

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 744 353**

51 Int. Cl.:

**B60M 3/06** (2006.01)

**B60L 7/10** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.04.2008** **E 08103683 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **05.06.2019** **EP 1985490**

54 Título: **Sistema, subestación y procedimiento para recuperar la energía de frenado de vehículos ferroviarios, vehículos ferroviarios para este sistema**

30 Prioridad:

**25.04.2007 FR 0703007**

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

**24.02.2020**

73 Titular/es:

**ALSTOM TRANSPORT TECHNOLOGIES (100.0%)**  
**48, rue Albert Dhalenne**  
**93400 Saint-Ouen, FR**

72 Inventor/es:

**CORNIC, DANIEL;**  
**AUTHIE, PIERRE y**  
**TAYAT, FARADJ**

74 Agente/Representante:

**SALVÀ FERRER, Joan**

**ES 2 744 353 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

Sistema, subestación y procedimiento para recuperar la energía de frenado de vehículos ferroviarios, vehículos ferroviarios para este sistema

5

**[0001]** La presente invención se refiere a un sistema, una subestación equipada con un convertidor estático y un procedimiento de recuperación de energía de frenado de vehículos ferroviarios, y a vehículos ferroviarios para este sistema.

10 **[0002]** El Solicitante conoce, a través del documento FR 2 873 332 A, una subestación que puede implementarse en un sistema de alimentación y recuperación de energía de frenado de vehículos ferroviarios que comprende:

15 - al menos una línea de alimentación que se extiende a lo largo de una vía férrea para alimentar los vehículos ferroviarios que circulan en esta vía férrea,  
 - una pluralidad de subestaciones  $S_k$  de recuperación de energía de frenado separadas entre sí por una distancia  $D_k$  superior a 100 m, estando dicha subestación  $S_k$  eléctricamente conectada a la línea de alimentación en un punto de conexión  $P_k$  y equipada con:

20 • un convertidor eléctrico capaz de transferir energía eléctrica desde una red de distribución de electricidad a la línea de alimentación y desde la línea de alimentación a la red de distribución de electricidad para recuperar la energía de frenado de los vehículos ferroviarios,  
 • un sensor o un estimador de tensión  $U_{ssk}$  en el punto de conexión  $P_k$ ,  
 25 • un módulo de control del convertidor eléctrico capaz de cambiar automáticamente el convertidor eléctrico a un modo de regeneración en el que el convertidor eléctrico transfiere continuamente energía eléctrica desde la línea de alimentación a la red de distribución de electricidad para recuperar la energía de frenado de los vehículos ferroviarios.

30 **[0003]** Las consideraciones eléctricas conocidas por el experto en la técnica permiten al Solicitante decir que, para tal subestación, es ventajoso cambiar el convertidor en un modo de regeneración tan pronto como la tensión  $U_{ssk}$  medida o estimada sea superior a un umbral  $U_{C3k}$ , de manera que cada subestación esté asociada con su propia zona  $Z_{fk}$  de recuperación de energía de frenado en la que, independientemente de la posición del vehículo ferroviario dentro de esta zona  $Z_{fk}$ , la subestación  $S_k$  es capaz de recuperar al menos una parte de la energía de frenado de este vehículo ferroviario.

35

**[0004]** Una zona  $Z_{fk}$  de recuperación de energía de frenado se define como un segmento  $[L_{Gfk}; L_{Dfk}]$  de la línea de alimentación centrada alrededor del punto  $P_k$  y cuyos límites  $L_{Gfk}$ ,  $L_{Dfk}$  están separados a ambos lados del punto  $P_k$  por una distancia  $F_k$  igual a  $(U_{Cmáx} - U_{C3mink}) / (\rho l_{máx})$ , en la que:

40 •  $U_{Cmáx}$  es una tensión máxima no permanente admisible en la línea de alimentación,  
 •  $U_{C3mink}$  es el valor mínimo que puede asumir el umbral  $U_{C3k}$  durante el funcionamiento de la subestación,  
 •  $p$  es la resistencia lineal de la línea de alimentación, y  
 •  $l_{máx}$  es la intensidad máxima admisible para la corriente que fluye en la línea de alimentación.

45 **[0005]** Además, el documento DD 261485 describe un sistema de conmutación para distribuir energía eléctrica en porciones de catenaria, que se alimentan por líneas de alimentación conectadas a través de las válvulas principales. El sistema de conmutación incluye además una línea de transporte de energía complementaria conectada a cada porción de catenaria por primera y segunda válvulas. El sistema es capaz de recuperar la energía de frenado de un vehículo conectado a una primera porción de catenaria y distribuirla a los vehículos conectados a otras porciones de  
 50 catenaria abriendo la primera y/o segunda válvulas.

**[0006]** El documento DE 3527309 describe un sistema de alimentación eléctrica para los ferrocarriles, en el que las líneas aéreas de contacto se alimentan a partir de subestaciones que pueden funcionar en un modo de recuperación de potencia de frenado.

55

**[0007]** El documento EP 1350666 describe un sistema de alimentación de una línea aérea de contacto para vehículos eléctricos.

60 **[0008]** En la siguiente descripción, los términos utilizados tienen su significado habitual en el campo del transporte ferroviario. En particular, los términos tales como tensión máxima no permanente, tensión nominal o tensión mínima permanente admisible en la línea de alimentación se definen, por ejemplo, en la Norma Europea EN 50 163/CEI 60850.

65 **[0009]** En la resistencia lineal de la línea de alimentación se incluye la resistencia lineal de los conductores paralelos o "alimentadores", cuando la línea es una catenaria.

- 5 **[0010]** Por línea de alimentación, se entiende en el presente documento, tanto un cable aéreo de catenaria en el que simplemente se frota el pantógrafo de un vehículo ferroviario para suministrar energía eléctrica, como un tercer carril dispuesto a lo largo de los carriles de vías del ferrocarril. En el caso de un tercer carril, el pantógrafo es mejor conocido por el término "patín".
- 10 **[0011]** Para frenar un vehículo ferroviario, es posible controlar un motor de tracción de este vehículo ferroviario para que funcione como generador. La energía eléctrica generada por el motor se transmite entonces a través de la línea de alimentación. Se denomina energía de frenado.
- [0012]** Esta energía de frenado está destinada a consumirse por otros vehículos ferroviarios cercanos o por las subestaciones reversibles.
- 15 **[0013]** Cuando una subestación consume energía de frenado, la transfiere desde la línea de alimentación a la red de distribución de electricidad para que pueda usarse para otros fines.
- 20 **[0014]** Sin embargo, con frecuencia y específicamente durante las horas valle operativas, la energía de frenado generada por el vehículo ferroviario no encuentra ningún consumidor cerca. Más específicamente, cuando un vehículo ferroviario genera energía de frenado en la línea de alimentación, esta energía se entrega a baja tensión  $U_T$  en el pantógrafo. Esta tensión  $U_T$  no puede exceder el umbral predefinido  $U_{Cmáx}$ . Por otro lado, una subestación  $S_k$  puede consumir la energía de frenado solo si tiene una tensión  $U_{ssk}$  superior al umbral  $U_{C3mínk}$ . Por lo tanto, se entiende que una subestación  $S_k$  puede consumir teóricamente la energía de frenado del vehículo ferroviario solo si la distancia que lo separa de este vehículo ferroviario es inferior a la distancia  $F_k$ , es decir, inferior a  $(U_{Cmáx} - U_{C3mínk})/(\rho I_{máx})$ .
- 25 **[0015]** En el caso contrario, es decir, si todas las subestaciones se encuentran a más de  $F_k$  del vehículo ferroviario que frena, entonces la energía de frenado no se consume. En estas condiciones, la generación de la energía de frenado en la línea de alimentación da como resultado un aumento de la tensión  $U_T$  en la línea de alimentación en el pantógrafo. Para evitar que la tensión  $U_T$  exceda el umbral  $U_{Cmáx}$ , en los vehículos ferroviarios existentes, tan pronto como la tensión  $U_T$  exceda un umbral  $U_{TG}$  inferior al umbral  $U_{Cmáx}$ , los vehículos ferroviarios dejan de generar energía de frenado en la línea de alimentación y disipan la energía de frenado en un reóstato a bordo en forma de calor. Como medida de seguridad, el umbral  $U_{TG}$  se elige mucho más pequeño que el umbral  $U_{Cmáx}$ . Como resultado, la distancia máxima que debe separar el vehículo ferroviario que frena la subestación es en realidad inferior a  $(U_{TG} - U_{C3mínk})/(\rho I_{máx})$ . En sistemas conocidos de rectificador no controlado con inversor en paralelo, por ejemplo, la diferencia de tensión  $U_{TG} - U_{C3mínk}$  es del orden del 7 % de la tensión de alimentación nominal. La distancia que separa el vehículo ferroviario que frena y el consumidor es, por lo tanto, muy pequeña en comparación con la distancia  $D_k$ . Esta corta distancia significa que una parte sustancial de la energía de frenado de los vehículos ferroviarios no se recupera. Esto da como resultado pérdidas de energía eléctrica en seco.
- 30 **[0016]** La invención tiene como objetivo remediar este problema proponiendo un sistema de recuperación de energía de frenado que limita el uso del reóstato y, por lo tanto, limita las pérdidas de energía eléctrica en seco.
- [0017]** Por lo tanto, se refiere a una subestación, un sistema y un procedimiento para recuperar la energía de frenado según las reivindicaciones adjuntas.
- 45 **[0018]** También tiene por objeto un vehículo ferroviario destinado a circular en una red ferroviaria equipada con el sistema anterior, en el que el vehículo ferroviario no tiene resistencia a bordo en el interior del vehículo y permite disipar toda la energía de frenado eléctrico de este vehículo ferroviario en forma de calor.
- 50 **[0019]** Finalmente, la invención también tiene por objeto un medio de registro de información que comprende instrucciones para implementar el procedimiento anterior, cuando estas instrucciones son ejecutadas por un ordenador electrónico.
- 55 **[0020]** En el sistema según la invención, dado que la distancia  $F_k$  es superior o igual a  $D_k/2$ , independientemente de la posición del vehículo ferroviario a lo largo de la línea de alimentación, se encuentra al menos en la zona  $Z_{fk}$  una subestación. En estas condiciones, la recuperación de energía de frenado es posible independientemente de la posición de los vehículos ferroviarios a lo largo de la línea de alimentación, lo que permite aumentar la cantidad de energía de frenado recuperada. Incluso es posible garantizar que se recupere al menos el 99 % de la energía de frenado y, por lo tanto, eliminar el reóstato del vehículo ferroviario destinado a disipar la energía de frenado. Por lo tanto, el sistema anterior también permite simplificar la arquitectura de los vehículos ferroviarios y ahorrar en el peso de los vehículos, lo que es un factor complementario de ahorro de energía.
- 60 **[0021]** Además, elegir el límite  $U_{C3mínk}$  para que la distancia  $F_k$  sea superior o igual a la distancia  $D_k$  permite garantizar que, incluso en el caso de fallo de una subestación  $S_k$ , las subestaciones  $S_{k-1}$  y  $S_{k+1}$  se pueden utilizar para recuperar la energía de frenado independientemente de la posición del vehículo ferroviario que frena entre estas dos subestaciones  $S_{k-1}$  y  $S_{k+1}$ . Esto también hace posible utilizar simultáneamente dos subestaciones adyacentes para

recuperar la energía de frenado y así agrupar la recuperación de energía de frenado.

**[0022]** La subestación según la invención tiene las siguientes ventajas:

- 5 - elegir la distancia  $T_k$  superior o igual a la mitad de la distancia  $D_k$  permite utilizar el mismo criterio para ubicar subestaciones para el suministro de vehículos ferroviarios y recuperar la energía de frenado independientemente de la posición de los vehículos ferroviarios a lo largo de la línea de alimentación,
  - elegir el umbral  $U_{C3\min k}$  por debajo del umbral  $U_{dk}$  y dar prioridad al modo de regeneración cuando la tensión  $U_{ssk}$  está entre estos dos umbrales permite aumentar la zona  $Z_{fk}$  de la subestación más allá de la zona  $Z_{tk}$ ,
- 10 - mantener el valor del umbral  $U_{C3k}$  cerca del límite máximo  $U_{C3\max k}$  permite promover el intercambio directo de energía entre los vehículos ferroviarios únicamente a través de la línea de alimentación,
  - disminuir el valor del umbral  $U_{C3k}$  en caso de un aumento repentino de la tensión  $U_{ssk}$  permite adaptar automáticamente las dimensiones de la zona  $Z_{fk}$  en función del tráfico ferroviario y distribuir la energía de frenado a recuperar entre las subestaciones más cercanas al vehículo ferroviario,
- 15 - controlar el convertidor para que transfiera la mayor cantidad posible de energía eléctrica desde la línea de alimentación a la red de distribución de electricidad, tan pronto como la tensión  $U_{ssk}$  exceda un umbral  $U_{C\max 2k}$ , permite suprimir las sobretensiones en la línea sin interrumpir el intercambio de energía entre vehículos ferroviarios.

**[0023]** La invención se comprenderá mejor con la lectura de la descripción que aparece a continuación, dada únicamente a título de ejemplo y realizada con referencia a los dibujos en los que:

- la figura 1 es una ilustración esquemática de la arquitectura de una red ferroviaria equipada con un sistema de subestaciones reversibles para la recuperación de la energía de frenado,
- la figura 2 es un diagrama de flujo de un procedimiento para recuperar la energía de frenado,
- 25 - las figuras 3 a 6 son cronogramas de señales que muestran el funcionamiento del procedimiento de recuperación de energía de frenado, y
- la figura 7 es un gráfico que muestra las diferentes zonas operativas posibles de la red ferroviaria de la figura 1.

**[0024]** En estas figuras, se usan las mismas referencias para designar los mismos elementos.

**[0025]** En la siguiente descripción, las características y funciones bien conocidas por el experto en la técnica no se describen en detalle.

**[0026]** La figura 1 muestra una red ferroviaria 2 equipada con un sistema 4 para recuperar la energía de frenado.

**[0027]** El sistema 4 comprende una o más líneas de alimentación y muchas subestaciones distribuidas a intervalos regulares a lo largo de estas líneas de alimentación. Para simplificar la figura 1, solo se han mostrado una línea de alimentación 6 y tres subestaciones  $S_{k-1}$ ,  $S_k$  y  $S_{k+1}$ .

**[0028]** El índice  $k$  representa el número de secuencia de cada subestación a partir de una subestación  $S_0$  situada en un extremo de la línea de alimentación 6 y desplazándose en la dirección  $F$  indicada en la figura 1.

**[0029]** La tensión en la línea de alimentación 6 puede variar entre una tensión máxima no permanente  $U_{C\max}$  y una tensión mínima no permanente  $U_{C\min}$ . Estos límites máximos y mínimos se definen típicamente por normales tal como la norma europea EN 50 163 o IEC 60850. Por ejemplo, aquí el límite  $U_{C\max}$  es igual a 1000 Vdc, y el límite  $U_{C\min}$  es igual a 500 Vdc para una línea de alimentación cuya tensión nominal  $U_{Cnom}$  es igual a 750 Vdc.

**[0030]** Cada subestación  $S_k$  está conectada eléctricamente a la línea de alimentación 6 en un punto de conexión  $P_k$ . El punto  $P_k$  está separado del punto  $P_{k+1}$  por una distancia  $D_k$  y del punto  $P_{k-1}$  por una distancia  $D_{k-1}$ . La distancia  $D_k$  también se conoce con el término la distancia entre subestaciones. Esta distancia  $D_k$  es mayor de varios cientos de metros. La distancia  $D_k$  también es lo suficientemente corta como para que la subestación  $S_k$  pueda suministrar tracción a un vehículo ferroviario cuyo pantógrafo esté situado en el punto  $P_{k+1}$ . Aquí, la distancia  $D_k$  está entre 1000 y 2000 m para una tensión nominal de 750 Vdc y puede llegar hasta 20 km para una tensión nominal de 3000 Vdc.

**[0031]** Aquí, por suministro de tracción se entiende el hecho de que una subestación genera en la línea de alimentación 6 suficiente potencia para alimentar los motores de tracción del vehículo ferroviario y así permitir el desplazamiento del vehículo ferroviario en las condiciones de tensión establecidas anteriormente.

**[0032]** Cada subestación  $S_k$  está asociada a una zona  $Z_{tk}$  de suministro de tracción. La zona  $Z_{tk}$  es un segmento  $[L_{Gk}; L_{Dk}]$  de la línea de alimentación 6 centrada alrededor del punto  $P_k$ . Los límites izquierdo y derecho  $L_{Gk}$  y  $L_{Dk}$  están separados del punto  $P_k$  por una distancia  $T_k$ . La distancia  $T_k$  se define por la siguiente relación:

$$T_k = (U_{ss\max k} - U_{C\min}) / (\rho I_{\max}) \quad (1)$$

donde:

- 5 -  $U_{ss\max k}$  es la tensión de tracción máxima que puede generar la subestación  $S_k$  en el punto  $P_k$  para suministrar tracción a un vehículo ferroviario,
- $U_{C\min}$  es la tensión mínima no temporal admisible en la línea de alimentación,
- $\rho$  es la resistencia lineal de la línea de alimentación 6 y de sus conductores paralelos o "alimentadores", e
- $I_{\max}$  es la intensidad máxima admisible para la corriente que circula en la línea de alimentación 6.

10

**[0033]** Por resistencia lineal, aquí se representa el valor de la resistencia por unidad de longitud.

- [0034]** Por lo tanto, la zona  $Z_{tk}$  corresponde al segmento de la línea de alimentación 6 en el que, independientemente de la posición del vehículo ferroviario dentro de esta zona, la subestación  $S_k$  puede suministrar
- 15 tracción a este vehículo ferroviario. Más allá de los límites  $L_{G_{tk}}$  y  $L_{D_{tk}}$ , la caída de tensión debido a la resistencia lineal de la línea de alimentación 6 es de tal forma que incluso si la subestación  $S_k$  genera la tensión  $U_{ss\max k}$  en el punto  $P_k$ , la tensión en el pantógrafo del vehículo ferroviario puede ser inferior a la tensión  $U_{C\min}$ . Por lo tanto, la subestación  $S_k$  no puede alimentar sistemáticamente al vehículo ferroviario más allá de estos límites  $L_{G_{tk}}$  y  $L_{D_{tk}}$ .

- 20 **[0035]** A modo de ilustración,  $U_{ss\max k}$  es superior o igual a  $U_{Cnom}$ . Los valores de los diferentes umbrales o límites se ilustran en la figura 7. Estas elecciones se realizan durante el diseño de la red 2 y, por lo tanto, imponen la distancia  $T_k$ . Entonces, la distancia  $D_k$  se elige para que sea igual o ligeramente inferior a la distancia  $T_k$ , de manera que, independientemente de la posición del vehículo ferroviario a lo largo de la línea de alimentación 6, siempre esté simultáneamente en dos zonas  $Z_{tk}$  y  $Z_{tk+1}$ . Tal elección de la distancia  $D_k$  permite garantizar que el vehículo ferroviario
- 25 pueda ser alimentado sea cual sea su posición a lo largo de la línea de alimentación 6, y esto incluso en caso de fallo de una de las subestaciones  $S_k$ .

- [0036]** La subestación  $S_k$  está también asociada a una zona  $Z_{fk}$  de recuperación de energía de frenado. Esta zona  $Z_{fk}$  es un segmento  $[L_{G_{fk}}; L_{D_{fk}}]$  de la línea de alimentación 6 centrada alrededor del punto  $P_k$ . Los límites  $L_{G_{fk}}$  y
- 30  $L_{D_{fk}}$  están separados del punto  $P_k$  por una distancia  $F_k$ . La distancia  $F_k$  se define por la siguiente relación:

$$F_k = (U_{C\max} - U_{C3\min k}) / (\rho I_{\max}) \quad (2)$$

donde:

35

- $U_{C\max}$  es la tensión máxima no permanente admisible en la línea de alimentación 6, y
- $U_{C3\min k}$  es un límite bajo para el valor de un umbral  $U_{C3k}$  que se definirá más adelante.

- [0037]** Aquí,  $U_{C3\min k}$  se elige inferior o igual a  $U_{Cnom}$ . Por lo tanto, la distancia  $F_k$  es superior o igual a la distancia
- 40  $D_k$ .

**[0038]** Por ejemplo, el límite  $U_{C3\min k}$  se elige igual a 700 Vdc.

- [0039]** La zona  $Z_{fk}$  es una zona en la que, independientemente de la posición del vehículo ferroviario que frena
- 45 dentro de esta zona  $Z_{fk}$ , la subestación  $S_k$  puede recuperar la energía de frenado de este vehículo ferroviario.

- [0040]** Como la distancia  $F_k$  es superior o igual a la distancia  $D_k$ , por lo tanto, es posible recuperar la energía de frenado de un vehículo ferroviario que frena en el punto  $P_{k-1}$  o en el punto  $P_{k+1}$ . Por lo tanto, incluso si la subestación  $S_k$  está fuera de servicio, las subestaciones  $S_{k-1}$  y  $S_{k+1}$  permiten recuperar la energía de frenado del vehículo ferroviario,
- 50 independientemente de la posición del vehículo ferroviario entre los puntos  $P_{k-1}$  y  $P_{k+1}$ . Por lo tanto, es posible garantizar que toda la energía de frenado del vehículo ferroviario se recuperará incluso si una subestación está fuera de servicio.

- [0041]** Todas las subestaciones  $S_k$  están conectadas a la misma red de larga distancia de distribución de
- 55 electricidad 20. Aquí la red 20 es una red de corriente alterna trifásica de alta tensión de categoría A o B. Por corriente alterna de alta tensión de categoría A o B, aquí se designa una corriente alterna de entre 1000 y 50 000 Vac. Según la enseñanza de la solicitud de patente FR 28 73 332, esta red 20 también puede ser una red de corriente alterna de baja tensión trifásica. Aquí, por corriente alterna de baja tensión trifásica, se entiende una tensión inferior a 1000 Vac. Típicamente, esta red trifásica de corriente alterna de baja tensión será una red de baja tensión de categoría B o BTB,

es decir, cuya corriente alterna está entre 500 y 1000 Vca.

**[0042]** Aquí, todas las subestaciones  $S_k$  son idénticas entre sí, y solo la subestación  $S_k$  se muestra en detalle en la figura 1.

5

**[0043]** La subestación  $S_k$  comprende un convertidor de cuatro cuadrantes 30 conectado por un lado a la red 20 y por el otro lado al punto  $P_k$  en la línea de alimentación 6. Este convertidor 30 es capaz de rectificar la tensión trifásica de la red 20 para entregar en la línea de alimentación 6 una corriente continua rectificadora entre  $U_{ssmáxk}$  y  $U_{Cmín}$ . El convertidor 30 también es capaz de puede invertir la corriente continua presente en la línea de alimentación 6 para entregar en la red 20 una tensión trifásica construida a partir de esta corriente continua comprendida entre  $U_{C3mínk}$  y  $U_{Cmáx}$ . El convertidor 30 puede cambiar de un modo operativo en rectificador al modo operativo en inversor, y viceversa, en menos de 10 ms para evitar pérdidas de frenado en el vehículo.

**[0044]** Para este propósito, el convertidor 30 está formado, por ejemplo, por un puente rectificador conectado en paralelo a un inversor. Aquí, el puente rectificador es un puente rectificador controlado hecho de tiristores o transistores de potencia tales como los transistores IGBT (Transistor bipolar de puerta aislada). El puente rectificador controlado permite generar una tensión fija de 750 Vcc en la línea de alimentación 6 y esto incluso en el caso de variaciones de más del 50 % de la potencia consumida por la carga eléctrica suministrada a través de la línea de fuente de alimentación 6.

20

**[0045]** El inversor permite absorber una corriente continua  $I_k$  como máximo igual a un umbral  $I_{kmáx}$ . Aquí,  $I_{kmáx}$  es superior o igual a  $I_{máx}$ . Esta corriente  $I_k$  es positiva cuando pasa a través del convertidor 30 al ir del punto  $P_k$  a la red 20. En el caso contrario, la intensidad de esta corriente  $I_k$  es negativa.

**[0046]** El convertidor 30 es un convertidor controlable. Para este propósito, la subestación  $S_k$  comprende una unidad de control 32 capaz de controlar el convertidor 30 para funcionar como un rectificador y, como alternativa, como un inversor. La unidad 32 también permite aprovechar la tensión  $U_{ssk}$  entregada o absorbida en el punto  $P_k$  a un punto de ajuste  $U_{ssc}$ . Para este propósito, la subestación  $S_k$  comprende un sensor 34 de la intensidad de corriente  $I_k$  y un sensor 36 de la tensión  $U_{ssk}$  en el punto  $P_k$ .

30

**[0047]** Más específicamente, la unidad 32 es capaz de cambiar el convertidor 30 en un modo de regeneración o recuperación de energía eléctrica tan pronto como la tensión  $U_{ssk}$  medida sea superior a un umbral  $U_{C3k}$ . La unidad 32 también puede cambiar automáticamente el convertidor 30 a un modo de suministro de tracción tan pronto como la tensión  $U_{ssk}$  sea inferior a un umbral  $U_{dk}$ . Por ejemplo, el umbral  $U_{dk}$  es inferior o igual a  $U_{Cnom}$ .

35

**[0048]** La subestación  $S_k$  también comprende un módulo 40 para ajustar el valor del umbral  $U_{C3k}$  en función de la tensión  $U_{ssk}$  medida.

**[0049]** La unidad 32 y el módulo 40 se realizan, por ejemplo, a partir de un ordenador programable 42 capaz de ejecutar instrucciones almacenadas en una memoria 44 conectada a este ordenador. Para este propósito, la memoria 44 comprende aquí instrucciones para ejecutar el procedimiento de la figura 2, así como los diferentes valores de los umbrales y límites utilizados en el presente documento.

40

**[0050]** El sistema 2 también comprende un vehículo ferroviario 46 que circula por una vía ferroviaria 47. Este vehículo 46 está conectado eléctricamente a la línea de alimentación 6 a través de un pantógrafo 48. El pantógrafo 48 permite captar la energía eléctrica desde la línea de alimentación 6 y entregarla a la entrada de un convertidor eléctrico 49 a bordo del vehículo 46. El convertidor 49 es capaz de transformar la corriente continua obtenida a través del pantógrafo 48 en una tensión de alimentación trifásica de un motor de tracción 50. El motor 50 es, por ejemplo, un motor eléctrico síncrono o asíncrono. Este motor 50 es capaz de girar las ruedas del vehículo 46. El motor 50 también puede funcionar como un generador para frenar el vehículo 46. En este caso, el convertidor 49 puede funcionar como un rectificador para enviar de vuelta la energía de frenado por la línea de alimentación 6.

**[0051]** El convertidor 49 es un convertidor controlable por una unidad de control 51. Esta unidad de control 51 puede proteger el convertidor 49 en función de una tensión  $U_T$  medida en el pantógrafo 48 a través de un sensor 52. Para este propósito, la unidad 51 puede activar el aislamiento eléctrico del vehículo eléctrico 46 de la línea de alimentación 6 en función de la tensión medida  $U_T$ .

55

**[0052]** El vehículo 46 carece de resistencia de frenado o reóstato a bordo capaz de disipar en forma de calor toda la energía de frenado producida por el motor 50 cuando funciona como generador.

60

**[0053]** El funcionamiento del sistema 4 se describirá ahora con más detalle con respecto al procedimiento de la figura 2.

**[0054]** Inicialmente, en la etapa 54, el valor del umbral  $U_{C3k}$  se toma igual a su límite alto  $U_{C3máxk}$ . El límite alto  $U_{C3máxk}$  está entre  $0,9 U_{Cmáx}$  y  $U_{Cmáx}$ . Por ejemplo, aquí el límite  $U_{C3máxk}$  es igual a 950 Vcc.

65

**[0055]** Después, en la etapa 56, la intensidad de corriente  $I_k$  y la tensión  $U_{ssk}$  se miden continuamente.

**[0056]** La subestación  $S_k$  avanza entonces simultáneamente a una fase 57 para ajustar el valor del umbral  $U_{C3k}$  y a una fase de control 58 del convertidor 30.

**[0057]** Al comienzo de la fase 57, en la etapa 60, la unidad 40 verifica si la intensidad de corriente  $I_k$  es cero.

Si es así, el módulo 40 avanza a la etapa 62 para comparar la derivada  $\frac{dU_{ssk}}{dt}$  con respecto al tiempo de la tensión  $U_{ssk}$  medida en un umbral predeterminado  $a_{ssk}$ . Por ejemplo, el valor del umbral  $a_{ssk}$  es superior o igual a 10 V/s.

10

**[0058]** Si el valor de la derivada  $\frac{dU_{ssk}}{dt}$  es superior al umbral  $a_{ssk}$ , entonces, en la etapa 64, el módulo 40 disminuye progresivamente el valor del umbral  $U_{C3k}$  siempre que no se cumpla una de las siguientes dos condiciones:

- 1) el valor de la tensión  $U_{C3k}$  ha alcanzado el límite  $U_{C3mínk}$ , o
- 2) la intensidad de corriente  $I_k$  es diferente de cero.

15

**[0059]** Si se cumple la condición 1) anterior, en la etapa 66, el valor del umbral  $U_{C3k}$  se restablece al valor  $U_{C3máxk}$  y el procedimiento regresa a la etapa 60.

**[0060]** En el caso en que se cumple la condición 2) anterior, la etapa 64 se detiene inmediatamente y el procedimiento regresa a la etapa 60.

**[0061]** La etapa 64 se ejecuta, por ejemplo, cuando un vehículo ferroviario comienza a frenar en la zona  $Z_{fk}$  y no hay otro vehículo ferroviario cercano para consumir la energía de frenado de este vehículo. En este caso, la generación de la energía de frenado en la línea de alimentación 6 da como resultado un aumento repentino en la tensión  $U_{ssk}$ , es decir, un aumento cuya pendiente es superior al umbral  $a_{ssk}$ . La disminución del valor del umbral  $U_{C3k}$  en respuesta a este aumento repentino permite ir al encuentro de la tensión  $U_{ssk}$  que está aumentando y, por lo tanto, reacciona muy rápidamente.

**[0062]** La etapa 66 se ejecuta cuando la energía de frenado es generada por un vehículo ferroviario que está fuera de la zona  $Z_{fk}$ . En este caso, para promover el intercambio de energía directa entre diferentes vehículos ferroviarios, el valor del umbral  $U_{C3k}$  se restablece al valor  $U_{C3máxk}$ . Por intercambio directo de energía se entiende un intercambio de energía eléctrica entre dos vehículos ferroviarios que se realiza solo a través de la línea de alimentación.

30

**[0063]** Si la derivada  $\frac{dU_{ssk}}{dt}$  es estrictamente inferior al umbral  $a_{ssk}$ , entonces, en la etapa 68, el módulo 40

verifica que esta derivada  $\frac{dU_{ssk}}{dt}$  es estrictamente superior a cero. Si es así, en la etapa 70, el valor del umbral  $U_{C3k}$  se establece igual al valor de la tensión  $U_{ssk}$  medida más una constante positiva  $\Delta U_{C3k}$ . La constante  $\Delta U_{C3k}$  es pequeña, es decir, por ejemplo, inferior a  $(U_{Cmáxk} - U_{Cmínk})/10$ .

40

**[0064]** La etapa 70 permite mantener el valor umbral  $U_{C3k}$  ligeramente más alto que la tensión  $U_{ssk}$  medida siempre que la tensión  $U_{ssk}$  aumente suavemente. Esta situación típicamente corresponde al caso en el que la energía de frenado de un vehículo ferroviario presente en la zona  $Z_{fk}$  es consumida, al menos en parte, por otro vehículo ferroviario que funciona en tracción. Mantener el umbral  $U_{C3k}$  cerca de la tensión  $U_{ssk}$  permite una reacción rápida en caso de un aumento repentino en la tensión  $U_{ssk}$ .

45

**[0065]** En el caso en que la derivada  $\frac{dU_{ssk}}{dt}$  es inferior o igual a cero, en la etapa 72, el valor del umbral  $U_{C3k}$  se restablece al valor  $U_{C3máxk}$ .

**[0066]** La etapa 72 se ejecuta en el caso en que la energía de frenado se consume por completo por otros vehículos ferroviarios. En este caso, restablecer el valor del umbral  $U_{C3k}$  al valor  $U_{Cmáxk}$  permite promover el intercambio directo de energía entre los diversos vehículos ferroviarios.

**[0067]** Si, en la etapa 60, la intensidad de corriente medida  $I_k$  es diferente de cero, entonces, en la etapa 74, el valor del umbral  $U_{C3k}$  se toma igual al valor de la tensión  $U_{ssk}$  medida menos una constante positiva predeterminada.

55

Aquí, a modo de ejemplo, la constante positiva predeterminada se toma igual a  $\Delta U_{C3k}$  como en la etapa 70.

**[0068]** Después, en la etapa 76, la intensidad  $I_k$  se compara con el valor cero. Si la intensidad  $I_k$  es estrictamente inferior a cero, entonces, en la etapa 78, el valor del umbral  $U_{C3k}$  se restablece al valor  $U_{C3máxk}$ .

5

**[0069]** Al final de la etapa 78, el procedimiento vuelve a la etapa 60.

**[0070]** En el caso opuesto, es decir, si la intensidad de corriente  $I_k$  es estrictamente superior a cero, el procedimiento vuelve directamente a la etapa 60.

10

**[0071]** Al comienzo de la fase 58, en la etapa 90, la tensión  $U_{ssk}$  medida se compara con el umbral  $U_{C3k}$ . Si la tensión  $U_{ssk}$  es superior al umbral  $U_{C3k}$ , entonces, en la etapa 91, la unidad 32 compara la tensión  $U_{ssk}$  con un umbral  $U_{Cmáx2}$ . El umbral  $U_{Cmáx2}$  es superior o igual al límite  $U_{C3máxk}$  e inferior o igual a  $U_{Cmáx}$ . Por ejemplo, aquí, el umbral  $U_{Cmáx2}$  se elige igual a  $U_{Cmáx}$ .

15

**[0072]** Si la tensión  $U_{ssk}$  es inferior al umbral  $U_{Cmáx2}$ , entonces, en la etapa 92, la unidad 32 cambia o mantiene el convertidor en el modo de regeneración. Específicamente, en la etapa 92, la unidad 32 controla el convertidor 30 para que funcione como un inversor. Además, en la etapa 92, la unidad 32 controla el convertidor 30 para que mantenga constante la tensión  $U_{ssk}$  medida.

20

**[0073]** Por lo tanto, en la etapa 92, la energía de frenado se transfiere desde la línea de alimentación 6 a la red 20 mientras se mantiene la tensión  $U_{ssk}$  constante. La tensión  $U_{ssk}$  se mantiene constante solo mientras el convertidor 30 funcione en el modo de regeneración. Por lo tanto, cuando el vehículo ferroviario 46 deja de generar energía de frenado, la tensión  $U_{ssk}$  desciende.

25

**[0074]** Si, en la etapa 91, la tensión  $U_{ssk}$  es superior al umbral  $U_{Cmáx2}$ , entonces, en la etapa 93, la unidad 32 controla el convertidor 30 para que absorba la máxima potencia eléctrica posible. Por lo tanto, la etapa 93 hace posible suprimir una sobretensión que aparecerá en la línea de alimentación 6.

30

**[0075]** Al final de la etapa 92 o 93, el procedimiento vuelve a la etapa 90.

**[0076]** Si la tensión  $U_{ssk}$  medida es estrictamente inferior al umbral  $U_{C3k}$ , entonces, en la etapa 94, la unidad 32 controla la detención de la transferencia de energía desde la línea de alimentación 6 a la red 20 por medio del convertidor 30.

35

**[0077]** Después, la tensión  $U_{ssk}$  se compara con el umbral  $U_{dk}$ , en la etapa 96. Si la tensión  $U_{ssk}$  medida es estrictamente inferior a este umbral  $U_{dk}$ , entonces el convertidor cambia o se mantiene en el modo de suministro de tracción. Más específicamente, en la etapa 98, la unidad 32 controla el convertidor 30 para que funcione como un rectificador. Por ejemplo, el umbral  $U_{dk}$  se elige igual a  $U_{Cnom}$ .

40

**[0078]** Además, en la etapa 98, la unidad 32 controla el convertidor 30 para entregar la energía recogida de la red 20 en la línea de alimentación 6 en forma de una corriente continua igual a la tensión  $U_{Cnom}$ .

45

**[0079]** En el caso contrario, es decir, si la tensión  $U_{ssk}$  medida es superior al umbral  $U_{dk}$ , entonces, durante la etapa 100, se detiene el funcionamiento del convertidor 30 como rectificador. Por lo tanto, en la etapa 100, no se establece ningún intercambio de energía entre la red 20 y la línea de alimentación 6 a través del convertidor 30.

**[0080]** En este procedimiento, el cambio del convertidor al modo de regeneración o al modo de suministro de tracción tiene lugar en menos de 10 ms.

50

**[0081]** Las figuras 3 a 6 muestran esquemáticamente la evolución de diferentes señales en función del tiempo durante el funcionamiento del sistema 2.

**[0082]** Más específicamente, la figura 3 representa la energía de frenado generada por el vehículo 46.

55

**[0083]** La figura 4 representa la energía de frenado generada por un segundo vehículo presente en la misma zona  $Z_{fk}$  que el vehículo 46.

**[0084]** La figura 5 muestra la evolución en el tiempo del valor del umbral  $U_{C3k}$  y la tensión  $U_{ssk}$ .

60

**[0085]** Finalmente, la Figura 6 muestra la intensidad de corriente  $I_k$  a través del convertidor 30 de la subestación  $S_k$  en función del tiempo.

**[0086]** Inicialmente, como se muestra en la figura 5, el valor del umbral  $U_{C3k}$  es igual a  $U_{C3máxk}$ .

65



- 5 **[0087]** En el momento  $t_1$ , el vehículo 46 genera energía de frenado. Esto da como resultado un fuerte aumento en la tensión  $U_{ssk}$ . Este aumento repentino en la tensión  $U_{ssk}$  causa una disminución en el valor del umbral  $U_{C3k}$ . Cuando la tensión  $U_{ssk}$  se vuelve superior al umbral  $U_{C3k}$ , entonces la unidad 32 controla el convertidor 30 para que funcione como un inversor. La energía de frenado generada por el vehículo 46 se transfiere entonces desde la línea de alimentación 6 a la red 20 y la corriente  $I_k$  es positiva.
- 10 **[0088]** En el momento  $t_2$ , el vehículo 46 deja de frenar. Esto se traduce inmediatamente en una caída en la tensión  $U_{ssk}$ . Por lo tanto, la tensión  $U_{ssk}$  se vuelve más baja que el umbral  $U_{C3k}$ , lo que da como resultado la detención del funcionamiento del convertidor 30 como inversor.
- 15 **[0089]** Cuando la tensión  $U_{ssk}$  cae por debajo del umbral  $U_{dk}$ , la unidad 32 controla el convertidor 30 para que funcione como un rectificador. La corriente que fluye a través del convertidor 30 es, por lo tanto, negativa. La intensidad negativa de la corriente  $I_k$  da como resultado un restablecimiento del valor del umbral  $U_{C3k}$  al valor  $U_{C3máxk}$ .
- 20 **[0090]** Por lo tanto, hasta el momento  $t_3$ , la subestación suministra energía eléctrica al vehículo 46.
- 25 **[0091]** En el momento  $t_3$ , el vehículo 46 comienza a frenar de nuevo y genera energía de frenado. Sin embargo, ahora se supone que al mismo tiempo, el segundo vehículo ferroviario cerca del vehículo 46 recibe tracción. Por lo tanto, al menos una parte de la energía de frenado del vehículo 46 se transmite directamente por la línea de alimentación de energía 6 a este segundo vehículo que la consume para propulsarse. Por lo tanto, esta energía se transfiere al segundo vehículo sin pasar por medio de una subestación. Por consiguiente, el aumento en la tensión  $U_{ssk}$  causado por la energía de frenado del vehículo 46 es bajo. En estas condiciones, el valor del umbral  $U_{C3k}$  se ajusta a un valor ligeramente superior al valor de la tensión  $U_{ssk}$  medida.
- 30 **[0092]** En el momento  $t_4$ , el vehículo 46 deja de frenar. La tensión  $U_{ssk}$  cae. La caída de la tensión  $U_{ssk}$  provoca el reinicio del valor del umbral  $U_{C3k}$  al límite  $U_{C3máxk}$ .
- 35 **[0093]** En el ejemplo descrito en el presente documento, se observa que, entre los instantes  $t_3$  y  $t_4$ , solo el vehículo 46 proporciona energía al segundo vehículo que funciona en tracción. La subestación  $S_k$  no proporciona energía y no consume energía.
- 40 **[0094]** En el momento  $t_5$ , la tensión  $U_{ssk}$  se vuelve más baja que el umbral  $U_{dk}$ . La unidad 32 controla entonces el funcionamiento del convertidor 30 como un rectificador para alimentar el vehículo ferroviario 46. La corriente  $I_k$  se vuelve negativa.
- 45 **[0095]** En el momento  $t_6$ , el vehículo 46 comienza a frenar de nuevo. También se supone que en este momento, el segundo vehículo consume energía en la línea de alimentación 6 para propulsarse. Por consiguiente, como ya se ilustra entre los momentos  $t_3$  y  $t_4$ , la tensión  $U_{ssk}$  aumenta lentamente y el valor del umbral  $U_{C3k}$  se mantiene ligeramente por encima del valor de la tensión  $U_{ssk}$  medida.
- 50 **[0096]** En el momento  $t_7$ , se supone que el segundo vehículo comienza a frenar. Esto se traduce en un fuerte aumento en la tensión  $U_{ssk}$ . Por lo tanto, la tensión  $U_{ssk}$  se vuelve superior al umbral  $U_{C3k}$  y el convertidor 30 comienza a funcionar como un inversor. La corriente  $I_k$  se vuelve positiva. El umbral  $U_{C3k}$  se mantiene ligeramente inferior a la tensión  $U_{ssk}$ .
- 55 **[0097]** Sin embargo, se supone aquí que, dado que dos vehículos ferroviarios frenan simultáneamente en la zona  $Z_{fk}$ , se alcanza la intensidad máxima  $I_{ssmáx}$  de la corriente  $I_k$  que puede atravesar el convertidor 30, de manera que este convertidor 30 no puede absorber la totalidad de la energía de frenado generada por los dos vehículos ferroviarios al mismo tiempo. Por lo tanto, la tensión  $U_{ssk}$  continúa creciendo bruscamente. Este aumento brusco en la tensión  $U_{ssk}$  también da como resultado un aumento repentino en las tensiones  $U_{ssk-1}$  y  $U_{ssk+1}$  en los puntos  $P_{k-1}$  y  $P_{k+1}$ . Por lo tanto, los umbrales  $U_{C3k-1}$  y  $U_{C3k+1}$  de las subestaciones  $S_{k-1}$  y  $S_{k+1}$  disminuyen.
- 60 **[0098]** Antes de que la tensión  $U_{ssk}$  en el punto  $P_k$  alcance la tensión  $U_{Cmáx}$ , la tensión  $U_{ssk-1}$  o  $U_{ssk+1}$  en el punto  $P_{k-1}$  o el punto  $P_{k+1}$  excede el umbral  $U_{C3k-1}$  o  $U_{C3k+1}$  de la subestación correspondiente. Las subestaciones comienzan a transferir energía de frenado desde la línea de alimentación 6 a la red 20. Esto es suficiente para detener el aumento de la tensión  $U_{ssk}$  y, por lo tanto, para mantenerlo inferior o igual a la tensión  $U_{Cmáx}$ .
- 65 **[0099]** En el momento  $t_8$ , el vehículo 46 y el segundo vehículo dejan de frenar simultáneamente. La tensión  $U_{ssk}$  cae bruscamente y después se vuelve más baja que el umbral  $U_{C3k}$ . El convertidor 30 de la subestación  $S_k$  deja de transferir inmediatamente la energía de frenado desde la línea de alimentación 6 a la red 20. Por lo tanto, la intensidad de corriente  $I_k$  se vuelve cero. Después, la caída de la tensión  $U_{ssk}$  lleva a restablecer el valor del umbral  $U_{C3k}$  al valor  $U_{C3máxk}$ .
- [0100]** Como se ilustra en el ejemplo de funcionamiento descrito con referencia a las figuras 3 y 6, el sistema 4 permite simultáneamente:

- recuperar toda la energía de frenado de los vehículos ferroviarios,
- para promover el intercambio directo de energía entre vehículos ferroviarios, y
- agrupar la potencia de frenado en varias subestaciones consecutivas.

- 5
- [0101]** Los diversos modos operativos posibles del sistema 4 se ilustran en el gráfico de la figura 7. En este gráfico, el eje vertical derecho comprende los umbrales  $U_{Cmáx}$  y  $U_{Cmín}$ , así como la tensión nominal  $U_{Cnom}$ . El eje derecho contiene los umbrales almacenados en la subestación, es decir,  $U_{Cmáx2}$ ,  $U_{C3máxk}$ ,  $U_{dk}$  y  $U_{C3mínk}$ . Las líneas horizontales 150, 152 y 154 representan respectivamente los umbrales  $U_{Cmáx}$ ,  $U_{dk}$  y  $U_{Cmín}$ .
- 10
- [0102]** En este gráfico, la evolución del valor del umbral  $U_{C3k}$  se representa por una línea oblicua 156. Este gráfico define cuatro posibles zonas operativas 160, 162, 164 y 166.
- [0103]** La zona 160 se encuentra debajo de la línea 150 y sobre las líneas 156 y 152. Cuando la tensión  $U_{ssk}$  está en la zona 160, la subestación funciona como un regenerador o recuperador de energía de frenado.
- 15
- [0104]** La zona 162 está entre las líneas 156 y 152. Cuando la tensión  $U_{ssk}$  se incluye en la zona 162, el convertidor de la subestación no está en modo de regeneración ni en modo de suministro de energía. tracción. Por lo tanto, la zona 162 corresponde a una zona operativa en la que la energía de frenado del vehículo ferroviario se transmite directamente a otro vehículo ferroviario a través de la línea de alimentación.
- 20
- [0105]** La zona 164 se encuentra debajo de las líneas 152 y 156 y por encima de la línea 154. Cuando la tensión  $U_{ssk}$  se incluye en la zona 164, esta última es inferior al umbral  $U_{dk}$ , de modo que el convertidor de la subestación funciona en el modo de suministro de tracción.
- 25
- [0106]** Finalmente, la zona 166 está situada debajo de la línea 152 y por encima de la línea 156. Cuando la tensión  $U_{ssk}$  está en la zona 166, está por debajo del umbral de  $U_{dk}$  y es superior al límite  $U_{C3mínk}$ . En esta zona, por lo tanto, es posible operar el convertidor en el modo de suministro de tracción o en el modo de regeneración. En el procedimiento de la figura 3, se ha elegido dar prioridad al modo de regeneración de manera que, cuando la tensión  $U_{ssk}$  se incluye en la zona 166, el convertidor de la subestación se conmuta sistemáticamente al modo de regeneración. Sin embargo, son posibles otros modos operativos. También se podría decidir dar prioridad al modo de suministro de tracción, de modo que, cuando la tensión  $U_{ssk}$  esté en la zona 166, el convertidor de la subestación  $S_k$  se cambie sistemáticamente al modo de suministro de tracción.
- 30
- [0107]** Finalmente, preferiblemente, el modo operativo del convertidor de la subestación  $S_k$  cuando la tensión  $U_{ssk}$  está en la zona 166 se elige según el modo operativo del convertidor que tenía antes de que la tensión  $U_{ssk}$  entrara en la zona 166. Por ejemplo, si la tensión  $U_{ssk}$  estaba en la zona 160 antes de entrar en la zona 166, el convertidor de la subestación se mantendrá en el modo de regeneración incluso en la zona 166. Por el contrario, si la tensión  $U_{ssk}$  estaba en la zona 164 antes de entrar en la zona 166, entonces el modo de suministro de tracción se mantendrá incluso cuando la tensión  $U_{ssk}$  entre en la zona 166.
- 35
- [0108]** Son posibles muchas otras realizaciones, por ejemplo, el convertidor 30 puede implementarse en forma de un inversor/rectificador controlable hecho de transistores de potencia. En esta realización, se utilizan los mismos transistores de potencia para rectificar la tensión o para invertir una tensión.
- 40
- 45
- [0109]** Como alternativa, lo que se ha descrito anteriormente también se aplica a las catenarias alimentadas por corriente alterna a través de un convertidor estático de CA/CA. Tal convertidor estático debe controlarse para permitir un intercambio de energía desde la red 20 a la línea de alimentación 6 y viceversa. Por lo tanto, el intercambio de energía no es natural.
- 50
- [0110]** Aquí, el convertidor 30 se ha descrito como un convertidor de cuatro cuadrantes. Como alternativa, el convertidor 30 es un convertidor con al menos dos cuadrantes que permiten invertir la dirección de la corriente  $I_k$ . Finalmente, no es necesario invertir la polaridad de la tensión  $U_{ssk}$ .
- 55
- [0111]** El umbral  $U_{dk}$  y el límite  $U_{C3mínk}$  pueden ser, respectivamente, estrictamente superiores a  $U_{Cnom}$  y estrictamente inferiores a  $U_{Cnom}$ .
- [0112]** Como alternativa, las subestaciones  $S_k$  pueden intercambiar datos entre sí y las subestaciones  $S_k$  pueden ajustarse cada una al valor de su umbral  $U_{C3k}$  respectivo en función de los datos recibidos de las demás subestaciones.
- 60
- [0113]** El modo operativo con referencia a las figuras 3 a 6 es solo un ejemplo simplificado dado a modo de ilustración. Por supuesto, el ajuste del umbral  $U_{C3k}$  se puede optimizar y lo que se ha descrito se puede adaptar en caso de que se deba recuperar la energía de frenado de más de dos vehículos. Del mismo modo, la energía eléctrica de frenado se puede recuperar tanto en sentido ascendente como descendente.
- 65

REIVINDICACIONES

1. Subestación  $S_k$  para la recuperación de energía de frenado de vehículos ferroviarios capaz de implementarse en un sistema de recuperación de energía de frenado de vehículos ferroviarios que incluye:
- 5 - al menos una línea de alimentación (6) que se extiende a lo largo de una vía férrea para alimentar los vehículos ferroviarios que circulan en esta vía férrea,  
 - una pluralidad de subestaciones de recuperación de energía de frenado separadas entre sí por una distancia  $D_k$  superior a 100 m,
- 10 siendo dicha subestación  $S_k$  capaz de conectarse eléctricamente a la línea de alimentación (6) en un punto  $P_k$  y estando equipada por:
- un convertidor eléctrico (30) capaz de transferir energía eléctrica desde la línea de alimentación (6) a una red de distribución de electricidad (20) para recuperar la energía de frenado de los vehículos ferroviarios,
  - 15 • un sensor (36) o un estimador de tensión  $U_{ssk}$  en el punto de conexión  $P_k$ ,
  - un módulo de control (32) del convertidor eléctrico capaz de cambiar automáticamente el convertidor eléctrico a un modo de regeneración en el que el convertidor eléctrico transfiere continuamente energía eléctrica desde la línea de alimentación a la red de distribución de electricidad para recuperar la energía de frenado de los vehículos ferroviarios,
  - 20 **caracterizado porque** el módulo de control (32) del convertidor eléctrico es capaz de cambiar automáticamente el convertidor eléctrico en un modo de regeneración tan pronto como la tensión  $U_{ssk}$  medida o estimada es superior a un umbral  $U_{C3k}$ , de modo que la subestación está asociada con una zona  $Z_{fk}$  de recuperación de energía de frenado en la que, independientemente de la posición del vehículo ferroviario en el interior de esta zona  $Z_{fk}$ , la subestación  $S_k$  puede recuperar al menos una parte de la energía de frenado de este vehículo ferroviario, siendo la zona  $Z_{fk}$  de recuperación de energía de frenado un segmento  $[L_{Gfk}; L_{Dfk}]$  de la línea de alimentación (6) centrada
  - 25 en torno al punto  $P_k$  y cuyos límites  $L_{Gfk}$ ,  $L_{Dfk}$  están separados a ambos lados del punto  $P_k$  por una distancia  $F_k$  igual a  $U_{Cmáx} - U_{C3mínk} / (\rho l_{máx})$ , donde:
    - $U_{Cmáx}$  es una tensión máxima no permanente admisible en la línea de alimentación,
    - 30 •  $U_{C3mínk}$  es el valor mínimo que puede asumir el umbral  $U_{C3k}$  durante el funcionamiento de la subestación,
    - $\rho$  es la resistencia lineal de la línea de alimentación,
    - $l_{máx}$  es la intensidad máxima admisible para la corriente que fluye en la línea de alimentación,
    - y **porque** el valor del límite  $U_{C3mínk}$  es de tal forma que la distancia  $F_k$  es superior o igual a  $D_k/2$  o  $D_k$ .
- 35 2. Subestación según la reivindicación 1, el convertidor eléctrico (30) es capaz de transferir energía eléctrica desde la red de distribución de electricidad (20) a la línea de alimentación (6) para suministrar tracción al vehículo o vehículos ferroviarios, de manera que la subestación  $S_k$  también está asociada con una zona  $Z_{tk}$  para suministrar tracción a los vehículos ferroviarios en la que, independientemente de la posición del vehículo ferroviario dentro de la zona  $Z_{tk}$ , la subestación  $S_k$  es capaz de suministrar tracción a los motores eléctricos del vehículo
- 40 ferroviario, siendo una zona  $Z_{tk}$  para suministrar tracción un segmento  $[L_{Gtk}; L_{Dtk}]$  de la línea de alimentación centrada alrededor del punto  $P_k$  y cuyos límites  $L_{Gtk}$ ,  $L_{Dtk}$  están separados a ambos lados del punto  $P_k$  por una distancia  $T_k$  igual a  $(U_{ssmáxk} - U_{Cmín}) / (\rho l_{máx})$ , en la que:
- $U_{ssmáxk}$  es la tensión máxima que puede generar el convertidor eléctrico de la subestación  $S_k$  en el punto  $P_k$  para suministrar tracción a un vehículo ferroviario,
  - 45 •  $U_{Cmín}$  es la tensión mínima no permanente admisible en la línea de alimentación,
  - siendo el valor del límite  $U_{ssmáxk}$  de tal forma que la distancia  $T_k$  es superior o igual a  $D_k/2$  o  $D_k$ .
3. Subestación según la reivindicación 2, en la que:
- 50 - el módulo de control (32) es capaz de cambiar automáticamente el convertidor eléctrico (30) en un modo de suministro de tracción en el que el convertidor eléctrico (30) transfiere continuamente energía eléctrica desde la red de distribución de electricidad a la línea de alimentación tan pronto como la tensión  $U_{ssk}$  medida o estimada sea inferior a un umbral  $U_{dk}$ ,
- 55 - el límite  $U_{C3mínk}$  es estrictamente inferior al umbral  $U_{dk}$ , y  
 - cuando la tensión  $U_{ssk}$  medida o estimada está comprendida entre el límite  $U_{C3mínk}$  y el umbral  $U_{dk}$ , el módulo de control puede cambiar el convertidor eléctrico en el modo de regeneración o en el modo de suministro de tracción en función del modo en el que el convertidor se encontraba antes de que la tensión  $U_{ssk}$  estuviera entre el límite  $U_{C3mínk}$  y el umbral  $U_{dk}$ .
- 60 4. Subestación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en la que la subestación  $S_k$  incluye un módulo (40) para ajustar el valor del umbral  $U_{C3k}$  capaz de hacer variar el valor de este umbral del límite bajo  $U_{C3mínk}$  hasta un límite alto  $U_{C3máxk}$  superior o igual al 90 % de una tensión máxima  $U_{Cmáx}$ , siendo este módulo de ajuste (40) capaz de mantener el valor del umbral  $U_{C3k}$  estrictamente superior a la tensión  $U_{ssk}$  medida o estimada siempre que el
- 65 aumento de la tensión  $U_{ssk}$  medida o estimada permanezca inferior a un umbral  $a_{ssk}$  predeterminado.

5. Subestación según la reivindicación 4, en la que, cuando la intensidad de corriente que atraviesa el convertidor eléctrico es nula, el módulo de ajuste (40) es capaz de disminuir el valor del umbral  $U_{C3k}$  hasta el límite  $U_{C3mink}$  si el aumento de la tensión  $U_{ssk}$  es superior o igual al umbral predeterminado  $a_{ssk}$ .
- 5 6. Subestación según la reivindicación 4 o la reivindicación 5, en la que el módulo de control (32) es capaz de controlar el convertidor eléctrico de modo que este convertidor eléctrico transfiera la mayor cantidad posible de energía eléctrica por unidad de tiempo de la línea de alimentación (6) a la red de distribución de electricidad (20), tan pronto como la tensión  $U_{ssk}$  medida o estimada exceda un umbral  $U_{cmáx2k}$  superior o igual al límite  $U_{c3máxk}$ .
- 10 7. Subestación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en la que el convertidor eléctrico (30) es un convertidor controlado por al menos dos cuadrantes hechos usando tiristores o transistores de potencia, siendo el módulo de control (32) capaz de controlar el convertidor para mantener constante la tensión  $U_{ssk}$  siempre que la potencia eléctrica generada en la línea de alimentación o absorbida a partir de la línea de alimentación no varía de más del 50 %.
- 15 8. Sistema de recuperación de energía de frenado de vehículos ferroviarios, comprendiendo este sistema:
- al menos una línea de alimentación (6) que se extiende a lo largo de una vía férrea para alimentar los vehículos ferroviarios que circulan en esta vía férrea,
  - una pluralidad de subestaciones  $S_k$  de recuperación de energía de frenado separadas entre sí por una distancia  $D_k$  superior a 100 m, estando cada subestación  $S_k$  eléctricamente conectada a la línea de alimentación en un punto de conexión  $P_k$ , **caracterizado porque** cada subestación es una subestación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7.
- 20 9. Sistema según la reivindicación 8, en el que el valor del límite  $U_{c3mink}$  es de tal forma que la distancia  $F_k$  es superior o igual a la distancia  $D_k$ .
- 25 10. Vehículo ferroviario (46) destinado a circular por una red ferroviaria equipada con un sistema de recuperación de energía de frenado según cualquiera de las reivindicaciones 8 a 9, **caracterizado porque** el vehículo ferroviario carece de reóstato integrado en este vehículo y permite disipar toda la energía eléctrica de frenado de este vehículo ferroviario en forma de calor.
- 30 11. Procedimiento de recuperación de energía de frenado de vehículos ferroviarios, comprendiendo este procedimiento:
- la provisión de al menos una línea de alimentación que se extiende a lo largo de una vía férrea para alimentar los vehículos ferroviarios que circulan en esta vía férrea,
  - la provisión de una pluralidad de subestaciones  $S_k$  de recuperación de energía eléctrica de frenado separadas entre sí por una distancia  $D_k$  superior a 100 m, estando cada subestación  $S_k$  eléctricamente conectada a la línea de alimentación en un punto de conexión  $P_k$  y equipada con un convertidor eléctrico capaz de transferir energía eléctrica de la línea de alimentación a una red de distribución de electricidad para recuperar la energía de frenado de los vehículos ferroviarios,
  - la medición (56) o estimación de una tensión  $U_{ssk}$  en el punto de conexión  $P_k$ ,
  - el control (92) del convertidor eléctrico para cambiarlo automáticamente a un modo de regeneración en el que el convertidor eléctrico transfiere continuamente la energía eléctrica desde la línea de alimentación a la red de distribución de electricidad para recuperar la energía frenado de vehículos ferroviarios, tan pronto como la tensión  $U_{ssk}$  medida o estimada sea superior a un umbral  $U_{c3k}$ , de manera que cada subestación esté asociada a su propia zona  $Z_{fk}$  de recuperación de energía de frenado en la que, independientemente de la posición del vehículo ferroviario dentro de esta zona  $Z_{fk}$ , la subestación  $S_k$  puede recuperar al menos una parte de la energía de frenado de este vehículo ferroviario,
  - estando una zona  $Z_{fk}$  de recuperación de energía de frenado un segmento  $[L_{Gfk}; L_{Dfk}]$  de la línea de alimentación (6) centrada en torno al punto  $P_k$  y cuyos límites  $L_{Gfk}$ ,  $L_{Dfk}$  están separados a ambos lados del punto  $P_k$  por una distancia  $F_k$  igual a  $(U_{Cmáx}-U_{C3mink})/(\rho I_{máx})$ , en la que:
- $U_{Cmáx}$  es una tensión máxima no permanente admisible en la línea de alimentación,
  - $U_{C3mink}$  es el valor mínimo que puede asumir el umbral  $U_{C3k}$  durante el funcionamiento de la subestación,
  - $\rho$  es la resistencia lineal de la línea de alimentación, y
  - $I_{máx}$  es la intensidad máxima admisible para la corriente que circula en la línea de alimentación,
- 55 60 siendo el límite  $U_{C3mink}$  de tal forma que la distancia  $F_k$  es superior o igual a  $D_k/2$ ,
- el ajuste (64) del valor del umbral  $U_{C3k}$  al valor del límite  $U_{C3mink}$  cuando un vehículo ferroviario genera energía de frenado en el límite de la zona  $Z_{fk}$ .
- 65 12. Procedimiento según la reivindicación 11, en el que el procedimiento incluye el mantenimiento (70) del

valor del umbral  $U_{C3k}$  estrictamente superior a la tensión  $U_{ssk}$  medida o estimada siempre que el aumento de la tensión  $U_{ssk}$  permanezca inferior a un umbral  $a_{ssk}$  predeterminado.

13. Procedimiento según la reivindicación 11 o 12, en el que el procedimiento incluye la disminución (64) del valor del umbral  $U_{C3k}$  hasta el límite  $U_{C3mink}$  si el aumento de la tensión  $U_{ssk}$  medida o estimada es superior o igual al umbral  $a_{ssk}$  predeterminado.

14. Medio de registro de información (44), **caracterizado porque** incluye instrucciones para la ejecución de un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 11 a 13, cuando estas instrucciones son ejecutadas por un ordenador electrónico (42).

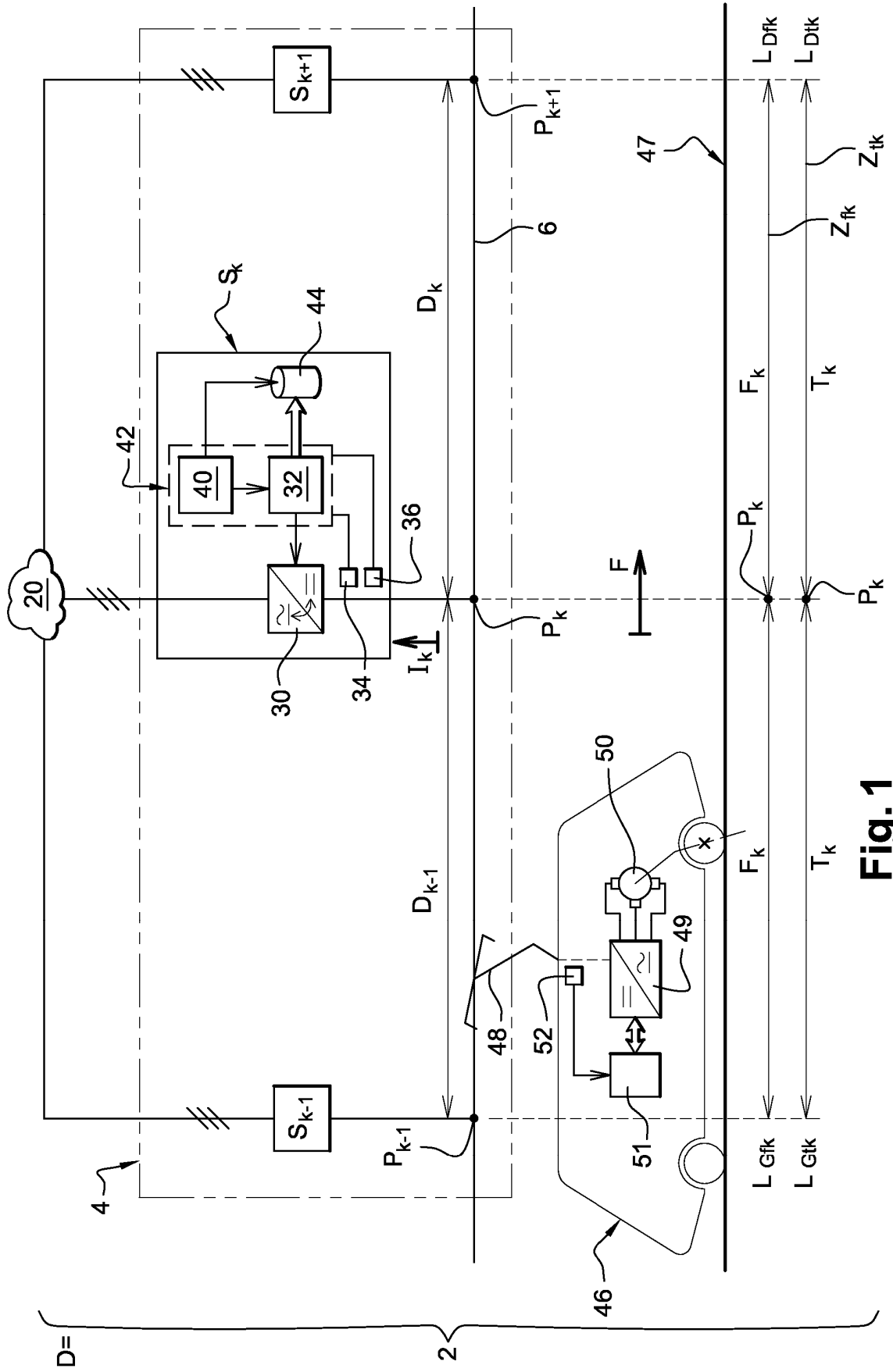


Fig. 1

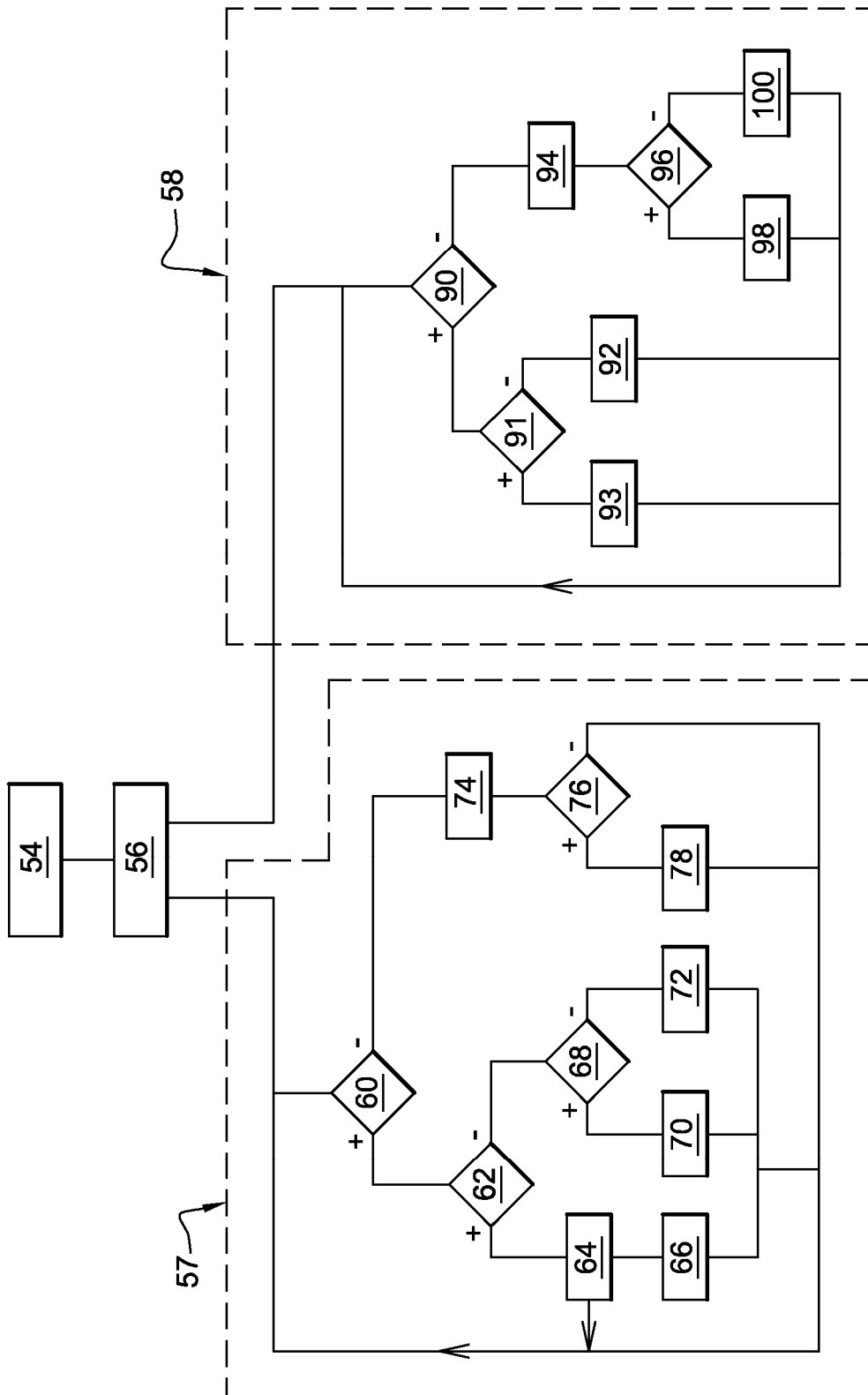
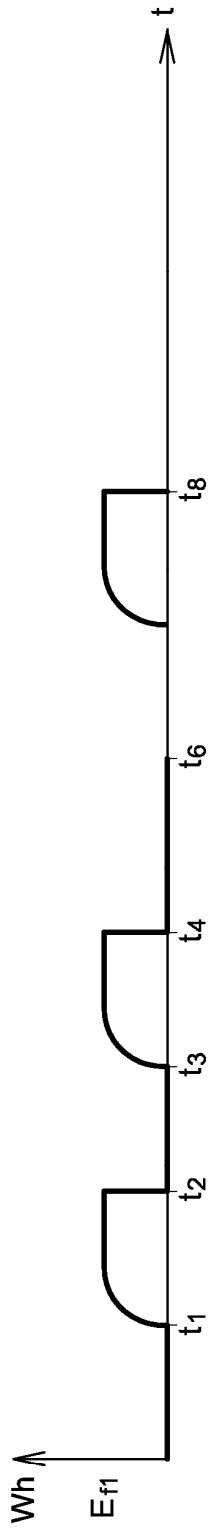
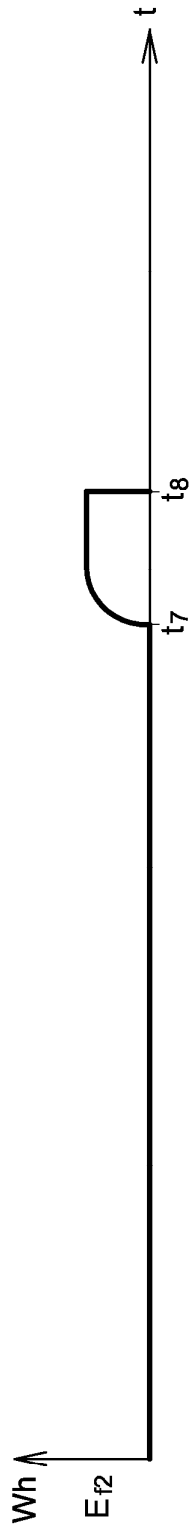


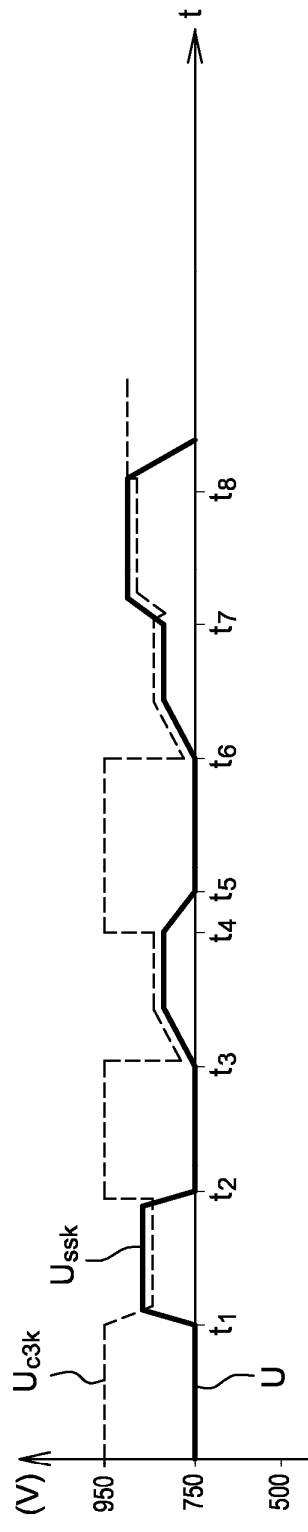
Fig. 2



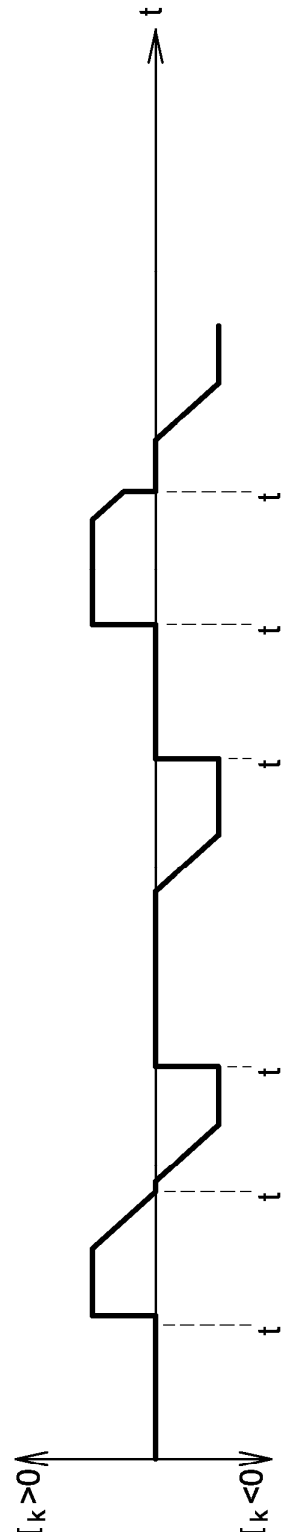
**Fig. 3**



**Fig. 4**

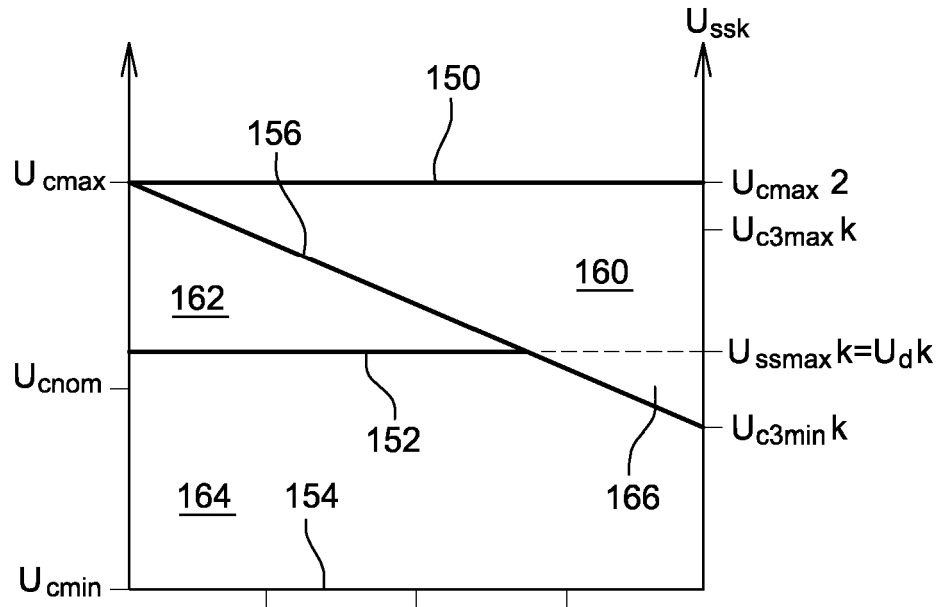


**Fig. 5**



**Fig. 6**





**Fig. 7**