlador de proceso industrial dispuesto para ejercer control directo sobre la operación del componente y monitorizar los parámetros de proceso;

un servidor de demanda central dispuesto para derivar una función de potencia de movimiento lento $D(t)$, en donde si se hacen ajustes a la tasa a la cual se transfiere energía entre el componente y la red de suministro de acuerdo con la función de potencia de movimiento lento $D(t)$, el componente se beneficiaría económicamente de una variación en un precio predominante de la electricidad en la red o una variación en un valor que pueda derivarse, directa o indirectamente, desde el suministro de electricidad en la red;

15 un indicador dispuesto para proporcionar una señal indicativa de desequilibrios en la potencia suministrada a través de la red; y

un controlador de dispositivo local asociado con el controlador de proceso industrial y componente y dispuesto:

20 para recibir la señal indicativa de desequilibrios en la potencia suministrada a través de la red desde el indicador y la función de potencia de movimiento lento $D(t)$ desde el servidor de demanda central;

para derivar una función de potencia de línea base $B(t)$ a partir de la función de potencia de movimiento lento $D(t)$, de tal manera que para $\delta \ll 1$:

$$B(t) = \delta C_D, \text{ si } D(t) < \delta C_D,$$

$$B(t) = D(t), \text{ si } \delta C_D \leq D(t) \leq (1 - \delta) C_D, \text{ y}$$

25 $B(t) = (1 - \delta) C_D, \text{ si } D(t) > (1 - \delta) C_D;$

para derivar una función de potencia de movimiento rápido $F(t)$ a partir de la señal indicativa de desequilibrios en la potencia suministrada a través de la red; y

30 para proporcionar al controlador de proceso industrial instrucciones para operar el componente de tal manera que se hagan ajustes a una tasa a la cual se transfiere energía entre el componente y la red de suministro de acuerdo con la función de potencia de movimiento rápido $F(t)$ superpuesta en la función de potencia de línea base $B(t)$.

35 En otro aspecto, la presente invención proporciona un controlador de dispositivo local asociado con un controlador de proceso industrial dispuesto para ejercer control directo sobre la operación de un componente conectado a una red de suministro de electricidad, siendo el componente ya sea un generador o carga de un tipo que sea capaz de almacenar energía en su interior y que sea operable en un rango de niveles de potencia entre cero y una potencia máxima C_D , estando el controlador de dispositivo local dispuesto:

para recibir una señal indicativa de desequilibrios en la potencia suministrada a través de la red desde un indicador y para recibir una función de potencia de movimiento lento $D(t)$ desde un servidor central;

para derivar una función de potencia de línea base $B(t)$ a partir de la función de potencia de movimiento lento $D(t)$, de tal manera que para $\delta \ll 1$:

40 $B(t) = \delta C_D, \text{ si } D(t) < \delta C_D,$

$$B(t) = D(t), \text{ si } \delta C_D \leq D(t) \leq (1 - \delta) C_D, \text{ y}$$

$$B(t) = (1 - \delta) C_D, \text{ si } D(t) > (1 - \delta) C_D;$$

para derivar una función de potencia de movimiento rápido $F(t)$ a partir de la señal indicativa de desequilibrios en la potencia suministrada a través de la red; y

para proporcionar al controlador de proceso industrial instrucciones para operar el componente de tal manera que se hagan ajustes a una tasa a la cual se transfiere energía entre el componente y la red de suministro de acuerdo con la función de potencia de movimiento rápido $F(t)$ superpuesta en la función de potencia de línea base $B(t)$; en donde

- 5 la función de potencia de movimiento lento $D(t)$ se deriva de tal manera que si se hacen ajustes a la tasa a la cual se transfiere energía entre el componente y la red de suministro de acuerdo con esta función $D(t)$, el componente se beneficiaría económicamente de una variación en el precio de la electricidad distribuida por la red durante el curso de un día.

La invención se describirá ahora, solamente a modo de ejemplo, y con referencia a los dibujos acompañantes, en los cuales:

- 10 La Figura 1 muestra un sistema de suministro de electricidad que incorpora una carga receptiva que puede operarse con una estrategia de consumo de potencia que está de acuerdo con la presente invención;

La Figura 2a es un gráfico representativo del consumo de potencia frente al tiempo para un dispositivo de carga, o grupo agregado de dispositivos, que proporciona un servicio que responde a frecuencia a una red de suministro;

- 15 La Figura 2b es un gráfico representativo del consumo de potencia frente al tiempo para un dispositivo de carga que practica evitación de precios pico;

La Figura 3 es un diagrama de flujo que representa etapas de proceso involucradas en la implementación de una estrategia de consumo de potencia dual para cargas eléctricas binarias.

- 20 En la Figura 1 se ilustra un sistema de suministro de potencia eléctrica indicado generalmente por 10. El sistema de suministro de potencia eléctrica 10 comprende uno o más generadores de potencia 12 y una pluralidad de cargas eléctricas 14, 16. Los generadores de potencia 12 suministran energía eléctrica a las cargas eléctricas 14, 16 a través de una red de distribución de potencia eléctrica 18 (de aquí en adelante "la red 18").

- 25 En esta realización específica, no se considera que los generadores estén proporcionando un servicio de acuerdo con esta invención. Esto no se debe a que sean incapaces, es simplemente por conveniencia. Será claro para un experto en la técnica que, si un generador satisface criterios de rendimiento adecuados, será posible implementar esta invención con ese generador. Sin embargo en lo que sigue, la descripción se centrará en la operación de carga.

- 30 Aunque representados juntos en la Figura 1, los generadores de potencia 12 no deben considerarse del mismo tipo. Algunos pueden ser centrales eléctricas de carbón, otros parques eólicos, generadores hidroeléctricos, o cualquiera de un número de sistemas conocidos que son capaces de generar electricidad y suministrarla a una red. En general, cada generador tendrá un acuerdo con el gestor de red para suministrar una cantidad establecida de electricidad a la red. Esta cantidad establecida puede ajustarse de acuerdo con los requisitos contractuales del generador con el fin de proporcionar un grado de equilibrio a la red.

- 35 Las cargas eléctricas 14, 16 son aún más variadas en su naturaleza. Generalmente, extraen potencia desde la red a pedido y solo un subconjunto limitado es capaz de proporcionar un servicio receptivo para contrarrestar el desequilibrio de red. Sin embargo aquellos que son capaces pueden adaptarse sobre una base individual o como un agregado de una pluralidad de cargas que se operan colectivamente para proporcionar un servicio de carga receptivo, que se adapta para ayudar a equilibrar el suministro y demanda de red.

- 40 En el caso de cargas eléctricas, esta presente invención se relaciona principalmente con cargas que son consumidores significativos de electricidad. Esto incluirá, por ejemplo, procesos industriales, vehículos eléctricos así como sistemas de calentamiento y refrigeración. Sin embargo no hay ninguna razón técnica por la que esta invención no pueda implementarse con cargas que consuman menos electricidad, es simplemente que es poco probable que el beneficio económico de tal carga sobrepase el coste.

- 45 Hay claramente un incentivo financiero para que las cargas eléctricas minimicen la potencia extraída de la red en momentos cuando el coste es alto. Las cargas que tienen capacidad para almacenar energía de alguna forma en su interior son, durante los períodos de fijación de precios pico, capaces de recurrir a las reservas de energía que se han acumulado como resultado del consumo aumentado justo antes del período pico. Una batería es un ejemplo directo, que permite la variación en el nivel de carga que contiene mientras que retiene su capacidad de suministrar potencia a la red. Otro ejemplo es un Sistema de Gestión de Edificios (BMS), que mantiene la temperatura de edificio dentro de un rango centrado en un punto de ajuste nominal. Por lo tanto se puede considerar que el sistema almacena energía si la temperatura de edificio está por encima del valor mínimo de este rango.

- 50 Las cargas 14, 16 mostradas en la Figura 1 son cargas de procesos industriales, que tienen una capacidad para almacenar energía. Por supuesto, también se pueden conectar a la red otras cargas y tipos de cargas, pero estas no se muestran en la Figura. Las cargas de procesos industriales 14, 16 están todas asociadas con un controlador de proceso industrial local 20, 22. El controlador de proceso industrial 20, 22 es generalmente responsable de controlar y monitorizar el rendimiento de la carga. Para este fin, incluirá, o estará en comunicación con, un detector posicionado apropiadamente 24 que está dispuesto para monitorizar un parámetro que es indicativo de las reservas de energía
- 55

almacenadas dentro de la carga. Esto permite al controlador de proceso asegurar que las reservas de energía se mantengan dentro de un rango permitido a lo largo del proceso.

Los detalles del detector 24 dependerán del proceso industrial particular que proporciona la carga 14. Se adaptará para medir un parámetro que, necesariamente, dependerá de las características de carga y, en particular, de la forma en que se almacena la energía en el carga. Usando los ejemplos anteriores, una batería tendrá un controlador que está adaptado para inferir su Estado de Carga (SoC) instantáneo a partir de la observación del voltaje al cual la batería se carga o descarga. Por otro lado, el detector 24 para un BMS incluirá un termómetro, termopar o dispositivo similar para medir la temperatura del edificio que está bajo su control. Con otras cargas de procesos industriales en las cuales se necesita más de un parámetro para proporcionar una indicación fiable de las reservas de energía, puede ser apropiado tener dos o más detectores 24 asociados con cada controlador de proceso industrial 20, 22.

La diferencia entre los dos tipos de cargas y controladores mostrados en la Figura 1 es que un primer tipo 14, 20 está adaptado para participar en un servicio de carga receptivo que está siendo proporcionado a la red 18. Otras cargas 16, 22 no lo están. En este ejemplo se supone que las cargas industriales receptivas 14 son cargas binarias entre un grupo de cargas receptivas que proporcionan colectivamente el servicio. Las cargas 14 dentro del grupo pueden ser iguales o diferentes. Independientemente de los detalles de los componentes de grupo, en cualquier momento en el cual se exija una respuesta a un desequilibrio, se recurrirá a una única carga o subgrupo de cargas para proporcionar la respuesta en nombre del grupo. Hay muchos algoritmos de selección que se conocen en la técnica anterior que pueden emplearse para determinar qué carga o subgrupo de cargas particular proporciona la respuesta en cualquier momento. Se proporcionan ejemplos no limitantes por los algoritmos Open Energi FFR, a los que se hace referencia anteriormente. La selección puede ser sobre la base de demandas de respuesta previas hechas sobre cada carga, parámetros internos de carga y el grado de desequilibrio detectado en la red. Los detalles de estos algoritmos no son tan importantes para esta invención como su efecto. La gran mayoría busca distribuir las demandas de respuesta de manera uniforme entre todo el grupo de cargas, asegurando que cada carga respectiva soporte un coste similar en términos de su reducción en el rendimiento operativo normal. En tal situación, una duración típica de una "conmutación" de carga receptiva es decir el tiempo durante el cual se requiere una carga particular dentro de la cartera para ajustar su consumo como resultado del desequilibrio de red será del orden de unos pocos minutos.

Los algoritmos para operación de carga binaria que son adecuados para esta implementación son aquellos que tienen como un corolario de la distribución uniforme de la demanda, el efecto de baja utilización de cada carga individual dentro de cualquier período de "liquidación". En este contexto, un período de liquidación es un período de tiempo que es largo en relación con la duración de una conmutación de carga receptiva típica, pero mucho más corto que un día. Por ejemplo, un período de liquidación de 30 minutos es apropiado para FFR. Para una cartera de cargas binarias durante un largo período de tiempo (muchos períodos de liquidación), la demanda hecha en el grupo en conjunto para un servicio receptivo siempre será una pequeña fracción del consumo de electricidad total del grupo. Esta implementación actual, que permite que se implemente un servicio receptivo junto con alguna otra estrategia de consumo de electricidad de movimiento más lento, requiere, además, que la fracción de tiempo dentro de cualquier período de liquidación durante el cual se recurre a una carga individual que proporciona un servicio receptivo sea bajo. Este es el caso con los algoritmos descritos en la técnica anterior mencionada anteriormente, pero no es universal.

Para cargas no binarias, o de velocidad variable, los requisitos son diferentes. Tales cargas ajustarán continuamente su potencia operativa para contrarrestar los desequilibrios de red. Por lo tanto no formarán parte de una cartera de cargas en la cual solo se recurre a cada carga de manera intermitente para proporcionar una respuesta. Más bien, la condición de baja utilización en este caso es que el servicio receptivo se proporcionará, en todo momento, usando solo una pequeña fracción del consumo de electricidad total de la carga.

Cada carga receptiva 14 y controlador de proceso industrial 20 está asociado con un controlador de carga receptivo local 26. El controlador de carga receptivo 26 está conectado y en comunicación con el controlador de proceso 20, con el cual trabaja cooperativamente. El controlador de carga receptivo local 26 incluye, o está conectado a, un monitor de frecuencia 28, que está adaptado para monitorizar la frecuencia de electricidad suministrada por la red. El término "local" se usa para indicar que los controladores 26 están físicamente cerca de, o incluso integrales con, las cargas 14 bajo su control. Con componentes que están previstos para responder sobre una base de segundo a segundo a los desequilibrios de red 18, es importante minimizar los retrasos de comunicación. En algunas realizaciones (no se muestran) una pluralidad de cargas eléctricas 14 pueden controlarse colectivamente como un grupo mediante un único controlador de carga 26.

Monitorizar las fluctuaciones transitorias en frecuencia es el enfoque actualmente preferido para detectar desequilibrios en el suministro de potencia a través de la red 18, pero monitores alternativos adaptados para detectar fluctuaciones en otras características de la red de suministro de electricidad 18, que son representativos de desequilibrios en la potencia suministrada a través de la red 18, están previstos y pueden sustituirse por el monitor de frecuencia 28. En realizaciones alternativas, adecuadas para mercados tales como la red de distribución PJM en los Estados Unidos y la red AEMO en Australia, el monitor de frecuencia 28 puede reemplazarse por un receptor. Ambas de estas redes se automonitorizan ya que el operador de red detecta desequilibrios. Los algoritmos para determinar el grado de desequilibrio, o al menos el grado de corrección requerida, pueden ser más complejos que simplemente monitorizar hasta qué punto la frecuencia de red se desvía de un valor nominal. Por ejemplo, se puede incluir un factor que tenga en cuenta la tasa de cambio de frecuencia. Sin embargo una vez que se detecta un desequilibrio, la red enviará una

señal a cualquier carga que sea requerida para ajustar su consumo de potencia en respuesta. Esta presente invención se puede implementar con cualquier algoritmo receptivo que asegure, con alta probabilidad, que cualquier carga individual solo se requiere para proporcionar su servicio receptivo durante una pequeña fracción de tiempo dentro de un período de liquidación.

El controlador de carga local 26 está adaptado para enviar comandos relacionados con el consumo de potencia de carga al controlador de proceso industrial 20. Si esto requiere un ajuste de consumo de potencia, por cualquier razón, esto será implementado por el controlador de proceso 20, siempre que las reservas de energía de carga se mantengan dentro de un rango operativo aceptable. Si las reservas de energía de carga están fuera de este rango, o si el ajuste al consumo de potencia solicitado por el controlador de carga local 26 lo llevará fuera de este rango, el controlador de proceso industrial 20 ya no responderá a las señales de controlador de carga local 26 y procederá a operar la carga 14 de manera independiente. Además, indicará al controlador de carga local 26 que la carga 14 ya no está disponible para proporcionar un servicio de carga receptivo.

El controlador de carga local 26 también está adaptado para monitorizar la frecuencia de red, según se detecte por el monitor de frecuencia 28 o de otro modo.

En esta implementación binaria, las cargas proporcionan su servicio receptivo de acuerdo con un algoritmo que asigna frecuencias de activación a cada carga dentro de la cartera. La distribución de la respuesta a demanda está asegurada por la reasignación habitual de las frecuencias de activación. El controlador de carga local 26 por lo tanto también está adaptado para retener información en cuanto a la frecuencia de activación a la cual la carga 14 debe conmutar desde la operación normal a uno que responda a una desviación de frecuencia de red. Si la frecuencia de red se desvía de su valor nominal hasta un punto de que se excede la frecuencia de activación de la carga, el controlador de carga local 26 enviará una señal al controlador de proceso industrial 20 indicando que se exige un servicio receptivo y (si es requerido) el nivel de la respuesta. De manera similar, el controlador de carga local determinará cuándo ya no se requiere un servicio de carga receptivo y notificará al controlador de proceso industrial 20 para que retorne a un nivel previo de operación. El controlador de proceso industrial 20 está adaptado para reportar parámetros de proceso de carga, por ejemplo reservas de energía almacenadas, al controlador de carga local 26.

El controlador de carga local 26 incluye una interfaz de comunicaciones que está adaptada para comunicación bidireccional. Esto permite el intercambio de datos a través de una red entre el controlador de carga local 26 y un servidor de demanda central remoto 30. El servidor de demanda central 30 puede estar en comunicación con una pluralidad de controladores de carga locales 26. Las señales de datos enviadas por el servidor de demanda central 30 se relacionan con la gestión de potencia de acuerdo con un criterio que varía relativamente de manera lenta. En este ejemplo, se relaciona con una estrategia de evitación de precios pico. A diferencia del servicio de carga receptivo, los ajustes al consumo de potencia hechos mientras que se involucra en evitación de precios pico se conocen con días, semanas o meses de antemano. En comparación, cualquier retraso de temporización en la transmisión de información a través de una red es insignificante. Esto significa que un único servidor de demanda central 30 puede proporcionar información sobre ajustes de potencia a muchos controladores de carga locales 26 a través de la red. El patrón de ajuste solicitado se adapta a los requisitos operativos específicos de cada carga 14, como se explicará con más detalle a continuación. Los datos proporcionados por el controlador de carga local 26 al servidor de demanda central 30 pueden, por ejemplo, incluir información relacionada con la potencia total instantánea consumida por la carga. Con el tiempo, esto permitirá que el servidor de demanda central 30 registre y analice los patrones de consumo de potencia de carga y así verificar el éxito o no de la carga receptiva y de las estrategias de evitación de precios pico.

La Figura 2 ilustra gráficamente la variación de patrones de consumo de potencia durante unas pocas horas para una carga cuando se opera (a) un servicio que responde a frecuencia del lado de demanda y (b) un esquema de evitación de precios pico. Cada gráfico 34, 36 traza el consumo de potencia por un dispositivo de carga de velocidad variable (o grupo agregado de cargas binarias) frente al tiempo en el día.

Con referencia a la Figura 2a, se nota que muchos operadores de sistemas de distribución de electricidad, en Europa y otros lugares, requieren que se comiencen medidas de estabilización tan pronto como la frecuencia de red se desvíe en más de 0.01 Hz de la frecuencia objetivo de 50 Hz. En el sistema 10, la frecuencia de la red es monitorizada por el monitor de frecuencia 28. Si la frecuencia de red aumenta a 50.01 Hz, o cae a 49.99 Hz, se anota este umbral y al menos uno de los controladores de carga 26 responde ajustando el consumo de potencia de su respectiva carga 14 para contrarrestar el desplazamiento de frecuencia. En el Reino Unido, se requiere que los proveedores de un servicio de carga receptivo satisfagan un número de criterios de rendimiento específicos. Por ejemplo, para cumplir con las condiciones de una Respuesta de Frecuencia Firme (FFR), se requiere que los proveedores se conecten dentro de 10 o 30 segundos de detectar una desviación de frecuencia y estar disponibles para proporcionar un mínimo de 1 MW de energía de respuesta. La Respuesta de Frecuencia Mejorada (EFR) es un servicio que puede proporcionar un ajuste de potencia total en 1 segundo (o menos) de registrar una desviación de frecuencia. Dado que la frecuencia de red se monitoriza sobre una base de segundo a segundo, los proveedores de FFR y EFR en el Reino Unido potencialmente cambiarán el consumo de potencia de carga agregada en una escala de tiempo similar. Esto se refleja en las rápidas fluctuaciones en el consumo total de potencia 24 de los dispositivos agregados que operan un servicio de FFR, como se observa en la Figura 2a.

Con referencia a la Figura 2b, se muestra el consumo de potencia de una carga de ejemplo que opera con la evitación de precios pico. Para este sistema de red, la electricidad consumida entre las 4 y 7pm cuesta más que en otros momentos del día. El nivel usual de consumo de potencia de esta carga, ya que opera con sus especificaciones, está en un nivel mostrado entre las 2 y 3pm y 7 y 8pm. Sin embargo a las 3pm, el dispositivo se ejecuta a su máxima potencia durante 1 hora. Esto le permite almacenar suficientes reservas de energía que pueden permitir operar en un consumo de potencia cero entre las horas pico de 4 a 7 pm. Luego retorna a su potencia operativa normal. Por supuesto, este es solo un ejemplo de comportamiento que permite la evitación de precios pico. Los detalles específicos dependerán de la carga en cuestión. Por ejemplo, podría requerirse más de una hora a máxima potencia para acumular reservas de energía completas. Las reservas de energía pueden no ser suficientes para mantener la operación en un consumo de potencia cero a lo largo del período pico y por lo que se requiere alguna forma de operación de potencia reducida. Además, la carga se puede operar en un mayor consumo de potencia después del período pico con el fin de acumular un almacenamiento de energía agotado. Independientemente del detalle específico, se puede ver que la evitación de precios pico da como resultado un perfil de consumo de potencia que varía lentamente en el tiempo 36.

La evitación de precios pico no es el único comportamiento que da como resultado un consumo de potencia variable de movimiento lento. En este contexto, "movimiento lento" normalmente significa que no debería haber más de un cambio cada 30 minutos, mientras que "movimiento rápido" puede cambiar cada segundo. La mayoría de las redes de distribución de electricidad ofrecen múltiples mercados en los cuales compran potencia y el derecho a exigir una respuesta flexible tanto de los generadores como de las cargas. Se dan incentivos y se imponen penalizaciones a los proveedores para fomentar la operación dentro de sus límites contratados. Aunque la participación en el mercado de frecuencias receptivas requerirá una respuesta rápida, un número de otros mercados solo requerirá que el consumo de potencia varíe en un patrón de movimiento lento. Por ejemplo, para participar en la optimización Diaria, la potencia se compra a un precio que se establece un día de antemano de su uso y por lo que los niveles de potencia operativa se establecen para que coincidan con la cantidad comprada. El servicio de mecanismo de equilibrio proporciona una respuesta instruida manualmente para corregir errores de pronóstico y pérdidas inesperadas en generación o demanda. Estos tipos de variaciones se conocen con algún tiempo de antemano. Otras estrategias que exigen perfiles de consumo de potencia de movimiento lento incluyen el proyecto TERRE, persecución de desequilibrios, señales de control DNO, entre muchas otras que se conocen por aquellos en el campo.

En el pasado, no se ha considerado posible que las cargas que se involucraban en evitación de precios pico participaran al mismo tiempo en un servicio que responde a frecuencia. Esto evita que los operadores de tales cargas disfruten de los beneficios financieros de estos mercados. También significa que las cargas tenderán a usar su capacidad para proporcionar otros servicios a la red, que son compatibles con la función de movimiento lento, reduciendo su capacidad para proporcionar servicios tales como FFR y por lo tanto restando valor a la calidad de servicio de equilibrio que se pueda proporcionar a la red. De manera similar, un número de generadores pueden ejecutarse con una capacidad variable con el fin de ingresar potencia a la red de acuerdo con una función de mercado de movimiento lento. Hasta la fecha, a tales generadores también se les ha impedido la participación simultánea en un servicio que responde a frecuencia tal como FFR.

Sin embargo con esta invención, tales cargas y generadores - específicamente, aquellos que tienen una capacidad para almacenar energía de alguna forma - son capaces de involucrarse en ambas prácticas simultáneamente. Esta invención se relaciona con la situación en la cual el componente (carga o generador) es operable con un consumo de potencia totalmente variable. Si el componente es un componente binario, se divulga un método alternativo. Las implementaciones en ambas situaciones se describirán en detalle a continuación.

Sin embargo en visión general, una carga será capaz de participar libremente en una práctica tal como FFR, que tiene una variación de movimiento rápido en el consumo de potencia $F(t)$, mientras que al mismo tiempo apunta a seguir una estrategia de movimiento lento, siempre que se permitan pequeñas desviaciones de un consumo de potencia ideal de movimiento lento. Con el fin de asegurar que las desviaciones permanezcan pequeñas, se debe derivar un consumo de potencia de línea base de movimiento lento $B(t)$ de tal manera que, en promedio, la potencia total consumida por el activo que practica FFR coincidirá, con alta probabilidad, con la potencia total consumida si no practicara FFR y siguiera solo la estrategia de movimiento lento.

La referencia anterior a "alta probabilidad" significa que, para una carga que proporciona FFR durante una cantidad de tiempo fija, como ese período de tiempo tiende a infinito, la probabilidad tiende a 1.

Con la función $B(t)$, la potencia total instantánea consumida en el tiempo t por la carga que practica FFR se puede escribir:

$$P(t) = B(t) + F(t)$$

Es decir, la potencia instantánea se puede modelar como una superposición de dos funciones: la función de línea base de movimiento lento $B(t)$ y el término de FFR de movimiento rápido $F(t)$. Debido a las diversas restricciones tanto en la fluctuación de potencia media e instantánea de un activo de velocidad variable que proporciona FFR o de un activo binario que está participando como uno de un grupo de activos que proporcionan un servicio de carga receptivo, este modelo es válido, siempre que se siga el algoritmo correcto para derivar $B(t)$.

El perfil de consumo de potencia exigido por la estrategia de movimiento lento, por ejemplo evitando el consumo en momentos de fijación de precios pico se denominará el perfil de demanda de movimiento lento y se denotará $D(t)$. Se debe ejercer precaución con el enfoque directo: establecer la función de línea base $B(t)$ igual al perfil de demanda de movimiento lento $D(t)$, dando como resultado que la potencia total consumida por la carga sea $D(t) + F(t)$. Si la desviación del perfil de demanda ideal es significativa, entonces el coste será demasiado grande para cualquier recompensa derivada como resultado de practicar una estrategia de acuerdo con $F(t)$. Además, en el caso de una carga binaria, los errores serán significativamente mayores. Tal carga solo puede estar "encendida" o "apagada": si ambas estrategias requieren simultáneamente que la carga esté "encendida", la superposición dará como resultado que la carga consuma el doble de su potencia máxima, una situación claramente imposible. La carga por lo tanto es forzada a desviarse desde una de las estrategias que está siguiendo, lo cual muy probablemente acarreará penalizaciones financieras.

El enfoque alternativo seguido en esta divulgación es usar, en lugar de $D(t)$, la función derivada $B(t)$ como el perfil de consumo de potencia de línea base. $B(t)$ está restringido de tal manera que durante un período de tiempo predeterminado (un período de liquidación), la cantidad total de potencia consumida por la carga tiene una alta probabilidad de ser la misma que la que se habría consumido si la carga estuviera operando de acuerdo con el perfil de demanda de movimiento lento. El período de tiempo se selecciona de tal manera que sea mucho mayor que una duración típica para la cual se requiere un ajuste de potencia que responde a frecuencia y corto en comparación con la longitud de tiempo durante la cual se requiere un consumo de potencia ajustado para el perfil de demanda de movimiento lento. La duración de un ajuste que responde a frecuencia dependerá, por supuesto, de los detalles del algoritmo usado pero normalmente es alrededor de 1 - 3 minutos. El resultado es que se permite que la carga se involucre libremente en FFR (por ejemplo) pero también debe seguir un perfil de línea base, que está sujeto a las restricciones indicadas anteriormente. Por lo tanto si el día se divide en una secuencia continua de períodos de liquidación y se sigue esta estrategia para cada período de liquidación sobre el curso del día, entonces se deduce que aunque habrá algunas desviaciones a corto plazo del perfil ideal de demanda de movimiento lento causadas por la participación en FFR, las consecuencias se minimizan en cada período de liquidación. Por lo tanto se mantiene bajo el coste global para la carga que participa en ambas estrategias de ajuste de potencia.

Como se anotó previamente, la implementación de estrategias de consumo de potencia que apuntan a un coste mínimo diferirá dependiendo de si la carga es operable con consumo de potencia variable o simplemente debe estar ya sea encendida o apagada. A continuación se establecen por separado ejemplos de algoritmos que se usan en estos diferentes escenarios.

Activo de demanda de velocidad variable

Un activo de demanda de velocidad variable es una carga que tiene la capacidad de consumir electricidad a una tasa configurable. Es decir, su consumo de potencia instantáneo es $P(t)$, donde $0 \leq P(t) \leq C_D$, siendo C_D el consumo de potencia máximo de la carga.

Con referencia a la Figura 1 y al caso de una carga de velocidad variable 14, ahora se describirán las etapas para operar la carga 14 de tal manera que pueda participar simultáneamente en dos estrategias separadas de ajuste de potencia. En preparación, el servidor de demanda central 30 es notificado de o tiene acceso a una base de datos en la cual se almacena información de relevancia para el perfil de demanda de movimiento lento $D(t)$. Para la evitación de precios pico, esto incluirá el coste de la electricidad a lo largo del día. También incluirá datos históricos que son específicos de la carga o tipo de carga 14 que está siendo operada de acuerdo con esta invención. Estos pueden obtenerse desde el controlador de proceso industrial local 20, y por lo tanto específicos de la carga, o pueden definirse genéricamente con respecto a cargas del mismo tipo. Tales datos incluirán restricciones operativas tales como, pero no limitadas a, la variación de las reservas de energía almacenadas como un función de la potencia operativa. Más adelante se describirá detalle adicional, en relación con procesos industriales de ejemplo. A partir de estos datos, el servidor de demanda central calcula un perfil de demanda de movimiento lento optimizado $D(t)$ que ofrece los costes operativos más bajos, sujeto a las restricciones operativas de la carga 14. Este perfil de demanda $D(t)$ se deriva bajo el supuesto de que este será la única estrategia de ajuste de potencia en la cual estará participando la carga. El servidor de demanda central 30 puede disponerse para proporcionar perfiles de demanda optimizados $D(t)$ para una o más cargas 14 que están conectadas a la red 18.

El perfil de demanda optimizado $D(t)$ se transmite a través de la red al controlador de carga receptivo local 26 o a cada controlador de carga receptivo local 26, si más de una carga está siendo operada bajo el control de este servidor de demanda 30. El controlador de carga receptivo local 26, para una carga de velocidad variable, establece la función de línea base $B(t)$:

$$B(t) = C_D - \Delta, \text{ si } C_D - \Delta < D(t) \leq C_D;$$

$$B(t) = \Delta, \text{ si } 0 \leq D(t) < \Delta; \text{ y}$$

$$B(t) = D(t) \text{ en caso contrario.}$$

Donde Δ es una pequeña constante ($\ll C_D$), cuyo origen se hará evidente más adelante. Hasta la fecha, tal superposición directa de $D(t)$ y $F(t)$ se ha considerado demasiado costosa. Es decir, es algo sorprendente que este enfoque funcione. Solo cuando $D(t)$ se aproxima a cero o a potencia operativa total que no puede usarse directamente como la función de línea base y se hace un pequeño ajuste Δ . Este pequeño ajuste solo es necesario con el fin de

El monitor de frecuencia local 28 proporciona una indicación de la frecuencia de red al controlador de carga receptivo 26. El controlador de carga local 26, como se conoce en la técnica de servicios de carga receptivos, calculará cualquier ajuste al consumo de potencia de carga que tenga que hacerse de acuerdo con una desviación de frecuencia detectada. Es decir, el controlador de carga local 26 calculará $F(t)$.

El controlador de carga receptivo local 26 luego instruye al controlador de proceso industrial local 20 que opere la carga de tal manera que retire potencia de la red de acuerdo con un perfil:

$$P(t) = B(t) + F(t).$$

Esta estrategia operativa permite que el consumo de línea base de la carga siga estrechamente la señal de movimiento lento mientras que, al mismo tiempo, permite la participación total en un servicio de FFR. El consumo de línea base solo se desvía del perfil de demanda de movimiento lento en tales momentos en que la carga puede estar operando alrededor de potencia total o alrededor de potencia cero.

Hay que anotar que la participación simultánea en los dos servicios diferentes operando una carga de acuerdo con una superposición de dos perfiles de consumo de potencia es dependiente de que se cumplan las tres condiciones siguientes:

- La carga es una carga de velocidad variable y por lo que no hay restricción en los ajustes de potencia que se pueden hacer, siempre que el consumo se mantenga dentro de los límites;
- La función de movimiento rápido $F(t)$ satisface una condición de baja utilización; y
- $F(t)$ satisface una condición de reversión a la media.

Por baja utilización se entiende que siempre que se recurra al activo para proporcionar el servicio que responde a frecuencia $F(t)$, entonces es probable que el tamaño del ajuste de potencia requerido sea solo una pequeña fracción de la potencia total disponible. Es decir:

$$|F(t)| \leq \delta C_D$$

donde, con alta probabilidad, $\delta \ll 1$.

De hecho, se reconoce que en general, para una carga de velocidad variable, las tasas de utilización de FFR están alrededor de 6%, lo cual representa solo una pequeña perturbación en el perfil de consumo de potencia de un activo. Es decir, la fracción de capacidad usada para proporcionar respuesta FFR típicamente es 6% de la disponibilidad de FFR licitada: $\delta \sim 0.06$. Se pueden usar otros algoritmos para implementar FFR (u otro servicio que responde a frecuencia) que tienen diferentes tasas de utilización pero, siempre que $\delta \ll 1$, estos otros algoritmos todavía satisfarán la condición de baja utilización.

Mientras que la condición de baja utilización se aplica al ajuste instantáneo de potencia que responde a frecuencia, la condición de reversión a la media se relaciona con el comportamiento de la respuesta $F(t)$ durante un período extendido de operación T . En cualquier instante dado de respuesta, el ajuste de $F(t)$ puede ser positivo (carga aumentada) o negativo (generación aumentada). Por lo tanto durante el período de tiempo T , se deduce que, en algunas ocasiones, el ajuste de respuesta será positivo y, en otras, será negativo. Idealmente, en el transcurso de un período de liquidación T , el servicio receptivo será neutral en energía es decir el valor medio de $F(t)$ será cero. En la práctica, este rara vez es el caso y el valor medio de $F(t)$ durante este período está limitado por un valor ϵ . La condición de reversión a la media requiere que el valor medio de los ajustes de potencia receptivos hechos durante un período de liquidación T (es decir ϵ) sea, con alta probabilidad, pequeño como fracción de potencia utilizada. Es decir:

$$\frac{1}{T} \int_T F(t) dt \leq \epsilon$$

donde, $\epsilon \ll \delta \times C_D$.

Es decir, el ajuste medio de potencia receptivo a lo largo de ϵ es significativamente menor que el ajuste de potencia máximo probable hecho en cualquier punto durante el período extendido T para una carga con tasa de utilización δ .

La condición de reversión a la media se satisface principalmente debido a que $F(t)$ será positiva en algunos momentos y negativa en otros durante el curso de un período de liquidación T .

Se recordará que la función de línea base $B(t)$ se establece, para un activo de demanda de velocidad variable, para que sea igual a la función de demanda de movimiento lento $D(t)$, a menos que la función de demanda se acerque al consumo de potencia máximo o mínimo para el activo. Si $D(t)$ se acerca a estos valores limitantes, $B(t)$ se desplaza desde $D(t)$ en una cantidad Δ , siendo el valor de Δ seleccionado de tal manera que se deje suficiente altura libre para que el activo proporcione un servicio que responde a frecuencia $F(t)$, si se recurre a hacerlo. Si el activo satisface la condición de baja utilización, entonces es poco probable que el valor de $F(t)$ exceda δC_D , $\delta \ll 1$ en cualquier punto en el tiempo. Por lo tanto se deduce que Δ solo necesita establecerse en δC_D para que el servicio receptivo se acomode completamente. Como $\delta \ll 1$, se deduce que $\Delta \ll C_D$ y por lo que este ajuste a $B(t)$ representa solo una desviación muy pequeña del perfil de demanda ideal.

En realizaciones alternativas, la función de línea base siempre sigue la función de demanda ideal, incluso cuando ésta se aproxima a C_D o 0. En este escenario, en los momentos en los cuales la carga está operando cerca de estos límites, la carga tiene que retirarse de la cartera de cargas que están disponibles para proporcionar la respuesta de equilibrio. Es decir, si la línea base es C_D , la carga no puede proporcionar un servicio de equilibrio en caso de una excursión de red de alta frecuencia, aunque todavía estará disponible para reducir el consumo de potencia en respuesta a una excursión de baja frecuencia. De manera similar, si la carga está operando en una línea base de potencia cero, entonces ya no podrá proporcionar un servicio receptivo a una excursión de baja frecuencia, aunque estará disponible para participar en una respuesta si la frecuencia de red se vuelve demasiado alta.

Cuál de estas realizaciones alternativas se prefiere estará dictada en gran medida por el coste económico: si la penalización por la no disponibilidad en el servicio de carga receptivo excede el coste aumentado de la desviación en una cantidad Δ desde la función de demanda ideal de movimiento lento.

En general, el consumo de potencia promedio de un activo que se deja libre para seguir cualquier demanda de respuesta $F(t)$ hecha sobre este y operado de acuerdo con una función de línea base $B(t)$ que sigue el perfil de demanda de movimiento lento durante el período $T(\hat{P}_T)$ es dado por:

$$\hat{P}_T = \frac{1}{T} \int_T B(t) dt + \frac{1}{T} \int_T F(t) dt$$

Como se indicó anteriormente, el valor medio de $F(t)$ durante el período T es menor que o igual al valor ε , que es un valor pequeño, siempre que se cumpla con la condición de reversión a la media. Es decir:

$$\begin{aligned} \hat{P}_T &\leq \frac{1}{T} \int_T B(t) dt + \varepsilon \\ &\leq \hat{B}_T + \varepsilon \end{aligned}$$

donde \hat{B}_T es el valor medio del término de línea base durante este período de tiempo T . Como \hat{B}_T fue derivado para asegurar que coincidiera con el perfil de demanda promedio ideal de movimiento lento \hat{D}_T , se deduce que el coste de operar la carga 14 de acuerdo con este algoritmo es una pequeña desviación (ε) de un perfil de consumo de potencia promedio ideal. Esto representa un coste aceptable que, en la gran mayoría de los casos, se sobrepasará mediante la recompensa por la participación en un servicio de carga receptivo.

Activo de demanda de velocidad no variable

En un activo de demanda de velocidad no variable, la potencia extraída por la carga puede ser solo uno de dos valores: capacidad operativa cero o total. Ejemplos de tales cargas son los compresores (para refrigeración) y los calentadores industriales operados por relé tal como un tanque de betún. Estas cargas no pueden participar efectivamente tanto en evitación de precios pico como en un servicio que responde a frecuencia tal como FFR mediante una superposición directa de ambos perfiles de consumo de potencia. El activo está ya sea encendido o apagado y por lo que $F(t)$ será igual a C_D cuando esté encendido y respondiendo a los requisitos de FFR.

Como se detalló anteriormente, el algoritmo mediante el cual fue derivada la función de línea base $B(t)$ para el activo de velocidad variable requería que la función de movimiento rápido $F(t)$ satisficiera una condición de baja utilización. Es decir, con alta probabilidad:

$$|F(t)| \leq \delta C_D, \delta \ll 1$$

Claramente, en el caso de un activo de velocidad no variable, esta condición ya no se cumplirá: $\delta = 1$, si se requiere una conmutación receptiva. Además, ya no es posible derivar la función de línea base $B(t)$ en aislamiento de la impredecible $F(t)$. La condición $B(t) + F(t) \leq C_D$ debe satisfacerse ya que el activo no se puede operar a más de la

potencia total y por lo que $B(t)$ debe responder a cambios en $F(t)$. Es decir, se requiere un algoritmo más complejo para derivar la función de línea base $B(t)$.

Sin embargo para un activo de velocidad no variable la condición de reversión a la media sí se cumple. Esto se satisface principalmente como resultado de dos factores:

- 5 • si $F(t)$ es positiva en algunos momentos y negativa en otros durante el curso del período de liquidación T ; y
- si una única carga participa como un miembro de un grupo receptivo en el mercado de FFR (o similar) entonces esta carga, con toda probabilidad, solo se recurrirá de manera intermitente para proporcionar una respuesta, lo cual a su vez significa que $F(t)$ será distinta de cero solo durante una pequeña fracción del período de tiempo T (siempre que el algoritmo de FFR que sustenta la operación de grupo asegure una distribución suficientemente uniforme de las respuestas alrededor del grupo).

Para una carga 14 que es un activo de velocidad no variable, comienza el método para derivar la función de línea base $B(t)$, como con el caso de velocidad variable: el servidor de demanda central 30 calcula un perfil de demanda optimizado de movimiento lento $D(t)$ que ofrece los costes operativos más bajos, sujeto a las restricciones operativas de la carga 14. Este perfil de demanda $D(t)$ se deriva bajo el supuesto de que esta será la única estrategia de ajuste de potencia en la cual estará participando la carga. El servidor de demanda central 30 puede disponerse para proporcionar perfiles de demanda optimizados $D(t)$ para una o más cargas 14 que están conectadas a la red 18.

Un diagrama de flujo que ilustra las etapas involucradas para implementar una estrategia de consumo de potencia que permita la participación tanto en un servicio de movimiento rápido $F(t)$, por ejemplo FFR, como siguiendo el perfil de demanda de movimiento lento $D(t)$ derivado mediante servidor de demanda central 30, se establece en la Figura 3. Para facilidad de referencia, se supondrá que el servicio de movimiento rápido $F(t)$ es FFR, aunque esto es solo a modo de ejemplo y no limitante.

En una primera etapa 40, el día se divide en N períodos de liquidación con tiempos de inicio t_k , $k = 1, 2, \dots, N, N+1$ (siendo t_{N+1} medianoche). No hay ningún requisito para que la longitud de cada período de liquidación sea igual aunque, en la práctica, para FFR y evitación de precios pico un período de liquidación de 30 minutos es efectivo y de acuerdo con las regulaciones del mercado de electricidad del Reino Unido.

En una segunda etapa 42, para cada período de liquidación, el servidor de demanda central 30 calcula la tasa de consumo de potencia promedio a la cual habría estado operando la carga 14 si hubiera seguido solamente el perfil de demanda de movimiento lento. Es decir, para el k ésimo período de liquidación, la tasa de consumo de potencia de demanda promedio \hat{D}_k es dada por:

$$\hat{D}_k = \frac{1}{t_{k+1} - t_k} \int_{t_k}^{t_{k+1}} D(t) dt$$

Este perfil de demanda medio \hat{D}_k , $\forall k$ se envía al controlador de carga receptivo local 26.

Durante la siguiente secuencia de etapas, el controlador de carga receptivo local 26 deriva una función \hat{B}_k para cada período de liquidación con base en el requisito de que durante la longitud T_k del período de liquidación, el consumo de potencia promedio de la carga \hat{P}_k debe ser tan cercano a \hat{D}_k como sea posible. Como se indicó previamente, la carga 14 puede ya sea consumir potencia a una tasa C_D o estar apagada. Es decir, en cualquier instante dado en tiempo t , $P(t)$ debe ser ya sea 0 o C_D . Por lo tanto con el fin de restringir el consumo de potencia promedio durante el k ésimo período de liquidación a \hat{D}_k , la carga 14 debe estar encendida durante la fracción apropiada del período T_k . Es decir, derivar $B(t)$ de tal manera que durante el k ésimo período de liquidación $\hat{B}_k = \hat{D}_k$, $\forall k$.

Por lo tanto la carga es accionada en un patrón de encendido/apagado modulado de tal manera que, a lo largo de la longitud del período de liquidación, la duración total de las fases de "encendido" coincida con la función de demanda de movimiento lento deseada.

En esta derivación de $B(t)$, la contribución de $F(t)$ al consumo total de potencia se ignora, al igual que con el activo de velocidad variable. Para el activo de velocidad variable, el coste fue mostrado arriba como una pequeña desviación, ϵ , del perfil de consumo de potencia de demanda ideal. Fue encontrado que este coste era aceptablemente bajo para situaciones en las cuales $F(t)$ satisfacía la condición de baja utilización y reversión a la media. Es decir, si $F(t)$ absorbe solo una pequeña porción de la potencia disponible y es tan probable que sea positiva como que sea negativa.

En el caso del activo de velocidad no variable, $F(t)$ debe, si es distinta de cero, absorber toda la potencia disponible. Derivar $B(t)$ de \hat{D}_k solamente significa que, para el k ésimo período de liquidación:

$$\begin{aligned}\widehat{P}_k &= \frac{1}{t_{k+1} - t_k} \int_{t_k}^{t_{k+1}} B(t) dt + \frac{1}{t_{k+1} - t_k} \int_{t_k}^{t_{k+1}} F(t) dt \\ &= \widehat{D}_k + \frac{1}{t_{k+1} - t_k} \int_{t_k}^{t_{k+1}} F(t) dt\end{aligned}$$

Se puede ver fácilmente que si se requiere que el activo proporcione una conmutación de respuesta de FFR durante este período, la contribución hecha por el término $F(t)$ puede ser significativa. No requerirá mucho alargamiento del tiempo de "encendido" en respuesta a un requisito de FFR para aumentar la demanda de tal manera que, durante la longitud del período de liquidación, el consumo de potencia promedio \widehat{P}_k sea significativamente mayor que el ideal. De manera similar, si el desequilibrio de red requiere una demanda reducida y un acortamiento del tiempo de "encendido" del activo durante el período de liquidación, el valor de \widehat{P}_k puede ser significativamente menor que el requerido para seguir el perfil ideal de demanda de movimiento lento. El activo entonces puede que no esté almacenando suficiente energía para alcanzar un período de fijación de precios pico. Por lo tanto también se necesita derivar $B(t)$ mediante un método que tenga en cuenta las consecuencias de cualquier conmutación de FFR que se haga durante el período de liquidación.

En la etapa 44, el controlador de carga receptivo local 26 comienza su algoritmo para calcular $B(t)$ durante el k ésimo período de liquidación. Cada período de liquidación se divide en subintervalos de modulación. Un subintervalo de modulación del k ésimo período de liquidación comienza en un tiempo s_i ($t_k \leq s_i < t_{k+1}$) y finaliza en un tiempo s_{i+1} ($s_i < s_{i+1} \leq t_{k+1}$). Si fuera desperdiciado el efecto de $F(t)$ entonces $B(t)$ podría, por ejemplo, derivarse "encendiendo" el activo durante un subintervalo, "apagándolo" para el siguiente, "encendido", "apagado", etc. y estableciendo la duración de los subintervalos de tal manera que la fracción del período de liquidación durante la cual el activo esté "encendido" lleve a un consumo promedio de \widehat{D}_k . Sin embargo desperdiciar $F(t)$ provoca que se introduzcan errores, que solo se agravarán en los períodos de liquidación subsecuentes. Para evitar esto se adopta un sistema de asignación dinámica de subintervalos.

Para el primer subintervalo s_1 , $B(s_1)$ se establece 44 ya sea en C_D o 0 y se envía la instrucción apropiada 46 al controlador de proceso industrial 20. Esta configuración puede ser mediante asignación aleatoria o siguiendo una regla inicial tal como $B(s_1) = C_D$ si $\widehat{D}_k \geq 0.5 C_D$ y 0 en caso contrario. Después de esto cada l minutos, el método ejecuta un bucle de asignación de subintervalos. Es decir, el valor de $B(t)$ se determina para el siguiente (mésimo) subintervalo. Esto comienza en la etapa 48 con el controlador de carga receptivo local verificando si la carga 14 está proporcionando actualmente un servicio de carga receptivo. Si es así, no se cambia nada y la carga 14 se deja libre para participar en FFR durante el siguiente subintervalo. Si no está siendo colocado ningún requisito de FFR en la carga 14 entonces, en la etapa 50, el consumo de potencia total promedio de la carga durante todos los subintervalos previos del k ésimo período de liquidación ya sea se calcula o se obtiene de otro modo mediante el controlador de carga receptivo 26. Para el m ésimo subintervalo, el consumo de potencia total promedio hasta este subintervalo es dado por:

$$\widehat{P}_k = C_D \frac{\sum_{j=1}^{m-1} \lambda_j (s_{j+1} - s_j)}{\sum_{j=1}^{m-1} s_{j+1} - s_j}$$

Donde λ_j es una función que tiene un valor de 1 si la carga está "encendida" para el j ésimo subintervalo y 0 si no lo está.

Este valor del consumo de potencia promedio de la carga durante el período de liquidación hasta ese punto se puede obtener en un número de formas. En el caso de FFR, el controlador de proceso industrial 20 monitoriza continuamente el consumo de potencia de carga y proporciona estos datos reales al controlador de carga receptivo 26, lo cual permite que el controlador de carga receptivo 26 extraiga la información requerida. En otras implementaciones, el controlador de carga receptivo 26 está configurado para almacenar los datos de instrucción que comunica al controlador de proceso industrial 20. El controlador de carga receptivo 26 puede luego usar estos datos históricos almacenados para calcular el consumo de potencia total promedio de la carga a lo largo de todos los subintervalos previos, asumiendo que ha sido operado de acuerdo con estas instrucciones. Si, por alguna razón, el controlador de proceso industrial 20 anula el controlador de carga receptivo 26, por ejemplo si las reservas de energía almacenadas son insuficientes, esta información es comunicada por el controlador de proceso industrial 20, permitiendo que el controlador de carga receptivo 26 ajuste el cálculo en consecuencia.

En la etapa 52 el consumo de potencia medio hasta la fecha (\widehat{P}_k) se compara con la potencia media ideal que habría consumido la carga 14, si hubiera estado operando de acuerdo con el perfil de demanda de movimiento lento solamente (\widehat{D}_k). Si la carga 14 está usando demasiada potencia entonces, en la etapa 54, $B(t)$ se establece en 0 para el m ésimo subintervalo. Si, por otra parte, la potencia insuficiente ha sido exigida por la carga 14, entonces $B(t)$ se ajusta 56 a C_D para el m ésimo subintervalo.

En cualquier caso, el valor de $B(t)$ para el subintervalo es enviado 58 por el controlador de carga receptivo 26 al controlador de proceso local 20. Para la duración del mésimo subintervalo, el controlador de proceso local 20 asegurará que la carga 14 opere de acuerdo con el valor determinado de $B(t)$, a menos que esto sea anulado por cualquier requisito de FFR. Si, en la etapa 52, se encuentra que el consumo de potencia medio es igual a la función de demanda ideal entonces no se toma ninguna acción. Luego el proceso espera 1 minuto adicional hasta repetir el bucle de asignación de subintervalo 48 - 58, para determinar $B(t)$ para el $(m+1)$ ésimo subintervalo y se instruye en consecuencia la operación de la carga 14. Este procedimiento continúa hasta el final del período de liquidación.

Si $B(t)$ se determina de acuerdo con este algoritmo, entonces se ajusta efectivamente para compensar $F(t)$ de tal manera que, con alta probabilidad, \hat{P}_k se mantenga cerca de su valor deseado. La longitud de subintervalo se selecciona de acuerdo con la duración del período de liquidación y quizás también mediante los requisitos de la carga particular 14.

Claramente, al igual que con el activo de velocidad variable, habrá algún coste en términos de desviación de la función de demanda de movimiento lento al permitir la participación en un servicio receptivo de movimiento rápido tal como FFR. Es necesario que se determine este coste: si es demasiado grande, las cargas que habitualmente operan una estrategia tal como evitación de precios pico pueden no estar dispuestas a adoptar esta técnica para permitir la participación tanto en esto como en FFR simultáneamente.

Como se anotó anteriormente, la condición de baja utilización no se cumplirá a los activos de velocidad no variable. Sin embargo, para un grupo de activos que participan en FFR de acuerdo con el algoritmo descrito en, por ejemplo, el documento WO 2006/128709, se tiene en cuenta el tiempo transcurrido desde que se requiere que un activo particular ajuste su consumo de energía en respuesta a la desviación de frecuencia de red para determinar su probabilidad de respuesta a desviaciones futuras. Esto tiene la consecuencia de que, durante un período de tiempo suficientemente largo, S , la respuesta FFR representará una perturbación relativamente pequeña con respecto al comportamiento operativo normal. Por lo tanto se deduce que el cambio total de consumo de potencia que surge a través de la respuesta FFR durante el período de tiempo S también será pequeño. Es decir:

$$\int_S F(t)dt \leq \|S\| \delta C_D$$

Por lo que existirá un valor de S de tal manera que $\delta \ll 1$. Esta condición débil de baja utilización, que sigue cuando las interrupciones de FFT en la línea de base son poco frecuentes, significa que la asignación dinámica de $\{0; C_D\}$ valores para cada subintervalo, como se describe en relación con la Figura 3, permite que se derive $B(t)$ de tal manera que un error introducido en uno (o más) subintervalos por un requisito de proporcionar un servicio que responde a frecuencia sea, con alta probabilidad, corregido en subintervalos subsecuentes.

Sin dar ninguna consideración a $F(t)$, se puede ver que siguiendo las reglas de asignación establecidas en la Figura 3, la tendencia será que el consumo de potencia promedio para el período de liquidación T_k se acerque al valor \hat{D}_k . Por ejemplo, considerar la situación en la cual la demanda ideal es $0.7C_D$. El algoritmo hará que la carga se ejecute siguiendo el patrón de modulación establecido en la Tabla 1 a continuación:

subintervalo	Potencia operativa	$P_k(\%C_D)$ al final
s_1	C_D	100%
s_2	0	50%
s_3	C_D	67%
s_4	C_D	75%
s_5	0	60%
s_6	C_D	67%
s_7	C_D	71%
s_8	0	62%
s_9	C_D	67%
s_{10}	C_D	70%
s_{11}	C_D	73%

Tabla 1

Como puede verse, el valor de \hat{P}_k puede variar significativamente durante los primeros pocos subintervalos de modulación pero tiende a oscilar alrededor del valor ideal de 70% en subintervalos posteriores. Los subintervalos subsecuentes ofrecerán cambios porcentuales cada vez más pequeños en \hat{P}_k , ya que la potencia operativa de la carga en cada subintervalo representa una fracción más pequeña de la potencia total consumida.

Si en cualquier punto se requiere que la carga emprenda una conmutación de FFR y $F(t)$ es distinta de cero, entonces el algoritmo modula la operación de la carga para compensar. De nuevo, cuanto mayor sea el número de subintervalos que siguen al subintervalo en el cual se produjo la conmutación, mejor será la recuperación hacia \hat{D}_k .

Por ejemplo, considerar la situación en la cual la carga, que intenta seguir un perfil de demanda promedio de $0.7C_D$ como anteriormente, se requiere que se someta a una conmutación de FFR a potencia 0 durante la mitad de la duración del 6to subintervalo s_6 . El comportamiento de carga será entonces como se establece en la Tabla 2 a continuación.

subintervalo	Potencia operativa	$P_k(\%C_D)$ al final
s_1	C_D	100%
s_2	0	50%
s_3	C_D	67%
s_4	C_D	75%
s_5	0	60%
s_6	$0.5C_D$	58%
s_7	C_D	64%
s_8	C_D	69%
s_9	C_D	72%
s_{10}	0	65%
s_{11}	C_D	68%

Tabla 2

Como se puede ver, la potencia promedio difiere después de la conmutación pero, después del 7mo subintervalo, que es el primero que puede compensar, la tasa de consumo de potencia promedio se mantiene dentro del 6% de su valor ideal.

Se entenderá que este es solo un ejemplo específico dado para aclarar el comportamiento de este algoritmo al compensar la carga proporcionando un servicio de carga receptivo además de seguir el perfil de demanda de movimiento más lento. Sin embargo se aplica el principio general: una conmutación $F(t)$ se compensará dentro de unos pocos subintervalos; cuantos más subintervalos haya en un período de liquidación, mejor será la convergencia de la potencia media consumida en ese período hacia el valor medio de la función de demanda de movimiento lento.

Retornando a la derivación de la función de línea base promedio \hat{B}_k para el k ésimo período de liquidación, se recordará que ésta fue establecida para igualar el valor promedio de la función de demanda de movimiento lento durante este período, \hat{D}_k . Sin embargo si el perfil ideal de demanda de movimiento lento se acerca a los valores limitantes de 0 o C_D para este período, entonces no hay capacidad restante para participación en FFR (o al menos no en una dirección). Para el activo de velocidad variable, si la función de demanda $D(t)$ se acercaba a cualquier límite, $B(t)$ se establecía en un valor δC_D lejos del límite. Para el activo de velocidad no variable, se usa un enfoque similar cuando se deriva \hat{B}_k . Sin embargo en este caso, ya que es el valor promedio de la función de línea base que es de más preocupación, el factor de ajuste más apropiado a usar en este caso es el valor promedio de la función que responde a frecuencia \hat{F}_k durante este período de liquidación. Esta es la cantidad ε , derivada anteriormente. Siempre que se cumpla la condición de reversión a la media, ε es un valor relativamente pequeño $\ll C_D$.

El período de liquidación usado en los cálculos anteriores se establece en 30 minutos. Esto se debe en gran medida a que se establece con las regulaciones de mercado de energía del Reino Unido. También se podría usar un período más largo o más corto, siempre que permanezca significativamente más largo que una longitud típica de conmutación de FFR. Hacer el período de liquidación más largo no tiene ningún impacto debido a que aunque habrá un tiempo más

largo en el cual corregir la función de línea base en respuesta a FFR, habrá más conmutaciones de FFR que corregir. El peor de los escenarios en los cuales se produce una conmutación de FFR al final de un período de liquidación surgirá con una frecuencia similar. Los períodos de liquidación más cortos también tienen poco efecto a menos que la longitud se acerque a la longitud de una conmutación de FFR típica. En esta situación, no habrá tiempo suficiente para corregir los efectos de cualquier conmutación de FFR.

Activos generadores de electricidad

Aunque los algoritmos anteriores se describen en términos de su aplicación a activos de demanda, será claro para un experto en la técnica que son igualmente aplicables a generadores. Hay momentos financieramente preferidos en los cuales un generador alimenta energía a la red y esto puede proporcionar un perfil de demanda de movimiento lento. Los generadores que pueden aumentar o disminuir su producción pueden, al mismo tiempo, participar en un servicio receptivo si siguen los algoritmos descritos en este documento, con el ajuste apropiado para la dirección de flujo de electricidad.

Ejemplos de almacenamiento de energía de carga

Al implementar los algoritmos descritos anteriormente (tanto en los casos de velocidad variable como velocidad no variable), es importante hacer un seguimiento de las reservas de energía almacenadas en el activo. Solo se puede permitir que el activo se involucre en cualquier estrategia de consumo variable si tiene reservas suficientes para operar en un consumo de energía no ideal durante el período de tiempo requerido.

Con referencia de nuevo a la Figura 1, el controlador de proceso industrial 20 incluye o está en comunicación con el detector 24 que está dispuesto para monitorizar un parámetro que es indicativo de las reservas de energía almacenadas dentro de la carga. Es decir, para cada generador o sistema de carga que se opera de acuerdo con un método descrito en este documento, es necesario derivar un parámetro mensurable del sistema que actúa como un "proxy" de la energía que se almacena dentro del sistema y que es mantenido en reserva para permitir la operación de acuerdo con estrategias de consumo de potencia variable. Esta variable proxy es monitorizada por el detector y comunicada al controlador de proceso industrial 20. Si la variable proxy excede los límites seguros, el controlador de proceso industrial 20 anula el controlador de carga receptivo 26 y retorna la carga (o generador) a su nivel de potencia operativa ideal.

Ahora se describirán algunos ejemplos no limitantes de variables proxy para diferentes sistemas que pueden incluirse en una cartera de activos que operan de acuerdo con esta invención. Por analogía con un sistema de almacenamiento de energía de batería y la medición de su Estado de Carga (SoC), la variable proxy para cada sistema alternativo será un número real entre 0 y 1, que representa la fracción de energía almacenable que está actualmente almacenada dentro del sistema.

Un tanque de betún es un recipiente cilíndrico aislado que se llena parcialmente con betún líquido. Por razones de seguridad y garantía de calidad, la temperatura del tanque debe mantenerse entre un umbral inferior T_{\min} y un umbral superior T_{\max} . Los tanques de betún generalmente están altamente aislados y esto les permite almacenar energía durante períodos extendidos de tiempo convirtiendo esta energía en calor, siempre que la temperatura del betún permanezca entre T_{\min} y T_{\max} . En este caso, la temperatura del tanque y temperaturas umbrales se pueden usar para definir una variable proxy adecuada Φ :

$$\phi(T) = \left(\frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \right)$$

Los Sistemas de Gestión de Edificios típicamente están configurados con un punto de ajuste de temperatura $T_{\text{ajus.}}$, que corresponde a la temperatura ideal a la cual se debe mantener el edificio. En la práctica, se permitirá que la temperatura caiga o suba una cantidad ΔT por debajo o por encima de este punto de ajuste sin que el sistema altere su comportamiento. Es decir, el sistema tiene una banda muerta efectiva que se extiende desde $T_{\text{ajus.}} - \Delta T$ hasta $T_{\text{ajus.}} + \Delta T$ que permite variar la energía almacenada dentro del sistema. Si el sistema de calentamiento está encendido, aumentando la temperatura de tal manera que entre en la banda muerta, el calentamiento no se apagará hasta que la temperatura sea lo suficientemente alta como para salir de la banda muerta. Por lo tanto se puede usar la temperatura actual de edificio T , punto de ajuste $T_{\text{ajus.}}$ y ancho de la banda muerta $2\Delta T$ para definir una variable proxy para este sistema Φ :

$$\phi(T) = \left(\frac{T - T_{\text{ajus.}} + \Delta T}{2\Delta T} \right)$$

Un Proceso de Lodos Activados (ASP) es un tipo de proceso industrial que se usa en el tratamiento de aguas residuales. Involucra la digestión biológica del contenido orgánico y los contaminantes en aguas residuales por

bacterias y protozoos. Se sopla aire u oxígeno a las aguas residuales sin tratar, que están sembradas con bacterias. Durante el proceso se monitorizan y controlan diversos parámetros:

- se debe mantener el nivel de oxígeno disuelto para soportar las bacterias;
- el Índice de Volumen de Lodos proporciona una indicación de las características de sedimentación de los lodos; y
- el nivel de amoníaco, que es un contaminante de aguas residuales, proporciona una indicación temprana de la necesidad de cualquier ajuste de proceso debido a la sensibilidad ambiental de las bacterias nitrificantes.

Podría decirse, que el nivel de amoníaco es la variable más importante ya que está vinculado a penalizaciones financieras significativas si se infringen los niveles autorizados. Por esta razón, la variable proxy más sencilla de usar para la operación de potencia variable de un ASP se basa en el nivel actual de amoníaco L y el límite máximo permitido $L_{\text{máx}}$:

$$\phi(L) = \left(\frac{L_{\text{máx}} - L}{L_{\text{máx}}} \right)$$

Sin embargo en estos procesos el nivel de oxígeno disuelto D también es crítico: si cae demasiado bajo, las bacterias pueden morir y concentraciones más bajas de bacterias reducen la eficiencia del proceso. Si el caso de la demanda variable estuviera basado solo en el nivel de amoníaco, podría surgir una situación en la cual el nivel de amoníaco sea bajo permitiendo que el proceso se apague durante un período de tiempo. Sin embargo, durante este tiempo "apagado", ya no se soplará oxígeno al lodo, dando como resultado una reducción en los niveles de oxígeno a medida que se consume por las bacterias. Obviamente esto corre el riesgo de que las bacterias mueran, lo cual tiene un grave impacto en el proceso de tratamiento de agua.

Si hay dos (o más) parámetros críticos que deben tenerse en cuenta al definir límites operativos seguros para un proceso, es necesario definir una variable proxy compuesta. En este caso, también se debe derivar una variable proxy para el nivel de oxígeno disuelto solamente. Con el fin de reflejar la rapidez con la cual los niveles bajos de oxígeno disuelto pueden resultar perjudiciales para las bacterias, la función proxy se construye de tal manera que a medida que el nivel de oxígeno disuelto D se acerca a su valor umbral mínimo $D_{\text{mín}}$, la función se acerca rápidamente a cero. Si los niveles de oxígeno están lejos del umbral, la variable proxy está cerca de 1. Una función adecuada es;

$$\phi(D) = 1 - e^{C_{\text{máx}}(D - D_{\text{mín}}, 0)}$$

donde C es una constante que se usa para parametrizar con cuán agresivamente la función debe acercarse a cero.

El valor proxy que indica la fracción de energía almacenada en todo este sistema como una fracción de la energía disponible se establece entonces como el producto de las dos funciones proxy:

$$\phi(L, D) = \phi(L) \cdot \phi(D)$$

$$= \left(\frac{(L_{\text{máx}} - L)(1 - e^{C_{\text{máx}}(D - D_{\text{mín}}, 0)})}{L_{\text{máx}}} \right)$$

Los ejemplos demuestran cómo se puede derivar una variable proxy de estado de carga con el fin de proporcionar un indicador de la capacidad instantánea del sistema industrial para ajustar su consumo de potencia para permitir la participación en estrategias que aprovechen las condiciones de mercado de electricidad. Claramente, los detalles del indicador dependerán de los detalles específicos del proceso industrial en cuestión: ¿cuál es la variable dominante que puede usarse para indicar la capacidad del proceso para usar sus propios recursos cuando no extrae potencia de la red? En sistemas tales como el ASP, la variable usada es producto de dos parámetros de proceso diferentes. Este enfoque puede extrapolarse a procesos en los cuales dos, tres o más indicadores deben mantenerse entre, por encima o por debajo de umbrales determinados.

El estado de carga proxy Φ es un parámetro que puede resultar útil para muchos elementos de las realizaciones descritas anteriormente de esta invención. Este único parámetro dará una indicación inmediata de las reservas de energía almacenadas y por lo tanto de la capacidad de una carga 14 para que responda a los ajustes de potencia requeridos para abordar los desequilibrios de red. Seguir la variación en el estado de carga proxy Φ para una carga particular 14 a lo largo del tiempo, permite que esto se mapee al consumo de potencia de carga. Esto permitirá que el servidor de demanda central 30 adapte el perfil de demanda de movimiento lento que se proporciona a cada carga con base en el requisito de que el estado de carga proxy Φ para esa carga debe mantenerse dentro de un rango

5 definido. Esto, a su vez, asegura que la carga esté operando dentro de su rango operativo normal a pesar de cualquier ajuste de potencia hecho de acuerdo con las condiciones de red. Además, monitorizar el estado de carga proxy Φ permite la determinación por el controlador de proceso industrial 20 en cuanto a cuándo la carga 14 no va a estar disponible para el servicio de carga receptivo, es decir cuándo anulará los comandos del controlador de carga local 26. Finalmente, proporciona un único parámetro que permite la implementación de un servicio de carga receptivo de acuerdo con un único algoritmo, independientemente de los detalles de los procesos industriales que se operan por cada carga dentro de una cartera.

10 Aunque las realizaciones de esta invención descritas anteriormente se han implementado todas usando cargas que ajustan el consumo de potencia en respuesta a las condiciones de mercado, se aplica igualmente a generadores que son capaces de ajustar la potencia alimentada a una red en respuesta a las condiciones de mercado. Por ejemplo, las plantas de tratamiento de agua que se basan en la digestión anaeróbica de aguas residuales dan como resultado la producción de biogás. Este biogás se convierte mediante motores de gas en energía eléctrica y térmica y cualquier energía eléctrica que se obtenga en exceso de la requerida para operar la planta se vende a la red. Muchos de tales generadores están dotados con tecnología de almacenamiento, tal como una bolsa de gas. La cantidad de gas que se ha almacenado es una indicación del potencial del generador para proporcionar electricidad. Además se requiere que se mantenga el gas almacenado por debajo de un umbral de presión, lo cual limita la capacidad de almacenamiento de energía. Es decir, este parámetro se puede usar como la variable proxy de estado de carga para este sistema. El proceso puede por lo tanto monitorizarse mientras opera estrategias de generación de potencia simultáneas de acuerdo con esta invención.

REIVINDICACIONES

1. Un método de control de operación de un componente conectado a una red de suministro de electricidad, siendo el componente ya sea un generador o carga de un tipo que sea capaz de almacenar energía en su interior y que sea operable en un rango de niveles de potencia entre cero y una potencia máxima C_D , comprendiendo el método las etapas de:
- 5 (a) Operar el componente durante un período de tiempo de tal manera que, dentro del período de tiempo, se hagan ajustes a una tasa a la cual se transfiere energía entre el componente y la red de suministro de acuerdo con una función de potencia de línea base $B(t)$; y
- 10 (b) Operar simultáneamente el componente durante el período de tiempo de tal manera que, además, se hagan ajustes a la tasa a la cual se transfiere energía entre el componente y la red de suministro de acuerdo con una función de potencia de movimiento rápido $F(t)$, de tal manera que la función de potencia de movimiento rápido $F(t)$ se superpone sobre la función de potencia de línea base; en donde
- la función de potencia de línea base $B(t)$ se deriva a partir de una función de potencia de movimiento lento $D(t)$, de tal manera que para $\delta \ll 1$:
- 15 $B(t) = \delta C_D$, si $D(t) < \delta C_D$,
- $B(t) = D(t)$, si $\delta C_D \leq D(t) \leq (1 - \delta)C_D$, y
- $B(t) = (1 - \delta)C_D$, si $D(t) > (1 - \delta)C_D$; en donde
- si se hacen ajustes en la tasa a la cual se transfiere energía entre el componente y la red de suministro de acuerdo con la función de potencia de movimiento lento $D(t)$, el componente se beneficiaría económicamente de una variación en un precio predominante de electricidad en la red o una variación en un valor que pueda derivarse, directa o indirectamente, desde el suministro de electricidad en la red; y
- 20 ajustes hechos a la tasa a la cual se transfiere energía entre el componente y la red de suministro de acuerdo con la función de potencia de movimiento rápido $F(t)$ son ajustes que responden a y tales como para contrarrestar los desequilibrios entre la generación de potencia y el consumo de potencia a través de la red de suministro de electricidad, teniendo estos ajustes una alta probabilidad de ser muy inferiores a la potencia máxima C_D .
- 25 2. Un método de control de operación de un componente conectado a una red de suministro de electricidad, siendo el componente ya sea un generador o carga de un tipo que sea capaz de almacenar energía en su interior y que sea operable en un rango de niveles de potencia entre cero y una potencia máxima C_D , comprendiendo el método las etapas de:
- 30 (a) Monitorizar un parámetro físico del componente que sea indicativo de las reservas de energía almacenadas en su interior;
- (b) Si el parámetro tiene un valor que está entre un límite umbral superior y un límite umbral inferior, controlar operación del componente de acuerdo con el método establecido en la reivindicación 1; y
- 35 (c) Si el parámetro tiene un valor que está fuera de los límites umbrales superior o inferior, operar el componente con una potencia operativa que esté de acuerdo con retornar el parámetro a un valor entre los límites umbrales superior e inferior.
- 40 3. El método de la reivindicación 2 en donde se deriva una variable proxy Φ , $0 \leq \Phi \leq 1$, para el componente, representando la variable proxy la fracción de energía almacenada mantenida en las reservas de energía en cualquier punto en el tiempo y siendo derivada del parámetro físico medido, mediante el cual los límites umbrales de operación de componente se definen en términos de la variable proxy.
4. El método de cualquier reivindicación precedente en donde el componente es un generador.
5. El método de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4 en donde el componente es una carga.
6. Un sistema para controlar la operación de un componente (14) conectado a una red de suministro de electricidad (18), siendo el componente (14) ya sea un generador o carga de un tipo que sea capaz de almacenar energía en su interior y que sea operable en un rango de niveles de potencia entre cero y una potencia máxima C_D , comprendiendo el sistema:
- 45 un controlador de proceso industrial (20) dispuesto para ejercer control directo sobre la operación del componente (14) y para monitorizar los parámetros de proceso;

- un servidor de demanda central (30) dispuesto para derivar una función de potencia de movimiento lento $D(t)$, en donde si se hacen ajustes a una tasa a la cual se transfiere energía entre el componente (14) y la red de suministro (18) de acuerdo con la función de potencia de movimiento lento $D(t)$, el componente (14) se beneficiaría económicamente de una variación en un precio predominante de electricidad en la red o una variación en un valor que puede derivarse, directa o indirectamente, desde el suministro de electricidad en la red (18);
- 5 un indicador (28) dispuesto para proporcionar una señal indicativa de desequilibrios en potencia suministrada a través de la red (18); y
- un controlador de dispositivo local (26) asociado con el controlador de proceso industrial (20) y componente (14) y dispuesto:
- 10 recibir la señal indicativa de desequilibrios en potencia suministrada a través de la red (18) desde el indicador (28) y la función de potencia de movimiento lento $D(t)$ desde el servidor de demanda central (30);
- derivar una función de potencia de línea base $B(t)$ a partir de la función de potencia de movimiento lento $D(t)$, de tal manera que para $\delta \ll 1$:
- $B(t) = \delta C_D$, si $D(t) < \delta C_D$,
- 15 $B(t) = D(t)$, si $\delta C_D \leq D(t) \leq (1 - \delta)C_D$, y
- $B(t) = (1 - \delta)C_D$, si $D(t) > (1 - \delta)C_D$;
- derivar una función de potencia de movimiento rápido $F(t)$ a partir de la señal indicativa de desequilibrios en potencia suministrada a través de la red (18); y
- 20 proporcionar al controlador de proceso industrial (20) instrucciones para operar el componente (14) de tal manera que se hagan ajustes a una tasa a la cual se transfiere energía entre el componente y la red de suministro de acuerdo con la función de potencia de movimiento rápido $F(t)$ superpuesta sobre la función de potencia de línea base $B(t)$.
7. Un controlador de dispositivo local (26) asociado con un controlador de proceso industrial (20) dispuesto para ejercer control directo sobre la operación de un componente (14) conectado a una red de suministro de electricidad (18), siendo el componente (14) ya sea un generador o carga de un tipo que sea capaz de almacenar energía en su interior y que sea operable en un rango de niveles de potencia entre cero y una potencia máxima C_D , estando el controlador de dispositivo local (26) dispuesto:
- 25 para recibir una señal indicativa de desequilibrios en potencia suministrada a través de la red (18) desde un indicador (28) y para recibir una función de potencia de movimiento lento $D(t)$ desde un servidor central (30);
- para derivar una función de potencia de línea base $B(t)$ a partir de la función de potencia de movimiento lento $D(t)$, de tal manera que para $\delta \ll 1$:
- 30 $B(t) = \delta C_D$, si $D(t) < \delta C_D$,
- $B(t) = D(t)$, si $\delta C_D \leq D(t) \leq (1 - \delta)C_D$, y
- $B(t) = (1 - \delta)C_D$, si $D(t) > (1 - \delta)C_D$;
- para derivar una función de potencia de movimiento rápido $F(t)$ a partir de la señal indicativa de desequilibrios en potencia suministrada a través de la red (18); y
- 35 para proporcionar al controlador de proceso industrial (20) instrucciones para operar el componente (14) de tal manera que se hagan ajustes a una tasa a la cual se transfiere energía entre el componente y la red de suministro de acuerdo con la función de potencia de movimiento rápido $F(t)$ superpuesta sobre la función de potencia de línea base $B(t)$; en donde
- 40 la función de potencia de movimiento lento $D(t)$ se deriva de tal manera que si se hacen ajustes a la tasa a la cual se transfiere energía entre el componente y la red de suministro de acuerdo con esta función $D(t)$, el componente (14) se beneficiaría económicamente de una variación en el precio de electricidad distribuida por la red durante el curso de un día.
8. El controlador de la reivindicación 7 en donde el componente (14) es un generador.
- 45 9. El controlador de la reivindicación 7 en donde el componente (14) es una carga.

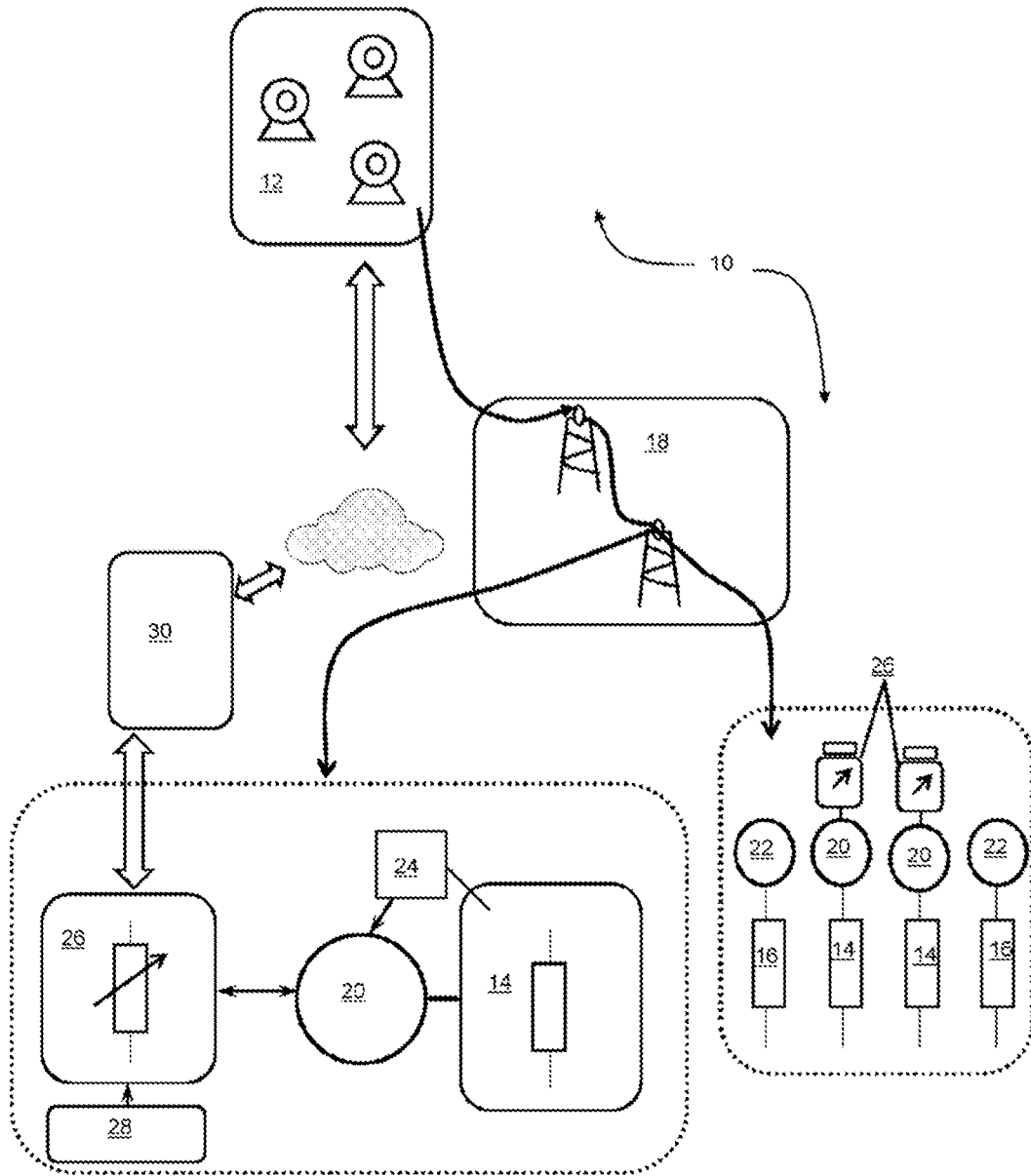


Figura 1

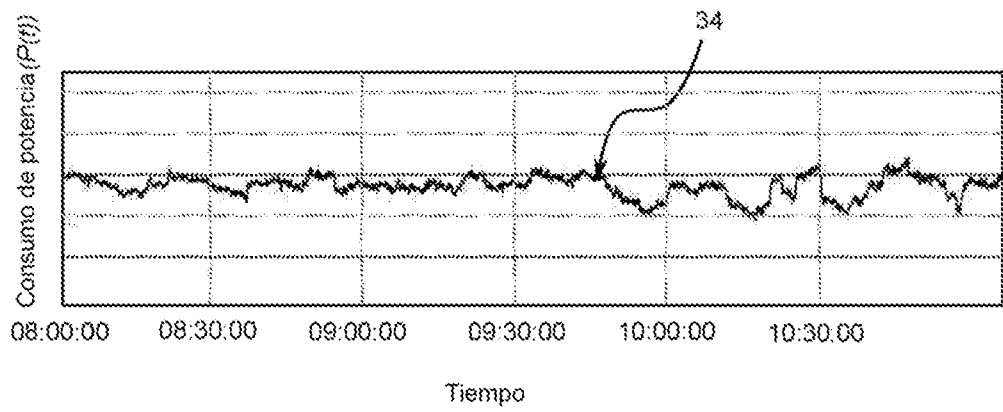


Figura 2a

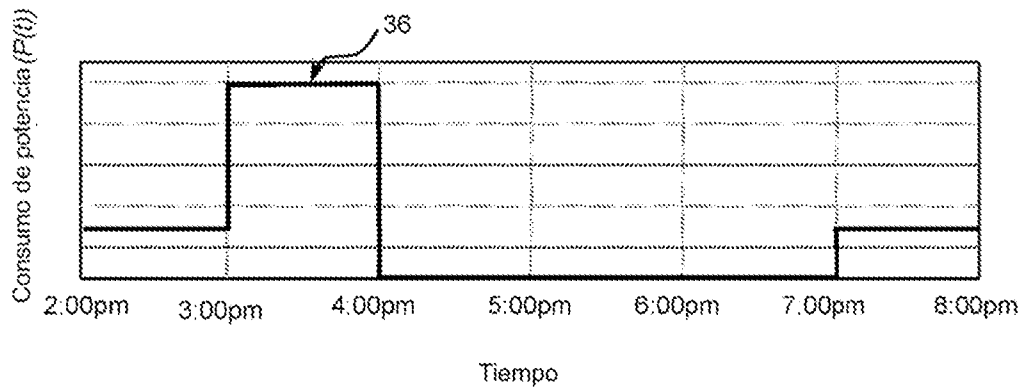


Figura 2b

