

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 970 295**

51 Int. Cl.:

H02J 3/18 (2006.01)

H02J 3/26 (2006.01)

G05F 1/13 (2006.01)

H02J 11/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **17.05.2017** **PCT/US2017/033174**

87 Fecha y número de publicación internacional: **23.11.2017** **WO17201202**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.05.2017** **E 17800118 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.12.2023** **EP 3459164**

54 Título: **Módulo de optimización de tensión aislado y apilable**

30 Prioridad:

17.05.2016 US 201662337535 P

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

27.05.2024

73 Titular/es:

GEORGIA TECH RESEARCH CORPORATION
(100.0%)

926 Dalney Street, NW
Atlanta, GA 30318, US

72 Inventor/es:

DIVAN, DEEPAKRAJ M. y
KANDULA, RAJENDRA PRASAD

74 Agente/Representante:

MENDIGUTÍA GÓMEZ, María Manuela

ES 2 970 295 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

Módulo de optimización de tensión aislado y apilable

5 Antecedentes

El control preciso de la tensión en el límite de la red eléctrica puede aportar muchos beneficios. En aplicaciones de redes eléctricas integradas, puede proporcionar una carga equilibrada de transformadores y circuitos. Esto puede permitir una utilización mejorada de los activos y puede retrasar significativamente la construcción de nuevos recursos, lo cual puede ser muy caro. En aplicaciones radiales, puede proporcionar un control preciso de la tensión suministrada a las cargas, lo que permite un control preciso de la energía y la potencia suministradas a la carga. Para muchas cargas industriales y comerciales, tal control preciso de la tensión en el límite puede ser la base para reducir el consumo de energía y las tarifas en hora punta.

Los transformadores con arrollamientos con tomas que utilizan una conmutación electromecánica han sido la solución más usada habitualmente. Esta solución adolece de una respuesta lenta y de una vida útil limitada de los contactos de conmutación. Se pueden usar transformadores conectados en serie para inyectar tensión en la línea con el fin de proporcionar la precisa regulación necesaria. La tensión inyectada puede controlarse usando tomas o un convertidor de potencia. Las averías de red eléctrica pueden dar lugar a grandes corrientes de cortocircuito, que pueden someter al transformador en serie a un gran esfuerzo, y hacen que el diseño sea complejo y costoso. Pueden emplearse fuentes de VAR en paralelo para proporcionar un control de tensión local, que es limitado y no es distribuable, ya que el nivel de control depende de la corriente de carga, el factor de potencia, la impedancia del transformador de servicio y los VAR inyectados.

El documento US 6.118.676 A se refiere a un sistema y un método para proporcionar una corrección dinámica de huecos de tensión en líneas de tensión. De acuerdo con el resumen, un corrector dinámico de huecos de tensión incluye un interruptor de derivación estática y un módulo regulador/de almacenamiento conectados el uno al otro en paralelo entre unos terminales de entrada y unos terminales de salida. En condiciones normales de funcionamiento, el interruptor de derivación estática está cerrado, y se proporciona un nivel de tensión de línea normal directamente de los terminales de entrada a los terminales de salida a través de dicho interruptor. Cuando se indica una condición de hueco de tensión, el interruptor de derivación estática se abre, y el módulo regulador/de almacenamiento se controla para proporcionar una señal de tensión de salida cuasi normal a los terminales de salida. El módulo regulador/de almacenamiento incluye un circuito de conversión de potencia que se controla para proporcionar la señal de tensión de salida deseada añadiendo en los condensadores de almacenamiento un nivel de tensión a la señal de tensión de línea de entrada disponible. Los componentes del corrector dinámico de huecos de tensión se seleccionan para proporcionar una corrección de huecos de tensión durante un tiempo suficiente como para proporcionar una corrección de un 90-95 % de las condiciones de hueco/caída de tensión que es probable que existan. De este modo se reducen el tamaño, el coste y el peso del corrector dinámico de huecos de tensión. El corrector dinámico de huecos de tensión también puede proporcionar una corrección de las condiciones de sobretensión transitoria, puede configurarse para proporcionar una corrección de huecos de tensión de larga duración a una parte prioritaria de una carga, puede dar soporte a una carga, incluso cuando se parta completamente una línea de tensión de entrada, y puede emplearse en aplicaciones monofase o multifase. El documento US-5.461.300 A se refiere a un regulador dinámico de ángulo de fase para mejorar la estabilidad transitoria de un sistema de tensión de C.A. trifásica, que incluye un controlador, un conjunto de interrupción de interruptores de tiristor y un solo transformador acoplado a una línea de tensión.

Resumen

Aspectos de la presente divulgación están relacionados con la optimización y el control de tensión aislada. Pueden usarse módulos de optimización de tensión aislados y apilados (MOTAA) para controlar la tensión y/o el flujo de potencia en una gran variedad de aplicaciones.

En un aspecto, entre otros, un módulo de optimización de tensión aislado y apilable (MOTAA) comprende un transformador que tiene una relación de transformación entre un arrollamiento primario y un arrollamiento secundario del transformador, donde el arrollamiento primario está configurado para ser alimentado por una primera fase de un sistema eléctrico trifásico; un bloque de conexión conectado a un circuito de conmutación, comprendiendo el bloque de conexión unos dispositivos de conmutación configurados para controlarse para proporcionar una tensión de C.A. proporcionada del sistema eléctrico trifásico al circuito de conmutación conmutando entre una primera tensión a través de la primera fase y un neutro del sistema eléctrico trifásico y una segunda tensión a través de las segunda y tercera fases del sistema eléctrico trifásico; el circuito de conmutación conectado al arrollamiento secundario, el circuito de conmutación configurado para energizar el arrollamiento secundario con una tensión de C.A. proporcionada desde el sistema eléctrico trifásico o para cortocircuitar el arrollamiento secundario; y un controlador configurado para controlar la conmutación del circuito de conmutación y el bloque de conexión. En uno o más aspectos, energizar el arrollamiento secundario con una tensión procedente de la primera fase y del neutro del sistema eléctrico trifásico puede elevar o reducir la tensión de la primera fase sin afectar al ángulo de fase de la primera fase. La elevación o reducción de tensión se puede basar en la relación de transformación del transformador y en una polaridad de la conexión a las segunda y tercera fases del sistema eléctrico trifásico. En uno o más aspectos, energizar el arrollamiento secundario

con una tensión procedente de las segunda y tercera fases del sistema eléctrico trifásico puede ajustar un flujo de potencia cambiando un ángulo de fase de la primera fase. La tensión procedente de las segunda y tercera fases puede estar desfasada 90 grados con respecto a una tensión de la primera fase.

En uno o más aspectos, el transformador puede ser un transformador de arrollamientos coaxiales (TAC). El arrollamiento primario del TAC puede comprender un tubo partido ovalado que está configurado para conectarse a la primera fase, y unas espiras del arrollamiento secundario están dispuestas dentro del tubo partido ovalado. En uno o más aspectos, el transformador puede ser un transformador toroidal (TT), comprendiendo el arrollamiento primario un conductor principal que atraviesa un núcleo toroidal y comprendiendo el arrollamiento secundario unas espiras arrolladas alrededor del núcleo toroidal.

En otro aspecto, un sistema comprende un módulo de optimización de tensión aislado y apilable (MOTAA) que está acoplado a cada fase de un sistema eléctrico trifásico, donde cada MOTAA comprende: un transformador que comprende un arrollamiento primario alimentado por la fase que está acoplada a ese MOTAA; un circuito de conmutación configurado para elevar o reducir una tensión o cambiar un ángulo de fase de la fase que está acoplada a ese MOTAA energizando un arrollamiento secundario del transformador con una tensión proporcionada desde el sistema eléctrico trifásico. En uno o más aspectos, el circuito de conmutación puede acoplarse a la fase que alimenta al arrollamiento primario y a un neutro del sistema eléctrico trifásico para elevar o reducir la tensión de esa fase. El circuito de conmutación se puede acoplar a las fases opuestas del sistema eléctrico trifásico que no están abasteciendo al arrollamiento primario para cambiar el ángulo de fase de la fase que suministra al arrollamiento primario. El transformador puede ser un transformador de arrollamientos coaxiales (TAC) o un transformador toroidal (TT). El TAC puede comprender un tubo de cobre partido ovalado que forma el arrollamiento primario, donde el arrollamiento secundario comprende un arrollamiento multiespiral que está rodeado por el tubo de cobre partido ovalado.

En uno o más aspectos, el sistema puede comprender además otro MOTAA que está acoplado a cada fase del sistema eléctrico trifásico, en el que uno de los MOTAA de cada fase eleva o reduce la tensión y el otro MOTAA ajusta el ángulo de fase. El sistema puede comprender una pluralidad de MOTAA apilados que están acoplados a cada fase del sistema eléctrico trifásico, en el que la pluralidad de MOTAA apilados está configurada para, acumulativamente, elevar o reducir la tensión o cambiar el ángulo de fase de la fase que está acoplada a la pluralidad de MOTAA apilados. El sistema puede comprender además un controlador maestro que está configurado para mantener unas tensiones de salida de la pluralidad de MOTAA apilados que están acoplados a cada fase del sistema eléctrico trifásico controlando individualmente el funcionamiento de los MOTAA apilados. El sistema eléctrico trifásico puede ser una salida de un transformador que suministra a cargas industriales. El sistema eléctrico trifásico puede ser una salida de un transformador que suministra a una red eléctrica integrada.

Otros sistemas, métodos, características y ventajas de la presente divulgación serán o resultarán evidentes para un experto en la técnica tras el examen de los siguientes dibujos y descripción detallada. Se pretende que todos estos sistemas, métodos, características y ventajas adicionales se incluyan en esta descripción, estén dentro del alcance de la presente divulgación y queden protegidos por las reivindicaciones adjuntas. Además, todas las características y modificaciones preferidas y opcionales de las realizaciones descritas son utilizables en todos los aspectos de la divulgación enseñada en la presente memoria. Además, las características individuales de las reivindicaciones dependientes, así como todas las características y modificaciones preferidas y opcionales de las realizaciones descritas, son combinables e intercambiables las unas con las otras.

Breve descripción de los dibujos

Muchos aspectos de la presente divulgación pueden entenderse mejor haciendo referencia a los siguientes dibujos. Los componentes que aparecen en los dibujos no se han representado necesariamente a escala, sino que, más bien, se ha hecho énfasis en ilustrar claramente los principios de la presente divulgación. En los dibujos, además, números de referencia iguales designan partes correspondientes en todas las distintas vistas.

La figura 1 es un diagrama esquemático que ilustra un ejemplo de un módulo de optimización de tensión aislado y apilable (MOTAA), de acuerdo con diversas realizaciones de la presente divulgación.

La figura 2 es un diagrama esquemático que ilustra un ejemplo de apilamiento de MOTAA, de acuerdo con diversas realizaciones de la presente divulgación.

La figura 3A es un diagrama esquemático que ilustra un ejemplo de otro MOTAA, de acuerdo con diversas realizaciones de la presente divulgación.

La figura 3B es una imagen que ilustra un ejemplo de la construcción de un transformador arrollado coaxialmente (TAC), de acuerdo con diversas realizaciones de la presente divulgación.

Las figuras 4A a 4C son diagramas esquemáticos que ilustran unos ejemplos de control de tensión y/o de flujo de potencia usando uno o más MOTAA, de acuerdo con diversas realizaciones de la presente divulgación.

Las figuras 5 y 6 son diagramas esquemáticos que ilustran unos ejemplos de aplicaciones que utilizan MOTAA para controlar la tensión y/o el flujo de potencia, de acuerdo con diversas realizaciones de la presente divulgación.

- 5 Las figuras 7A y 7B son diagramas de flujo que ilustran un ejemplo del funcionamiento de un MOTAA, de acuerdo con diversas realizaciones de la presente divulgación.

Descripción detallada

- 10 En la presente memoria se divulgan diversos ejemplos de métodos, sistemas, aparatos y dispositivos relacionados con una optimización de tensión aislada. Ahora se hará referencia detallada a la descripción de las realizaciones que se han ilustrado en los dibujos, en los que números de referencia iguales indican partes similares en todas las diversas vistas.

- 15 La viabilidad de las soluciones convencionales se vuelve particularmente problemática cuando el objetivo es reducir la energía consumida o la demanda máxima. Reducir la tensión de línea hasta un 95 % de la nominal mediante el uso de un transformador con tomas mantiene la tensión dentro de la banda ANSI permitida y puede reducir la demanda y la energía consumida en un 5-7 % de sus valores a la tensión nominal. Las soluciones típicas tendrían unas pérdidas de entre 2-4 %, lo que anularía una parte sustancial del beneficio anticipado.

- 20 En segundo lugar, si la tensión se mantiene al 95 % de la nominal, cualquier hueco de tensión reduciría aún más la tensión de carga, lo que pondría en peligro el funcionamiento ininterrumpido del proceso o de los equipos sensibles. En tal caso, sería importante mantener la tensión dentro de la banda permitida, incluso cuando la tensión de línea entrante experimente un hueco de tensión. Esta corrección de tensión tendría que ser rápida, es decir, producirse en
25 menos de un ciclo de la tensión de línea, para evitar un tiempo de inactividad de proceso. El uso de semiconductores de potencia para conseguir una respuesta en tiempo real de 8 ms trae consigo unas mayores pérdidas, la necesidad de una gestión térmica avanzada y la necesidad de gestionar las grandes corrientes que fluyen en condiciones de fallo de sistema.

- 30 Finalmente, para satisfacer las demandas de diversos sistemas de carga, que varían de 1 MW a más de 20 MW, las soluciones tendrían que diseñarse a medida para satisfacer todas las necesidades, por lo que serían muy caras. Los desafíos planteados por las restricciones anteriores son demasiado difíciles de vencer, y muchos usuarios industriales no usan ningún tipo de control rápido de tensión y operan en realidad con tomas de transformador fijas a
35 aproximadamente un 104 % de la tensión nominal para garantizar un funcionamiento continuo de sus procesos, aunque la tensión de línea se reduzca al 90 % o menos. Esto se traduce en que pagan un 8-15 % más por la energía de lo que harían si pudieran mantener la tensión de línea a un 95 % de la nominal.

Una solución más práctica de optimización de la tensión en el límite de la red eléctrica tendría las siguientes características:

- 40
- Pérdidas de menos de un 0,3 % de la potencia de carga gestionada;
 - capacidad de pasar de 1 MW a 20 MW o más;

45

 - capacidad de admitir hasta 50 kA de corriente de cortocircuito;
 - control de tensión de +/-5 % en torno a un punto de ajuste nominal;
 - respuesta rápida de subciclo para garantizar una resistencia a los huecos de tensión;

50

 - compacta, con enfriamiento pasivo, fácil de instalar y sin necesidad de mantenimiento en campo;
 - capacidad de trabajar con las infraestructuras de potencia existentes;

55

 - una arquitectura de funcionamiento normal en caso de fallo (fail-normal) que es muy robusta y resistente;
 - amortización en menos de 2 años; y
 - capacidad para tener comunicaciones inteligentes, lo que permite la integración con mercados eléctricos
60 auxiliares.

Se presenta una plataforma de tecnología de núcleo común que aborda algunos de los desafíos más grandes, lo que hace que la solución sea apta para varias exigentes aplicaciones específicas.

- 65 El módulo de optimización de tensión aislado y apilable (MOTAA) puede dar solución a estas limitaciones. Uno o más de los MOTAA se puede(n) usar en una gran variedad de aplicaciones, que incluyen, por ejemplo, aplicaciones

industriales y de servicio público de alta potencia con tensiones asignadas de, por ejemplo, 208 V, 480 V o 600 V de C.A. (trifásicos), con corrientes de 1000 A a aproximadamente 6000 A por circuito (de 0,36 MVA a SMVA), que normalmente es el límite de los transformadores de 480 V. Como ejemplo, cada unidad MOTAA puede configurarse para proporcionar una elevación o reducción de tensión de, por ejemplo, un $\pm 2\%$ (u otro rango apropiado). El

5 apilamiento de tres de tales unidades MOTAA puede proporcionar un rango de $\pm 6\%$ en el control de tensión. La unidad MOTAA también se puede configurar para inyectar una tensión desfasada, lo que da como resultado un control de ángulo de fase de alrededor de 2-5 grados. Cada unidad MOTAA puede funcionar y puede controlarse de manera autónoma, pero también puede coordinarse usando comunicaciones o una detección de línea para lograr objetivos

10 específicos a nivel de sistema en un modo de funcionamiento de distribución.

Haciendo referencia a la figura 1, en ella se muestra un ejemplo de un módulo 100a de optimización de tensión aislado y apilable (MOTAA) que utiliza un transformador toroidal (TT) 103. Tal y como se muestra en la figura 1, un conductor (o línea) principal (o primario/a) 106 atraviesa el núcleo del TT 103 para actuar como arrollamiento primario, y el arrollamiento secundario 109 está arrollado alrededor del núcleo. El núcleo puede ser un núcleo de acero al silicio u

15 otro núcleo que sea equivalente o apropiado para la aplicación. El conductor 106 principal de alta intensidad que atraviesa el núcleo del TT 103 actúa como arrollamiento primario, con el arrollamiento secundario 109 arrollado alrededor del núcleo (por ejemplo, 50 espiras). Si la intensidad en la línea principal (o primaria) 106 es de 2500 A, entonces, con una relación de transformación de 1:50, la intensidad en el arrollamiento secundario es tan solo de 50 A. Como se puede entender, el número de espiras de arrollamiento secundario puede variarse para proporcionar una

20 relación de transformación adecuada para la aplicación.

Los cables para el arrollamiento secundario 109 están conectados a una circuitería 112 de conmutación, tal y como se muestra en la figura 1. Por ejemplo, se puede usar un par de tiristores o un conmutador triac para cortocircuitar el arrollamiento secundario 109 o para conectarlo a una correspondiente tensión de línea de, por ejemplo, 277 V. El

25 MOTAA 100 y, por tanto, la circuitería 112 de conmutación pueden ser aptos para un funcionamiento hasta 600 V (o más). La circuitería 112 de conmutación también puede incluir un relé de derivación o contactor 115 conectado a través de los cables del arrollamiento secundario 109. El funcionamiento de la circuitería 112 de conmutación puede inyectar eficazmente 5,5 V en la línea principal, efectuando un cambio de aproximadamente un 2 % en la tensión de línea en el conductor principal 106. Dependiendo de la polaridad de la conexión 'secundaria', la tensión podría

30 aumentarse o disminuirse. Esto puede lograrse con, por ejemplo, cuatro tiristores en una configuración de puente, tal y como se ha ilustrado en la figura 1. Si el arrollamiento secundario 109 está conectado a través de las otras dos fases, entonces se puede inyectar una tensión desfasada de 9,6 V, lo que da como resultado un control de ángulo de fase de aproximadamente ± 2 grados. Las espiras del arrollamiento secundario 109 pueden variarse para lograr la cantidad deseada de control de tensión y/o de ángulo de fase.

Se incluye un bloque 118 de conexión que puede conmutar entre configuraciones de conexión. Por ejemplo, el bloque de conexión puede comprender dispositivos de conmutación tales como, por ejemplo, relés, conmutadores de estado sólido u otros dispositivos de conmutación apropiados que puedan controlarse para conmutar entre unas conexiones de fase y/o de neutro. También se pueden usar conmutadores o puentes manuales. En el ejemplo de la figura 1, un

40 primer dispositivo de conmutación puede conmutarse entre una fase A y una fase B, y un segundo dispositivo de conmutación puede conmutarse entre un neutro N y una fase C. El MOTAA 100a también comprende una interfaz 124 de comunicación y un controlador 121, que puede incluir circuitería de procesamiento con un procesador y una memoria y/o un circuito integrado de aplicación específica (ASIC, por sus siglas en inglés). El controlador 121 está configurado para controlar la conmutación de la circuitería 112 de conmutación y del bloque 118 de conexión

Los MOTAA 100 pueden apilarse juntos para lograr un resultado de control deseado. En la figura 2 se muestra un ejemplo de tres MOTAA 100a que están apilados en un conductor (o línea) principal (o primario/a) 106. Tal y como se muestra, el conductor principal 106 atraviesa los TT 103 de los tres MOTAA 100a. En esta disposición, el rango del control de tensión puede aumentarse hasta aproximadamente un $\pm 6\%$ de la tensión nominal, y el rango del control de fase puede ser de aproximadamente $\pm 6^\circ$. Además, con esta configuración, las pérdidas son reducidas: se estima que son aproximadamente de 1,25 kW o menores de un 0,2 % de la potencia suministrada por 666 kW / fase (o 2 MW en total). En caso de un fallo de sistema, una intensidad de fallo de 50 000 A se reduciría en principio a 1000 A, la cual es muy manejable con los tiristores de bajo coste en el mercado, especialmente si se usan con el relé 115 de derivación (o contactor). Si falla un MOTAA 100a, puede configurarse para volver a un modo de derivación en el que se cierra el relé 115 de derivación. De esta manera, se mantiene la funcionalidad del sistema, aunque con un control de tensión

55 reducido.

Mediante el uso de un transformador de arrollamiento coaxial, pueden evitarse los grandes niveles de flujo de pérdida que puede haber presentes en los transformadores toroidales (TT) 103 y los grandes esfuerzos mecánicos entre los arrollamientos primario y secundario cuando se experimenten corrientes de falta. En la figura 3A se muestra un ejemplo de un módulo de optimización de tensión aislado y apilable (MOTAA) 100b en el que se utiliza un transformador 203 de arrollamiento coaxial (TAC). Tal y como se ha ilustrado en la figura 3A, las espiras del arrollamiento secundario 109 están situadas coaxialmente con respecto al conductor principal (o primario) 106 en un núcleo 206. El núcleo 206 puede ser un núcleo de acero al silicio u otro núcleo que sea equivalente o apto para la aplicación. Un tubo 209 ovalado o con forma de U puede proporcionar el arrollamiento primario (y una parte del conductor principal 106) a través de unas conexiones en unos extremos opuestos. El tubo 209 ovalado o con forma de U puede ser de cobre o de otro

material conductor apropiado. Las espiras del arrollamiento secundario 109 pueden atravesar el interior del tubo 209 de cobre (por ejemplo, con una relación de transformación de 1:50). Esta disposición aporta una resistencia adicional para soportar las fuerzas generadas por las corrientes de falta. La configuración coaxial también reduce los niveles de flujo de pérdida en el TAC 203.

Haciendo referencia a la figura 3B, en ella se muestra un ejemplo de un TAC 203 que comprende un tubo partido ovalado como arrollamiento primario. Inicialmente, el tubo partido ovalado 209 se puede fabricar. Tal y como se puede ver en la figura 3B, el tubo ovalado 209 incluye dos secciones rectas 303 entre unos extremos redondeados 306. El tubo ovalado 209 está partido a lo largo de la longitud del tubo para facilitar la inserción del arrollamiento secundario entre ambas mitades 209a y 209b del tubo ovalado 209. En uno de los extremos redondeados 306, el tubo partido ovalado 209 está cortado para formar un arrollamiento primario de una sola espira para el TAC 203. Unas placas de conexión 309 están montadas en ambas mitades 209a y 209b del tubo partido, en lados opuestos del corte en el extremo redondeado 306. Tal y como puede entenderse, las dos mitades 209a y 209b del tubo ovalado son imágenes especulares la una de la otra que pueden colocarse para formar el tubo partido ovalado 209 completo.

Para el ensamblaje, puede formarse un arrollamiento multiespiral para el arrollamiento secundario 109 del TAC 203. El arrollamiento secundario 109 se coloca en una mitad del tubo partido ovalado 209a. Los cables para el arrollamiento secundario pueden pasarse por unas aberturas en uno de los extremos redondeados 306 de una mitad del tubo partido ovalado 209a. Por ejemplo, pueden formarse unas aberturas en lados opuestos del extremo cortado del semitubo 209a, con las placas 309 de conexión entre las dos aberturas. Los cables de arrollamiento secundario pueden pasar por las aberturas para su conexión a la circuitería 112 de conmutación (fig. 3A). Se puede proporcionar un manguito protector alrededor de los cables que pasan por las aberturas para proporcionar un aislamiento adicional y una protección antidesgaste. Con el arrollamiento 109 colocado en el semitubo 209a, el otro semitubo 209b puede alinearse encima del semitubo 209a para que el arrollamiento secundario 109 esté rodeado por el tubo partido ovalado 209. Las placas 309 de conexión de cada semitubo pueden configurarse para unirse la una a la otra con el fin de sujetar las mitades del tubo partido ovalado 209 alineadas alrededor del arrollamiento secundario 109. Por ejemplo, las placas 309 de conexión correspondientes se pueden afianzar la una a la otra usando sujetadores (por ejemplo, pernos o tornillos).

También se pueden incluir unas abrazaderas 315 de montaje para sujetar el tubo partido ovalado 209 alineado y afianzar los núcleos 206 alrededor de las secciones rectas 303 del tubo partido ovalado 209. Las abrazaderas 315 de montaje pueden ser de un material aislante de resistencia suficiente como para mantener los núcleos 206 en su posición sobre el tubo partido ovalado 209. Las abrazaderas 315 de montaje pueden fijarse en su sitio en ambos extremos de los núcleos 206 mediante el uso de sujetadores (por ejemplo, tuercas y pernos) que se extiendan por el centro y fuera de ambos lados del tubo partido ovalado 209 para afianzar una mitad a la otra. La construcción del TAC 209 permite sumergirlo en aceite para enfriarse durante los funcionamientos. En el tubo 209 pueden proporcionarse unos orificios o aberturas para permitir que el aceite fluya dentro del tubo 209 alrededor del arrollamiento secundario 109. La disposición del tubo partido ovalado 209 también proporciona un soporte estructural adicional para soportar las fuerzas producidas por corrientes de falta que circulen a través del TAC 203.

Parecidos a los del TT 103 del MOTAA 100a de la figura 1, los cables para el arrollamiento secundario 109 del TAC 203 están conectados a una circuitería 112 de conmutación (por ejemplo, un par de tiristores o un conmutador triac), tal y como se muestra en la figura 3A. La circuitería 112 de conmutación también puede incluir un relé 115 de derivación (o contactor) conectado a través de los cables del arrollamiento secundario 109. Puede incluirse un bloque 118 de conexión que puede conmutar entre configuraciones de conexión. El MOTAA 100b también comprende la interfaz 124 de comunicación y el controlador 121.

Haciendo referencia ahora a las figuras 4A-4C, en ellas se muestran unos diagramas esquemáticos que ilustran unos ejemplos de control de tensión y/o de flujo de potencia usando uno o más MOTAA 100. Un MOTAA 100 o un MOTAA 100 apilado puede excitarse con la tensión de línea-neutro de la fase en la que esté montado. Por ejemplo, tal y como se muestra en la figura 4A, el arrollamiento secundario 109 del MOTAA 100b está conectado entre el conductor (o línea) principal (o primario/a) 106, que está conectado al arrollamiento primario del TAC 203, y una conexión neutra. Esto logrará un control de tensión para esa fase, tal y como se ha ilustrado en el diagrama fasorial de la figura 4A. Como el arrollamiento secundario 209 es excitado por la tensión en el conductor principal 106, la tensión que está acoplada del arrollamiento secundario 109 al conductor principal 109 (fasor 403) está en fase (o desfasada 180 grados) con la tensión en el conductor principal 106 (fasor 406) es aditiva para producir una tensión de salida ajustada (fasor 409). En aplicaciones radiales, esto permitirá un control preciso de tensión por ascenso y reducción por parte del MOTAA 100, lo que permite aplicaciones tales como el control de energía y la gestión de la demanda máxima. La tensión aplicada puede ajustarse a través del control del circuito 112 de conmutación. Las intensidades y las tensiones del MOTAA 100 pueden ser monitorizadas por el controlador y usarse para controlar el funcionamiento de los conmutadores. Por ejemplo, los tiristores pueden conmutarse para proporcionar una excitación solo en una parte del ciclo (por ejemplo, unas conmutación de semiciclo). Los tiristores de entrada y de salida tendrán que manejarse para que no estén ambos abiertos o cortocircuitados al mismo tiempo. Tal y como se ha explicado con respecto a la figura 2, se pueden apilar múltiples MOTAA 100 para proporcionar un control de tensión deseado.

Si un MOTAA 100 se excita con la tensión de línea-línea opuesta, tal y como se muestra en la figura 4B (por ejemplo, el arrollamiento secundario 109 del MOTAA 100b está conectado a través de los conductores principales de las fases B-C para el MOTAA 100b, con el arrollamiento primario conectado al conductor principal 106 de la fase A), se inyecta una tensión en cuadratura, tal y como se ha ilustrado en el diagrama fasorial. Como la tensión inyectada (fasor 412) está desfasada 90 grados con respecto a la tensión en el conductor principal 106 (fasor 415), las dos tensiones se combinan para producir un desplazamiento de fase en la tensión de salida ajustada (fasor 418). Esto permite que el MOTAA 100 funcione como un encaminador de potencia cambiando la potencia en el transformador aguas arriba en relación con otros transformadores conectados a la red integrada de baja tensión. Tal y como se ha explicado con respecto a la figura 2, se pueden apilar múltiples MOTAA 100 para proporcionar un control de flujo de potencia deseado.

Haciendo referencia ahora a la figura 4C, tanto el control de tensión como el control de flujo de potencia pueden lograrse implementando la configuración mostrada. En el ejemplo de la figura 4C, cada fase incluye dos MOTAA 100b apilados, con un primer MOTAA 100b configurado tal y como se ha ilustrado en la figura 4A y el segundo MOTAA 100b configurado tal y como se ha ilustrado en la figura 4B. Tal y como se ha ilustrado en el ejemplo de la figura 4C, la combinación de MOTAA 100b puede configurarse para funcionar en modo reductor-elevador de tensión, en modo de control de flujo de potencia o en una combinación de ambos dependiendo de la funcionalidad deseada. Esto puede verse en el diagrama fasorial de la figura 4C. La combinación de tensiones (fasor 421) inyectadas por los MOTAA 100b se combina con la tensión en el conductor principal 106 (fasor 424) para producir un ajuste de tensión y/o de flujo de potencia deseado (fasor 427). Tal y como se ha ilustrado mediante la envolvente 430 de control, se puede implementar un control escalonado usando una combinación de MOTAA 100. Tal y como se ha explicado con respecto a la figura 2, se pueden apilar múltiples MOTAA 100 para proporcionar un control de tensión y/o de flujo de potencia deseado. La forma de la envolvente 430 de control se puede personalizar ajustando la relación de transformación del TT 103 o del TAC 203 y el número de MOTAA 100 apilados. Esta disposición proporciona una función de equilibrio de red eléctrica única, donde el sistema integrado puede cargarse completamente y la capacidad de sistema puede maximizarse.

Los MOTAA 100 se pueden usar en una gran variedad de aplicaciones industriales, de servicio público, etc. Una primera aplicación es para grandes plantas industriales (por ejemplo, 1-20 MW) que son alimentadas desde una fuente de alimentación de 480 V y en las que es deseable un control de tensión dinámico. Tal y como se muestra en la figura 5, esto se puede lograr con uno o más grupos 503 de MOTAA 100 apilados por fase para obtener un rango de control de la tensión más amplio. Un controlador maestro 506 puede comunicarse con los MOTAA 100 a través de las interfaces 124 de comunicación para proporcionar un funcionamiento coordinado. Por ejemplo, el sistema puede configurarse para funcionar a una tensión de salida o un rango de tensiones de salida definido (después de los MOTAA 100 apilados), tal como, por ejemplo, el extremo inferior de la banda ANSI permitida (por ejemplo, 0,95 por unidad [pu] de la tensión nominal). El controlador principal 506 puede monitorizar el nivel de tensión de salida (o ángulo de fase) y ajustar el funcionamiento de los MOTAA 100 en respuesta a los cambios en el nivel de tensión de salida. La tensión de salida puede regularse incluso a medida que la tensión de línea entrante varía a lo largo de su rango normal, especialmente si cae por debajo de los límites ANSI. En tal caso, los MOTAA 100 pueden elevar rápidamente la tensión para mantener el nivel de tensión de salida deseado. El circuito 112 de conmutación (figs. 1 y 3) puede configurarse para proporcionar unos tiempos de respuesta dentro de un ciclo.

Por ejemplo, considérese la situación ilustrada en la figura 5, en la que tres MOTAA 100 están apilados para proporcionar un control de tensión de aproximadamente $\pm 6\%$ para cada fase. En este caso, la tensión de línea entrante podría ser tan baja como un 89 % de la nominal, mientras que todavía se garantiza que la tensión de salida está dentro del rango permitido. Para lograr el mismo nivel de susceptibilidad a los huecos con una toma de transformador fija, el transformador principal tendría que elevar la tensión en un 5-6 %, lo que daría una tensión nominal de un 105 % en la planta. Si bien esto proporcionaría una resistencia equivalente contra los huecos, daría como resultado un aumento de un 10-15 % del consumo de energía y cargas de demanda máxima. Los MOTAA 100 se pueden añadir retroactivamente (por ejemplo, en la sala eléctrica) de una instalación existente y pueden proporcionar una reducción sustancial de los costes energéticos mientras mantienen un alto nivel de resistencia contra los huecos de tensión y las condiciones de baja tensión. El uso de los MOTAA 100 también puede duplicar el rango de funcionamiento de la tensión de línea entrante a de un 89 % a un 111 % de la nominal, al tiempo que garantiza que la tensión de planta esté en la banda de $\pm 5\%$ deseada.

Otra aplicación es en sistemas de potencia de C.A. de baja tensión y de gran tamaño, tal como en la ciudad de Nueva York, donde las subredes eléctricas individuales tienen una tensiones asignadas de 208 V/120 V a menos de 20 MW. En la figura 6 se ha ilustrado un ejemplo de una red eléctrica integrada 603 que se alimenta a través de cuatro transformadores 606 de potencia, que pueden tener tensiones asignadas a, por ejemplo, 0,5-1 MW cada uno. Unas cargas 609 pueden conectarse a la red eléctrica integrada 603 en cualquiera de varias ubicaciones. La capacidad de operar con niveles de redundancia N-X da como resultado unos niveles de fiabilidad extremadamente altos. Por otro lado, las variaciones de carga y las impedancias de red eléctrica dan lugar a una carga desigual de los transformadores, lo que limita significativamente la capacidad del sistema en su conjunto. Al incluir MOTAA 100 en las salidas de al menos una parte de los transformadores 606, los MOTAA 100 pueden equilibrar dinámicamente la carga de los transformadores 606 y liberar una capacidad significativa. Esta es una aplicación distribuida en la que múltiples

transformadores pueden incorporar los MOTAA 100. Por ejemplo, solo tres MOTAA 100 (uno por fase) por transformador 606 pueden bastar para cumplir los objetivos generales de equilibrado de red eléctrica.

Otra aplicación incluye plantas industriales en zonas no urbanizadas en las que se puede usar una red eléctrica integrada de baja tensión (480 V) alimentada por múltiples transformadores capacitados con MOTAA para satisfacer las necesidades eléctricas de la planta. De esta manera se pueden alcanzar niveles de fiabilidad y flexibilidad sin precedentes, lo que permite mover las cargas según sea necesario y permite conectar capacidad adicional a medida que la demanda aumente o cambie con el tiempo. Este enfoque puede lograr simultáneamente los objetivos de fiabilidad, reducción del coste de la energía y utilización mejorada de los activos. La incapacidad para controlar los flujos de potencia en sistemas integrados ha obligado a usar redes radiales, que tienen una flexibilidad y una fiabilidad reducidas, la cual se puede superar mediante el uso de MOTAA 100.

Haciendo referencia a la figura 7A, en ella se muestra un diagrama de flujo que ilustra un ejemplo del funcionamiento de los MOTAA. Comenzando en 703, la(s) tensión(es) de salida del (de los) MOTAA 100 se monitoriza(n) para determinar la magnitud (o nivel) y el ángulo de fase. El controlador 121 de un MOTAA 100 (figs. 1 y 3) puede monitorizar su propia salida para controlar la conmutación del circuito 112 de conmutación, o bien un controlador maestro 506 (fig. 5) puede monitorizar la(s) salida(s) de uno o más MOTAA 100. En 706, la tensión monitorizada puede compararse con uno o más niveles o rangos de tensión definidos para determinar el funcionamiento del (de los) MOTAA 100 individuales. En respuesta a la comparación, la circuitería 112 de conmutación y/o el bloque 118 de conexión puede(n) hacerse funcionar para ajustar el funcionamiento del (de los) MOTAA 100. Si la tensión monitorizada está por encima del nivel definido o fuera del rango definido en 709, entonces el funcionamiento del MOTAA (o de una pluralidad de MOTAA) 100 puede ajustarse en 712, y el flujo vuelve a 703, desde donde continúa la monitorización. Si la tensión monitorizada no está por encima del nivel deseado o fuera del rango deseado, entonces en 715 puede determinarse si el nivel de tensión ha vuelto a caer por debajo del nivel o estar dentro del rango, lo que permite ajustar el funcionamiento del (o de los) MOTAA 100 en 718. De lo contrario, el flujo vuelve a 703 para continuar la monitorización. El ciclo de monitorización se puede llevar a cabo en intervalos de tiempo definidos (por ejemplo, cada t segundos). Los MOTAA 100 apilados pueden tener intervalos (t) de tiempo aleatoriamente asignados para evitar tener que buscar entre los distintos MOTAA 100.

En la figura 7B se ha ilustrado un ejemplo del ajuste de funcionamiento basado en los ejemplos de las figuras 2 y 5, en el que los MOTAA 100 pueden ajustar individualmente la tensión o el ángulo de fase en incrementos de aproximadamente un 2 %. La unidad MOTAA ajustará la cantidad de inyección en función de la magnitud del error entre el valor deseado y el valor real. Tal y como se muestra en la figura 7B, la comparación de la magnitud de tensión o ángulo de fase monitorizado en relación con los niveles o rangos puede traducirse en un ajuste apropiado de uno o más MOTAA 100. En las realizaciones descritas, los MOTAA 100 divulgados están configurados para realizar cambios en incrementos de aproximadamente un 2 %. Por ejemplo, si el error (e) entre los valores real y de referencia es menor que $\pm 2\%$, entonces no se realiza ningún ajuste. Si el error (por ejemplo, $V_{ref} - V_{real}$) está fuera de ese rango, entonces la tensión o fase real es ajustado por uno o más MOTAA 100, tal y como se ha indicado.

Debe recalcar que las realizaciones descritas anteriormente de la presente divulgación son simplemente ejemplos posibles de implementaciones establecidas para permitir una comprensión clara de los principios de la divulgación.

El uso del término “sustancialmente” tiene por objeto permitir desviaciones del término descriptivo que no afecten negativamente a la finalidad prevista. Se entiende implícitamente que los términos descriptivos son modificados por la palabra ‘sustancialmente’, aunque el término no sea modificado explícitamente por dicha palabra.

Cabe señalar que las relaciones, concentraciones, cantidades y otros datos numéricos pueden expresarse en la presente memoria en formato de rango. Cabe entender que un formato de rango así se usa a efectos de conveniencia y brevedad y, por tanto, debe interpretarse de manera flexible para incluir no solo los valores numéricos enumerados explícitamente como los límites del rango, sino también para incluir todos los valores numéricos individuales o subrangos abarcados dentro de ese rango, como si cada valor numérico y subrango se enumerara explícitamente. Como ejemplo, un rango de concentraciones de “aproximadamente un 0,1 % a aproximadamente un 5 %” debe interpretarse como que incluye no solo la concentración explícitamente enumerada de aproximadamente un 0,1 % en peso a aproximadamente un 5 % en peso, sino como que también incluye concentraciones individuales (por ejemplo, 1 %, 2 %, 3 % y 4 %) y los subrangos (por ejemplo, 0,5 %, 1,1 %, 2,2 %, 3,3 % y 4,4 %) que hay dentro del rango indicado. El término “aproximadamente” puede incluir un redondeo tradicional a cifras significativas de los valores numéricos. Además, la frase “aproximadamente ‘x’ a ‘y’” incluye “aproximadamente ‘x’ a aproximadamente ‘y’”.

REIVINDICACIONES

1. Un módulo de optimización de tensión aislado y apilable, MOTAA, que comprende:
 - 5 Un transformador (103) que comprende un arrollamiento primario (106) y un arrollamiento secundario (109) y que tiene una relación de transformación entre el arrollamiento primario y el arrollamiento secundario, donde el arrollamiento primario está configurado para conectarse en serie con, y ser alimentado por, una primera fase (106) de un sistema eléctrico trifásico;
 - 10 un bloque (118) de conexión conectado a un circuito (112) de conmutación, comprendiendo el bloque de conexión unos dispositivos de conmutación configurados para controlarse para proporcionar una tensión de C.A. proporcionada del sistema eléctrico trifásico al circuito de conmutación conmutando entre una primera tensión a través de la primera fase y un neutro del sistema eléctrico trifásico y una segunda tensión a través de las segunda y tercera fases del sistema eléctrico trifásico;
 - 15 el circuito (112) de conmutación, en el que el circuito de conmutación está conectado al arrollamiento secundario, el circuito de conmutación configurado para energizar el arrollamiento secundario con una tensión de C.A. proporcionada desde el sistema eléctrico trifásico o para cortocircuitar el arrollamiento secundario; y
 - 20 un controlador (121) configurado para controlar la conmutación del circuito (112) de conmutación y del bloque (118) de conexión.
2. El MOTAA de la reivindicación 1, en el que energizar el arrollamiento secundario con la primera tensión procedente de la primera fase y del neutro del sistema eléctrico trifásico eleva o reduce una tensión de la primera fase sin afectar al ángulo de fase de la primera fase y,
 - 25 opcionalmente, en el que la elevación o reducción de la tensión de la primera fase se basa en la relación de transformación del transformador.
3. El MOTAA de la reivindicación 1, en el que energizar el arrollamiento secundario con la segunda tensión procedente de las segunda y tercera fases del sistema eléctrico trifásico ajusta un flujo de potencia cambiando un ángulo de fase de la primera fase y,
 - 30 opcionalmente, en el que la segunda tensión procedente de las segunda y tercera fases está desfasada 90 grados con respecto a una tensión de la primera fase.
4. El MOTAA de la reivindicación 1, en el que el transformador es un transformador de arrollamiento coaxial, TAC, y,
 - 40 opcionalmente, en el que el arrollamiento primario del TAC comprende un tubo partido ovalado que está configurado para conectarse a la primera fase, y unas espiras del arrollamiento secundario están dispuestas dentro del tubo partido ovalado.
5. El MOTAA de la reivindicación 1, en el que el transformador es un transformador toroidal, TT, comprendiendo el arrollamiento primario un conductor principal que atraviesa un núcleo toroidal y comprendiendo el arrollamiento secundario unas espiras arrolladas alrededor del núcleo toroidal.
6. El MOTAA de la reivindicación 1, en el que el circuito de conmutación comprende unos tiristores en una configuración de puente.
7. Un sistema, que comprende:
 - 55 Un módulo de optimización de tensión aislado y apilable, MOTAA, según una cualquiera de las reivindicaciones 1-6 que está acoplado respectivamente a cada fase de un sistema eléctrico trifásico, en el que, para cada MOTAA que está acoplado a una fase del sistema eléctrico trifásico:

El arrollamiento primario del transformador es alimentado por la fase acoplada a ese MOTAA; y

el circuito de conmutación está configurado para elevar o reducir una tensión de la fase que está acoplada a ese MOTAA o para cambiar un ángulo de fase de la fase que está acoplada a ese MOTAA energizando el arrollamiento secundario del transformador con la tensión de C.A. proporcionada por el bloque de conexión y procedente del sistema eléctrico trifásico.
8. El sistema de la reivindicación 7, en el que la tensión de C.A. proporcionada al circuito de conmutación por el bloque de conexión para:

Elevar o reducir la tensión de esa fase es la primera tensión a través de la fase que alimenta al arrollamiento primario y el neutro del sistema eléctrico trifásico; y

5 cambiar el ángulo de fase de esa fase es la segunda tensión a través de las dos fases del sistema eléctrico trifásico que no están abasteciendo al arrollamiento primario.

9. El sistema de la reivindicación 7, en el que el MOTAA es un primer MOTAA, comprendiendo además el sistema un segundo MOTAA según una cualquiera de las reivindicaciones 1-6 que está acoplado a cada fase del sistema eléctrico trifásico, en el que uno de los primero y segundo MOTAA de cada fase eleva o reduce la tensión y uno distinto de los primer y segundo MOTAA ajusta el ángulo de fase.

10. El sistema de la reivindicación 7, que comprende una pluralidad de MOTAA apilados que están acoplados respectivamente a cada fase del sistema eléctrico trifásico, en el que cada pluralidad de MOTAA apilados comprende el MOTAA que está acoplado a la fase respectiva y está configurada para, acumulativamente, elevar o reducir la tensión, o cambiar el ángulo de fase, de la fase que está acoplada a la pluralidad respectiva de MOTAA apilados.

11. El sistema de la reivindicación 10, que comprende además un controlador maestro que está configurado para mantener unas tensiones de salida de la pluralidad de MOTAA apilados que están acoplados a cada fase del sistema eléctrico trifásico controlando individualmente el funcionamiento de los MOTAA apilados.

12. El sistema de la reivindicación 10, en el que el sistema eléctrico trifásico que está acoplado a los MOTAA comprende una salida de un transformador que alimenta a cargas industriales.

13. El sistema de la reivindicación 7, en el que el sistema eléctrico trifásico que está acoplado a los MOTAA comprende una salida de un transformador que alimenta a una red eléctrica integrada.

14. El sistema de la reivindicación 7, en el que el transformador es un transformador de arrollamientos coaxiales, TAC, que comprende un tubo de cobre partido ovalado que forma el arrollamiento primario, donde el arrollamiento secundario comprende un arrollamiento multiespiral que está rodeado por el tubo de cobre partido ovalado.

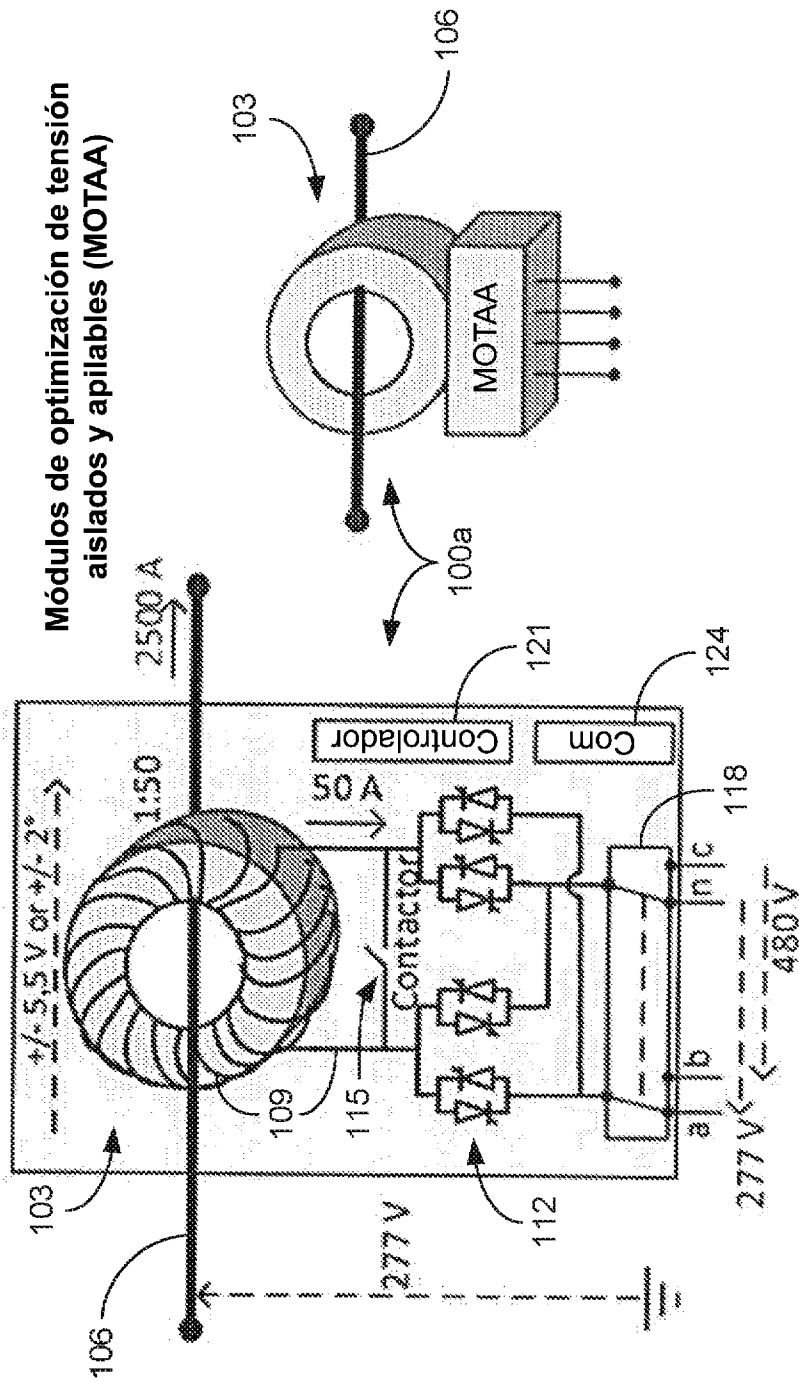


Figura 1

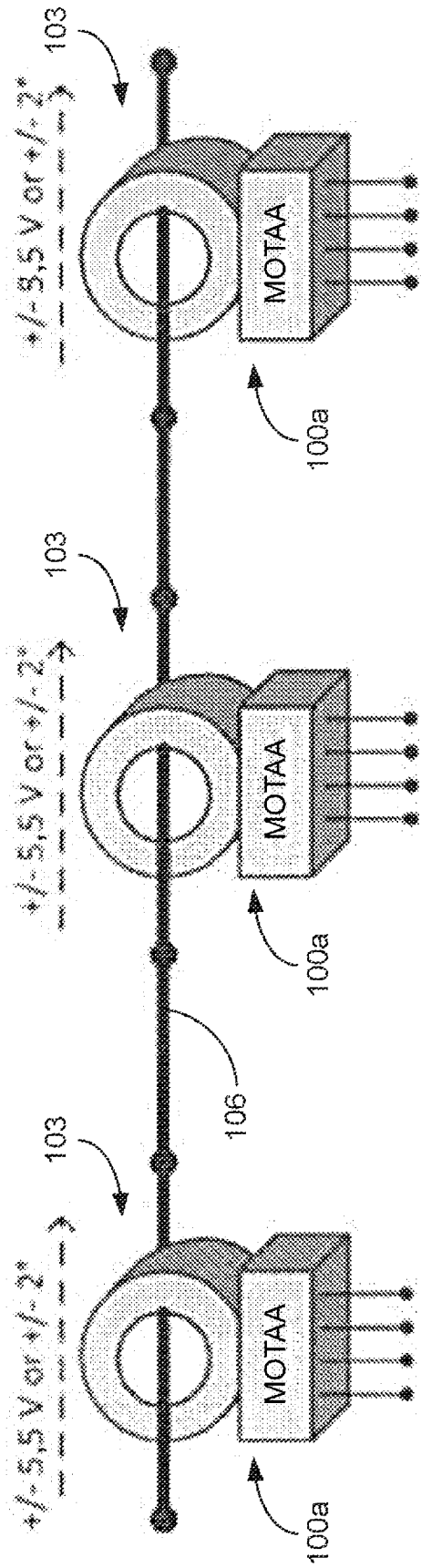


Figura 2

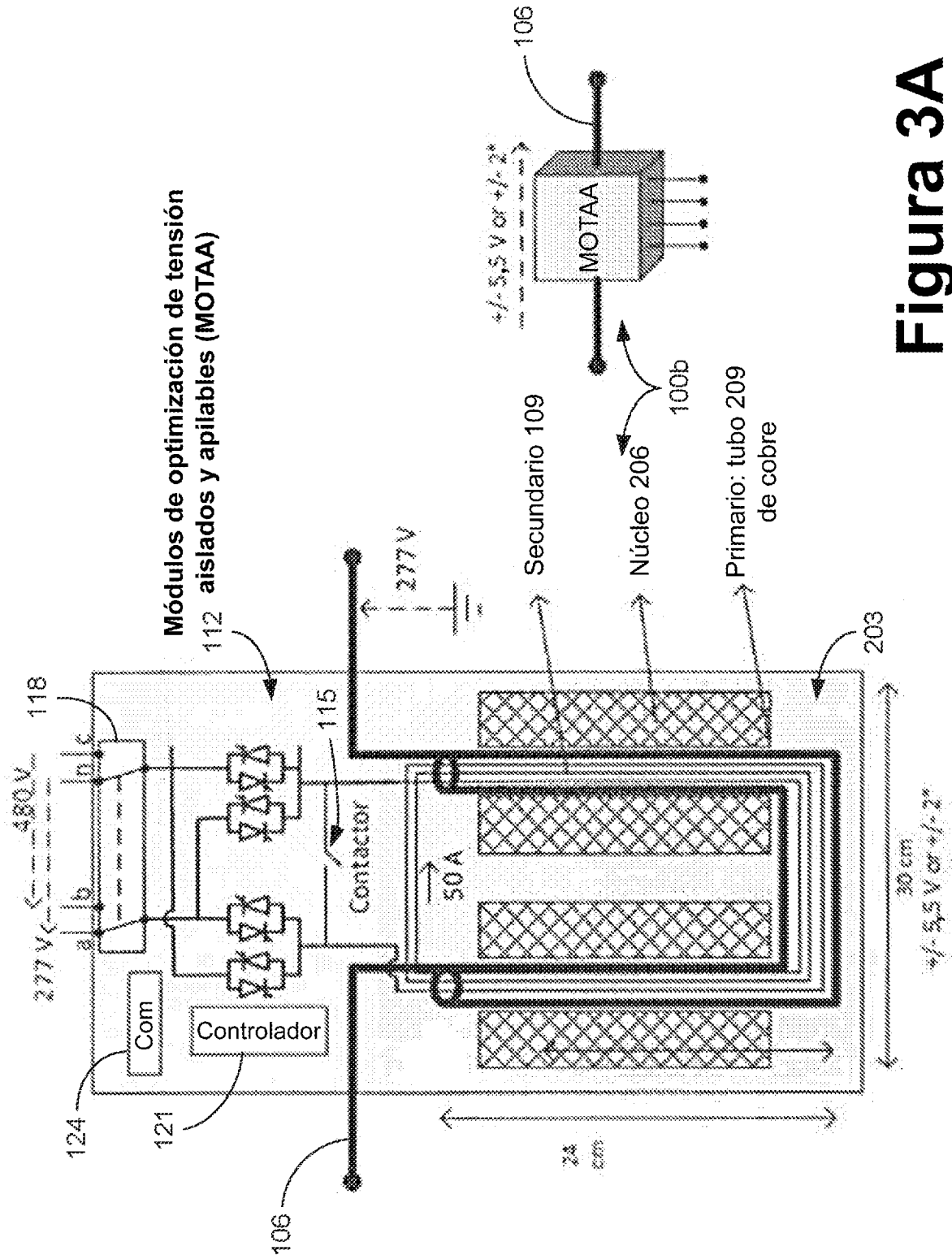


Figura 3A

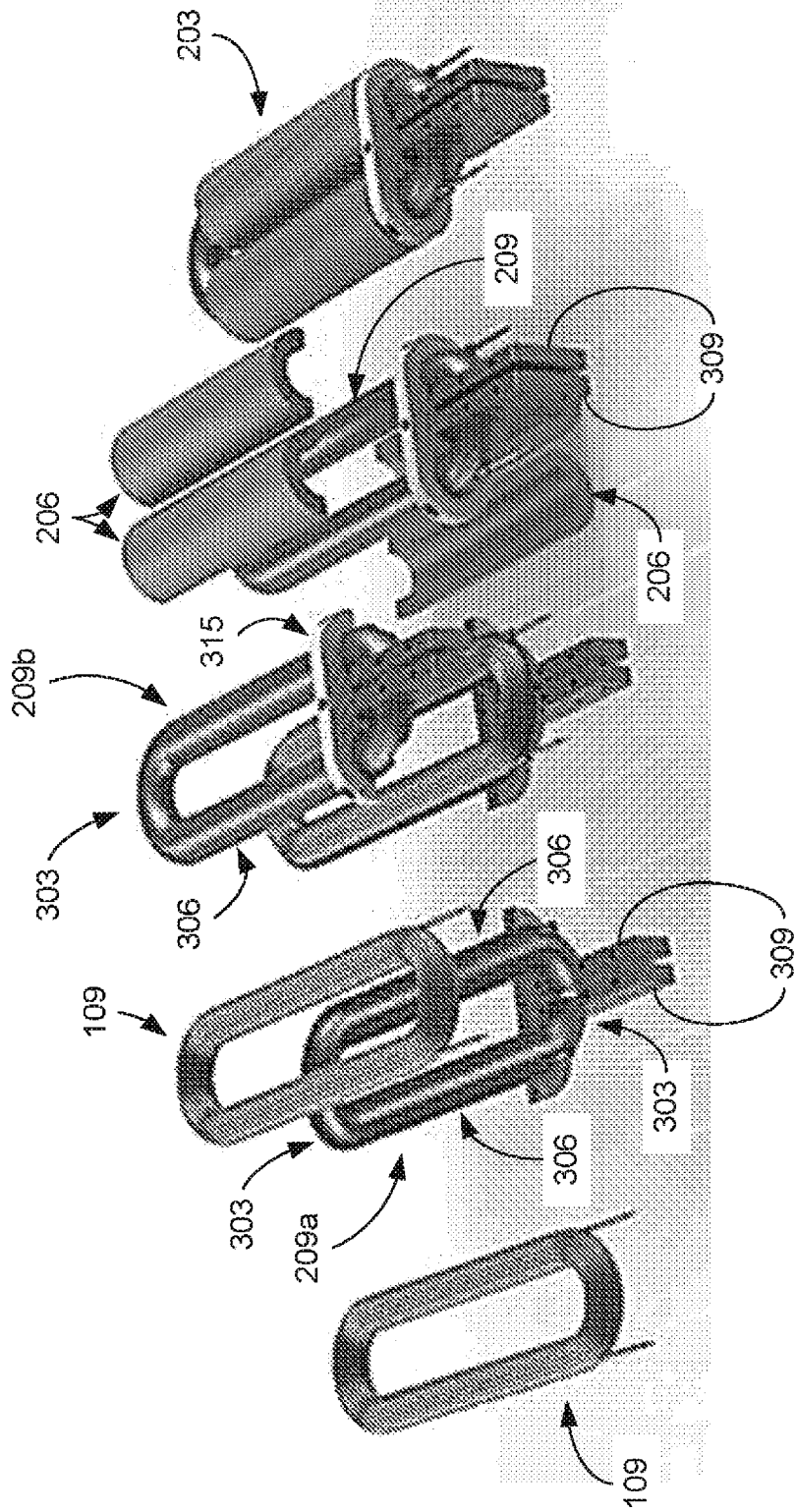


Figura 3B

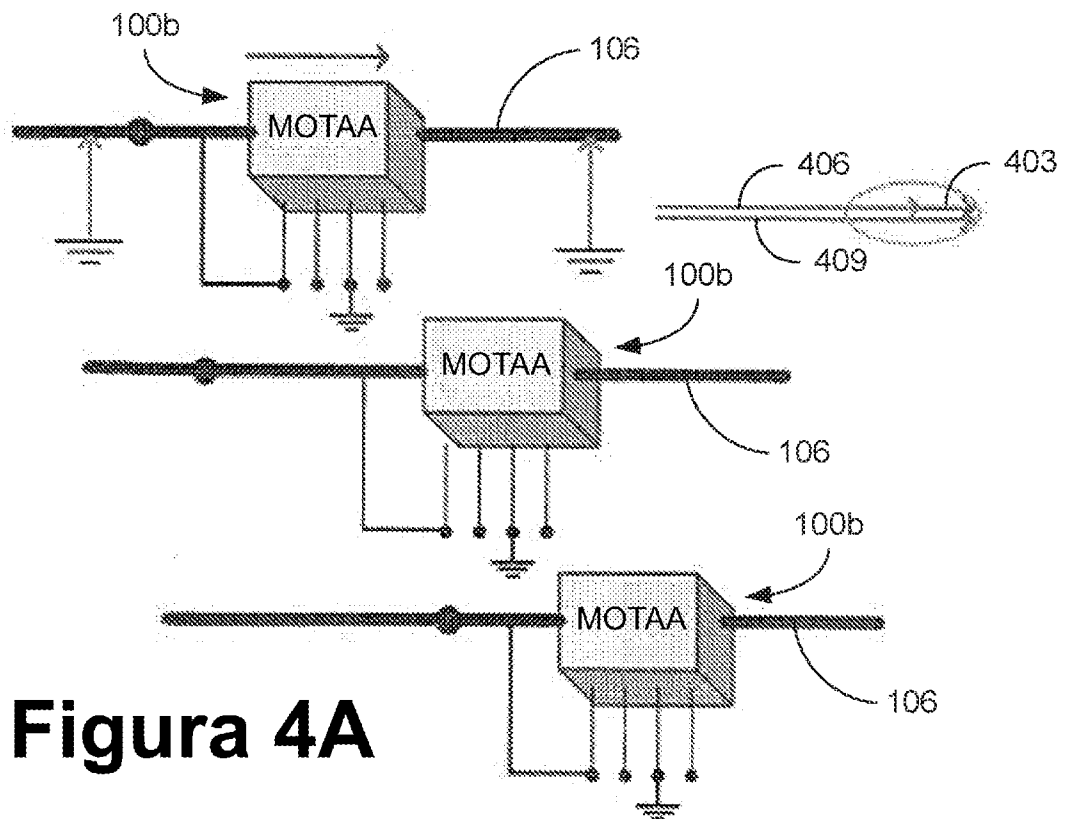


Figura 4A

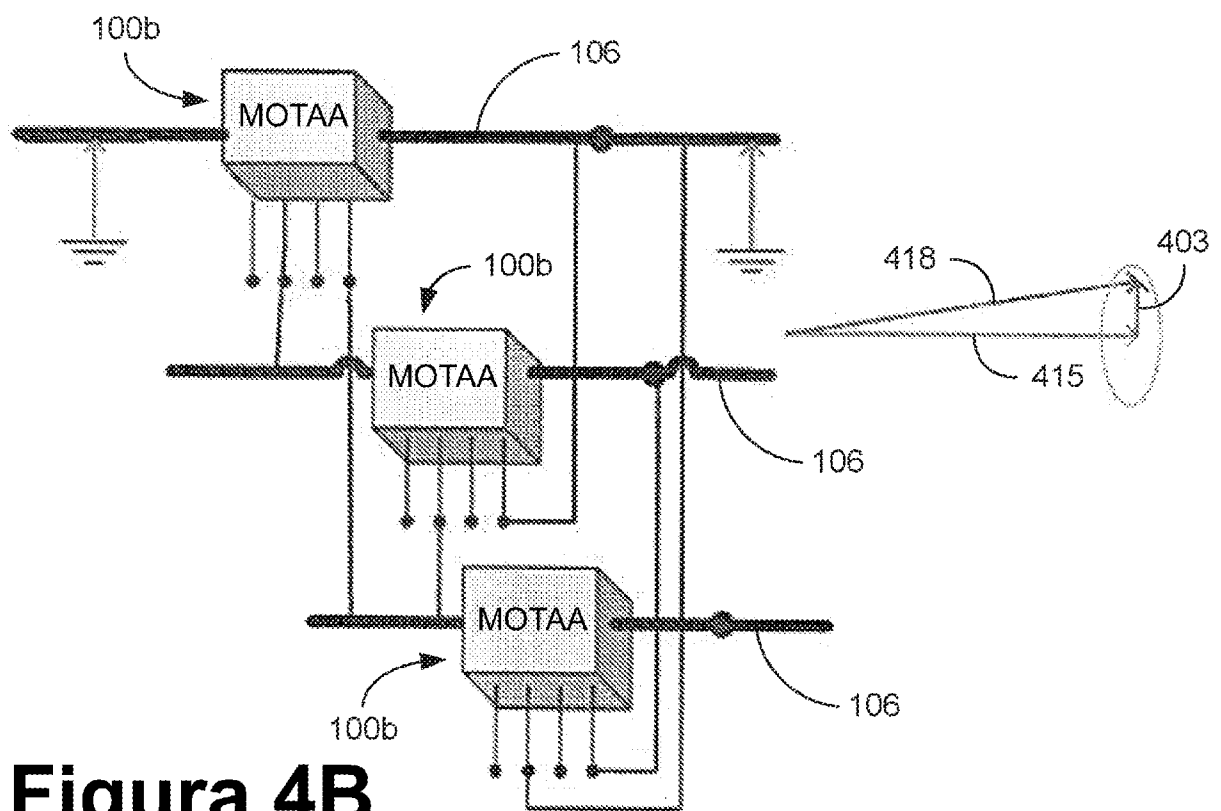


Figura 4B

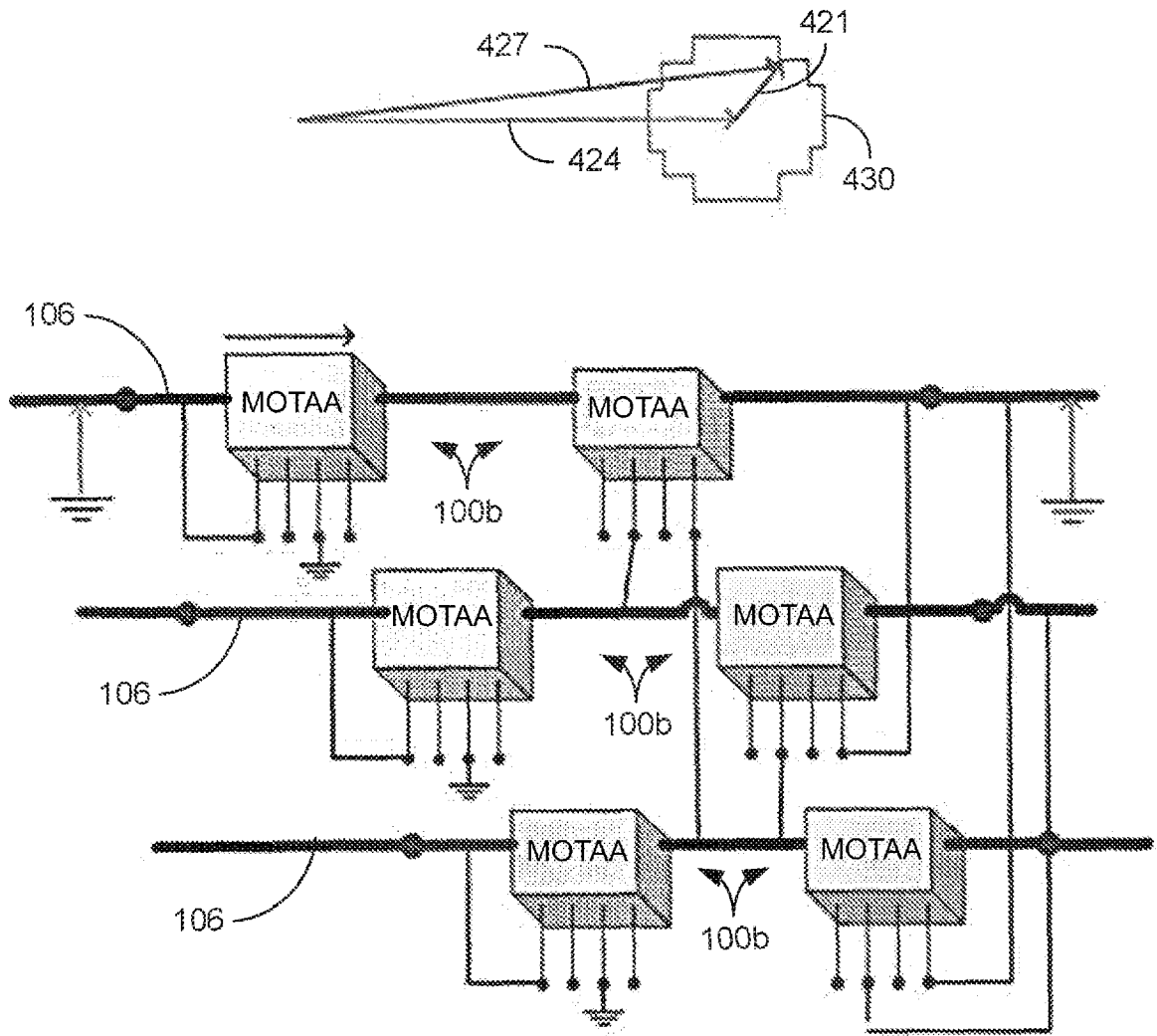


Figura 4C

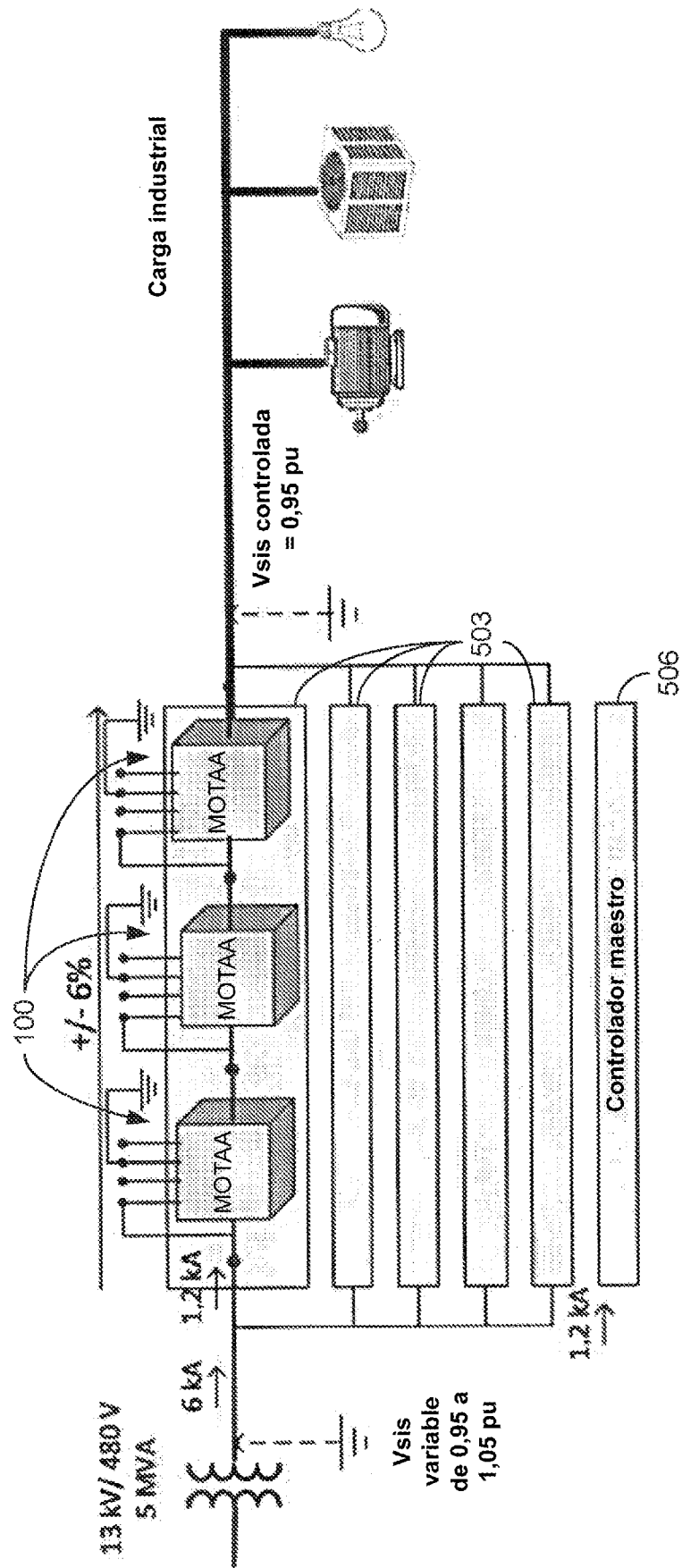


Figura 5

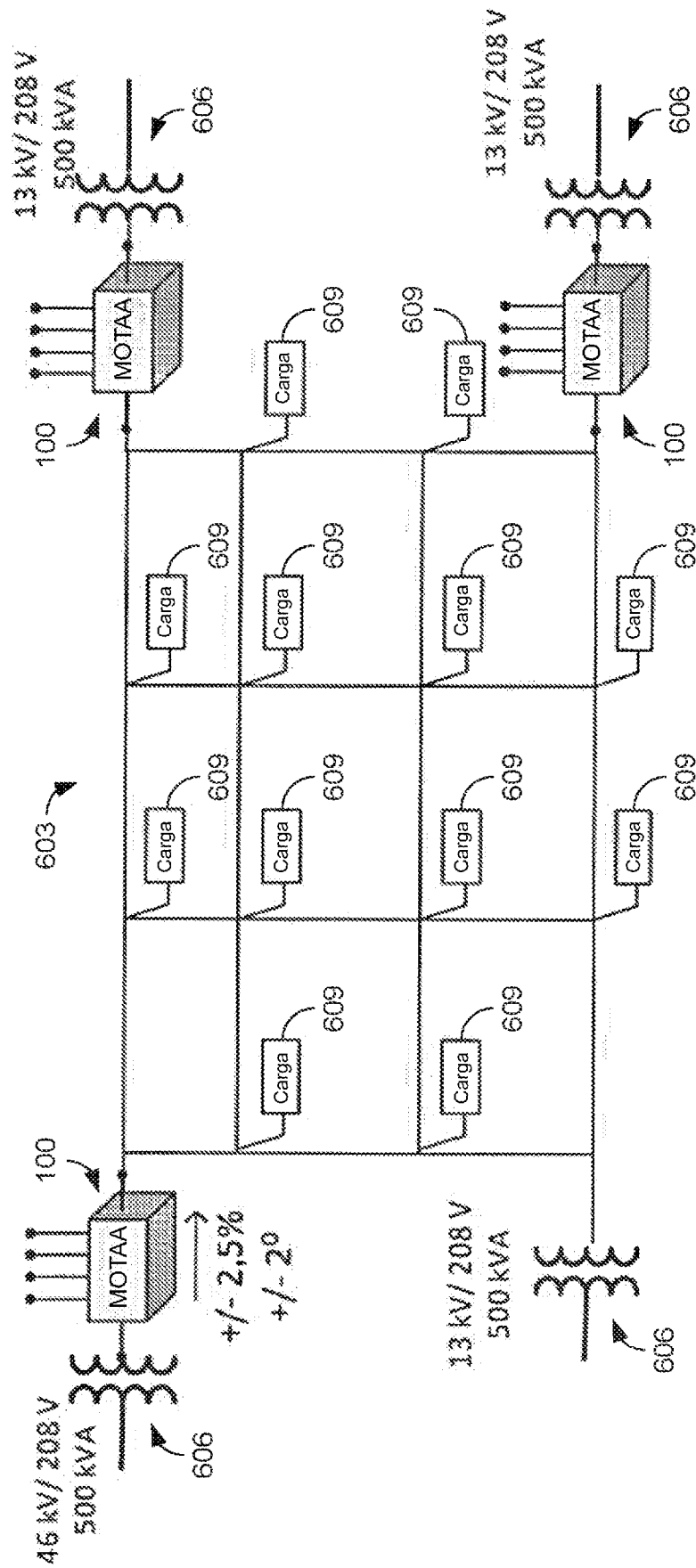


Figura 6

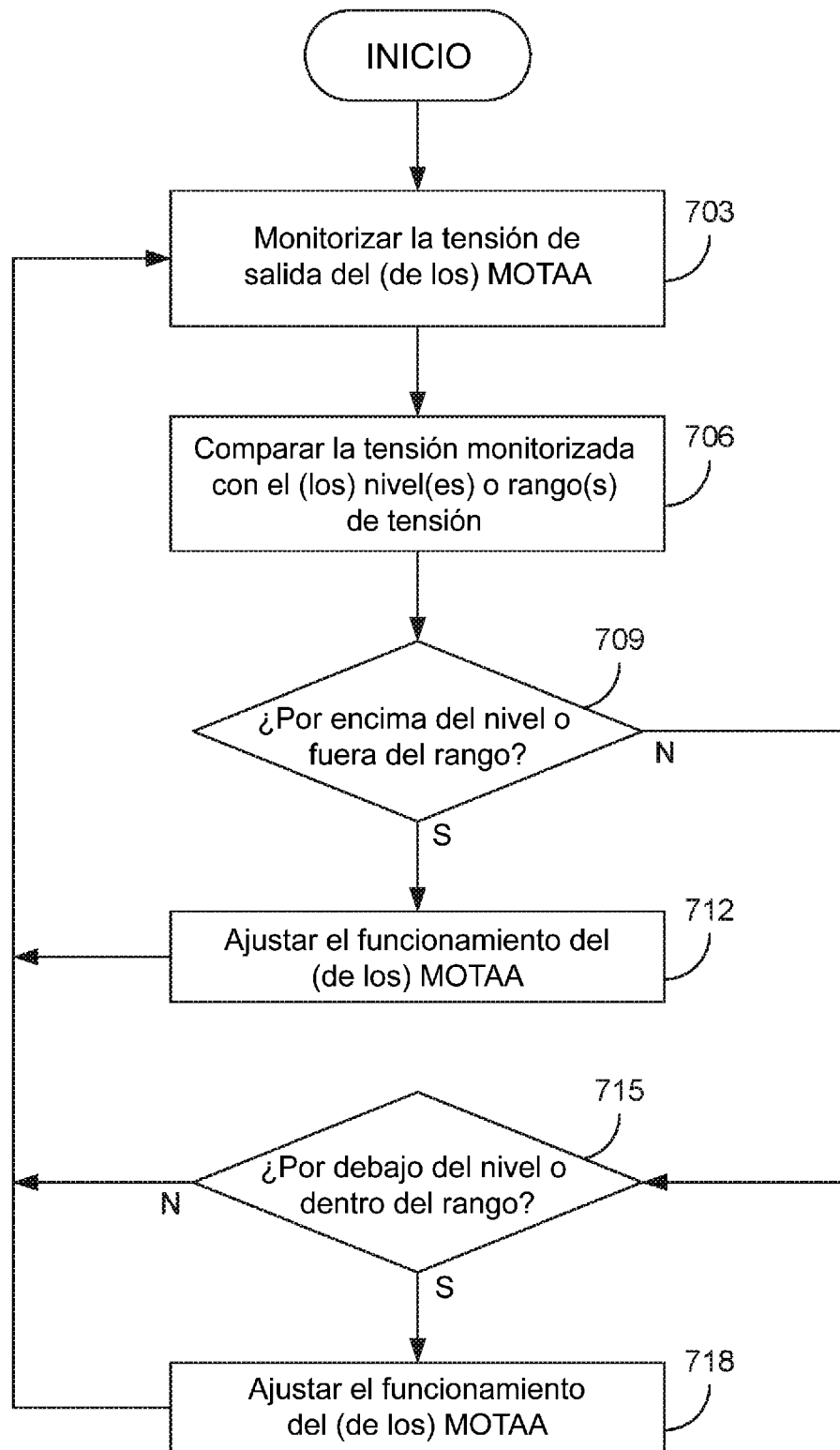


Figura 7A

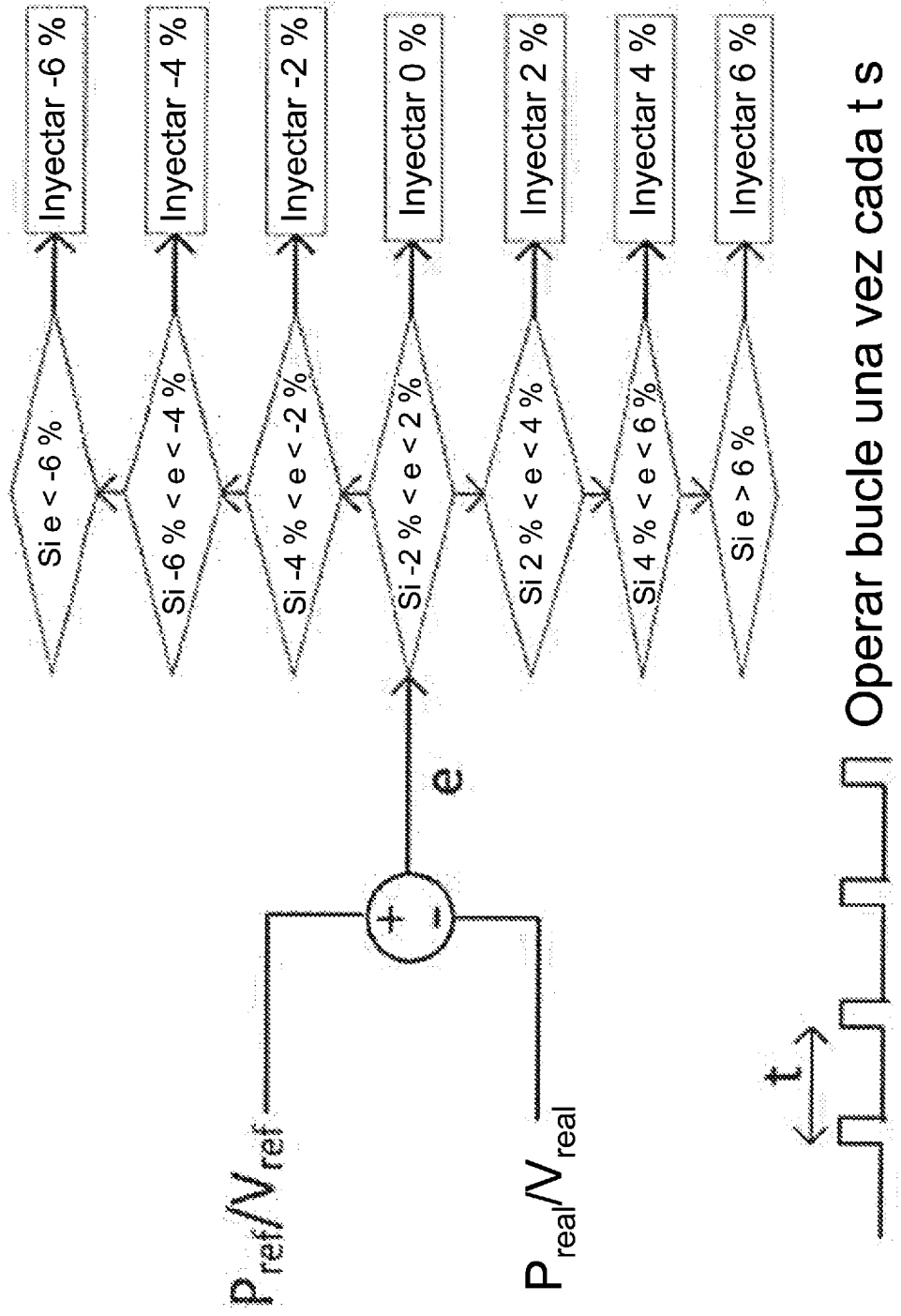


Figura 7B