



República Federativa do Brasil  
Ministério da Economia  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) PI 0822822-1 A2



(22) Data do Depósito: 17/06/2008

(43) Data da Publicação Nacional: 15/12/2020

(54) **Título:** INSTALAÇÃO TENDO UM CIRCUITO INTERMEDIÁRIO DE VOLTAGEM CC E CONVERSORES AUTOCOMUTADOS

(51) **Int. Cl.:** H02J 3/36; H02M 5/458.

(71) **Depositante(es):** SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT.

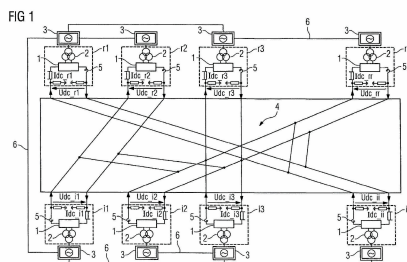
(72) **Inventor(es):** TOBIAS BERNHARD; MIKE DOMMASCHK; JÖRG DORN; INGO EULER; FRANZ KARLECİK-MAIER; JÖRG LANG; JÜRGEN RITTIGER; JOHN-WILLIAM STRAUSS; QUOC-BUU TU; OLIVER VENJAKOB; CARSTEN WITTSTOCK; KLAUS WÜRFLINGER.

(86) **Pedido PCT:** PCT EP2008005211 de 17/06/2008

(87) **Publicação PCT:** WO 2009/152840 de 23/12/2009

(85) **Data da Fase Nacional:** 20/12/2010

(57) **Resumo:** INSTALAÇÃO TENDO UM CIRCUITO INTERMEDIÁRIO DE VOLTAGEM CC E CONVERSORES AUTOCOMUTADOS. A presente invenção refere-se a um método para regular pelo menos dois inversores (1), que podem ser regulados como retificadores ou inversores, conectados entre si por uma ligação CC (4), para transmissão e/ou distribuição de energia, em que uma voltagem CC medida ( $U_{dc\_r1} \dots U_{dc\_rr}$ ;  $U_{dc\_i1} \dots U_{dc\_ii}$ ) e uma corrente CC medida ( $I_{dc\_r1} \dots I_{dc\_rr}$ ;  $I_{dc\_i1} \dots I_{dc\_ii}$ ) são medidas em cada inversor (1), e transmitidas a um regulador de retificador (7\_rr), para regular o retificador correspondente, ou a um regulador de inversor (8\_ii), para regular o inversor correspondente, em que cada regulador de retificador (7\_rr) e cada regulador de inversor (8\_ii) propicia a diferença entre uma determinada voltagem CC ajustada ( $U_{dco}$ ) e a voltagem CC medida recebida relevante ( $U_{dc\_r1} \dots U_{dc\_rr}$ ;  $U_{dc\_i1} \dots U_{dc\_ii}$ ), para propiciar uma voltagem CC diferencial ( $du$ ) e a diferença entre uma corrente CC ajustada ( $I_{dco\_r1} \dots I_{dco\_rr}$ ;  $I_{dco\_i1} \dots I_{dco\_ii}$ ) e a CC medida recebida ( $I_{dc\_r1} \dots I_{dc\_rr}$ ;  $I_{dc\_i1} \dots I_{dc\_ii}$ ) correspondente, para propiciar uma corrente CC diferencial ( $di$ ), em que a corrente CC medida, a voltagem CC medida, a corrente CC ajustada (...).



Relatório Descritivo da Patente de Invenção para **"INSTALAÇÃO TENDO UM CIRCUITO INTERMEDIÁRIO DE VOLTAGEM CC E CONVERSORES AUTOCOMUTADOS"**.

A presente invenção refere-se a um método para controle em  
5 circuito fechado de pelo menos dois conversores, que podem ser controla-  
dos como retificadores ou inversores, e são conectados entre si por meio de  
uma ligação de voltagem CC (corrente contínua), no campo da transmissão  
e/ou distribuição de energia, no qual uma medida de voltagem CC  
( $U_{dc\_r1} \dots U_{dc\_rr}$ ;  $U_{dc\_i1} \dots U_{dc\_ii}$ ) e uma medida de corrente contínua  
10 ( $I_{dc\_r1} \dots I_{dc\_rr}$ ;  $I_{dc\_i1} \dots I_{dc\_ii}$ ) são, em todos os casos, medidas em cada  
conversor, e são transmitidas a um regulador de retificador, para controle em  
circuito fechado do respectivo retificador, ou são transmitidas a um regulador  
de inversor para controle em circuito fechado do inversor respectivamente  
associado, em que cada regulador de retificador e cada regulador de inver-  
15 sor, em cada fase, formam a diferença entre uma voltagem CC nominal pre-  
determinada ( $U_{dco}$ ) e, respectivamente, a medida recebida de voltagem CC  
( $U_{dc\_r1} \dots U_{dc\_rr}$ ;  $U_{dc\_i1} \dots U_{dc\_ii}$ ), produzindo uma diferença de voltagem  
CC ( $du$ ), e, além do mais, a diferença entre uma corrente contínua nominal  
( $I_{dco\_r1} \dots I_{dco\_rr}$ ,  $I_{dco\_i1} \dots I_{dco\_ii}$ ) e, respectivamente, a medida recebida  
20 de corrente contínua ( $I_{dc\_r1} \dots I_{dc\_rr}$ ;  $I_{dc\_i1} \dots I_{dc\_ii}$ ), produzindo uma diferen-  
ça de corrente contínua ( $di$ ), em que a medida de corrente contínua, a medi-  
da de voltagem CC, a corrente contínua nominal e a voltagem CC nominal  
ficam em uma forma normalizada.

Um método tal como esse já é conhecido do pedido de patente  
25 internacional WO 2007/033620 A1, que descreve um método de controle em  
circuito fechado para transmissão de corrente contínua de alta voltagem, em  
que a energia elétrica é transmitida entre os sistemas de voltagem CA (cor-  
rente alternada), por meio de um circuito de corrente contínua. A instalação  
de transmissão de corrente contínua de alta voltagem (HVDCT), que é usa-  
30 da para a transmissão de energia, consiste em um retificador e um inversor,  
que são conectados entre si por meio de uma ligação de corrente contínua.  
Transformadores são proporcionados para acoplar os conversores ao siste-

ma de voltagem CA respectivamente associado. Para controle em circuito fechado do retificador ou inversor, uma medida de voltagem CC  $U_{dc\_r}$  ou  $U_{dc\_i}$  e uma respectiva medida de corrente contínua  $I_{dc\_r}$  ou  $I_{dc\_i}$ , respectivamente, são registradas e são transmitidas para o respectivo sistema de controle em circuito fechado, tanto no retificador quanto no inversor. Uma voltagem CC nominal  $U_{dco}$  e uma corrente contínua nominal  $I_{dco}$  são determinadas da energia predeterminada, que é intencionada a ser transmitida, com a ajuda de um transmissor de função. A diferença de voltagem CC,  $du$ , é então calculada da diferença entre a voltagem CC nominal  $U_{dco}$  e a medida de voltagem CC  $U_{dc\_r}$  ou  $U_{dc\_i}$ . A diferença de corrente contínua,  $di$ , é formada correspondentemente da diferença entre a corrente contínua nominal,  $I_{dco}$ , e a medida determinada respectivamente da corrente contínua  $I_{dc\_r}$  e  $I_{dc\_i}$ . Todos os valores estão, nesse caso, em uma forma normalizada, com o processo de normalização sendo conduzido, por exemplo, com relação a uma voltagem CC nominal e a uma corrente contínua nominal, ou também com relação a uma corrente contínua nominal e à voltagem CC nominal. O regulador de retificador controla então o retificador, de modo que a soma da diferença de voltagem CC,  $du$ , e a diferença de corrente contínua,  $di$ , seja mínima. O regulador de inversor controla, diferentemente, o inversor, de modo que a diferença entre a diferença de corrente contínua,  $di$ , e a diferença de voltagem CC,  $du$ , seja mínima. Os métodos já conhecidos são, no entanto, adequados apenas para os denominados conversores comutados externamente, nos quais, por exemplo, tiristores são usados, que não podem ser desligados por meio de sinais de disparo. Conversores, tais como esses, permitem o escoamento de corrente em apenas uma direção no circuito de corrente contínua. O fluxo de energia pode ser invertido apenas por inversão da polaridade da voltagem pelo respectivo conversor. Além do mais, nessa instalação, que é referida no texto a seguir, como uma instalação HVDC tradicional, a corrente operacional deve ser sempre maior do que 0,05 p.u., por causa da necessidade de evitar as correntes intermitentes no valor nominal da corrente. Isso propicia a normalização mencionada acima com relação aos valores nominais.

Em consequência do aperfeiçoamento progressivo no campo da eletrônica de energia, possibilita-se também usar semicondutores de energia que podem ser desligados, por exemplo, IGBTs ou GTOs, para os conversores no campo de transmissão de energia, e, em particular, para HVDCT. Um conversor tal como esse, que é também chamado de um conversor de fonte de 5 voltagem (VSC), é conectado a um outro VSC por meio de um circuito intermediário de voltagem. Cada semicondutor de energia, que pode ser desligado no conversor, tem um diodo de roda livre conectado em paralelo com ele. O fluxo de energia não é mais invertido por inversão da polaridade da voltagem no respectivo VSC, mas por inversão da corrente escoando pelo 10 VSC. Além do mais, os valores nominais de corrente contínua iguais a zero podem ser usados para o respectivo VSC. É, portanto, impossível usar o método desse tipo genérico para controlar um VSC. É, portanto, impossível usar o método desse tipo genérico para controlar um VSC em uma instalação HVDCT. 15

O pedido de patente internacional WO 2007/033619 A1 descreve um método de controle em circuito fechado para a transmissão de corrente contínua, tendo uma pluralidade de conversores, em que o método mencionado acima é igualmente usado. Também nesse caso, as correntes nominais superiores a 0,05 p.u. são necessárias, em particular no retificador, para evitar correntes intermitentes. 20

O objetivo da invenção é proporcionar um método do tipo mencionado inicialmente, o que propicia que um controle em circuito fechado seja conduzido para os conversores que tenham semicondutores de energia, que podem ser desligados e que são conectados entre si, por meio de um 25 circuito intermediário de voltagem CC, enquanto que possibilitando ao mesmo tempo correntes nominais preestabelecidas iguais a zero.

A invenção atinge esse objetivo pelo fato de que cada conversor é um conversor autocomutado (1), tendo semicondutores de energia, que 30 podem ser desligados, e o regulador de retificador controla o conversor respectivamente associado, de modo que a soma do produto da diferença de voltagem CC ( $du$ ) e da grandeza da corrente contínua nominal ( $I_{dco\_r}$ ), que

é proporcionada no retificador respectivamente associado, e a da diferença de corrente contínua ( $d_i$ ) seja mínima ( $du * |Idco\_r| + d_i \rightarrow \text{Min}$ ), e o regulador de inversor controla o conversor respectivamente associado, de modo que a soma entre a diferença de tensão CC ( $du$ ) e da diferença de corrente contínua ( $d_i$ ) seja mínima ( $du + d_i \rightarrow \text{Min}$ ).

A invenção transfere o método de controle em circuito fechado, conhecido de instalações HVDC tradicionais em HVDC, nas quais os VSCs e um circuito intermediário de tensão CC são usados. No caso desses denominados conversores de fonte de tensão (VSC), a polaridade não pode ser mais invertida por causa do circuito intermediário de tensão CC, por meio do qual o fluxo de energia é invertido em um HVDC convencional. Nos conversores (VSCs) tais como esses, o fluxo de energia é invertido por inversão do fluxo de corrente. Essas diferenças físicas são consideradas no método de controle em circuito fechado de acordo com a invenção. Além do mais, o método de acordo com a invenção também possibilita correntes nominais pré-estabelecidas com um valor de zero. Isso era impossível no caso de métodos de controle em circuito fechado conhecidos para HVDC convencional. O método de acordo com a invenção proporciona, portanto, um controle em circuito fechado simples e flexível para dois ou mais VSCs, que são conectados entre si por meio de uma ligação CC.

A ligação de tensão CC tem uma polaridade que não varia durante a operação da instalação HVDC, dentro do âmbito da invenção, mesmo quando o fluxo de energia é invertido. Nesse caso, por exemplo, a ligação de tensão CC é uma ligação de tensão CC bipolar, que se estende entre os dois conversores. De acordo com essa variante, a instalação HVDC, a ser controlada, consiste em um retificador, que é conectado por meio de uma indutância, por exemplo, um transformador, a um sistema de tensão CA, que proporciona energia. O inversor, que é conectado ao dito retificador pela ligação de tensão CC bipolar, é igualmente conectado por meio de uma indutância, por exemplo, um transformador, a um segundo sistema de tensão CA, que tem, por exemplo, as cargas a serem supridas. No entanto, em comparação com isso, uma pluralidade de conversores pode

ser também controlada por uso do método de acordo com a invenção, em que os conversores, ou, nesse caso, os VSCs, são conectados entre si por meio de uma ligação de voltagem CC com qualquer topologia desejada. O método de acordo com a invenção é completamente independente da topologia da ligação de voltagem CC.

Convenientemente, a voltagem CC nominal  $U_{dco}$  de cada regulador de retificador e a voltagem CC nominal  $U_{dco}$  de cada regulador de inversor são idênticas. A complexa definição da voltagem CC nominal em cada estação de conversor, com telecomunicação rápida e segura para sinalização da respectiva voltagem CC nominal às outras estações, ficou, portanto, supérflua dentro do escopo da invenção.

Convenientemente, os conversores ficam a uma distância de pelo menos um quilômetro entre si. Todas as instalações HVDC que usam a denominada configuração dorso a dorso, na qual os inversores e conversores são instalados fisicamente lado a lado entre si e são usados, apenas, para acoplamento de diferentes sistemas de voltagem CC, de uma maneira que possa ser submetida a controle em circuito fechado, são excluídos desse outro desenvolvimento conveniente. O aparelho, para o qual o método de acordo com esse desenvolvimento é projeto, é, portanto, usado para transmitir energia elétrica por uma distância relativamente longa.

Vantajosamente, cada medida de voltagem CC  $U_{dc\_rr}$  ou  $U_{dc\_ii}$  e a voltagem CC nominal  $U_{dco}$  são normalizadas com relação à voltagem CC nominal  $U_{dco}$ . Isso propicia um controle em circuito fechado estável, em particular quando os níveis de energia, a ser transmitidos, são baixos. Essa normalização, que já é conhecida de HVDC convencional, é, no entanto, conduzida para fins da concretização exemplificativa de acordo com a invenção apenas em conjunto com a respectiva medida e a voltagem CC nominal. Em comparação, a corrente contínua nominal não é normalizada, para permitir o uso de correntes contínuas nominais iguais a zero também nesse outro desenvolvimento conveniente da invenção.

Vantajosamente, dois conversores são proporcionados, um dos quais é operado como um retificador e o outro conversor é operado como

um inversor, em que um circuito intermediário de voltagem CC se estende entre o retificador e o inversor. De acordo com esse refino, o método é usado para uma instalação HVDCT com VSCs e um circuito intermediário de voltagem CC sem quaisquer ramificações. Por exemplo, o circuito intermediário de voltagem CC é projetado com um polo, usando o terminal terra como o condutor de retorno. Em comparação com isso, a ligação de voltagem CC tem dois polos, com o polo positivo e o polo negativo da ligação de voltagem CC sendo na forma de condutores de cabo.

De acordo com um refino, que difere desse, o método de acordo com a invenção é proporcionado para pelo menos três conversores, entre os quais um sistema de voltagem CC se estende.

O sistema de voltagem CC pode ter qualquer topologia desejada.

De acordo com um outro desenvolvimento conveniente nesse contexto, um retificador de energia CC nominal ( $P_{dco\_r1} \dots P_{dco\_rr}$ ) ou um inversor de energia CC nominal ( $P_{dco\_i1} \dots P_{dco\_ii}$ ) respectivamente associados é, em todos os casos, definido para cada regulador de retificador e para cada regulador de inversor, respectivamente, em que a soma de todas as energias CC nominais do retificador e todas as energias CC do inversor é igual a zero. Por meio de exemplo, os respectivos níveis de energia CC nominal são definidos por um centro de controle central e são transmitidos dele para os respectivos reguladores de conversor. Não há qualquer necessidade, de qualquer modo, para uma ligação de comunicação poderosa para, por exemplo, transmissão, como no caso com um HVDCT convencional. Para os propósitos da invenção, é suficiente transmitir os respectivos níveis de energia CC pela Internet, ou qualquer outra forma simples e, portanto, de custo efetivo de telecomunicação ao respectivo regulador.

Convenientemente, a corrente contínua nominal, respectivamente associada ao conversor, é determinada em cada conversor da energia CC nominal, associada a ela e da voltagem CC nominal, que é comum a todos eles. De acordo com esse outro desenvolvimento vantajoso, o método de acordo com a invenção é simples e claro.

Convenientemente, o controle em circuito fechado de cada retificador e o de cada inversor é conduzido por toda a faixa operacional do retificador ou do inversor, tanto com base na diferença de corrente contínua ( $di_{r1} \dots di_{rr}$ ) do retificador associada respectivamente, quanto com base na diferença de tensão CC ( $du_{r1} \dots du_{rr}$ ) do retificador e, respectivamente, com base na diferença de corrente contínua ( $di_{i1} \dots di_{ii}$ ) do inversor associada, quanto com base na diferença de tensão CC ( $du_{i1} \dots du_{ii}$ ) do inversor associada.

Vantajosamente, uma respectiva medida de tensão CC ( $Udc_{r1} \dots Udc_{rr}$ ;  $Udc_{i1} \dots Udc_{ii}$ ) e uma respectiva medida de corrente contínua ( $I_{dc_{r1}} \dots I_{dc_{rr}}$ ;  $I_{dc_{i1}} \dots I_{dc_{ii}}$ ) são medidas em cada conversor e são transmitidas a um regulador de retificador ou a um regulador de inversor.

De acordo com um outro desenvolvimento conveniente nesse contexto, vários conversores são controlados, de modo que uma corrente contínua, que escoar por uma chave isolante, que é disposta na ligação de tensão CC, seja igual a zero. De acordo com esse outro desenvolvimento vantajoso, chaves isolantes simples podem ser usadas na ligação de tensão CC, uma vez que a comutação pode sempre ocorrer quando nenhuma corrente está escoando. Os circuitos ressonantes complexos, que aplicam um cruzamento zero na corrente por meio da chave, extinguindo, desse modo, qualquer arco que seja fulminado na comutação, foram igualmente tornados supérfluos por esse refino vantajoso da invenção.

De acordo com uma modificação nesse contexto, pelo menos um conversor controla a respectiva medida da corrente contínua registrada no zero, e pelo menos uma chave isolante, que é disposta na ligação de tensão CC, é então aberta. A regulação de corrente zero é conduzida por uso de uma corrente contínua nominal igual a zero. De acordo com uma concretização preferida desse outro desenvolvimento, todos os conversores, que são conectados entre si por uma ligação de tensão CC, são controlados a zero. Em outras palavras, uma corrente contínua nominal zero é usada para cada regulador.

De acordo com um outro desenvolvimento conveniente nesse

contexto, um tempo de desligamento é ajustado e é transmitido para os reguladores afetados, respectivamente, em que os ditos reguladores controlam a medida da corrente contínua associada a eles para ser zero quando o tempo de desligamento é alcançado. De acordo com esse outro desenvolvimento conveniente, todas as unidades reguladoras tendo um transmissor de sinal de tempo, por exemplo, um relógio preciso, que proporciona um sinal de tempo comum, ou substancialmente comum, a todos os reguladores. Esse sinal de tempo é comparado com o conjunto e transmitido com o tempo de desligamento. Se a diferença entre o tempo de desligamento e o tempo medido for inferior a um valor de limiar, ajustado de antemão, isto é, a respectiva unidade reguladora preajusta uma corrente contínua nominal de zero, de modo que a medida de corrente contínua seja controlada em zero. Esse refino garante que todos os reguladores afetados, que são, por exemplo, selecionados como tais por uma estação de controle central, ou todos os reguladores, sejam transferidos para o controle de corrente zero ao mesmo tempo.

De acordo com um outro desenvolvimento conveniente nesse contexto, a medida de corrente contínua é controlada para ser zero por cada conversor afetado, por um período de tempo de corrente zero, e o método de controle em circuito fechado normal é então restabelecido, isto é, uma vez que o período de tempo de corrente zero tenha decorrido. Dentro do período de tempo de corrente zero, que, por exemplo, está na região de uns poucos milissegundos, a chave ou as chaves isolantes desejadas na ligação de tensão CC vão ser então abertas. Isso possibilita, de uma maneira simples, que se desconecte deliberadamente uma área de um conversor do sistema de tensão CC com qualquer topologia desejada, sem que se tenha igualmente que interromper a transmissão de energia por essas ligações ou conversores, que não tenham sido desligados. De fato, dentro do escopo da invenção, é possível desconectar uma seção da ligação de tensão CC ou de um conversor especificamente do sistema de tensão CC por rápida redução da corrente contínua. O controle em circuito fechado normal da instalação HVDC é então reiniciado. O método de controle em circuito fecha-

do, de acordo com a invenção, então se aproxima automaticamente, sem qualquer conhecimento da nova topologia da ligação de voltagem CC. As transmissões, os cálculos ou similares de dados complexos ficaram supérfluos em consequência da invenção.

5                   Outros refinamentos e vantagens convenientes da invenção são o objeto da descrição apresentada a seguir das concretizações exemplificativas da invenção, com referência às figuras dos desenhos, nos quais os mesmos símbolos de referência se referem aos componentes tendo o mesmo efeito, e em que:

10                   a figura 1 mostra uma instalação HVDCT tendo uma pluralidade de conversores de fonte de voltagem, que são conectados entre si por meio de um sistema de voltagem CC;

                    a figura 2 mostra parâmetros e variáveis controladas usados por uma concretização exemplificativa do método de controle em circuito fechado de acordo com a invenção;

15                   a figura 3 mostra uma concretização exemplificativa do método de acordo com a invenção, para uma pluralidade de VSCs, que são ligados entre si por um sistema de voltagem CC; e

                    a figura 4 mostra uma concretização exemplificativa do método de acordo com a invenção, no qual uma seção específica da ligação de voltagem CC é desconectada do sistema de voltagem CC por meio de uma única chave isolante.

                    A figura 1 ilustra esquematicamente uma instalação HVDCT, tendo uma multiplicidade de conversores 1, que são todos conectados por meio de um transformador 2 a um sistema de voltagem CC 3. Cada conversor 1 é um denominado conversor de fonte de voltagem (VSC), tendo semicondutores de energia que podem ser desligados, tais como IGBTs ou GTOs, cada um dos quais tem um diodo de roda livre conectado dorso a dorso em paralelo com ele. Nesse caso, cada conversor 1 é conectado a um sistema de voltagem CC 4, como uma ligação de voltagem CC, cujo sistema de voltagem CC 4 pode ter qualquer topologia desejada. Além do mais, cada VSC 1 tem um indutor de nivelamento 5. Um VSC 1, um transformador 2 e

um indutor de nivelamento 5 são parte de uma estação reguladora ou estação inversora, dependendo de como o respectivo VSC é controlado pela unidade reguladora ou regulador, que não é ilustrado na figura. Na figura 1, essas estações retificadoras, que têm VSCs operados nos retificadores, são anotados  $r_1, r_2, r_3 \dots r_r$ , enquanto aquelas estações inversoras com VSCs, que são operadas como inversores, são  $i_1, i_2, i_3 \dots i_i$ . A figura 1 também mostra que todas as estações conversoras  $r_r$  e todas as estações inversoras  $i_i$  têm sensores, para registrar a medida da voltagem CC  $U_{dc\_rr}$  nessa estação, bem como a corrente contínua  $I_{dc\_rr}$  ou  $I_{dc\_ii}$  escoando nela na VSC 1.

10 Como pode-se notar igualmente da figura 1, os respectivos sistemas de voltagem CA são também conectados entre si por meio de ligações de voltagem CA 6. A ligação de corrente alternada 6 não afeta adversamente o método de acordo com a invenção para controle em circuito fechado do VSC.

A figura 2 é um gráfico, no qual a corrente contínua normalizada é mostrada na abscissa e a voltagem CC normalizada é mostrada na ordenada. Isso é baseado na suposição que, em comparação com a ilustração na figura 1, apenas um retificador é conectado, por meio de um circuito intermediário de voltagem CC, a um VSC operando como um inversor.

No gráfico, os parâmetros e as variáveis controladas do retificador são mostrados no quadrante do lado esquerdo do gráfico, e as variáveis correspondentes para o inversor são mostradas no quadrante do lado direito. A medida da corrente contínua e a medida da voltagem CC, no ponto de medida  $X_r$ , são represadas no lado do retificador, cujos valores medidos e nominais são anotados  $_r$ . A medida da voltagem CC  $U_{dc\_r}$  é, portanto, maior do que a medida da voltagem CC nominal  $U_{dco}$  ou  $U_{dco\_r}$ . Se a diferença da voltagem CC,  $du_r$ , for formada e normalizada com relação à voltagem CC nominal  $U_{dco}$ , isso resulta em  $du_r = 1 - \frac{U_{dc\_r}}{U_{dco\_r}}$ . Esse valor deve ser inferior a zero para a energia a ser transmitida para o inversor.

A corrente contínua nominal  $I_{dco\_r}$  do retificador é, por definição, negativa, em consequência do que:  $I_{dco\_r} = -I_{dco}$ . A diferença da corrente contínua  $d_i$ , que é formada da diferença entre a corrente contínua nominal e de medida, é então apresentada por:  $d_i = -I_{dco\_r} + I_{dc\_r}$ . Essa não é

normalizada com relação à corrente contínua nominal  $I_{dco\_r}$ , para propiciar uma corrente contínua nominal de zero para controle em circuito fechado. O controle em circuito fechado é então conduzido por minimização do erro de controle de retificador  $e_{r\_r} = du\_r * |I_{dco\_r}| + di\_r$ , isto é, está ficando igual a zero. A linha reta mostrada à esquerda é, portanto, uma tangente para a hipérbole, que é mostrada por uma linha tracejada e representa a energia CC nominal invariante  $P_{dco\_r} = -P_{dco}$ . Uma vez que a diferença da voltagem CC  $du\_r$  é multiplicada pela grandeza da corrente contínua nominal  $|I_{dco\_r}|$ , para calcular o erro de controle de  $e_{r\_r}$ , isso resulta em uma resposta de controle rapidamente ativa, estável do retificador, porque o controle em circuito fechado de voltagem é eliminado, quando as correntes contínuas nominais são pequenas. Os controles em circuito fechado de voltagem e corrente são conduzidos simultaneamente e em uma forma substancialmente equivalente entre si, apenas para correntes contínuas nominais mais altas  $I_{dco\_r}$ .

A medida de corrente contínua  $I_{dc\_1}$  e a medida de voltagem CC  $U_{dc\_i}$ , no ponto operacional  $X\_i$ , são representadas no lado do inversor. Como no lado do retificador, a diferença de voltagem CC  $du\_i$  e a diferença de corrente contínua  $di\_i$  são calculadas, com a diferença de voltagem,  $du\_i$ , sendo mais uma vez normalizada com relação à voltagem CC nominal  $U_{dco}$ .  $du\_i$  deve ser maior do que zero para a transmissão de energia desejada. A normalização com relação à corrente contínua nominal, para formar a diferença da corrente contínua  $di\_i$ , não é também conduzida nesse caso. É, portanto, também possível preestabelecer as correntes CC nominais  $I_{dco\_i}$  iguais a 0. Para a transmissão de energia desejada, a diferença de corrente contínua  $di\_i$  é inferior a zero. O erro de controle de  $e_{i\_i}$  é formado da soma da diferença de voltagem CC  $du\_i$  e da diferença de corrente contínua  $di\_i$ . O controle em circuito fechado então tenta minimizar o erro de controle de  $e_{i\_i}$  para que seja zero. No gráfico mostrado na figura 2, isso resulta em uma linha reta, que intercepta a hipérbole da energia CC invariante  $P_{dco\_i}$ , no ponto  $W\_i$ . A linha reta de  $e_{i\_i}$  é reminiscente da resposta de uma substância pura, em consequência do que o regulador de inversor pode ser também referido como um regulador de resistência.

A figura 3 ilustra esquematicamente uma concretização exemplificativa do método de acordo com a invenção para uma instalação HVDCT, como mostrado na figura 1, na qual os parâmetros e as variáveis, mostrados na figura 2, são usados para um regulador de retificador 7\_r1 para a estação retificadora r\_1, e para um regulador de inversor 8\_i1 para a estação inversora i1. Os reguladores de retificadores 7\_rr, que não são mostrados na figura, e o regulador de inversor 8\_ii, que não é ilustrado, são fisicamente idênticos.

Como pode-se notar da figura 3, o regulador de retificador 7\_r1, e, portanto, cada regulador de retificador recebe uma energia CC nominal Pdco\_r1 atribuída a ele. Uma situação correspondente se aplica ao regulador de inversor 8\_i1, em cujo caso a energia CC nominal respectivamente associada é transmitida de uma estação de controle central para as respectivas estações, por meio de ligações de comunicação, que não são mostradas, por exemplo, uma simples ligação de rádio. Nesse caso, a soma de todas as energias CC nominais é igual a zero:  $\sum Pdco\_rr + \sum Pdco\_ii = 0$ . A invenção torna a transmissão complexa, rápida e segura, como no caso para HVDCT convencional, supérflua.

As energias CC nominais recebidas Pdco\_r1 e Pdco\_i1 são, em todos os casos, fornecidas a um divisor 9, ao qual uma segunda entrada da voltagem CC nominal Udco, que é igual para todas as estações, é aplicada. Por meio de exemplo, a energia CC nominal é igualmente transmitida de uma estação central. O divisor 9 forma o quociente da respectiva energia CC nominal, Pdco, e a voltagem CC nominal, Udco, produzindo a corrente contínua nominal Idco\_r1 ou Idco\_i1, com a respectiva corrente contínua nominal fornecida a um limitador 10, que limita a corrente contínua nominal Idco\_r1 ou Idco\_i1 a uma respectiva corrente contínua nominal mínima I\_min\_r1, I\_min\_i1, e uma respectiva corrente contínua nominal máxima I\_max\_r1, I\_max\_i1. A corrente contínua nominal Idco\_r1 ou Idco\_i1 é então fornecida a um adicionador 11, que forma, em todos os casos, a diferença da corrente contínua nominal Idco\_r1 ou Idco\_i1 e a medida da corrente contínua Idco\_r1 ou Idco\_i1. A diferença da corrente contínua di\_r1, assim obtida,

é então fornecida a um outro adicionador 11. O valor na segunda entrada do dito adicionador 11 é derivado da voltagem medida e da voltagem nominal. Para esse fim, o divisor 12, em todos os casos, determina o quociente da medida de voltagem CC  $U_{dc\_r1}$  ou  $U_{dc\_i1}$  e a voltagem CC nominal  $U_{dco}$ .

5 A medida da voltagem CC  $U_{dc\_r1}$  ou  $U_{dc\_i1}$ , que foi normalizada desse modo, é então subtraída de 1, produzindo a respectiva diferença de voltagem CC  $du\_r1$  ou  $du\_i1$ . Como mencionado acima, para o regulador de inversor 8\_i1, a diferença de voltagem CC  $du\_i$ , obtida desse modo, é fornecida à segunda entrada do adicionador 11, que, por adição das suas entradas,  
10 calcula o erro de controle do inversor de\_i, que é então fornecido a um regulador 13.

Em comparação com o regulador de inversor 8\_i1, no caso do regulador de retificador 7\_r1, a diferença de voltagem CC  $du\_r1$  é multiplicada pela grandeza da corrente contínua nominal  $|I_{dco\_r1}|$ . Um gerador de  
15 valor absoluto 23 é proporcionado para formar a grandeza  $|I_{dco\_r1}|$  a partir de  $I_{dco\_r1}$ , com o produto  $|I_{dco\_r1}| * du\_r1$  sendo formado por meio de um multiplicador 24. No caso do regulador de retificador 7\_r1, a diferença de corrente contínua  $di\_r1$  é adicionada ao dito produto de  $du\_r1$  e  $|I_{dco\_r1}|$  por meio do adicionador 11, para produzir o erro de controle de \_r do retificador.  
20 O erro de controle do retificador de \_r1 é então fornecido ao regulador 13, e, finalmente, a um sistema de gerenciamento de módulo 14, que, nesse caso, proporciona um controle em circuito aberto para os semicondutores de energia nos respectivos VSCs.

Os VSCs ilustrados na figura 3 são os denominados VSCs de  
25 níveis múltiplos, que, como todos os VSCs, consistem em um circuito em ponte de válvulas elétricas, cada válvula elétrica sendo formada de um circuito em série de submódulos bipolares, que têm todos um armazenamento de energia, e, em paralelo com o armazenamento de energia, um circuito composto de semicondutores de energia, de modo que a voltagem pelo armazenamento de energia, ou também uma voltagem zero, seja deixada  
30 diminuir pelo respectivo submódulo, dependendo da operação dos semicondutores de energia. A voltagem, que é deixada diminuir totalmente pelas válvulas

las elétricas é composta aditivamente das voltagens de saída dos submódulos, e pode ser, portanto, alterada nas etapas.

Para operar os semicondutores de energia nos submódulos, a saída do regulador 13 é conectada à entrada do denominado sistema de gerenciamento de módulo, cuja configuração detalhada não vai ser descrita para os propósitos da invenção, uma vez que não é essencial para a invenção. O sistema de gerenciamento de módulo opera os semicondutores de energia nos submódulos correspondentes à saída do regulador 13. No entanto, dentro do escopo da invenção, é também possível que o regulador 13 seja seguido por um modulador de amplitude de pulso, em vez de por um sistema de gerenciamento de módulo, cujo modulador de amplitude de pulso é projetado para controle em circuito aberto de conversores de fonte de voltagem de dois estágios ou três estágios.

A figura 4 mostra igualmente uma instalação HVDCT, para ilustrar uma concretização exemplificativa do método de acordo com a invenção. Nesse caso, uma pluralidade de estações retificadoras  $r_1, r_2, \dots, r_r$  e uma pluralidade de estações inversoras  $i_1, i_2, \dots, i_i$  são mais uma vez conectadas entre si, por meio de um sistema de voltagem CC 4 de qualquer topologia desejada. Além da ilustração mostrada nas figuras 3 e 1, cada estação retificadora  $rr$  e cada estação inversora  $ii$  têm uma unidade de proteção 15, além de um regulador de retificador  $7_{rr}$  ou regulador de inversor  $8_{ii}$ , respectivamente, cuja unidade de proteção 15 é conectada ao respectivo regulador de retificador  $7_{rr}$  ou regulador de inversor  $8_{ii}$ . O respectivo regulador de retificador  $7_{rr}$  ou regulador de inversor  $8_{ii}$  é também, em todos os casos, conectado a um dispositivo de proteção 16 de um disjuntor 17, com a chave 17 sendo disposta entre o sistema de voltagem CA 3 e o transformador 2. No caso de uma falha, por exemplo, altas correntes de curto-circuito, é possível desconectar cada VSC do respectivo sistema CA 3 por meio da chave multipolo 17 no lado de voltagem CA, que é, por exemplo, um disjuntor para comutação de altas correntes de curto-circuito. Nesse caso, uma interrupção de proteção ocorre pela unidade de proteção 15, que faz com que a respectiva unidade de regulação 7 emita um comando de interrupção para o dispo-

sitivo de proteção 16. O dispositivo de proteção 16 abre o disjuntor 17, quando ocorre um comando de interrupção.

Para permitir que seções de voltagem CC 18 sejam também desligadas ou desconectadas dentro da ligação de voltagem CC 4, chaves de voltagem CC 19 são dispostas nas ligações de voltagem CC. Uma unidade de proteção de voltagem CC 20 é usada para desligar a chave ou as chaves de voltagem CC 19, e é conectada à saída de um sensor de corrente de voltagem CC 21, que produz valores de corrente contínua  $I_{dc\_b1}$  ou  $I_{dc\_b2}$ , correspondentes ao fluxo de corrente contínua pela respectiva chave 19. A unidade de proteção de voltagem CC 20 fica, por sua vez, conectada ao dispositivo de proteção 16 para a chave de voltagem CC 19.

A seta 22 mostrada na figura 4 indica uma falha de terra, em consequência do que altas correntes de curto-circuito escoam na seção de voltagem CC 18. Se os valores de corrente contínua  $I_{dc\_b1}$  e  $I_{dc\_b2}$ , que são fornecidos à respectiva unidade de proteção de voltagem CC 20, excederem um valor de limiar definido previamente, ou algum outro critério, a respectiva unidade de proteção de voltagem CC 20 define um tempo de desligamento  $t_{off}$  em um futuro próximo, e transmite o tempo de desligamento  $t_{off}$  para o respectivo regulador de retificador 7\_r1, 7\_r2, 7\_rr ou regulador de inversor 8\_i1, 8\_i2, 8\_ii. Esses reguladores são conectados a um sincronizador, de modo que todos os reguladores possam determinar que o tempo de desligamento foi atingido, aproximadamente, ao mesmo tempo. A unidade de proteção 15 então opera a respectiva unidade de regulação, de modo que essa, em todos os casos, ajuste a respectiva corrente contínua nominal  $I_{dco\_r1}$ ,  $I_{dco\_r2}$ ,  $I_{dco\_rr}$  ou  $I_{dco\_i1}$ ,  $I_{dco\_i2}$  e  $I_{dco\_ii}$  a zero, por um período de tempo de corrente zero, de modo que a respectiva medida de corrente contínua seja controlada a zero. Portanto, a respectiva corrente contínua  $I_{dc\_b1}$  ou  $I_{dc\_b2}$ , escoando pelas chaves de corrente contínua 19, é também igual a zero. A chave 19 pode ser então aberta sem qualquer corrente escoando. A unidade de proteção de voltagem CC 20 identifica igualmente que o tempo de desligamento foi atingido, por comparação de tempo. Após um intervalo de tempo de segurança ter passado, que é mais curto do que

um período de tempo de corrente zero, a chave de voltagem CC 19 é aberta sem qualquer corrente escoando, desconectando, desse modo, a seção de voltagem CC 18. O método de controle em circuito fechado normal é iniciado mais uma vez, desde que o período de corrente zero tenha passado. Para os propósitos da invenção, os respectivos reguladores não precisam ser informados da variação na topologia da ligação de voltagem CC 4. O sistema de controle em circuito fechado muda, automaticamente, para os pontos de controle em circuito fechado estáveis, sem quaisquer outros efeitos adicionais. Isso permite que o sistema de voltagem CC 4 seja comutado com pouca complexidade. A invenção torna os circuitos ressonantes paralelos, como os usados para as chaves de voltagem CC de acordo com a técnica anterior, supérfluos.

## REIVINDICAÇÕES

1. Método para controle em circuito fechado de pelo menos dois conversores (1), que podem ser controlados como retificadores ou inversores, e que são conectados entre si por uma ligação de tensão CC (4), no campo da transmissão e/ou distribuição de energia, no qual:
- 5                   - uma medida de tensão CC ( $U_{dc\_r1}...U_{dc\_rr}$ ;  $U_{dc\_i1}...U_{dc\_ii}$ ) e uma medida de corrente contínua ( $I_{dc\_r1}...I_{dc\_rr}$ ;  $I_{dc\_i1}...I_{dc\_ii}$ ) são, em todos os casos, medidas em cada conversor (1), e são transmitidas a um regulador de retificador (7\_rr), para controle em circuito fechado do respectivo retificador, ou são transmitidas a um regulador de inversor (8\_ii) para controle em circuito fechado do inversor respectivamente associado;
- 10                   - em que cada regulador de retificador (7\_rr) e cada regulador de inversor (8\_ii), em cada fase, formam a diferença entre uma tensão CC nominal predeterminada ( $U_{dco}$ ) e, respectivamente, a medida recebida de tensão CC ( $U_{dc\_r1}...U_{dc\_rr}$ ;  $U_{dc\_i1}...U_{dc\_ii}$ ), produzindo uma diferença de tensão CC ( $du$ ), e, além do mais, a diferença entre uma corrente contínua nominal ( $I_{dco\_r1}...I_{dco\_rr}$ ,  $I_{dco\_i1}...I_{dco\_ii}$ ) e, respectivamente, a medida recebida de corrente contínua ( $I_{dc\_r1}...I_{dc\_rr}$ ;  $I_{dc\_i1}...I_{dc\_ii}$ ), produzindo uma diferença de corrente contínua ( $di$ ), em que a medida de corrente contínua, a medida de tensão CC, a corrente contínua nominal e a tensão CC nominal ficam em uma forma normalizada, caracterizado pelo fato de que:
- 15                   - cada conversor é um conversor autocomutado (1) tendo semicondutores de energia, que podem ser desligados, e;
- 20                   - o regulador de retificador (7\_rr) controla o conversor respectivamente associado (1), de modo que a soma do produto da diferença da tensão CC ( $du$ ) e a grandeza da corrente contínua nominal ( $|I_{dco\_r}|$ ), que é proporcionada no retificador respectivamente associado, e a da diferença de corrente contínua ( $di$ ) seja mínima ( $du \cdot |I_{dco\_r}| + di \rightarrow \text{Min}$ ); e
- 25                   - o regulador de inversor (8\_ii) controla o conversor (1) respectivamente associado, de modo que a soma entre a diferença de tensão CC ( $du$ ) e da diferença de corrente contínua ( $di$ ) seja mínima ( $du + di \rightarrow \text{Min}$ ).
- 30

2. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a voltagem CC nominal ( $U_{dco}$ ) de cada regulador de retificador e a voltagem CC nominal ( $U_{dco}$ ) de cada regulador de inversor são idênticas.

3. Método de acordo com a reivindicação 1 ou 2, caracterizado pelo fato de que os conversores (1) são instalados a uma distância de pelo menos 1 km entre si.

4. Método de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, caracterizado pelo fato de que ambas as medidas de voltagem CC ( $U_{dc\_rr}$ ) e de voltagem CC nominal ( $U_{dco}$ ) são normalizadas com relação à voltagem CC nominal ( $U_{dco}$ ).

5. Método de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, caracterizado pelo fato de que os conversores (1) são proporcionados, um dos quais é operado como um retificador e o outro conversor (1) é operado como um inversor, em que um circuito intermediário de voltagem CC (4) se estende entre o retificador e o inversor.

6. Método de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 4, caracterizado pelo fato de que pelo menos três conversores (1) são proporcionados, entre os quais se estende um sistema de voltagem CC (4).

7. Método de acordo com a reivindicação 6, caracterizado pelo fato de que um retificador de energia CC nominal ( $P_{dco\_r1} \dots P_{dco\_rr}$ ) ou um inversor de energia CC nominal ( $P_{dco\_i1} \dots P_{dco\_ii}$ ) respectivamente associados é, em todos os casos, definido para cada regulador de retificador (7<sub>rr</sub>) e para cada regulador de inversor (8<sub>ii</sub>), respectivamente, em que a soma de todas as energias CC nominais do retificador e todas as energias CC do inversor é igual a zero.

8. Método de acordo com a reivindicação 7, caracterizado pelo fato de que a corrente contínua nominal ( $I_{dco\_rr}$ ;  $I_{dco\_ii}$ ) associada ao respectivo conversor (1) é determinada em cada conversor (1) a partir da energia CC nominal ( $P_{dco\_rr}$ ;  $P_{dco\_ii}$ ) associada a ele, e da voltagem CC nominal ( $U_{dco}$ ), que é comum a todos eles.

9. Método de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, caracterizado pelo fato de que o controle em circuito fechado de cada

retificador e de cada inversor é conduzido em toda a faixa operacional do retificador ou do inversor, tanto com base na diferença do retificador da corrente contínua ( $d_{i\_r1} \dots d_{i\_rr}$ ) respectivamente associada, quanto com base na diferença do retificador de tensão CC ( $d_{u\_r1} \dots d_{u\_rr}$ ), e, respectivamente, com base na diferença do inversor de corrente contínua ( $d_{i\_r1} \dots d_{i\_rr}$ ) respectivamente associada, e com base na diferença do inversor de tensão CC ( $d_{u\_i1} \dots d_{u\_ii}$ ) associada.

10. Método de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, caracterizado pelo fato de que uma respectiva medida de tensão CC ( $U_{dc\_r1} \dots U_{dc\_rr}$ ;  $U_{dc\_i1} \dots U_{dc\_ii}$ ) e uma respectiva medida de corrente contínua ( $I_{dc\_r1} \dots I_{dc\_rr}$ ;  $I_{dc\_i1} \dots I_{dc\_ii}$ ) são medidas em cada conversor (1), e são transmitidas a um regulador de retificador (7<sub>rr</sub>) ou a um regulador de inversor (8<sub>ii</sub>).

11. Método de acordo com a reivindicação 10, caracterizado pelo fato de que um número de conversores (1) é controlado, de modo que uma corrente contínua ( $I_{dc\_b1}$ ;  $I_{dc\_b2}$ ), que escoia por uma chave isolante, que é disposta na ligação de tensão CC (4), seja igual a zero.

12. Método de acordo com a reivindicação 10 ou 11, caracterizado pelo fato de que pelo menos um conversor (1) controla a respectiva medida de corrente contínua ( $I_{dc\_rr}$ ;  $I_{dc\_ii}$ ) registrada em zero, e pelo menos uma chave isolante (19), que é disposta na ligação de tensão CC (4), é então aberta.

13. Método de acordo com a reivindicação 12, caracterizado pelo fato de que um tempo de desligamento ( $t_{off}$ ) é ajustado e é transmitido para os reguladores respectivamente afetados, em que os ditos reguladores controlam a medida de corrente contínua ( $I_{dc\_rr}$ ;  $I_{dc\_ii}$ ), associada a eles, para que seja zero, quando o tempo de desligamento ( $t_{off}$ ) for atingido.

14. Método de acordo com qualquer uma das reivindicações 11 a 13, caracterizado pelo fato de que a medida de corrente contínua ( $I_{dc\_rr}$ ;  $I_{dc\_ii}$ ) é controlada para que seja zero por cada conversor (1) afetado, durante um período de tempo de corrente zero, e o método de controle em circuito fechado seja então iniciado.

15. Método de acordo com qualquer uma das reivindicações 11 a 14, caracterizado pelo fato de que um dos conversores (1) é desconectado da ligação de voltagem CC (4) por abertura das chaves isolantes (19).

5 16. Método de acordo com qualquer uma das reivindicações 11 a 15, caracterizado pelo fato de que uma seção (18) da ligação de voltagem CC (4) é desconectada seletivamente da ligação de voltagem CC (4) por comutação das chaves isolantes (19).

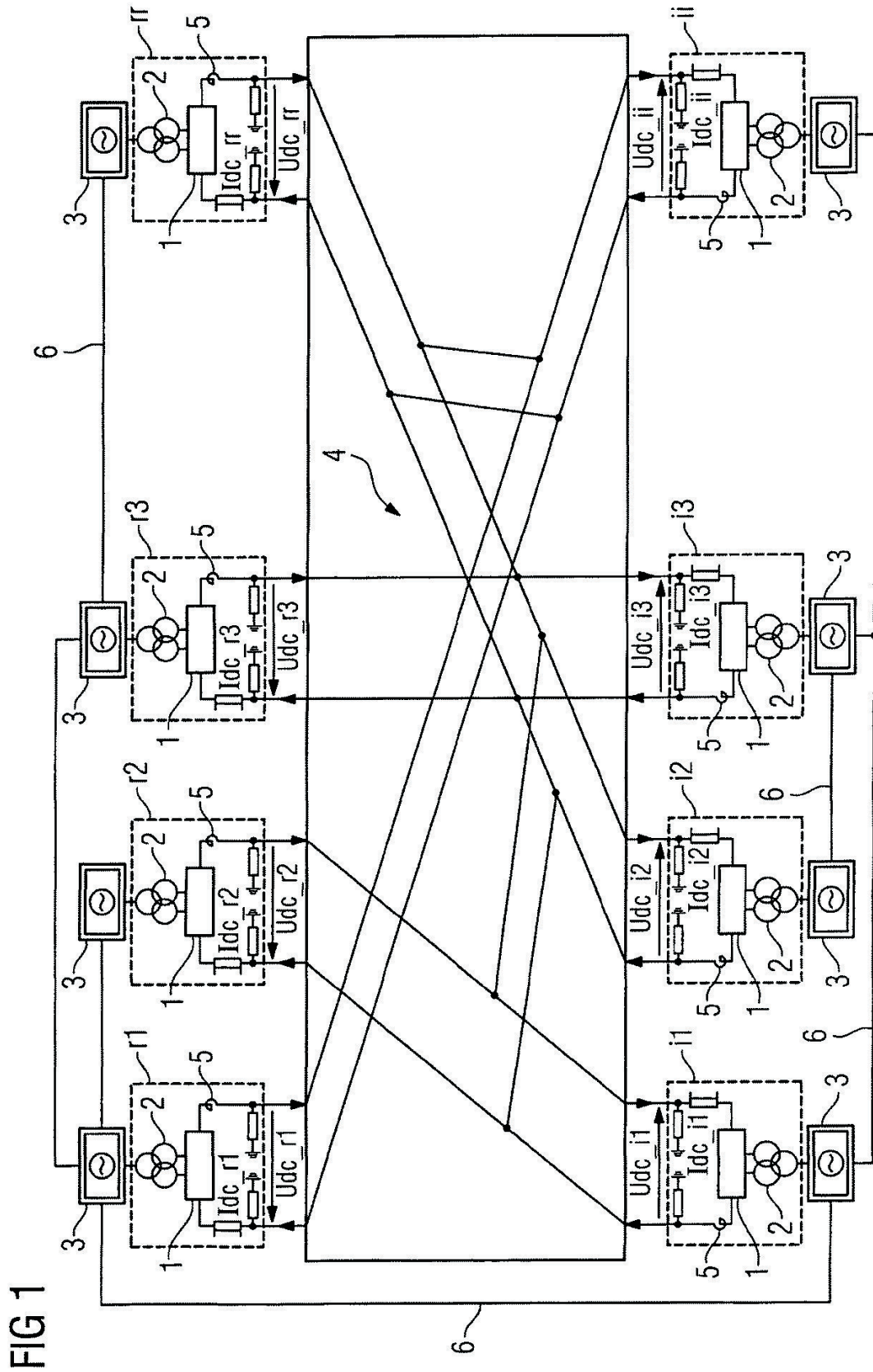
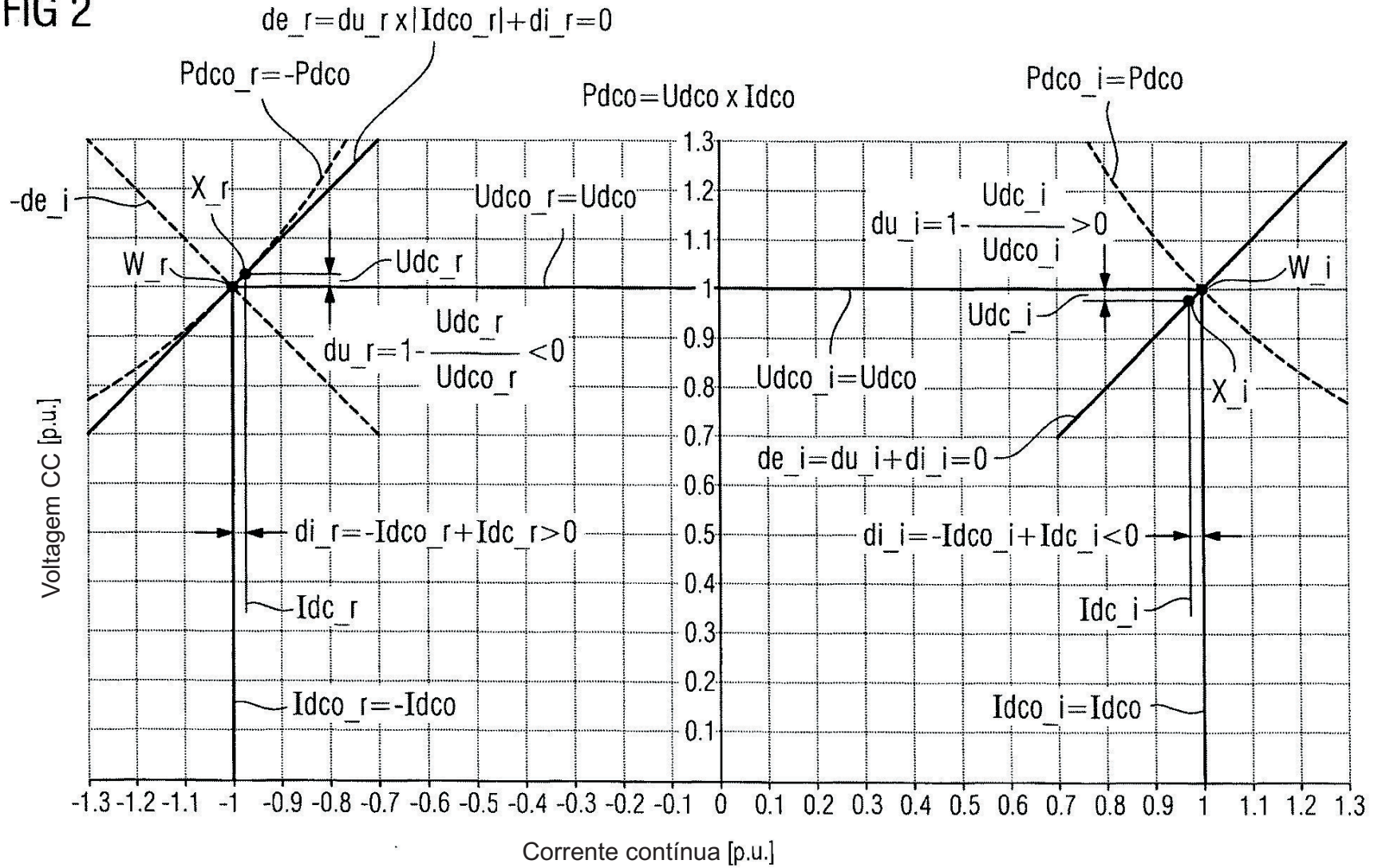
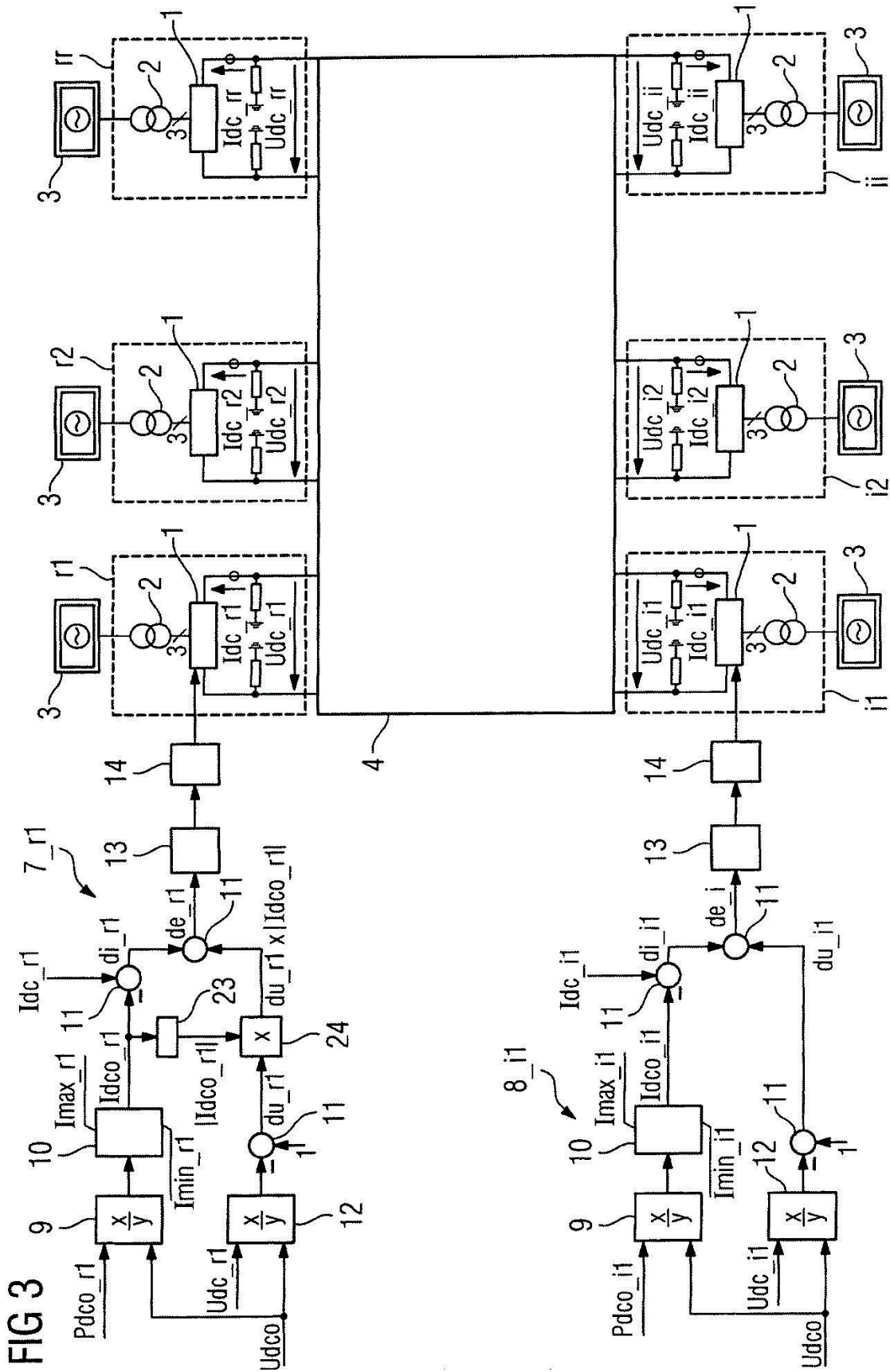


FIG 1

FIG 2



2/4



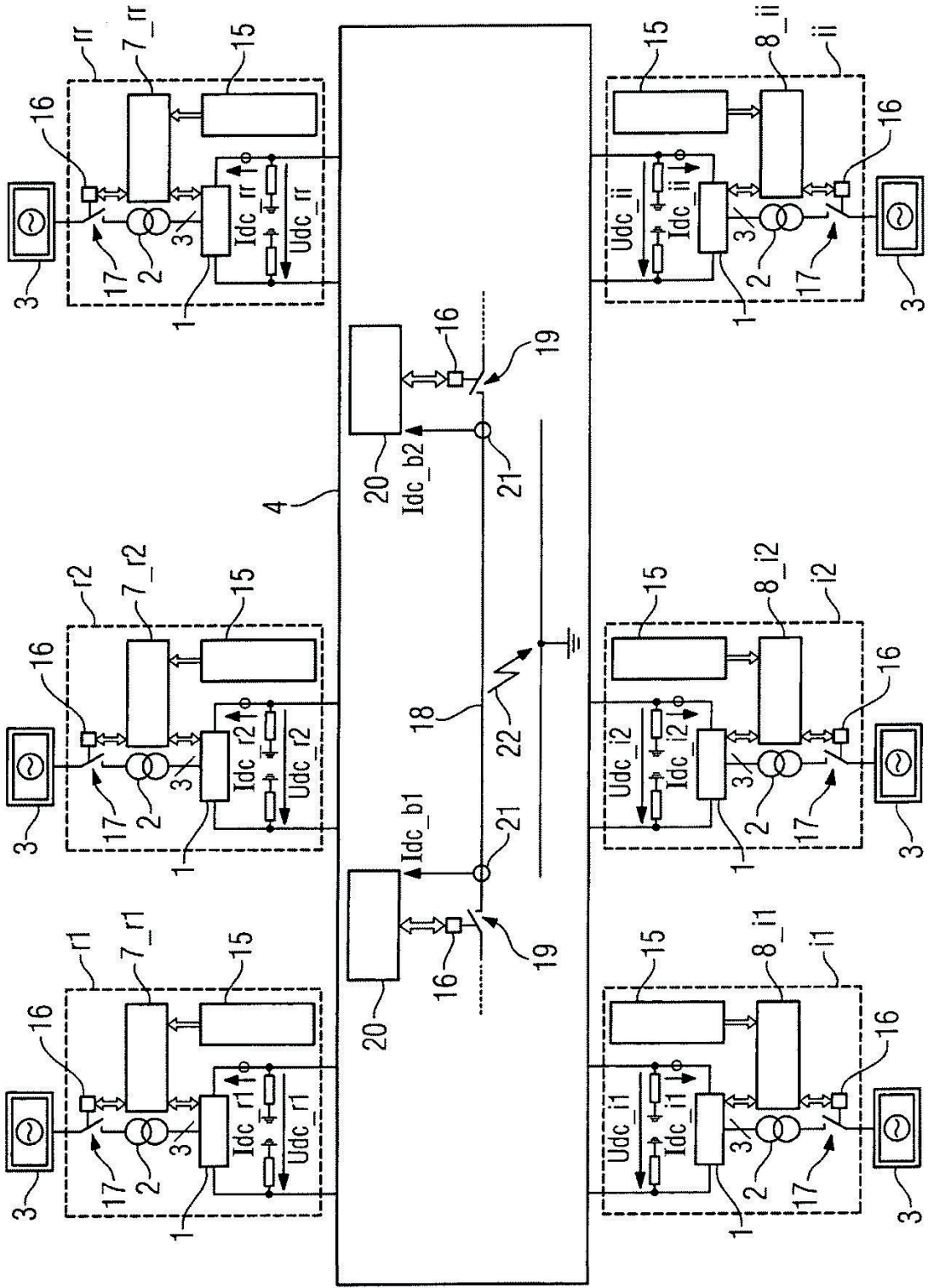


FIG 4

## RESUMO

Patente de Invenção: "INSTALAÇÃO TENDO UM CIRCUITO INTERMEDIÁRIO DE VOLTAGEM CC E CONVERSORES AUTOCOMUTADOS".

A presente invenção refere-se a um método para regular pelo menos dois inversores (1), que podem ser regulados como retificadores ou inversores, conectados entre si por uma ligação CC (4), para transmissão e/ou distribuição de energia, em que uma voltagem CC medida ( $U_{dc\_r1} \dots U_{dc\_rr}$ ;  $U_{dc\_i1} \dots U_{dc\_ii}$ ) e uma corrente CC medida ( $I_{dc\_r1} \dots I_{dc\_rr}$ ;  $I_{dc\_i1} \dots I_{dc\_ii}$ ) são medidas em cada inversor (1), e transmitidas a um regulador de retificador (7\_rr), para regular o retificador correspondente, ou a um regulador de inversor (8\_ii), para regular o inversor correspondente, em que cada regulador de retificador (7\_rr) e cada regulador de inversor (8\_ii) propicia a diferença entre uma determinada voltagem CC ajustada ( $U_{dco}$ ) e a voltagem CC medida recebida relevante ( $U_{dc\_r1} \dots U_{dc\_rr}$ ;  $U_{dc\_i1} \dots U_{dc\_ii}$ ), para propiciar uma voltagem CC diferencial ( $du$ ) e a diferença entre uma corrente CC ajustada ( $I_{dco\_r1} \dots I_{dco\_rr}$ ,  $I_{dco\_i1} \dots I_{dco\_ii}$ ) e a CC medida recebida ( $I_{dc\_r1} \dots I_{dc\_rr}$ ;  $I_{dc\_i1} \dots I_{dc\_ii}$ ) correspondente, para propiciar uma corrente CC diferencial ( $di$ ), em que a corrente CC medida, a voltagem CC medida, a corrente CC ajustada e a voltagem CC ajustada são normalizadas com uma regulação de inversores, que compreende semicondutores de energia comutáveis conectados por uma ligação CC que pode ser conduzida, em que a condição de ajuste de corrente em zero é possível. De acordo com a invenção, cada inversor é um inversor autocomutado com semicondutores de energia comutáveis, e a regulação de retificador (7\_rr) do inversor proporcionado (1) é regulada, de modo que a soma do produto das voltagens diferenciais ( $du$ ) e do valor da determinada corrente CC ajustada ( $I_{dco\_r1}$ ) no retificador correspondente e da corrente diferencial ( $di$ ) seja um mínimo ( $du * |I_{dco\_r1}| + di \rightarrow \text{Min}$ ) e a regulação do inversor (8\_ii) regula o inversor (1) correspondente, de modo que a soma entre a voltagem diferencial ( $du$ ) e a corrente diferencial ( $di$ ) seja um mínimo ( $du + di \rightarrow \text{Min}$ ).