

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 415 238**

21 Número de solicitud: 201101267

51 Int. Cl.:

G06F 1/26 (2006.01)

H02M 5/12 (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A2

22 Fecha de presentación:

30.11.2011

43 Fecha de publicación de la solicitud:

24.07.2013

71 Solicitantes:

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACION A
DISTANCIA (UNED) (100.0%)**

**C/ BRAVO MURILLO, 38 - 4
28015 MADRID ES**

72 Inventor/es:

**BORGE DÍEZ , David ;
COLMENAR SANTOS , Antonio ;
CASTRO GIL , Manuel Alonso y
CARPIO IBÁÑEZ , José**

54 Título: **SISTEMA Y MÉTODO DE REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS EN SISTEMAS DE
TRANSFORMADORES EN PARALELO EN CENTROS DE DISTRIBUCIÓN**

57 Resumen:

Sistema y método de reducción de pérdidas en sistemas de transformadores en paralelo en centros de distribución. El método comprende:

- medir la potencia de carga total S_L de los transformadores en paralelo (10, 10') del centro de distribución;
- comparar dicho valor de carga S_L con un valor de potencia de optimización (5) obtenido en función de la potencia de transformación total S_N de los transformadores en paralelo (10, 10');
- seleccionar una configuración de conexión de transformadores (10, 10') determinada en función de dicha comparación;
- cambiar a la configuración de conexión seleccionada, en caso de que ésta no coincida con la configuración de conexión en activo.

Aplicable para centros donde el uso de energía eléctrica es muy variable (polígonos industriales, centros comerciales, centros docentes, centros turísticos estacionales, etc.).

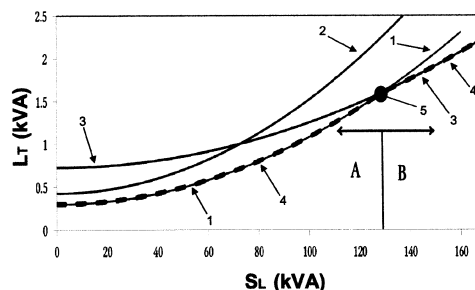


Fig. 2

DESCRIPCIÓN

Sistema y método de reducción de pérdidas en sistemas de transformadores en paralelo en centros de distribución**Campo de la invención**

- 5 La presente invención se engloba dentro del campo de los centros de transformación, y más en concreto, en los sistemas y métodos de reducción de pérdidas en la transformación de tensión realizada en dichos centros de transformación.

10 **Antecedentes de la invención**

- Los sistemas de transformación instalados en edificios e industrias conectados en redes de distribución deben garantizar la continuidad de suministro en el punto de consumo del modo más eficiente posible. Las diferentes normativas internacionales exigen esta garantía de suministro mediante la instalación de dos o más
- 15 transformadores de potencia en paralelo que permitan realizar operaciones de mantenimiento en uno de ellos sin cortar el suministro, así como garantizar la continuidad de funcionamiento en caso de avería. A pesar de que la eficiencia energética de los transformadores de distribución ha aumentado y se han reducido las pérdidas totales, suma de las pérdidas en carga y en vacío, éstas representan todavía
- 20 un valor importante en los sistemas eléctricos, entre un 16% y un 40% de las pérdidas energéticas asociadas a los sistemas de distribución eléctrica. Se hace por tanto necesario reducir las pérdidas en los sistemas de transformación y por lo tanto la emisión de gases de efecto invernadero asociados.

- Los sistemas de transformación suponen un importante porcentaje en las
- 25 pérdidas del conjunto de la distribución eléctrica tanto en Europa como Estados Unidos [1]. Pese a que los fabricantes de transformadores [2] han reducido de forma sistemática las pérdidas introduciendo nuevos materiales y técnicas de fabricación [3-6], existe un importante número de equipos ya instalados que se encuentran dentro de su vida útil y presentan valores de eficiencia energética mucho menores a las que
- 30 presentan los sistemas fabricados hoy en día. Las técnicas de fabricación modernas de transformadores permiten obtener sistemas con pérdidas prácticamente nulas lo que implica la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas [4,5]. Los sistemas de transformación con bajas pérdidas permiten reducir la potencia instantánea demandada por la instalación y por lo tanto reducen la potencia de
- 35 generación asociada. En el caso del suministro basado en combustibles fósiles esto

implica una reducción de toneladas de CO₂ equivalentes y en el caso de sistemas en redes de generación distribuida con generación renovable implica una reducción de la potencia instalada y facilita una mejor previsión de la demanda y control del sistema.

La inversión necesaria en los sistemas de distribución de potencia y el coste de generación eléctrica siguen en aumento, por lo que las tecnologías que permitan reducir el consumo energético están muy demandadas hoy en día. Las empresas suministradoras de energía eléctrica y el consumidor final en instalaciones privadas se ven directamente beneficiados por la implementación de sistemas de reducción de pérdidas en transformadores de distribución. Los sistemas de transformación se encuentran en funcionamiento obligatorio siempre que exista demanda por lo que los ahorros energéticos asociados a nuevas tecnologías o sistemas de transformación alcanzan valores elevados. Además los transformadores instalados funcionando en vacío tienen unas pérdidas asociadas por lo que existe consumo energético sin demanda en el secundario. En una fase de diseño de una nueva instalación la decisión entre la utilización de un sistema de alta eficiencia y uno de mayores pérdidas está directamente relacionada con el ahorro económico esperable durante la fase de utilización del equipo. El análisis TOC (*Total Owning Cost*, análisis de coste total de la propiedad) se utiliza como herramienta de decisión ya que contempla la suma del coste del propio transformador y los costes derivados de las pérdidas en el equipo durante su vida útil [7]. Existen ejemplos de la aplicación de este método para la evaluación de instalaciones [8,9] en función del tipo de uso [10-12] y particularizando para sistemas industriales y comerciales [13,14]. El cálculo TOC evalúa las pérdidas del transformador en carga y en vacío para determinar qué transformador es el más adecuado en función del coste de las pérdidas durante la vida útil del equipo. Es una herramienta idónea para la toma de decisiones en fase de diseño [14,15], fabricación y compra de equipos.

En el caso de instalaciones ya existentes que poseen transformadores en operación es necesario plantear técnicas que permitan reducir las pérdidas energéticas asociadas a los equipos sin tener que sustituir éstos. La sustitución de un equipo que no se encuentre dañado es justificable siempre que al realizar un análisis TOC se compruebe la rentabilidad de desechar el sistema existente y la instalación de un nuevo transformador. Esta sustitución no es económicamente rentable en casi ningún caso por lo que es necesario plantear alternativas de ahorro. En el caso de nuevas instalaciones la elección de transformadores de mayor clase de eficiencia puede ser rentable cuando la reducción de pérdidas energéticas justifique el

sobrecoste frente a un transformador convencional. Los transformadores existentes han de ser integrados además en los nuevos sistemas de generación distribuida por lo que la propuesta de métodos de reducción de pérdidas facilitará esta tarea. En los centros de transformación de instalaciones industriales y comerciales, habitualmente se mantienen los transformadores conectados sea cual sea la demanda de potencia instantánea. Son muchas las instalaciones que presentan estacionalidad horaria, diaria y mensual de uso, por lo que la potencia de transformación instalada no siempre se ajusta a la óptima. Además, por motivos de previsión de ampliación de la instalación, es habitual sobredimensionar los sistemas de transformación un mínimo de un 20%.

Los transformadores son máquinas eléctricas estáticas con un elevado rendimiento que alcanza valores superiores al 95%. Está basado en el uso de dos o más arrollamientos alrededor de un núcleo ferromagnético, y en un cambio de un nivel de tensión a otro sin que exista un cambio en la frecuencia. Los transformadores son utilizados masivamente en los sistemas de distribución eléctrica y desempeñan funciones básicas ya que actúan como elementos de aislamiento y transformadores de nivel de tensión. La utilización de materiales ferromagnéticos y cobre hace que su coste sea elevado y son además máquinas pesadas y voluminosas. El medio para reducir el tamaño de las máquinas es que la densidad de potencia en el transformador es inversamente proporcional a la frecuencia por lo que sistemas que trabajen con elevadas frecuencias permiten utilizar de forma más eficiente el núcleo magnético y reducir por lo tanto el tamaño del equipo [16]. En la actualidad se están desarrollando múltiples investigaciones en sistemas de transformación basados en electrónica de potencia. Estos sistemas, llamados sistemas DEPT (*Distribution Electronic Power Transformer*), permiten afrontar de forma más eficaz los problemas de calidad de la energía en los sistemas de distribución y reducir las pérdidas [17-24]. Los sistemas DEPT se encuentran en fase de desarrollo pero no se han introducido en los sistemas de distribución eléctrica.

La presente invención se centra en los sistemas existentes en la actualidad y que se encuentran instalados en los sistemas de distribución y que se seguirán instalando en los próximos años. Según estudios llevados a cabo en Estados Unidos las pérdidas de los sistemas de transformación suponen el 40% de las pérdidas en empresas de servicio público no generadoras y el 16% en las empresas de servicio privado [1]. En la Unión Europea el Instituto Europeo del Cobre calcula que la sustitución de los transformadores de potencia instalados en Europa por otros un 40% más eficientes permitiría reducir el consumo energético en más de 22 TWh lo que

conllevaría una disminución de emisiones de gases de efecto invernadero de más de 9 millones de toneladas de CO₂ equivalentes [25]. Debido al elevado coste de los equipos esta solución no puede llevarse a cabo de forma sistematizada por lo que se plantea un método de reducción de pérdidas en sistemas de transformación

5 independientemente de su eficiencia [26-29]. En Junio del año 2011 la International Energy Agency (IEA) ha hecho público que durante el año 2010 y a pesar de la crisis económica mundial, se ha alcanzado el record de emisiones de gases de efecto invernadero [30]. Esto implica que las consecuencias del cambio climático son cada vez más inevitables y deben establecerse todas las estrategias posibles para reducir

10 estos niveles de emisión. La presente invención presenta una metodología de bajo coste aplicable a sistemas de transformación en paralelo y estudia el potencial concreto en varias situaciones reales. Entre estas situaciones reales destaca el elevado potencial de ahorro económico y energético en instalaciones que presentan un funcionamiento temporal, horario o estacional. Por ejemplo en polígonos

15 industriales, centros comerciales, centros docentes, etc., el funcionamiento se da en ciertas horas del día, en centros turísticos el uso es muy estacional y existen casos combinados, como centros docentes. En todos estos casos la potencia demandada en los transformadores varía de forma sustancial a lo largo del tiempo.

La presente invención propone un nuevo método llamado PLO (*Parallel Losses Optimization*) y orientado a la minimización de pérdidas en el sistema durante la

20 explotación del mismo. El método permite adaptar el sistema de funcionamiento del centro de transformación para lograr las menores pérdidas posibles para la potencia demandada. Además el método PLO propuesto permite reducir las pérdidas en todo tipo de instalaciones de transformadores en paralelo siendo aplicable para sistemas

25 existentes o nuevos permitiendo aumentar los ahorros energéticos sea cual sea la clase de eficiencia del transformador.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Kennedy BW. Energy efficient transformers. New York: McGraw-Hill; 1998.
- 30 [2] Hasegawa R, Azuma D. Impacts of amorphous metal-based transformers on energy efficiency and environment. J Magn Magn Mater 2008;320:2451–6.
- [3] Olivares JC, Yilu L, Canedo JM, Escarela-Perez R, Driesen J, Moreno P. Reducing losses in distribution transformers. IEEE Trans Power Deliv 2003;18:821–6.
- [4] Hasegawa R, Azuma D. Impacts of amorphous metal-based transformers on energy
- 35 efficiency and environment. J Magn Magn Mater 2008;320:2451–6.

- [5] Georgilakis PS. Differential evolution solution to transformer no-load loss reduction problem. IET Gener, Trans Distrib 2009;3:960–9.
- [6] Olivares-Galván JC, Georgilakis PS, Ocon-Valdez R. A review of transformer losses. Electr Power Compon Syst 2009;37:1046–62.
- 5 [7] Nochumson CJ. Considerations in application and selection of unit substation transformers. IEEE Trans Ind Appl 2002;38:778–87.
- [8] Rasmusson PR. Transformer economic evaluation. IEEE Trans Ind Appl 1984;20:355–63.
- [9] Bins DF, Crompton AB, Jaberansari A. Economic design of a 50 kVA distribution
10 transformer. Part 2: effect of different core steels and loss capitalisations. IEE Proc Gener, Trans, Distrib 1986;133:451–6.
- [10] ANSI/IEEE. IEEE loss evaluation guide for power transformers and reactors. ANSI/IEEE Standard C57.120-1991; 1992.
- [11] Nickel DL, Braunstein HR. Distribution transformer loss evaluation: I –proposed
15 techniques. IEEE Trans Power Appar Syst 1981;100:788–97.
- [12] Nickel DL, Braunstein HR. Distribution transformer loss evaluation: II – load characteristics and system cost parameters. IEEE Trans Power Appar Syst 1981;100:798–811.
- [13] Merritt S, Chaitkin S. No load versus load loss. IEEE Ind Appl Mag 2003;9:21–8.
- 20 [14] Georgilakis PS. Decision support system for evaluating transformer investments in the industrial sector. J Mater Process Technol 2007;181:307–12.
- [15] Baranowski JF, Hopkinson PJ. An alternative evaluation of distribution transformers to achieve the lowest TOC. IEEE Trans Power Deliv 1992;7:614–9.
- [16] M. Kang, P.N. Enjeti, I.J. Pitel, Analysis and design of electronic transformers for
25 electric power distribution system, IEEE Trans. Power Electr.14 (1999) 1133–1141.
- [17] W. McMurray, Power converter circuits having a high frequency link, US Patent 3,517,300, June 23, 1970.
- [18] G. Venkataramanan, B.K. Johnson, A. Sundaram, An ac–ac power converter for custom power applications, IEEE Trans. Power Delivery 11 (1996) 1666–1671.
- 30 [19] J.L. Brooks, Solid State Transformer Concept Development, Naval Material Command, Civil Engineering Laboratory,Naval Construction Battalion Ctr., Port Hueneme, CA, 1980.
- [20] EPRI Report, Proof of the principle of the solid-state transformer: the AC/AC switch mode regulator, EPRI TR-105067, Research Project 8001-13, Final Report, August
35 1995.

- [21] K. Harada, F. Anan, K. Yamasaki, M. Jinno, Y. Kawata, T. Nakashima, K. Murata, H. Sakamoto, Intelligent transformer, in: Proceedings of the 1996 IEEE PESC Conference, 1996, pp. 1337–1341.
- [22] M.D. Manjrekar, R. Kieferndorf, G. Venkataramanan, Power electronic
5 transformers for utility applications, in: Proceedings of the 2000 IEEEIAS Annual Meeting, 2000, pp. 2496–2502.
- [23] E.R. Ronan, S.D. Sudhoff, S.F. Glover, D.L. Galloway, A power electronic based distribution transformer, IEEE Trans. Power Delivery 17 (2002) 537–543.
- [24] M. Marchesoni, R. Novaro, S. Savio, AC locomotive conversion systems without
10 heavy transformers: is it a practicable solution, in: Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2002, pp. 1172–1177.
- [25] Targosz R. The potential for global energy savings from high energy efficiency distribution transformers. Leonardo Energy, 2005.
<<http://www.leonardoenergy.org/repository/Library/Reports/Transformers-Global.pdf>>.
- 15 [26] Zhang Y-J, Wei Y-M. An overview of current research on EU ETS: evidence from its operating mechanism and economic effect. Appl Energy 2010;87:1804–14.
- [27] Chen WT, Li YP, Huang GH, Chen X, Li YF. A two-stage inexact-stochastic programming model for planning carbon dioxide emission trading under uncertainty. Appl Energy 2010;87:1033–47.
- 20 [28] Vad Mathiesen B, Lund H, Karlsson K. 100% renewable energy systems, climate mitigation and economic growth. Appl Energy 2011;88:488–501.
- [29] Irrek W, Topalis F, Targosz R, Rialhe A, Frau J. Policies and measures fostering energy-efficient distribution transformers. Report of European Commission Project No EIE/05/056/SI2.419632; June 2008.
- 25 [30] CO₂ emissions reach a record high in 2010; 80% of projected 2020 emissions from the power sector are already locked in. International Energy Agency, 2011.
<<http://www.iea.org>>
- [31] CENELEC. Three-phase oil-immersed distribution transformers 50 Hz, from 50 kVA to 2500 kVA with highest voltage for equipment not exceeding 36 kV –Part 1:
30 General requirements. CENELEC Standard EN 50464-1; 2007.
- [32] FLUKE 430 Series Three-Phase Power Quality Analyzers, 2011.<<http://www.fluke.com/fluke/us/en/power-quality-tools/three-phase/fluke-430-series.html>>

35 Descripción de la invención

La presente invención propone un sistema y un método de optimización de sistemas de transformadores en paralelo que resuelve los problemas anteriores, aplicable a instalaciones existentes o futuras y adaptable a cualquier tipo de sistemas de transformador.

- 5 El método de optimización se aplica para sistemas de transformación basados en dos transformadores en paralelo, solución habitual tanto a nivel industrial como comercial. En el método se calcula y caracteriza las pérdidas totales en el centro de transformación para uno, dos o ambos transformadores conectados. Para cada potencia de transformación se establece una potencia o punto de optimización, aquí también llamada potencia PLO (Paralell Losses Optimization), que es el punto de ruptura a partir del cual es más rentable tener conectado uno u otro de los transformadores o ambos en paralelo.

El método de reducción de pérdidas en sistemas de transformadores en paralelo en centros de distribución comprende realizar repetidamente los siguientes pasos:

- 15 - medir la potencia de carga total S_L de los transformadores en paralelo del centro de distribución;
- comparar dicho valor de carga S_L con al menos un valor de potencia de optimización obtenido en función de la potencia de transformación total S_N de los transformadores en paralelo;
- 20 - seleccionar una configuración de conexión de transformadores determinada en función de dicha comparación;
- cambiar a la configuración de conexión seleccionada, en caso de que ésta no coincida con la configuración de conexión en activo.

25 Preferiblemente el centro de transformación dispone únicamente de dos transformadores conectados en paralelo. En ese caso el valor de carga S_L se compara con un único valor de potencia de optimización.

En una realización preferida el valor de potencia de optimización depende linealmente de la potencia de transformación total S_N de los transformadores en paralelo.

30 La configuración de conexión de transformadores se puede determinar de la siguiente forma:

- si el valor de carga S_L es inferior al valor de potencia de optimización, la configuración de conexión consiste en activar un único transformador, que es el que para ese valor de carga S_L presenta menores pérdidas;
- 35

- si el valor de carga S_L es superior al valor de potencia de optimización, la configuración de conexión consiste en activar ambos transformadores en paralelo.

Es también objeto de la invención un sistema de reducción de pérdidas en sistemas de transformadores en paralelo en centros de distribución, que comprende:

- 5 - medios de medida de la potencia de carga total S_L de los transformadores en paralelo del centro de distribución;
- medios de control configurados para:
 - comparar dicho valor de carga S_L con al menos un valor de potencia de optimización obtenido en función de la potencia de transformación total S_N de los transformadores en paralelo;
 - 10 • seleccionar una configuración de conexión de transformadores determinada en función de dicha comparación;
 - cambiar a la configuración de conexión seleccionada, mediante la activación de unos medios de conexión (los cuales pueden formar parte del sistema), en caso de que no coincida con la configuración de conexión en activo.
 - 15

Los medios de control pueden comprender una memoria donde se almacena el al menos un valor de potencia de optimización.

20 El sistema puede comprender también una unidad remota de supervisión con funciones de gestión remota de la configuración de los medios de control.

En el caso de que el centro de transformación disponga de dos transformadores conectados en paralelo, los medios de control pueden estar configurados para comparar el valor de carga S_L con un único valor de potencia de optimización. El valor de potencia de optimización puede depender linealmente de la potencia de transformación total S_N de los transformadores en paralelo.

25

Los medios de control pueden estar configurados para determinar la configuración de conexión de transformadores de la siguiente forma:

- 30 - si el valor de carga S_L es inferior al valor de potencia de optimización, la configuración de conexión consiste en activar un único transformador, que es el que para ese valor de carga S_L presenta menores pérdidas;
- si el valor de carga S_L es superior al valor de potencia de optimización, la configuración de conexión consiste en activar ambos transformadores en paralelo.

Breve descripción de los dibujos

35 A continuación se pasa a describir de manera muy breve una serie de dibujos

que ayudan a comprender mejor la invención y que se relacionan expresamente con una realización de dicha invención que se presenta como un ejemplo no limitativo de ésta.

La Figura 1 muestra, en un sistema de transformadores en paralelo, un ejemplo
5 de curvas de relación carga/pérdidas de los distintos transformadores cuando funcionan por separado y ambos en paralelo.

La Figura 2 muestra en detalle el punto de potencia óptima obtenido para la figura anterior.

La Figura 3 muestra la correspondencia entre puntos de potencia óptima y la
10 potencia nominal de transformación utilizada.

La Figura 4 representa el sistema objeto de la invención.

Descripción detallada de la invención

Los transformadores tienen asociadas pérdidas que se clasifican en:

15 - Pérdidas en vacío: En un transformador conectado a un sistema de distribución eléctrica existen unas pérdidas siempre que el transformador está sometido a un voltaje. Estas pérdidas no dependen de que el transformador esté o no sometido a una carga por lo que se denominan pérdidas en vacío. Su valor es constante y consta de cinco componentes diferenciadas:

- 20 • Pérdidas por histéresis en láminas centrales y pérdidas por corrientes de Foucault en la laminación principal (99%)
- Pérdidas dieléctricas (<0.50%)
- Pérdidas por corrientes de Foucault libres y en las abrazaderas principales, pernos y componentes (<0.35%)
- 25 • Pérdidas I^2R asociadas con corriente en vacío (<0.15%)

Debido al que las pérdidas por histéresis y corriente de Foucault suponen el 99% de las pérdidas totales, suelen asumirse como las únicas que se tienen en cuenta, mientras que las demás se suponen aproximadamente igual a cero.

- Pérdidas en carga: En cuanto a las pérdidas en carga, a medida que varía la
30 carga en el transformador se modifican las pérdidas en el equipo ya que éstas son debidas a las pérdidas de calor en los conductores originadas por la corriente de carga y por las corrientes de Foucault. Estas pérdidas varían con la temperatura al variar las características de conductividad de los materiales y el valor más importante es el debido a las pérdidas en el cobre caracterizadas por I^2R .

35

Para garantizar la continuidad de suministro, en previsión de ampliaciones, para facilitar el mantenimiento y por cuestiones de normativa son muy habituales las instalaciones formadas por dos transformadores en paralelo. Dichos sistemas multitransformador en paralelo tienen también distintas pérdidas. Se pueden presentar tres casos de operación:

1. La potencia de funcionamiento demandada es menor a la potencia nominal del primer transformador.
2. La potencia de funcionamiento demandada es menor a la potencia nominal del segundo transformador.
3. La potencia de funcionamiento demandada es mayor a la potencia nominal de cualquiera de los dos transformadores.

Estas situaciones de carga se presentarán de forma habitual en una misma instalación en función de la curva de carga de la instalación pero los transformadores se mantienen conectados de forma idéntica independientemente de la carga.

Teniendo en cuenta los tipos de pérdidas expuestos anteriormente, en un caso de un sistema formado por un transformador con una potencia nominal S_N caracterizado por sus pérdidas en vacío (L_0) y su impedancia porcentual de cortocircuito (U_{sc}) las pérdidas totales cuando está sometido a una potencia de carga aparente S_L se calcularán según:

$$L_T = L_0 + \left(\frac{S_L}{S_N} \right)^2 U_{sc} \quad (1)$$

En el caso de dos transformadores conectados en paralelo con las características de ensayo de impedancia de cortocircuito porcentual, U_{sc} , la carga se repartirá entre ambos transformadores de modo que cuanto menor sea el valor de U_{sc} mayores serán las corrientes de cortocircuito.

La potencia de carga total, S_L , se repartirá entre los transformadores 1 y 2 de acuerdo a las Ecuaciones (2) y (3):

$$S_{L,1} = \frac{S_L \cdot S_{N,1} \cdot U_{sc,T}}{(S_{N,1} + S_{N,2}) \cdot U_{sc,1}} \quad (2)$$

$$S_{L,2} = \frac{S_L \cdot S_{N,2} \cdot U_{sc,T}}{(S_{N,1} + S_{N,2}) \cdot U_{sc,2}} \quad (3)$$

El valor $U_{sc,T}$ representa la impedancia de cortocircuito medio que se determina según la Ecuación (4):

$$U_{sc,T} = \frac{\frac{S_{N,1} + S_{N,2}}{\frac{S_{N,1}}{U_{sc,1}} + \frac{S_{N,2}}{U_{sc,2}}}}{\quad} \quad (4)$$

De modo que cada transformador podrá caracterizarse por su distribución porcentual de carga PL_1 , PL_2 tal y como se muestra en las Ecuaciones (5) y (6):

$$PL_1 = \frac{S_{L,1}}{S_{N,1}} \quad (5)$$

$$PL_2 = \frac{S_{L,2}}{S_{N,2}} \quad (6)$$

Las pérdidas por lo tanto en el sistema funcionando en paralelo se calcularán según la Ecuación (7):

$$L_{T,par} = L_{0,1} + \left(\frac{S_{L,1}}{S_{N,1}} \right)^2 U_{sc,1} + L_{0,2} + \left(\frac{S_{L,2}}{S_{N,2}} \right)^2 U_{sc,2} \quad (7)$$

En el método que propone la presente invención se han de computar las características de pérdidas de cada uno de los transformadores y de ambos funcionando en paralelo para cada punto de la curva de carga, correspondiente a la suma de las potencias nominales, Ecuación (8):

$$S_N = S_{N,1} + S_{N,2} \quad (8)$$

15

En función de la carga y utilizando las fórmulas de cálculo de pérdidas recogidas en las Ecuaciones (1) y (7), se determina cuál es el punto o potencia de optimización de pérdidas en paralelo (en adelante potencia de optimización o potencia PLO). Se ha denominado la potencia PLO (*Paralell Losses Optimization*) a aquella a partir de la cual las pérdidas en el sistema hacen recomendable la conexión de ambos transformadores aunque no se haya alcanzado el 100% de carga en el primero ($S_{N,1}$). Esta estrategia permite minimizar las pérdidas al establecer una estrategia de conexión basada en las mínimas pérdidas de operación y no en las potencias nominales de los equipos.

25

Para la combinación de transformadores que integran el centro de transformación se simulan las pérdidas a diferentes niveles de carga (S_L) funcionando con cada uno de los transformadores y con su funcionamiento en paralelo

obteniéndose una curva de carga-pérdidas como la de **Figura 1**, donde se muestra a modo de ejemplo el resultado para una potencia de transformación de 410 kVA (transformadores de 160 + 250 kVA clase de eficiencia E_0D_k).

En la **Figura 1** se observan por tanto la curva de pérdidas del primer transformador 1 funcionando aisladamente, la curva de pérdidas del segundo transformador 2 con la misma estrategia de funcionamiento, la curva de pérdidas del sistema en paralelo 3 y la curva de pérdidas mínimas 4 (i.e. la óptima). Se determina el punto o potencia de optimización 5 (punto o potencia PLO) como aquella potencia de carga a partir de la que las pérdidas disminuyen al conectar en paralelo ambos transformadores, detalle que se observa en la **Figura 2**.

En la zona A, a la izquierda de la potencia de optimización 5, será óptimo trabajar con una conexión del sistema de un único transformador (el que sea más eficaz, el que tenga menos pérdidas, en este caso el primer transformador), mientras que en la zona B, a la derecha de la potencia de optimización 5, será óptimo trabajar con una conexión en paralelo de ambos sistemas. Así, la curva de pérdidas mínimas 4 coincidirá en la zona A con la curva de pérdidas del primer transformador 1 y en la zona B con la curva de pérdidas del sistema en paralelo 3.

En resumen, se elige la conexión que sea energéticamente más eficaz en función de la potencia de carga S_L . En la zona A se conecta el transformador con menores pérdidas. En función de las características de ambos transformadores el punto de optimización varía, de modo que lo que se busca es conectar el transformador de menores pérdidas para esa potencia S_L , no siendo éste necesariamente el de máxima potencia nominal.

En un estudio realizado en distintos centros de transformación, se han combinado transformadores de las características expuestas en la **Tabla 1**, para dar lugar a trece potencias de instalación con tres grados de eficiencia energética (E_0D_k , D_0C_k , C_0B_k) por lo que se han generado un total de 39 casos de estudio, según la **Tabla 2**. Las potencias analizadas corresponden a casos típicos de potencias instaladas en un amplio rango de aplicaciones. Todos los datos de transformadores corresponden a equipos reales.

S_N (kVA)	Clasificación EN50464-1	U_{sc} (%)	P_0 (W)
100	E_0D_k - High	4	320
160	E_0D_k - High	4	460

250	E ₀ D _k - High	4	650
400	E ₀ D _k - High	4	930
630	E ₀ D _k - High	4	1,200
1,000	E ₀ D _k - High	5	1,700
1,600	E ₀ D _k - High	6	2,600
100	D ₀ C _k - Medium	4	260
160	D ₀ C _k - Medium	4	375
250	D ₀ C _k - Medium	4	530
400	C ₀ B _k - Medium	4	750
630	D ₀ C _k - Medium	4	940
1,000	D ₀ C _k - Medium	5	1,400
1,600	D ₀ C _k - Medium	6	2,200
100	C ₀ B _k - Low	4	210
160	C ₀ B _k - Low	4	300
250	C ₀ B _k - Low	4	425
400	C ₀ B _k - Low	4	610
630	C ₀ B _k - Low	4	800
1,000	C ₀ B _k - Low	5	1,100
1,600	C ₀ B _k - Low	6	1,700

Tabla 1. Transformadores de potencia estudiados

S _N (kVA)	Transformadores en paralelo	Clasificación EN50464-1
200	2 x 100	E ₀ D _k , D ₀ C _k , C ₀ B _k
260	100 + 160	E ₀ D _k , D ₀ C _k , C ₀ B _k
320	2 x 160	E ₀ D _k , D ₀ C _k , C ₀ B _k
410	160 + 250	E ₀ D _k , D ₀ C _k , C ₀ B _k
500	2 x 250	E ₀ D _k , D ₀ C _k , C ₀ B _k
650	250 + 400	E ₀ D _k , D ₀ C _k , C ₀ B _k
800	2 x 400	E ₀ D _k , D ₀ C _k , C ₀ B _k
1,030	400 + 630	E ₀ D _k , D ₀ C _k , C ₀ B _k
1,260	2 x 630	E ₀ D _k , D ₀ C _k , C ₀ B _k
1,630	630 + 1,000	E ₀ D _k , D ₀ C _k , C ₀ B _k
2,000	2 x 1,000	E ₀ D _k , D ₀ C _k , C ₀ B _k
2,600	1000 + 1,600	E ₀ D _k , D ₀ C _k , C ₀ B _k
3,200	2 x 1,600	E ₀ D _k , D ₀ C _k , C ₀ B _k

Tabla 2. Instalaciones de transformación estudiadas

Para cada uno de los casos se ha calculado el punto o potencia de optimización (PLO) y se han obtenido los valores indicados en la Tabla 3. Se observa que como norma general a medida que aumenta la eficiencia del conjunto de transformadores la potencia de optimización aumenta aunque los valores son muy similares para todas las clases de eficiencia. El efecto del aumento de la clase de eficiencia es una disminución de las pérdidas en cualquier condición de funcionamiento.

S_N (kVA)	$E_0 D_k$	$D_0 C_k$	$C_0 B_k$	Media
200	56	55	54	55
260	86	82	79	82
320	89	92.8	89	90
410	128	134	129	130
500	142.5	145	140	143
650	217	220	212	216
800	228	232	229	230
1,030	332	340	340	337
1,260	333	340	340	338
1,630	491	535	522	516
2,000	520	530	500	517
2,600	820	880	800	833

Tabla 3. Resultados de potencia de optimización

10

Representando gráficamente los valores obtenidos y realizando un tratamiento estadístico de los mismos se obtiene una correlación que permite calcular cuál es el valor de potencia de optimización 5 para una potencia de transformación de la instalación S_N , Figura 3.

15

Para cada nivel de eficiencia ($E_0 D_k$, $D_0 C_k$, $C_0 B_k$) se detallan el valor que alcanza el punto de potencia de optimización 5 así como el valor medio del punto de potencia de optimización para cada potencia de transformación S_N . A partir de estos resultados se deduce un nuevo método de optimización de transformadores en paralelo. Realizando un análisis estadístico para validar la correlación se obtiene que los valores de potencia de optimización (PLO) presentan una adecuada relación con la potencia de transformación instalada, según la Ecuación (9):

20

$$PLO = f(S_N) \quad (9)$$

En concreto, se observa que presenta una adecuada correlación lineal y se obtiene un método de cálculo de la potencia de optimización (PLO) basado simplemente en la potencia de transformación instalada S_N , según la Ecuación (10), con $a \in \mathbb{R}, b \in \mathbb{R}$:

$$5 \quad PLO = a \cdot S_N + b \quad (10)$$

Para el caso concreto de estudio se obtiene un nivel de ajuste $R^2 = 0.9771$ y con $a=0.012$ y $b=-2.0583$, de acuerdo a la siguiente ecuación: $PLO = 0.012 \cdot S_N - 2.0583$

Es importante reseñar que los valores a y b variarían en función del estudio
10 realizado, y podrán utilizarse cualesquiera otros valores considerados en función de resultados de otros estudios y/o pruebas. El método aquí propuesto permite, mediante la aplicación de una relación lineal directa con la potencia de transformación instalada, implementar el sistema en cualquier instalación existente o futura con independencia de sus características. La sencillez del algoritmo permite programarlo en un sencillo
15 autómata programable que gobernará los sistemas de conexión/desconexión de los transformadores en paralelo.

Debido a la necesidad de adaptar los sistemas de medida eléctrica a los requisitos de las redes de distribución de energía eléctrica inteligente (sistemas "Smart Grid") se están realizando cambios a los contadores eléctricos de todos los sistemas
20 de distribución de potencia en EE.UU. y en Europa con un horizonte temporal máximo del 2020. Los sistemas de medición inteligente (contadores inteligentes, "Smart Metering") poseen capacidad de programación de salidas de medida y en algunos casos pueden realizar cálculos lógicos. Con un sistema de reducción de pérdidas como el que se muestra en la Figura 4 es posible ejecutar el método propuesto con un
25 coste prácticamente nulo proporcionando retornos de la inversión en un periodo muy bajo.

El sistema de reducción de pérdidas, aplicado a transformadores en paralelo (10,10'), comprende medios de medida 12 (e.g. un medidor o contador inteligente) de la potencia de carga total S_L de los transformadores en paralelo (10,10') y unos medios
30 de control 11 (e.g. una unidad de control, un controlador) encargados de configurar la conexión y/o desconexión de los transformadores en paralelo (10,10'), a través de unos medios de conexión (13,13'), en función de la potencia de carga total y del puntos de potencia de optimización 5 previamente calculados. Se configura por tanto qué transformador(es) se conectan (un único transformador o los dos transformadores

en paralelo). Los puntos de potencia de optimización 5 han podido ser obtenidos, tal y como se ha explicado, simplemente en función -e.g. una relación lineal- del valor de la potencia de transformación de la instalación S_N , que corresponde a la suma de las potencias nominales ($S_{N,1}$, $S_{N,2}$) de los transformadores (10,10'). Dichos puntos de potencia de optimización 5, que en el caso de dos transformadores es un único punto tal y como se muestra en la Figura 2, pueden estar almacenados en una memoria 16 (memoria dentro de los medios de control 11 o de los medios de medida 12, o una memoria externa accesible por cualquiera de dichos medios). Los puntos de potencia de optimización 5 serán normalmente calculados previamente y almacenados en la memoria 16, la cual podría ser actualizada remotamente a través de una unidad remota de supervisión 14 de la red inteligente 15 (smart grid).

La capacidad de telegestión del medidor inteligente permite además, mediante protocolo PLC ("Power Line Communication") o cualquier otro sistema de comunicación la supervisión, control, actualización y monitorización del sistema, pudiendo actualizar la forma de control y los valores de los puntos de potencia de optimización 5 a través de una unidad de supervisión 14.

El método propuesto se valida por tanto para instalaciones de transformación de tres niveles de eficiencia, lo que permite implementarlo en cualquier instalación de transformación. Los nuevos sistemas de transformadores de bajas pérdidas presentan menores pérdidas pero un mayor coste económico por lo que su instalación es rentable si el coste global durante el ciclo de vida es menor. En transformadores existentes la sustitución directa no es rentable en casi ningún caso. El método propuesto reduce sus pérdidas durante toda su vida útil en instalaciones nuevas o existentes. El sistema propuesto no requiere para su implementación de ningún dispositivo de maniobra adicional y permite obtener ahorros porcentuales de hasta un 41% respecto a las pérdidas iniciales.

Los nuevos sistemas de medida energética en redes de distribución de energía eléctrica inteligente facilitan la instalación y la operación con este método. En instalaciones con funcionamiento horario no continuado el porcentaje de ahorro puede ser mucho más elevado puesto que durante las horas nocturnas y fines de semana los transformadores siguen conectados en paralelo elevando de este modo las pérdidas. El conectarlos y desconectarlos de acuerdo al punto de potencia de optimización y al consumo actual reduce esas pérdidas. En instalaciones con funcionamiento estacional las pérdidas anuales se pueden reducir de forma muy notable realizando la optimización propuesta.

- Finalmente es necesario indicar que la presente invención podría funcionar con tres o más transformadores. En el caso de emplear tres transformadores habría dos zonas de optimización, si bien el caso comercial de centros de transformación con tres transformadores es extremadamente raro (el tercero como mucho está en reserva). En
- 5 caso de que hubiera tres transformadores se actuaría de la siguiente forma: siempre estaría conectado, como base, el más eficiente de los tres y la invención se aplicaría para seleccionar cuál de los dos que quedan sería óptimo conectar para cada demanda de potencia.

REIVINDICACIONES

1. Método de reducción de pérdidas en sistemas de transformadores en paralelo en centros de distribución, **caracterizado por que** comprende realizar repetidamente los siguientes pasos:
 - medir la potencia de carga total S_L de los transformadores en paralelo (10,10') del centro de distribución;
 - comparar dicho valor de carga S_L con al menos un valor de potencia de optimización (5) obtenido en función de la potencia de transformación total S_N de los transformadores en paralelo (10,10');
 - seleccionar una configuración de conexión de transformadores (10,10') determinada en función de dicha comparación;
 - cambiar a la configuración de conexión seleccionada, en caso de que ésta no coincida con la configuración de conexión en activo.
2. Método según la reivindicación 1, en el que el centro de transformación dispone de dos transformadores (10,10') conectados en paralelo, **caracterizado por que** el valor de carga S_L se compara con un único valor de potencia de optimización (5).
3. Método según la reivindicación 2, **caracterizado por que** el valor de potencia de optimización (5) depende linealmente de la potencia de transformación total S_N de los transformadores en paralelo (10,10').
4. Método según la reivindicación 2 ó 3, **caracterizado por que** la configuración de conexión de transformadores (10,10') se determina de la siguiente forma:
 - si el valor de carga S_L es inferior al valor de potencia de optimización (5), la configuración de conexión consiste en activar un único transformador, que es el que para ese valor de carga S_L presenta menores pérdidas;
 - si el valor de carga S_L es superior al valor de potencia de optimización (5), la configuración de conexión consiste en activar ambos transformadores en paralelo (10,10').
5. Sistema de reducción de pérdidas en sistemas de transformadores en

paralelo en centros de distribución, **caracterizado por que** comprende:

- medios de medida (12) de la potencia de carga total S_L de los transformadores en paralelo (10,10') del centro de distribución;

- medios de control (11) configurados para:

- 5 • comparar dicho valor de carga S_L con al menos un valor de potencia de optimización (5) obtenido en función de la potencia de transformación total S_N de los transformadores en paralelo (10,10');
- seleccionar una configuración de conexión de transformadores (10,10') determinada en función de dicha comparación;
- 10 • cambiar a la configuración de conexión seleccionada, mediante la activación de unos medios de conexión (13,13'), en caso de que no coincida con la configuración de conexión en activo.

6. Sistema según la reivindicación 5, **caracterizado por que** comprende dichos
15 medios de conexión (13,13').

7. Sistema según la reivindicación 5 ó 6, **caracterizado por que** los medios de control (11) comprenden una memoria (16) donde se almacena el al menos un valor de potencia de optimización (5).
20

8. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 5 a 7, **caracterizado por que** comprende una unidad remota de supervisión (14) con funciones de gestión remota de la configuración de los medios de control (11).

9. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 5 a 8, en el que el centro de transformación dispone de dos transformadores (10,10') conectados en paralelo, **caracterizado por que** los medios de control (11) están configurados para comparar el valor de carga S_L con un único valor de potencia de optimización (5).
25

10. Sistema según la reivindicación 9, **caracterizado por que** el valor de potencia de optimización (5) depende linealmente de la potencia de transformación total S_N de los transformadores en paralelo (10,10').
30

11. Sistema según la reivindicación 9 ó 10, **caracterizado por que** los medios de control (11) están configurados para determinar la configuración de conexión de
35

transformadores (10,10') de la siguiente forma:

- si el valor de carga S_L es inferior al valor de potencia de optimización (5), la configuración de conexión consiste en activar un único transformador, que es el que para ese valor de carga S_L presenta menores pérdidas;
- 5 - si el valor de carga S_L es superior al valor de potencia de optimización (5), la configuración de conexión consiste en activar ambos transformadores en paralelo (10,10').

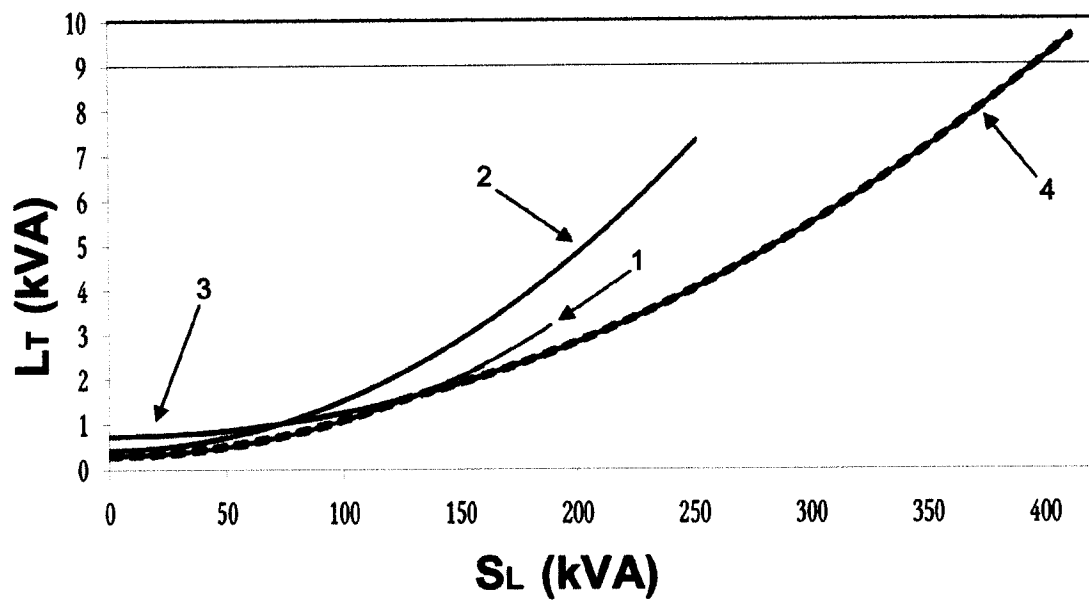


Fig. 1

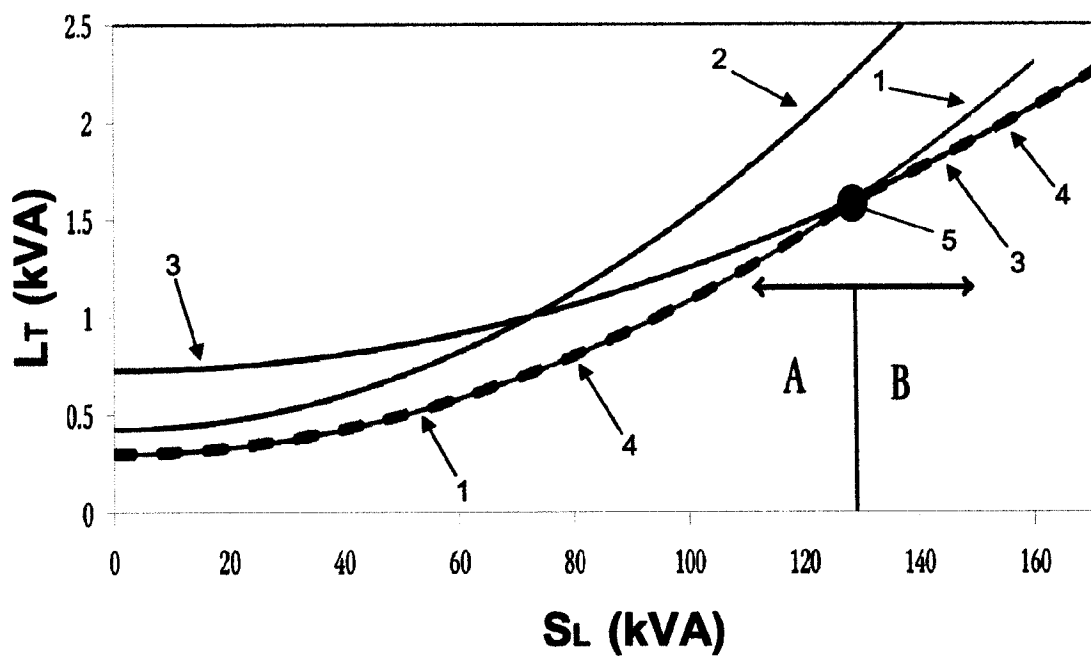


Fig. 2

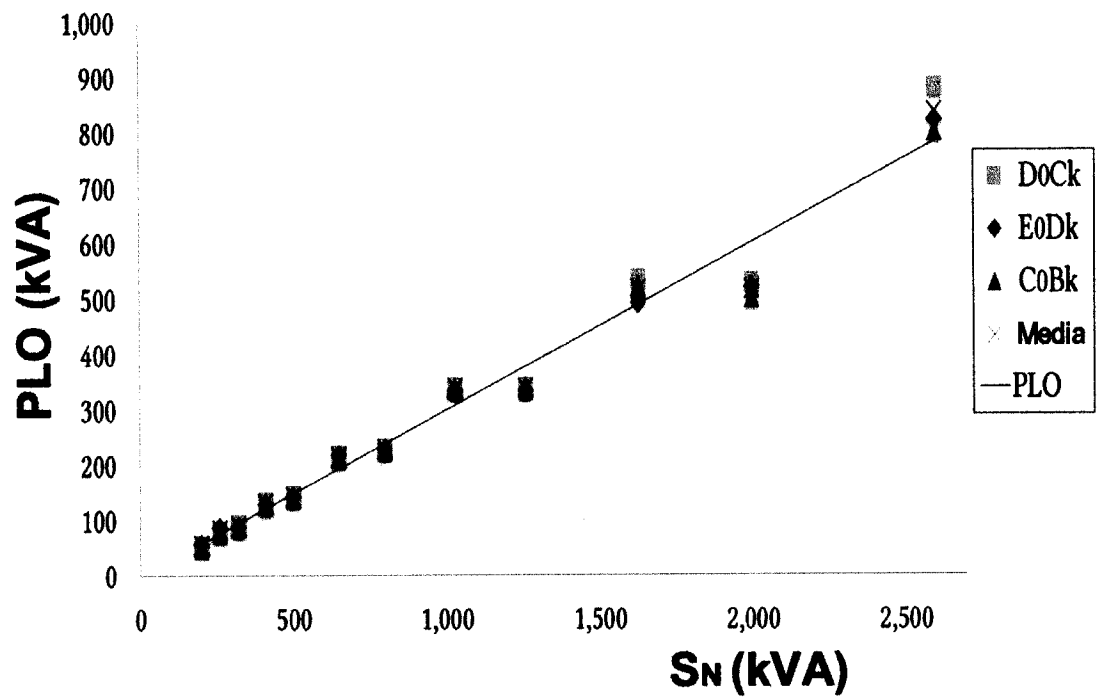


Fig. 3

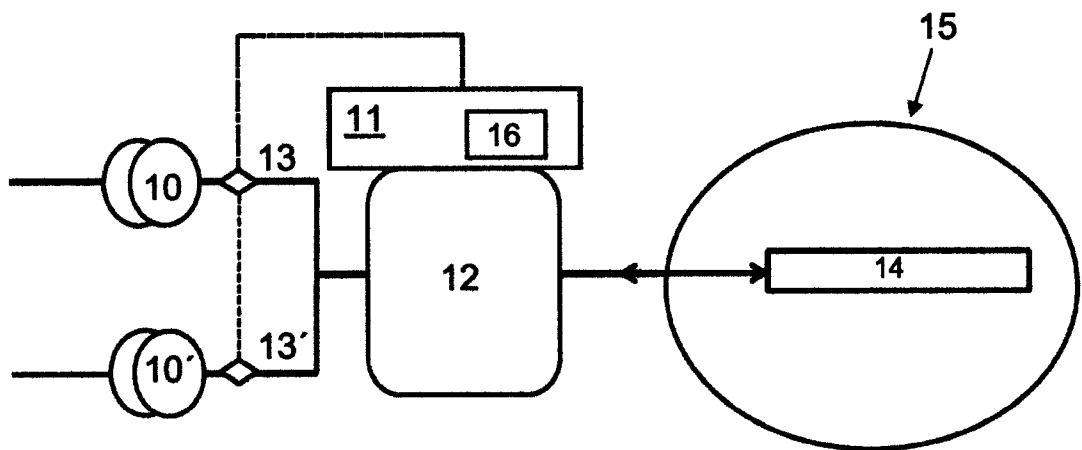


Fig. 4