



INPI
INSTITUTO NACIONAL
DA PROPRIEDADE
INDUSTRIAL
Assinado
Digitalmente

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS
INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL

CARTA PATENTE Nº PI 0708441-2

O INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL concede a presente PATENTE DE INVENÇÃO, que outorga ao seu titular a propriedade da invenção caracterizada neste título, em todo o território nacional, garantindo os direitos dela decorrentes, previstos na legislação em vigor.

(21) Número do Depósito: PI 0708441-2

(22) Data do Depósito: 06/03/2007

(43) Data da Publicação do Pedido: 13/09/2007

(51) Classificação Internacional: G05F 1/14; H01F 29/04; H01H 9/00

(30) Prioridade Unionista: GB 0604671.8 de 08/03/2006

(54) Título: MODIFICADOR DE DERIVAÇÃO EM CARGA HÍBRIDO, E, MÉTODO DE OPERAÇÃO DO MESMO

(73) Titular: ALSTOM TECHNOLOGY LTD., Empresa Suíça. Endereço: BROWN BOVERI STRASSE 7, CH-5400 BADEN, SUIÇA(CH)

(72) Inventor: DONALD COLIN MURRAY OATES; MILAN SARAVOLAC

Prazo de Validade: 10 (dez) anos contados a partir de 03/04/2018, observadas as condições legais

Expedida em: 03/04/2018

Assinado digitalmente por:
Júlio César Castelo Branco Reis Moreira
Diretor de Patente

15 de Novembro
REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
de 1889

“MODIFICADOR DE DERIVAÇÃO EM CARGA HÍBRIDO, E, MÉTODO DE OPERAÇÃO DO MESMO”

[0001] Esta invenção refere-se em particular, mas não exclusivamente, a um modificador de derivação em carga híbrido para uso em transmissão de energia de corrente alternada de alta tensão, e um método de operação de um tal modificador de derivação.

[0002] Transmissão de energia é caracterizada por níveis de tensão de corrente alternada (CA) em excesso de 200 kV juntamente com altos níveis de sobre tensão e tensões e correntes transientes. Estas condições de operação colocam demandas particulares às exigências de isolamento para os componentes usados em tal transmissão.

[0003] Um modificador de derivação é um dispositivo montado em um transformador para regular a tensão de saída do transformador para um nível requerido. Tal derivação é normalmente atingida por meio de seletivamente conectar para uma derivação particular do transformador, controlando assim o número de espiras na porção ativa do enrolamento primário ou secundário.

[0004] Um modificador de derivação em carga é projetado para operar quando da condução de corrente e requer que não exista interrupção no fluxo de corrente durante a mudança de derivações.

[0005] Um esquema simplificado de um convencional modificador de derivação é mostrado na figura 1. O convencional modificador de derivação 10 inclui um primeiro seletor 12 e um primeiro desviador 18 conectado em série com um enrolamento primário 14 de um transformador 16. O primeiro seletor 12 e primeiro desviador 18 contam com isolamento a óleo para atingir os níveis de isolamento de contato-com-contato, requeridos para tensões máximas de transformador de energia.

[0006] O primeiro desviador 18 tem duas pernas 20, 22, cada das quais define um respectivo percurso de corrente, e um primeiro comutador eletromecânico 24. O primeiro comutador eletromecânico 24 seletivamente conecta uma perna 20 ou a outra 22 com o enrolamento primário de modo a seletivamente conectar uma dada derivação, escolhida por meio do seletor, no enrolamento primário 14, regulando

assim a tensão de saída do transformador para um nível requerido.

[0007] A fim de evitar uma interrupção do fluxo de corrente através do enrolamento primário 14 durante uma mudança de derivações, o primeiro comutador eletromecânico 24 tem uma ação de "fecho antes de ruptura", pela qual o comutador momentaneamente põe em derivação ambas as pernas 20, 22, como mostrado na figura 1. Um alto nível de formação de arco ocorre quando uma tal derivação é feita ou interrompida.

[0008] A formação de arco conduz a uma degradação da propriedade de isolamento do óleo de isolamento no qual o primeiro desviador 18 é colocado. Isto resulta em uma necessidade de segregar óleo para o primeiro desviador a partir de óleo para o transformador principal e também a necessidade de substituir o óleo de desviador em uma base regular.

[0009] Uma variante deste arranjo usa um comutador a vácuo, mecanicamente operado, para conter a formação de arco e reduzir assim a necessidade de manutenção. Todavia, a inclusão de um comutador a vácuo, mecanicamente operado, adiciona complexidade, a qual, por sua vez, aumenta o custo de capital de tal equipamento. Em adição, é necessário substituir comutadores a vácuo, mecanicamente operados, em intervalos regulares.

[0010] Em cada dos arranjos acima mencionados, o tempo requerido para cada mudança de derivações é aproximadamente 5 segundos, dos quais a operação do primeiro desviador 18 demora aproximadamente 150 milissegundos. Como um resultado, um modificador de derivação convencional 10 levaria, por exemplo, mais que 2 minutos e 15 segundos para realizar uma etapa de mudança prudente sobre uma faixa de derivação de -12 a +12.

[0011] Comutadores semicondutores são atrativos em sua capacidade de operar rapidamente em seguida a um comando eletrônico bem definido, e para comutar para desligamento, isto é, desligamento, sem formação de arco.

[0012] A perda de energia e nível de correntes de sobre tensão presentes em sistemas de transmissão de energia significa que é desejável isolar tais comutadores semicondutores a partir de tais sistemas durante operação de estado estável usando,

por exemplo, um comutador eletromecânico.

[0013] Por conseguinte, é conhecido combinar comutadores semicondutores com comutadores eletromecânicos para criar um assim chamado modificador de derivação de carga “híbrido”, como mostrado na figura 2. Tal um modificador de derivação em carga híbrido 30 é descrito, por exemplo, na EP 1 619 698. Ele inclui um segundo seletor 32 e um segundo desviador 34 (indicado por meio das linhas tracejadas) arranjado em série, por exemplo, no enrolamento primário 14 de um transformador 16. O conhecido modificador de derivação híbrido 30 também inclui um primeiro controlador 36 para controlar a operação do segundo desviador 34.

[0014] O segundo seletor 32 inclui um número de derivações 38, três no exemplo mostrado, e comutadores S1, S2, S3 para selecionar uma derivação particular 38. O segundo seletor 32 pode também incluir dois segundos comutadores eletromecânicos S4, S5 para seletivamente isolar uma dada perna do segundo desviador 34, de modo a contornar os dispositivos semicondutores na mesma.

[0015] O segundo desviador 34 tem duas pernas 40, 42, cada das quais define um respectivo percurso de corrente. Cada perna 40, 42 inclui um par de primeiro e segundo comutadores semicondutores opostos 44, 46. Os comutadores semicondutores 44, 46 são arranjados para seletivamente estabelecer um percurso de fluxo de corrente em uma dada perna 40, 42 do segundo desviador 34.

[0016] Um tipo desejável de comutador semicondutor é um tiristor 48, 50. Tais dispositivos têm uma capacidade de alta tensão e corrente, uma alta confiabilidade e pode operar com uma temperatura de junção superior a 150°C. Em adição, eles são comutáveis por meio de um transformador de pulso, omitindo assim a necessidade de um suprimento de energia auxiliar, isolado. Além disto, tiristores disparados por luz são disponíveis, os quais são comutáveis por meio de um pulso a partir de um díodo de laser conduzido através de um cabo de fibra óptica.

[0017] Todavia, a despeito das vantagens precedentes, uma desvantagem de um tiristor é que ele continua a conduzir até que a corrente e ânodo seja removida. Isto cria dificuldades em comutação de desligamento de um tal dispositivo.

[0018] Um método de comutação de desligamento de um tiristor é usar a assim

chamada "comutação natural". Durante comutação natural, a remoção da corrente de ânodo ocorre naturalmente como um resultado de, por exemplo, flutuação durante um ciclo de CA em que a corrente de ânodo cruza zero, isto é, é removida. Por conseguinte, é possível permitir que um tiristor em uma perna 40, 42 se recupere para um estado não conduzindo antes comutação de ligação de um tiristor na outra perna 42, 40.

[0019] Todavia, tiristores tendem a se recuperar lentamente, resultando assim em um retardo durante o qual nenhuma das pernas 40, 42 é capaz de prover um percurso de fluxo de corrente. Como um resultado, é necessário colocar em derivação as pernas com componentes passivos volumosos e caros a fim de prover o necessário fluxo de corrente contínuo, isto é, evitar uma interrupção no fluxo de corrente. A duração da recuperação (em torno de 0,6 ms) é de modo que estes componentes passivos têm que ser suficientemente grandes (e consequentemente volumosos e caros) para comutar a corrente e manter a tensão em um nível dentro do valor nominal do tiristor.

[0020] Um segundo método de comutação de desligamento de um tiristor emprega a assim chamada "comutação forçada ressonante". A comutação forçada ressonante envolve tomar ação para remover ou comutar a corrente de ânodo para permitir que o tiristor se recupere para um estado não conduzindo.

[0021] Todavia, um tal método também requer a formação de ponte das pernas 40, 42 com componentes passivos volumosos e caros a fim de prover um fluxo de corrente contínuo.

[0022] O volume dos componentes de formação de ponte, requeridos em cada dos métodos acima cria dificuldades de instalação. Além disto, seu alto custo aumenta o custo total de um tal modificador de derivação híbrido para um nível comercialmente inaceitável.

[0023] Outro tipo do modificador de derivação em carga é um assim chamado modificador de derivação em carga de estado sólido 60, como mostrado na figura 3. O modificador de derivação de estado sólido 60 inclui somente tiristores 62 no arranjo de ligação para fazer respectivas conexões de derivação. Os tiristores 62 são

arranjados em pares opostos 64, 66, 68. Tais modificadores de derivação são inadequados para aplicações de transmissão de energia, uma vez que as limitações físicas de um dado tiristor limitam as mudanças em tensão e corrente que ele é capaz de resistir.

[0024] Em conexão com o acima mencionado, um método proposto de comutação envolve comutação de ligação de um tiristor 62 em um dos pares não conduzindo 66 de modo a originar uma corrente de circulação CC acionada por meio da tensão de derivação. Em teoria, quando a corrente de circulação é igual em magnitude, mas fluindo em uma direção oposta à corrente de carga LC fluindo através de um tiristor de condução 62, isto é, através do tiristor 62 dentro do par de conduções 68 que está ligado, então as respectivas correntes CC, LC devem anular uma com relação à outra, de modo que o tiristor de condução 62 é capaz de comutar para desligamento. A condução da corrente de carga LC seria mantida por meio do tiristor 62 que foi ligado no par originalmente não conduzindo 66.

[0025] Todavia, o arranjo mostrado na figura 3 é completamente inadequado para aplicação em transmissão de energia.

[0026] Em aplicações de transmissão de energia, o modificador de derivação é montado no enrolamento primário de um transformador. Isto é porque o arranjo das conexões de modificador de derivação nesta maneira cria menos dificuldades de isolamento. Em adição, um tal arranjo reduz o nível de corrente que torna a obrigação para comutação eletromecânica existente menos onerosa.

[0027] Um modificador de derivação de estado sólido do tipo mostrado na figura 3, arranjado na maneira acima mencionada, resultaria em expor cada tiristor 62 a um excesso de 40 kV. Uma tal tensão é além da especificação de operação prática de qualquer tiristor conhecido.

[0028] Por conseguinte, é um objetivo geral da invenção prover um modificador de derivação em carga que permite a utilização de comutação de semicondutor sem as dificuldades inerentes associadas com a operação de apropriados comutadores semicondutores.

[0029] De acordo com um primeiro aspecto da invenção, é provido um modificador

de derivação em carga híbrido, para uso transmissão de energia de corrente alternada de alta tensão, compreendendo:

um seletor;

um desviador tendo duas pernas definindo respectivos percursos de corrente, cada perna incluindo um par de primeiro e segundo comutadores semicondutores opostos; e

um controlador para seletivamente comutar para um do primeiro ou segundo comutadores semicondutores de uma dada perna em um ponto predeterminado dentro do ciclo de corrente alternada de modo a comutar para desligamento um desejado comutador semicondutor na outra perna.

[0030] O arranjo precedente previne a necessidade de componentes de formação de ponte passivos, volumosos e caros, reduzindo assim o custo de capital do modificador de derivação em carga para um nível comercialmente aceitável.

[0031] O modificador de derivação em carga provê esta vantagem, enquanto facilita o uso de comutadores semicondutores, melhorando assim a velocidade de operação do modificador de derivação.

[0032] Opcionalmente, cada perna ainda inclui pelo menos um elemento de proteção arranjado em comunicação elétrica com o par de comutadores semicondutores. Isto permite que comutadores semicondutores operem dentro de seus limites operacionais normais.

[0033] Preferivelmente, o elemento de proteção é ou inclui um atenuador arranjado em paralelo com cada par de primeiro e segundo comutadores semicondutores. Isto limita a taxa de mudança de tensão através do comutador semicondutor sendo comutado para desligamento, quando da mudança de uma derivação durante o suprimento de energia para uma carga de fator de energia negativo.

[0034] Opcionalmente, o elemento de proteção é ou inclui um indutor arranjado em série entre o par de primeiro e segundo comutadores semicondutores e o seletor. A inclusão de um indutor ajuda a limitar a elevação em corrente que flui através de um dado par do primeiro e segundo comutadores semicondutores quando da realização

de uma mudança de derivações.

[0035] Convenientemente, cada perna ainda inclui um capacitor arranjado de modo a situar-se em paralelo com um correspondente comutador de isolamento eletromecânico do seletor. Cada capacitor limita a taxa de mudança de tensão através do correspondente par de comutadores semicondutores de modo a ajudar a assegurar que cada comutador semicondutor opere dentro das desejáveis condições de operação.

[0036] Em uma forma de realização preferida da invenção, cada perna ainda inclui um supressor de surto de tensão arranjado de modo a situar-se em paralelo com um correspondente comutador de isolamento eletromecânico do seletor. A inclusão de respectivos coletores de sobretensão protege um correspondente par de primeiro e segundo comutadores semicondutores com relação à tensão de choque progressiva durante, por exemplo, uma greve de iluminação.

[0037] Opcionalmente, o seletor inclui dois comutadores de isolamento eletromecânico para seletivamente isolar uma respectiva perna do coletor de modo a contornar os comutadores semicondutores na mesma.

[0038] Em outra forma de realização preferida da invenção, cada comutador de isolamento eletromecânico do seletor inclui um indutor arranjado em série com ele. O indutor limita a taxa de mudança de corrente através de respectivos pares de comutadores semicondutores, ajudando assim a assegurar que os ditos comutadores semicondutores operem dentro das desejáveis condições de operação.

[0039] De acordo com um segundo aspecto da invenção é provido um método de operação de um modificador de derivação em carga híbrido, durante transmissão de energia de corrente alternada de alta tensão, compreendendo as etapas de:

- (i) prover um seletor;
- (ii) prover um desviador tendo duas pernas, cada definindo um respectivo percurso de corrente;
- (iii) prover cada perna com um par de primeiro e segundo comutadores semicondutores opostos; e
- (iv) seletivamente comutar para um do primeiro ou segundo comutadores

semicondutores de uma dada perna em um ponto predeterminado dentro do ciclo de corrente alternada de modo a comutar para desligamento um desejado comutador semicondutor na outra perna.

[0040] Opcionalmente, a etapa (iii) ainda inclui prover pelo menos um elemento de proteção arranjado em comunicação elétrica com o par de primeiro e segundo comutadores semicondutores.

[0041] Preferivelmente, a etapa (iii) inclui prover um atenuador arranjado em paralelo com cada par de primeiro e segundo comutadores semicondutores.

[0042] Opcionalmente, a etapa (iii) inclui prover um indutor arranjado em série entre cada par de primeiro e segundo comutadores semicondutores e o seletor.

[0043] Convenientemente, o método ainda inclui a etapa de prover um capacitor arranjado de modo a situar-se em paralelo com um correspondente comutador de isolamento eletromecânico do seletor.

[0044] Um método da invenção preferido ainda inclui a etapa de prover um supressor de surto de tensão arranjado de modo a situar-se em paralelo com um correspondente comutador de isolamento eletromecânico do seletor. Cada supressor de surto de tensão protege um respectivo par de primeiro e segundo comutadores semicondutores a partir da tensão de choque progressiva que pode ocorrer durante, por exemplo, uma greve de iluminação.

[0045] Outro método preferido da invenção ainda inclui a etapa de prover cada comutador de isolamento eletromecânico do seletor com um indutor arranjado em série com ele.

[0046] O método da invenção compartilha as vantagens das correspondentes características do aparelho da invenção.

[0047] Segue agora uma breve descrição de uma forma de realização preferida da invenção, a título de exemplo não limitativo, com referência sendo feita aos desenhos anexos, em que:

a figura 1 mostra uma vista esquemática do convencional modificador de derivação em carga;

a figura 2 mostra uma vista esquemática de um conhecido modificador de

derivação em carga híbrido;

a figura 3 mostra um conhecido modificador de derivação de estado sólido;

a figura 4 mostra uma vista esquemática de um modificador de derivação em carga híbrido de acordo com uma forma de realização da invenção;

as figuras 5 (a) (i) a 5 (e) (ii) mostram possíveis condições de comutação;

a figura 6 (a) mostra um diagrama de Lissajous para uma mudança de derivação;

a figura 6 (b) mostra um diagrama de Lissajous para uma mudança de derivação;

as figuras 7 (a) e 7 (b) mostram respectivos efeitos combinados de corrente de carga e corrente de circulação;

a figura 8 mostra figuras de Lissajous para cargas com alto fator de potência; e

a figura 9 mostra o efeito sobre uma figura de Lissajous de alteração do tempo em que um particular comutador semiconductor que não está conduzindo é ligado.

[0048] Um modificador de derivação em carga híbrido de acordo com uma primeira forma de realização da invenção é designado geralmente por meio do número de referência 70, como mostrado na figura 4.

[0049] O modificador de derivação híbrido 70 inclui um terceiro seletor 72, um terceiro desviador 74 e um segundo controlador 76. O modificador de derivação híbrido compartilha algumas características com o conhecido modificador de derivação híbrido 30. Tais características são designadas usando os mesmos números de referência.

[0050] O terceiro seletor 72 tem uma pluralidade de derivações 78 e correspondentes comutadores S1, S2, S3 para selecionar uma derivação particular 78. No exemplo mostrado, três derivações são incluídas. Outras formas de realização da invenção podem incluir um número maior ou menor de derivações 78.

[0051] O terceiro seletor 72 também inclui dois segundos comutadores eletromecânicos S4, S5 para seletivamente isolar uma dada perna do terceiro desviador 74, de modo a isolar os dispositivos semicondutores no mesmo.

[0052] O terceiro desviador 74 tem duas pernas 80, 82, cada das quais define um respectivo percurso de corrente. Cada perna 80, 82 inclui um par P1, P2 de primeiro e segundo tiristores opostos 84, 86. Os tiristores 84, 86 são arranjos para seletivamente estabelecer um percurso de fluxo de corrente em uma dada perna 80, 82 do terceiro desviador 74. Em outras formas de realização da invenção, um tipo diferente de comutador semicondutor pode ser usado.

[0053] Cada perna 80, 82 do terceiro desviador 74 inclui um atenuador 88 arranjado em paralelo com o par P1, P2 de primeiro e segundo tiristores 84, 86. Cada atenuador 88 inclui um resistor de atenuador 90 e um capacitor de atenuador 92 arranjados em série um com o outro. Cada atenuador 88, no uso, limita a taxa de mudança de tensão através de um respectivo par P1, P2 de primeiro e segundo tiristores 84, 86.

[0054] Cada perna 80, 82 do terceiro desviador 74 também inclui a indutor de reator 94 arranjado em série entre o par P1, P2 de primeiro e segundo tiristores 84, 86 e o terceiro seletor 72. Cada indutor de reator 94, em uso, limita a taxa de mudança de corrente fluindo através de um respectivo par P1, P2 de primeiro e segundo tiristores 84, 86.

[0055] Em adição, cada perna 80, 82 inclui um capacitor de limitação 96 arranjado para situar-se em paralelo com um correspondente segundo comutador de isolamento eletromecânico S4, S5 do terceiro seletor 72. Cada capacitor de limitação 96, em uso, ajuda a ainda limitar a taxa de mudança de tensão através de um respectivo par P1, P2 de primeiro e segundo tiristores 84, 86.

[0056] Cada perna 80, 82 da forma de realização de modificador de derivação em carga híbrido 72 mostrada ainda inclui um supressor de surto de tensão 98 arranjado em paralelo com um correspondente segundo comutador de isolamento eletromecânico S4, S5. Em uso, cada supressor de surto de tensão 98 protege um respectivo par P1, P2 de primeiro e segundo tiristores 84, 86 a partir da tensão de choque progressiva durante, por exemplo, uma greve de iluminação.

[0057] Cada segundo comutador de isolamento eletromecânico S4, S5 inclui um seletor indutor 100 arranjado em série com ele. Cada seletor indutor 100, em uso,

ajuda ainda a limitar a taxa de mudança de corrente em um respectivo par P1, P2 de primeiro e segundo tiristores 84, 86.

[0058] Em uso, o segundo controlador 76 seletivamente comuta para ligação um do primeiro ou segundo tiristores 84, 86 de um dado par não conduzindo P1, P2 em uma dada perna 80, 82 em um ponto predeterminado dentro do ciclo de corrente alternada de modo a comutar para desligamento um desejado tiristor de condução 84, 86 do outro par P1, P2 na outra perna 80, 82.

[0059] Tal comutação permite que o número de espiras no enrolamento primário 14 seja aumentado ou diminuído, quando requerido, sem interromper o fluxo de corrente de carga LC.

[0060] No circuito do terceiro desviador 74 mostrado, o aumento do número de espiras no enrolamento primário executa uma mudança para baixo de derivação, enquanto diminui o número de espiras que realiza uma mudança para cima de derivação.

[0061] Quatro distintas condições de tensão de derivação e corrente de carga LC ocorrem dentro do circuito do terceiro desviador 74, mostrado na figura 4, durante metade de um dado ciclo de CA, por exemplo, quando a tensão de suprimento é positiva. As quatro condições são: (i) tanto a tensão de derivação quanto a corrente de carga LC são positivas; (ii) a tensão de derivação é negativa e a corrente de carga LC é positiva; (iii) tanto a tensão de derivação quanto a corrente de carga LC são negativas; e (iv) a tensão de derivação é positiva e a corrente de carga LC é negativa.

[0062] Uma vez que as duas metades de um ciclo de CA (isto é, quando a tensão de suprimento é positiva e negativa, respectivamente) são simétricas, as outras quatro condições de tensão de derivação e corrente de carga LC para o segundo semi-ciclo negativo são essencialmente duplicatas das primeiras quatro condições.

[0063] Em adição, quando retro-geração tem lugar, isto é, quando a carga regenera energia, outras quatro condições de tensão de derivação e corrente de carga LC aparecem. Cada destas corresponde a uma das quatro distintas condições de tensão de derivação e corrente de carga LC, delineadas acima.

[0064] A figura 5 (a) (i) ilustra a primeira condição de tensão de derivação e

corrente de carga LC. O segundo tiristor do segundo par 86^{P2} está inicialmente conduzindo, isto é, comutado para ligação, e a corrente de carga LC está sendo suprida pela fonte, isto é, está provindo do enrolamento primário 14 do transformador e, assim, é considerada positiva.

[0065] A tensão de suprimento é positiva, então o primeiro enrolamento de derivação 15 que é conectado através do segundo tiristor do segundo par 86^{P2} é positivo com respeito ao segundo enrolamento de derivação 17, para o qual é desejado comutar. Por conseguinte, a tensão de derivação é considerada positiva nesta condição.

[0066] A figura 5 (a) (ii) mostra um esquema simplificado das condições mostradas na figura 5 (a) (i).

[0067] As figuras 5 (b) (i) e 5 (b) (ii) ilustram a segunda condição. Corrente de carga LC está sendo regenerada, isto é, ela está fluindo para o enrolamento primário 14, e, assim, é considerada negativa. O primeiro enrolamento de derivação 15 é positivo com respeito ao segundo enrolamento de derivação 17, para o qual é desejado comutar. Por conseguinte, a tensão de derivação é considerada positiva.

[0068] As figuras 5 (c) (i) e 5 (c) (ii) ilustram a terceira condição. Corrente de carga LC está sendo suprida da fonte, a partir do enrolamento primário 14 e, assim, é considerada positiva. O segundo enrolamento de derivação 17 é negativo com respeito ao primeiro enrolamento de derivação 15, para o qual é desejado comutar. Por conseguinte, a tensão de derivação é considerada negativa.

[0069] As figuras 5 (d) (i) e 5 (d) (ii) ilustram a quarta condição. Corrente de carga LC está sendo regenerada e, assim, é considerada negativa. O segundo enrolamento de derivação 17 é negativo com respeito ao primeiro enrolamento de derivação 15, para o qual é desejado comutar, então a tensão de derivação é também negativa.

[0070] É possível representar a relação entre a tensão de derivação e corrente de carga LC em qualquer instante particular em um dado ciclo de CA do sistema de transmissão de energia em um diagrama de Lissajous, como mostrado nas figuras 6 (a) e 6 (b).

[0071] Cada diagrama de Lissajous inclui um primeiro, segundo, terceiro e quarto

quadrantes 102, 104, 106, 108, que correspondem a respectivas condições de tensão de derivação e corrente de carga LC.

[0072] As condições de tensão de derivação e corrente de carga LC em cada das primeiras a quarta condições correspondem àquelas em um respectivo quadrante 102, 104, 106, 108. Por conseguinte, é possível mapear cada das primeiras a quarta condições sobre um diagrama de Lissajous.

[0073] Um primeiro diagrama de Lissajous 112 (figura 6 (a)) é para uma mudança de derivação, isto é, a redução da tensão no enrolamento secundário de transformador por meio de comutação da conexão de derivação de modo a aumentar o número de espiras no enrolamento primário 14.

[0074] Para uma carga indutiva (como ilustrada), a relação entre tensão de derivação e corrente de carga LC varia com o tempo ao longo do “locus” do primeiro diagrama de Lissajous 112 em uma direção anti-horária.

[0075] Uma carga capacitiva (não ilustrada) causaria com que a relação entre tensão de derivação e corrente de carga LC varie com o tempo ao longo do “locus” do primeiro diagrama de Lissajous 112 em uma direção horária.

[0076] Um segundo diagrama de Lissajous 114 (figura 6 (b)) ilustra a relação entre tensão de derivação e corrente de carga LC no terceiro circuito de desviador 74 quando da realização de uma mudança para cima de derivação, isto é, quando da diminuição do número de espiras no enrolamento primário 14.

[0077] O segundo diagrama de Lissajous 114 é uma imagem de espelho do primeiro diagrama de Lissajous 112, em torno do eixo vertical, de tensão de derivação zero.

[0078] Para uma carga indutiva (como ilustrada), a relação entre tensão de derivação e corrente de carga varia com o tempo ao longo da segunda figura de Lissajous 114 em uma direção horária.

[0079] Uma carga capacitiva (não ilustrada) causaria com que a relação entre tensão de derivação e corrente de carga LC variasse com o tempo ao longo do “locus” do segundo diagrama de Lissajous 114 em uma direção anti-horária.

[0080] O “locus” de cada diagrama de Lissajous 112, 114 atravessa cada

quadrante, independentemente de se a mudança de derivações é para baixo ou para cima. A natureza da mudança de derivações meramente determina a quantidade de tempo em que o “locus” de cada diagrama de Lissajous 112, 114 permanece em um quadrante particular.

[0081] Uma vez que a primeira e segunda condições (figuras 5 (a) e 5 (b)) são para uma mudança para baixo de derivação, elas correspondem ao primeiro diagrama de Lissajous 112.

[0082] Na primeira condição, tanto a corrente de carga quanto a tensão derivação são positivas, de modo que corresponde ao primeiro quadrante 102 do primeiro diagrama de Lissajous 112. Na segunda condição, a corrente de carga é negativa e a tensão de derivação é positiva, então ela corresponde ao quarto quadrante 108 do primeiro diagrama de Lissajous 112.

[0083] Uma vez que a terceira e quarta condições (figuras 5 (c) e 5 (d)) são para uma mudança para cima de derivação, elas correspondem ao segundo diagrama de Lissajous 114.

[0084] Na terceira condição, a corrente de carga é positiva e a tensão de derivação é negativa, então ela corresponde ao segundo quadrante 104 do segundo diagrama de Lissajous 114. Na quarta condição, tanto a corrente de carga quanto a tensão derivação são negativas, então ela corresponde ao terceiro quadrante 106 do segundo diagrama de Lissajous 114.

[0085] A polaridade de tensão do enrolamento primário 14 em cada das figuras 5 (a) a 5 (d) é ajustada por meio da tensão de suprimento, a qual é positiva durante o semi-ciclo considerado.

[0086] Em cada das figuras 5 (a) e 5 (b), um tiristor 84^{P2} , 86^{P2} do segundo par P2 está inicialmente conduzindo, enquanto cada dos outros tiristores 84^{P1} , 86^{P1} do primeiro par P1 pode ser comutado para ligado, de modo a conduzir, isto é, é inicialmente não conduzindo. Conseqüentemente, a tensão de derivação é positiva. Isto, em combinação com se a corrente de carga LC está sendo suprida da fonte ou regenerada, isto é, é ou positiva ou negativa, determina se comutação é possível.

[0087] Por exemplo, para as condições ilustradas nas figuras 5 (a) (i) e (ii) (isto é,

a corrente de carga é positiva e a tensão de derivação é positiva), comutação de ligação do primeiro tiristor não conduzindo 84^{P1} do primeiro par P1 causa com que uma corrente de circulação CC acionada por meio da polaridade de tensão do enrolamento primário 14, flua no circuito.

[0088] A corrente de circulação CC reforça a corrente de carga LC para fornecer uma corrente combinada, sobretudo elevada, como mostrado na figura 7 (a).

[0089] Para as condições nas figuras 5 (b) (i) e (ii), comutação de ligação do primeiro tiristor não conduzindo 84^{P1} do primeiro par P1 causa com que uma corrente de circulação CC, acionada por meio da polaridade de tensão do enrolamento primário 14, flua no circuito.

[0090] A corrente de circulação CC anula a corrente de carga LC, como mostrado na figura 7 (b), permitindo assim que o tiristor de condução (neste caso, o primeiro tiristor conduzindo 84^{P2} do segundo par P2) comute para desligamento.

[0091] No meio tempo, o tiristor novamente ligado (o primeiro tiristor 84^{P1} do primeiro par P1) é capaz de conduzir a corrente de carga principal, isto é, o primeiro tiristor 84^{P1} do primeiro par P1 define um novo percurso de fluxo para a corrente de carga, como mostrado por meio da linha tracejada LC na figura 5 (b) (i). Desta maneira, o fluxo de corrente de carga é mantido, enquanto aumenta o número de espiras no enrolamento primário 14, isto é, enquanto executa uma mudança de derivações.

[0092] Em cada das figuras 5 (c) e 5 (d), um tiristor 84^{P1} , 86^{P1} do primeiro par P1 está inicialmente conduzindo, enquanto cada dos outros tiristores 84^{P2} , 86^{P2} do segundo par P2 pode ser comutado para ligado de modo a conduzir, isto é, está inicialmente não conduzindo. Consequentemente, a tensão de derivação é negativa. Isto, em combinação com se corrente de carga LC está sendo suprida da fonte ou regenerada, isto é, é ou positiva ou negativa, determina se comutação é possível.

[0093] Por exemplo, para as condições nas figuras 5 (c) (i) e (ii), comutação de ligação do segundo tiristor não conduzindo 86^{P2} do segundo par P2 causa com que uma corrente de circulação CC acionada por meio da polaridade de tensão do enrolamento primário 14, flua no circuito.

[0094] A corrente de circulação CC anula a corrente de carga LC, permitindo assim que o tiristor de condução (neste caso o segundo tiristor conduzindo 86^{P1} do primeiro par P1) comute para desligamento.

[0095] Para as condições nas figuras 5 (d) (i) e (ii), comutação de ligação do segundo tiristor não conduzindo 86^{P2} do segundo par P2 causa com que uma corrente de circulação CC acionada por meio da polaridade de tensão do enrolamento primário 14, flua no circuito.

[0096] A corrente de circulação CC reforça a corrente de carga LC para fornecer uma corrente combinada, sobretudo elevada.

[0097] Por conseguinte, a fim de comutar para desligamento um desejado tiristor de condução 84^{P2} , 86^{P1} é necessário para comutar para ligado um particular tiristor não conduzindo 84^{P1} , 86^{P2} quando as condições de tensão de derivação e corrente de carga correspondem a uma condição particular, isto é, àquela no quarto quadrante 108 do primeiro diagrama de Lissajous 112; e àquela no segundo quadrante 104 do segundo diagrama de Lissajous 114.

[0098] Como um resultado, é necessário controlar quando, durante o ciclo de CA, um particular tiristor não conduzindo 84^{P1} , 86^{P2} é ligado. Isto é para assegurar que exista tempo suficiente para completa comutação de desligamento de um particular tiristor conduzindo 84^{P2} , 86^{P1} , enquanto a corrente de carga e tensão de derivação do sistema de transmissão de energia correspondem às condições no segundo ou quarto 104, 108 quadrantes.

[0099] O instante particular em que cada do segundo e quarto 104, 108 quadrantes em que o particular o tiristor não conduzindo 84^{P1} , 86^{P2} é ligado é escolhido a fim de minimizar a taxa de mudança de corrente e tensão experimentada ou sofrida por meio dos tiristores de cada par P1, P2.

[0100] Por exemplo, é desejável comutar para ligado o particular tiristor não conduzindo 84^{P1} , 86^{P2} , enquanto a tensão de derivação é baixa, de modo a limitar a elevação em corrente experimentado pelos respectivos pares de tiristores P1, P2.

[0101] Quando da realização de uma mudança para baixo de derivação (as figuras 5 (a) e 5 (b)), um primeiro período de tempo 122, durante o qual é desejável comutar

para desligamento um particular tiristor conduzindo 84^{P2} , é mostrado sobre o “locus” do primeiro diagrama de Liassajous 112 (figura 6 (a)).

[0102] Este período é escolhido de modo a limitar a taxa de mudança de corrente experimentada por meio de cada par de tiristores P1, P2 durante comutação.

[0103] A limitação da taxa de mudança de corrente durante comutação reduz o tamanho do indutor de reator 94 requerido, e, conseqüentemente, o custo de um tal indutor. Uma baixa taxa de mudança de corrente ocorre adjacente ao eixo de tensão de derivação zero.

[0104] Por conseguinte, por meio da comutação de ligação do segundo tiristor não conduzindo 86^{P1} do primeiro par P1 quando o ciclo de CA é adjacente ao eixo de tensão de derivação zero, é possível limitar a taxa de mudança de corrente experimentada por meio de cada par de tiristores P1, P2 to dentro dos parâmetros de operação físicos de cada tiristor 84^{P1} , 86^{P1} , 84^{P2} , 86^{P1} , usando somente um indutor de reator 94 moderadamente dimensionado e menos caro.

[0105] Quando da realização de uma mudança para cima de derivação (figuras 5 (c) e 5 (d)) é desejável comutar para desligamento o tiristor de condução 86^{P1} durante um segundo período de tempo 124, como mostrado sobre o “locus” do segundo diagrama de Lissajous 114 da figura 6 (b).

[0106] A fim de limitar a taxa de mudança de corrente experimentada por meio de cada par de tiristores P1, P2 durante comutação, é desejável que a comutação tenha lugar enquanto a tensão de derivação é baixa, isto é, adjacente ao eixo de tensão de derivação zero. Todavia, para que a comutação tenha lugar dentro de um desejado quadrante, por exemplo, o segundo quadrante 104 do segundo diagrama de Lissajous 114, ela tem que ocorrer antes da tensão de derivação atingir zero Volt.

[0107] Como um resultado, existe uma alta taxa de mudança de tensão através de cada par de tiristores P1, P2.

[0108] A fim de limitar o grau em que cada par de tiristores P1, P2 experimenta esta taxa de mudança de tensão, é desejável incluir um atenuador 88 em paralelo com cada par de tiristores P1, P2.

[0109] A simetria de cada metade do ciclo de CA significa que, quando da

realização de uma mudança para baixo de derivação, é também possível comutar para desligamento o tiristor de condução 86^{P2} durante o segundo semi-ciclo negativo, como mostrado nas figuras 5 (e) (i) e (ii).

[0110] As condições de corrente de carga e tensão de derivação durante este período correspondem àquelas no segundo quadrante 104 do primeiro diagrama de Lissajous 112 (figura 6 (a)). Um terceiro período de tempo 123, durante o qual é desejável comutar para desligamento do tiristor de condução 86^{P2} é mostrado sobre o “locus” do primeiro diagrama de Lissajous 112.

[0111] Similarmente, quando da realização da mudança para cima de derivação, é também possível comutar para desligamento do tiristor de condução durante o segundo semi-ciclo negativo.

[0112] As condições de corrente de carga e tensão de derivação durante este período correspondem àquelas no quarto quadrante 108 do segundo diagrama de Lissajous 114 (figura 6 (b)).

[0113] Por conseguinte, é possível comutar para desligamento um respectivo tiristor conduzindo durante cada meio ciclo, isto é, um tiristor conduzindo em cada dos segundo e quarto quadrantes 104, 108. Isto significa que a comutação do terceiro desviador poderia ter lugar duas vezes durante cada ciclo de CA.

[0114] Por conseguinte, é possível realizar duas mudanças de derivação durante cada ciclo de CA, sujeitas à seleção de desempenho, isto é, o tempo requerido para selecionar uma derivação particular, do terceiro seletor 72.

[0115] Quando da comutação de ligação de um tiristor não conduzindo, como delineado acima, é necessário que as condições de corrente de carga e tensão de derivação do sistema de transmissão de energia permaneçam dentro do desejado quadrante 104, 108 por um tempo suficiente para permitir que a comutação tenha lugar. O tempo mínimo requerido em um desejado quadrante 104, 108 é determinado por meio do tempo despendido para um dado tiristor conduzindo comute para desligamento, isto é, recupere para uma condição de não condução. Tipicamente, este é em torno de 650 μ s.

[0116] Isto coloca uma restrição na relação de fase entre a corrente de carga e

tensão de derivação, ou o assim chamado "fator de potência" do sistema.

[0117] A figura 8 mostra a quarta até sexta figuras de Lissajous 126, 128, 130.

[0118] As quarta e quinta figuras de Lissajous 126, 128 são para relações de fase de $+0,98$ e $-0,98$ entre corrente de carga e tensão de derivação. Os sinais $+$ e $-$ se referem a mudanças de derivação para baixo e de derivação para cima, respectivamente.

[0119] O período de tempo em que o "locus" de, por exemplo, a quarta figura de Lissajous 126 está no segundo quadrante 104, como indicado por meio de um quarto período de tempo 132, é $650\ \mu\text{s}$. Por conseguinte, uma carga de fator de potência de $\pm 0,98$ é o fator de potência mais elevado que permite que a comutação tenha lugar completamente dentro de um desejado quadrante 104, 108.

[0120] Maiores relações de fase entre corrente de carga e tensão de derivação, isto é, fatores de potência mais elevados, resultam em uma figura de Lissajous crescentemente estreita, a qual despende menos que $650\ \mu\text{s}$ em um desejado quadrante 104, 108, como mostrado por meio da sexta figura de Lissajous 130, a qual é para uma unidade, isto é, carga de fator de potência de $+1,0$.

[0121] Esta limitação na relação de fase pode ser superada por meio da comutação de ligação do tiristor não conduzindo, isto é, iniciando a comutação antes de cruzar o eixo de tensão de derivação zero e antes de entrar no terceiro quadrante 106, como indicado por meio de um quinto período de tempo 134.

[0122] Preferivelmente, tal comutação ocorre aproximadamente na metade de tempo de recuperação de tiristor, isto é, $325\ \mu\text{s}$ antes do cruzamento do eixo de tensão de derivação zero.

[0123] Durante um tal modo de operação do indutor de reator 94, a indutância própria do transformador e a troca da polaridade de tensão do enrolamento primário 14 (isto é, a tensão de derivação) quando a tensão de suprimento se inverte, todos, ajudam a limitar a elevação em corrente que resulta do curto-circuito criado.

[0124] Quando da realização de uma mudança de derivação, a comutação da tensão de derivação no cruzamento do eixo de tensão de derivação zero cria a condição ilustrada na figura 5 (e). Isto gera uma corrente de circulação CC que anula

a corrente de carga LC, permitindo assim que o tiristor de condução 86^{P2} comute para desligamento.

[0125] Comutação de ligação do tiristor não conduzindo 86^{P1} antes do cruzamento do eixo de tensão de derivação zero desloca a figura de Lissajous (como mostrado na figura 9), de modo a alterar o ponto em que seu “locus” entra em um desejado quadrante 104, 108 (nesse caso o quarto quadrante 108) a fim de prover suficiente tempo dentro do desejado quadrante 108 para que a comutação tenha lugar.

REIVINDICAÇÕES

1. Modificador de derivação em carga híbrido (70), para uso em transmissão de energia de corrente alternada de alta tensão, compreendendo:

um seletor (72) incluindo dois comutadores de isolamento eletromecânico (S4, S5);

um desviador (74) tendo duas pernas (80, 82) definindo respectivos percursos de corrente, cada perna incluindo um par (P1, P2) de primeiro e segundo comutadores semicondutores opostos (84, 86), cada perna incluindo um primeiro indutor (94) arranjado em série entre cada par de primeiro e segundo comutadores semicondutores (84, 86) e o seletor (72), e cada perna incluindo um supressor de surto de tensão (98) em paralelo com cada um dos comutadores de isolamento eletromecânico (S4, S5) do seletor (72); e

um controlador (76) configurado para comutar em um do primeiro ou segundo comutadores semicondutores (84, 86) de uma dada perna em um ponto predeterminado dentro do ciclo de corrente alternada de modo a comutar para desligamento um desejado comutador semicondutor na outra perna; e

um atenuador (88) arranjado em paralelo com cada par de primeiro e segundo comutadores semicondutores (84, 86);

caracterizado pelo fato de que cada um dos comutadores de isolamento eletromecânico (S4, S5) inclui um segundo indutor (100) arranjado em série com o mesmo, cada segundo indutor (100) sendo arranjado em série com um respectivo primeiro indutor (94), e cada um dos comutadores de isolamento eletromecânico (S4, S5) e o respectivo segundo indutor (100) sendo arranjado em paralelo com o supressor de surto de tensão (98) correspondente de cada perna.

2. Modificador de derivação em carga híbrido (70), de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que cada perna ainda inclui um capacitor (96) arranjado em paralelo com um comutador de isolamento eletromecânico (S4, S5) correspondente do seletor (72).

3. Modificador de derivação em carga híbrido (70) de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 ou 2, caracterizado pelo fato de que os dois

comutadores de isolamento eletromecânico (S4, S5) seletivamente isolam uma respectiva perna do desviador de modo a contornar comutadores semicondutores (84, 86) na mesma.

4. Método de operação de um modificador de derivação em carga híbrido (70) durante transmissão de energia de corrente alternada de alta tensão, compreendendo as etapas de:

(i) prover um seletor (72) incluindo dois comutadores de isolamento eletromecânico (S4, S5);

(ii) prover um desviador (74) tendo duas pernas (80, 82), cada definindo um respectivo percurso de corrente

(iii) prover cada perna com um par (P1, P2) de primeiro e segundo comutadores semicondutores opostos (84, 86), prover um primeiro indutor (94) arranjado em cada perna em série entre cada par de primeiro e segundo comutadores semicondutores (84, 86) e o seletor (72), e prover cada perna com um supressor de surto de tensão (98) em paralelo com cada um dos comutadores de isolamento eletromecânico (S4, S5) do seletor (72);

(iv) seletivamente comutar para um dos primeiro ou segundo comutadores semicondutores de uma dada perna em um ponto predeterminado dentro do ciclo de corrente alternada de modo a comutar para desligamento um desejado comutador semicondutor na outra perna, o ponto predeterminado no qual os comutadores semicondutores (84, 86) são operados sendo pouco antes da aparição da tensão zero através dos terminais de derivação;

caracterizado pelo fato de compreender ainda a etapa de:

(v) prover cada um dos comutadores de isolamento eletromecânico (S4, S5) com um segundo indutor (100) arranjado em série com o mesmo, cada segundo indutor (100) sendo arranjado em série com o respectivo primeiro indutor (94), e cada um dos comutadores de isolamento eletromecânico (S4, S5) e o respectivo segundo indutor (100) sendo arranjado em paralelo com o supressor de surto de tensão (98) correspondente de cada perna.

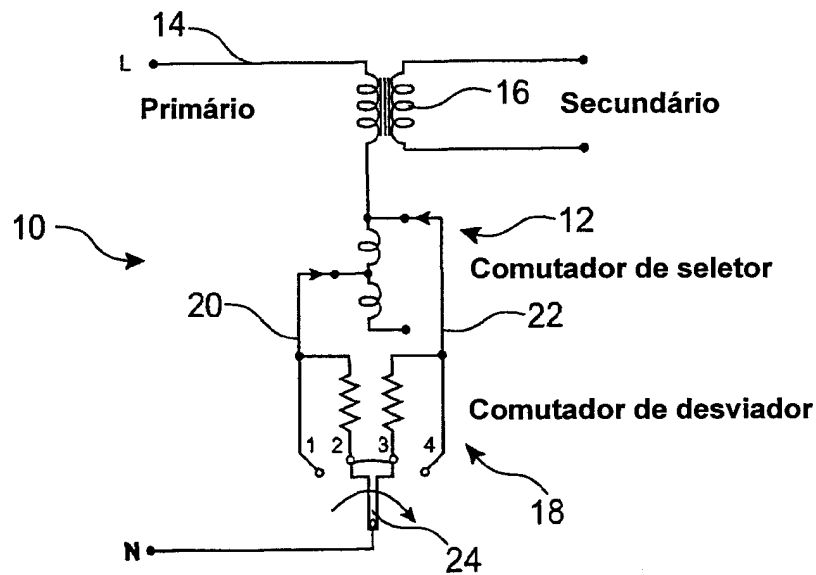


FIG.1

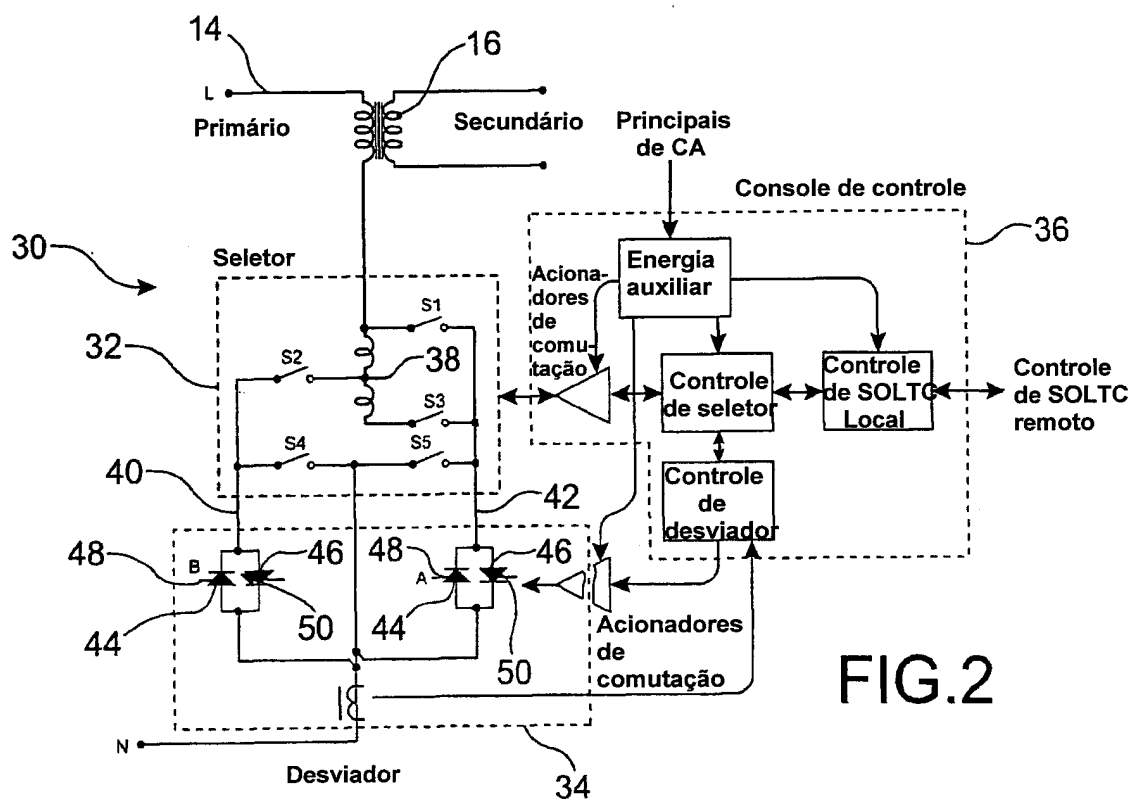


FIG.2

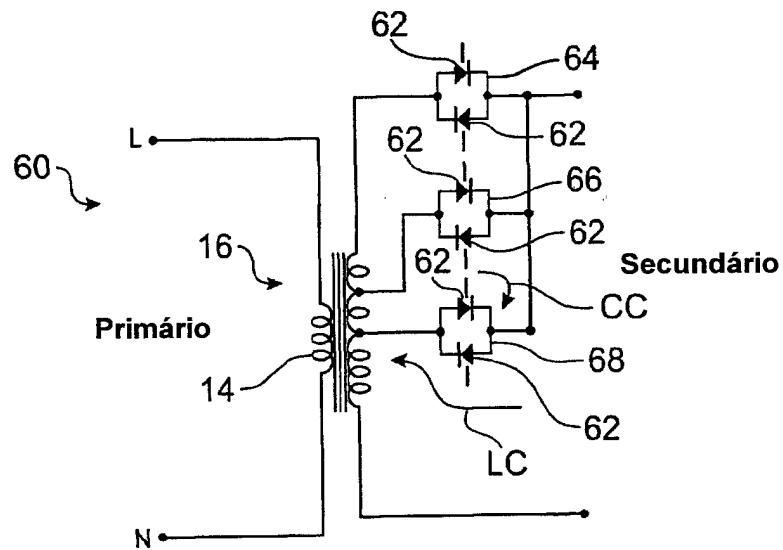


FIG.3

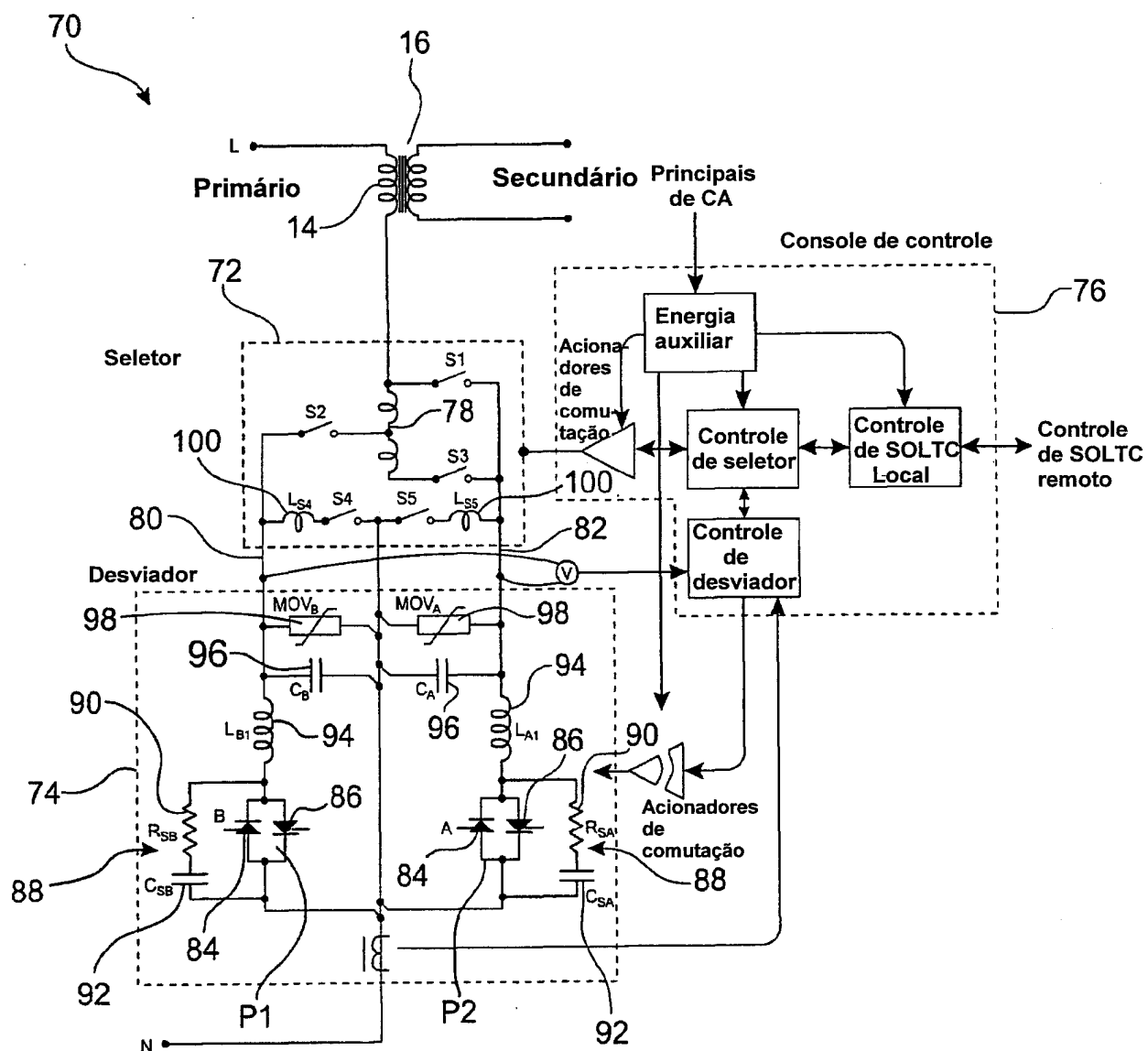


FIG.4

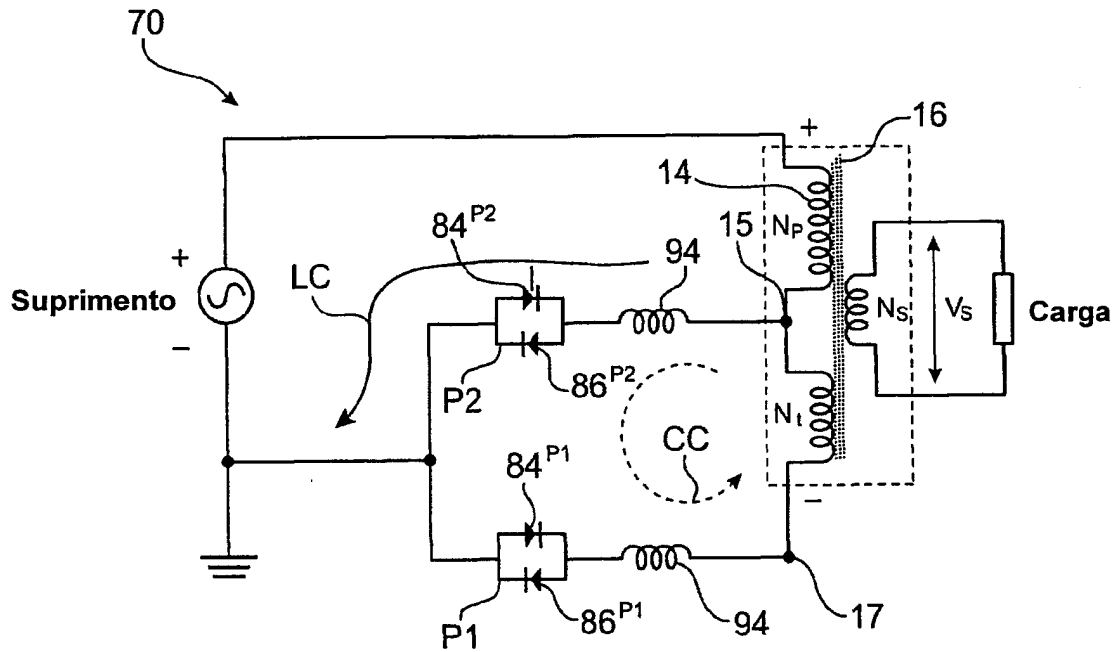


FIG.5(a)(i)

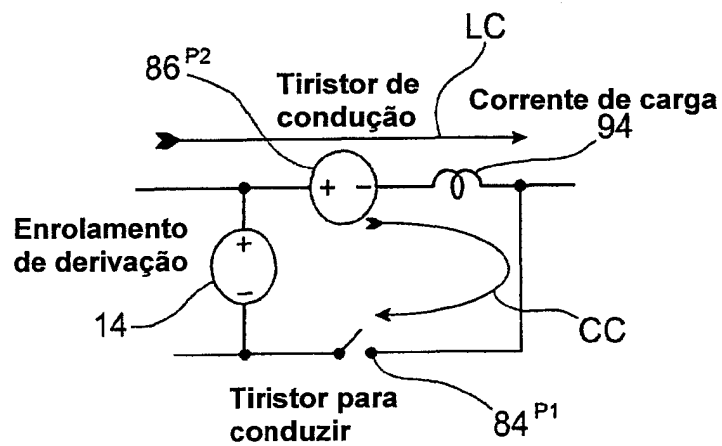


FIG.5(a)(ii)

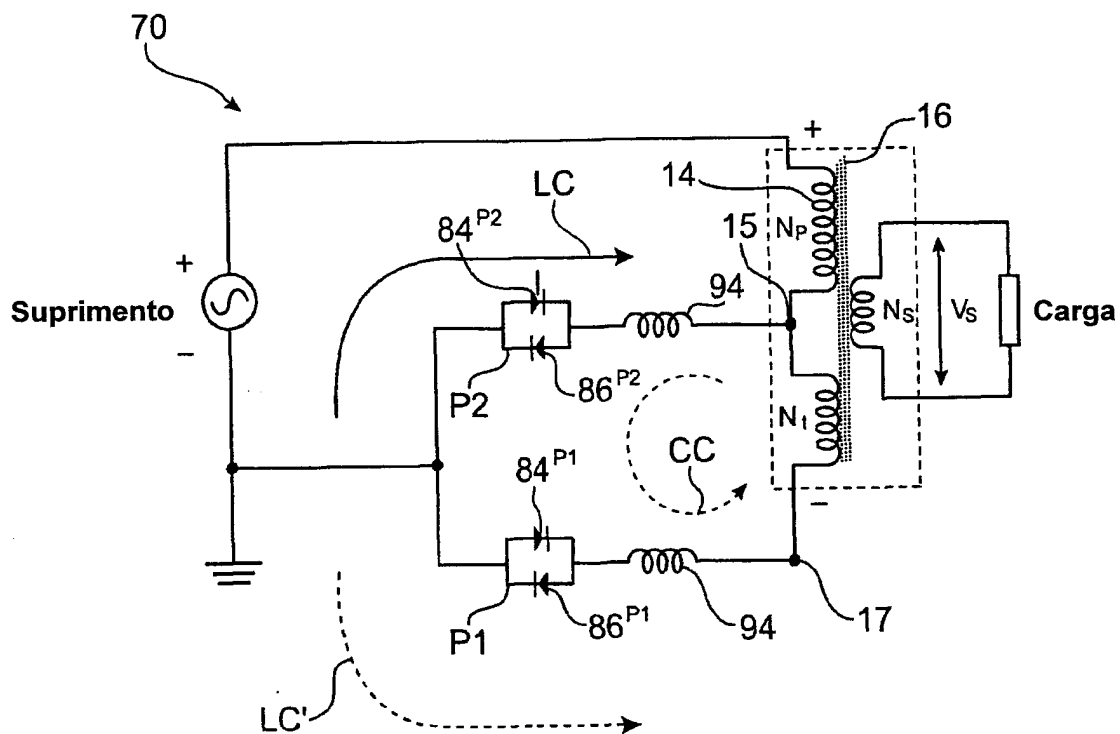


FIG.5(b)(i)

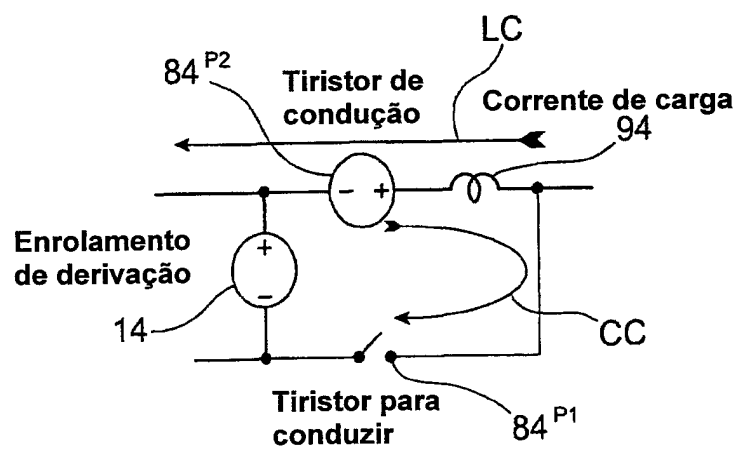


FIG.5(b)(ii)

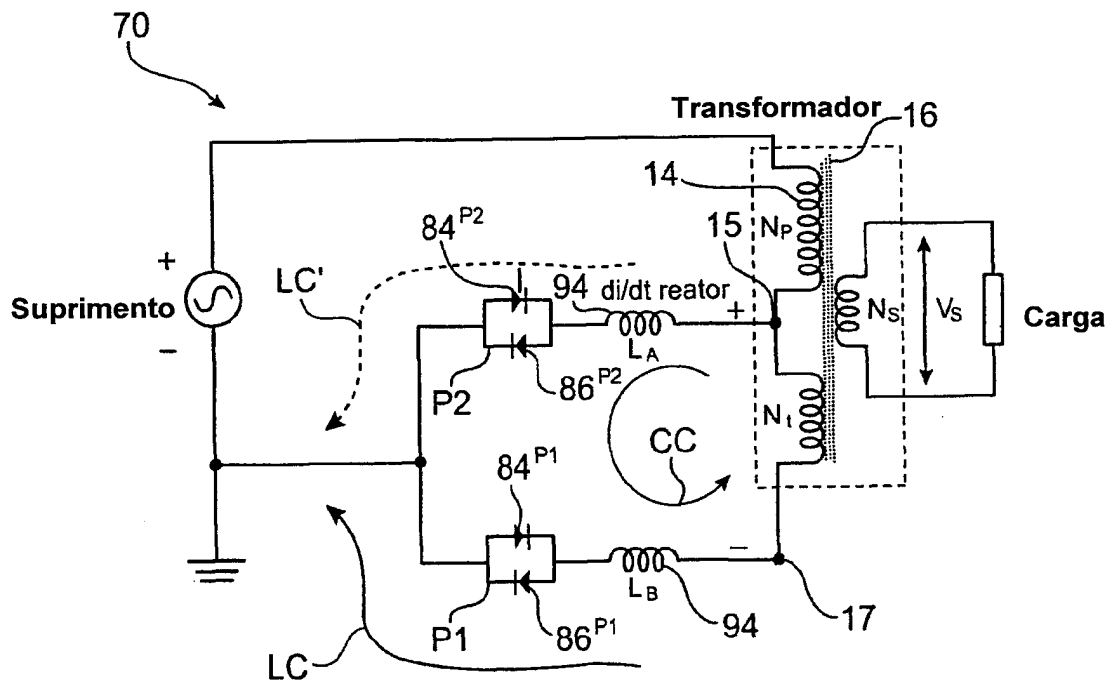


FIG.5(c)(i)

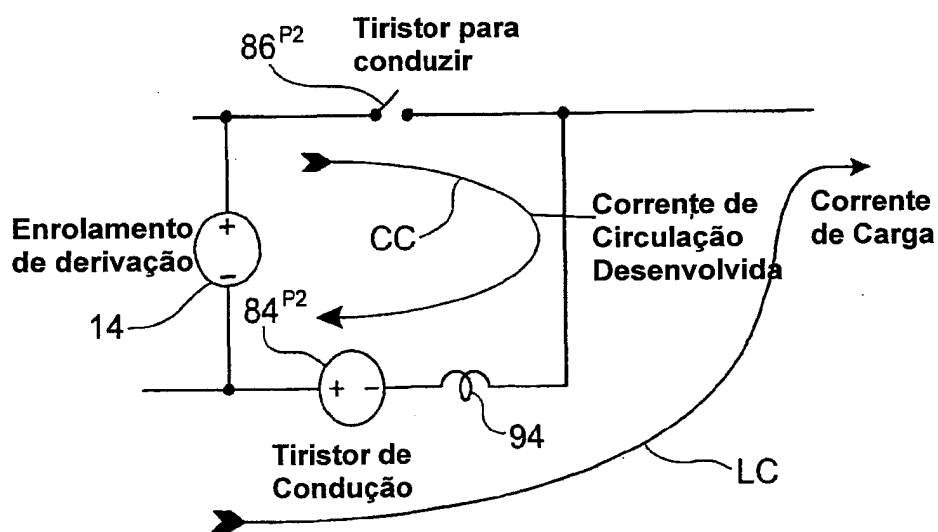


FIG.5(c)(ii)

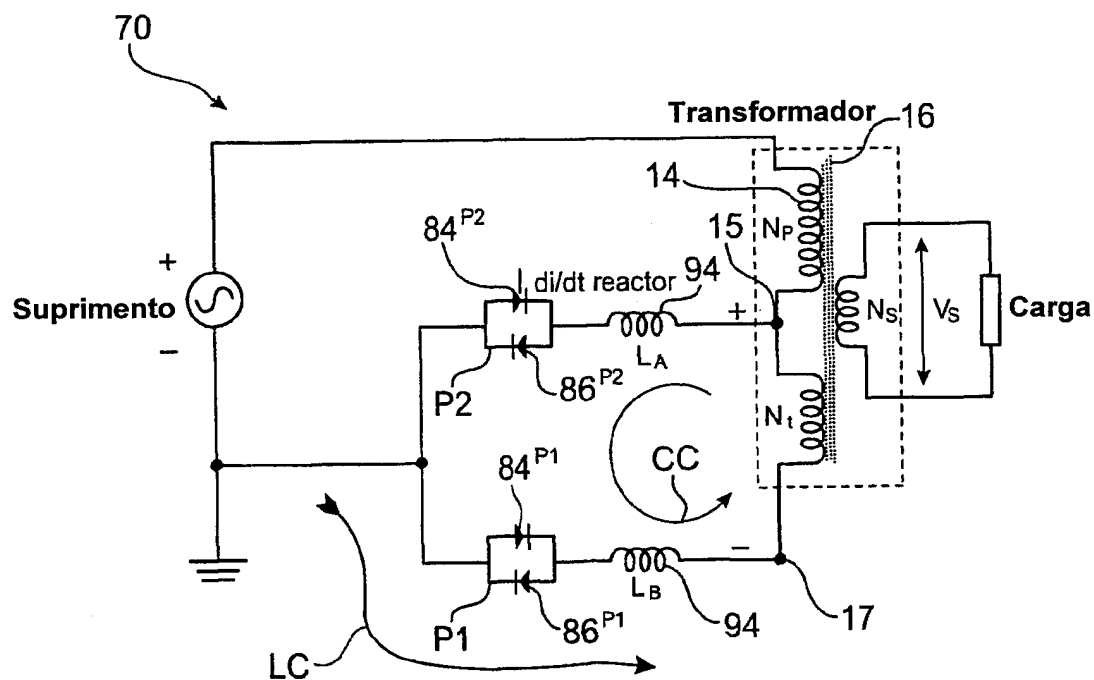


FIG.5(d)(i)

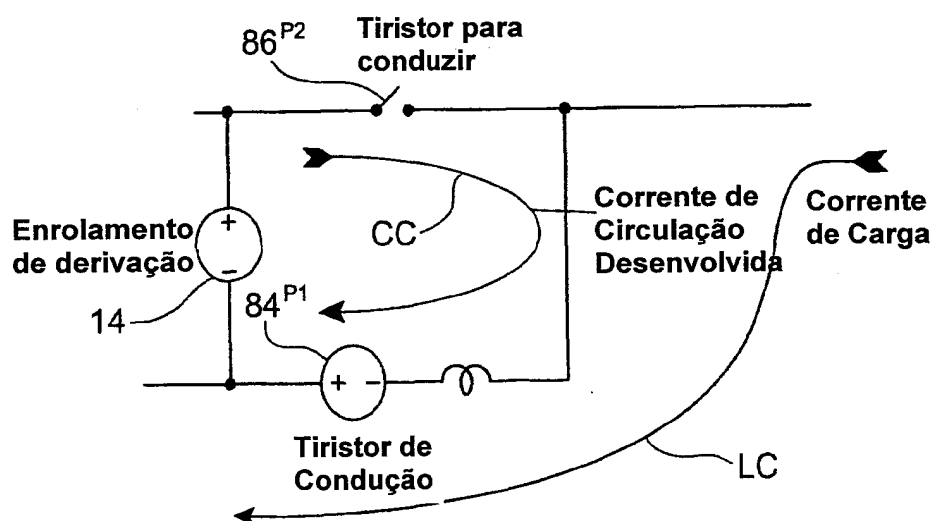


FIG.5(d)(ii)

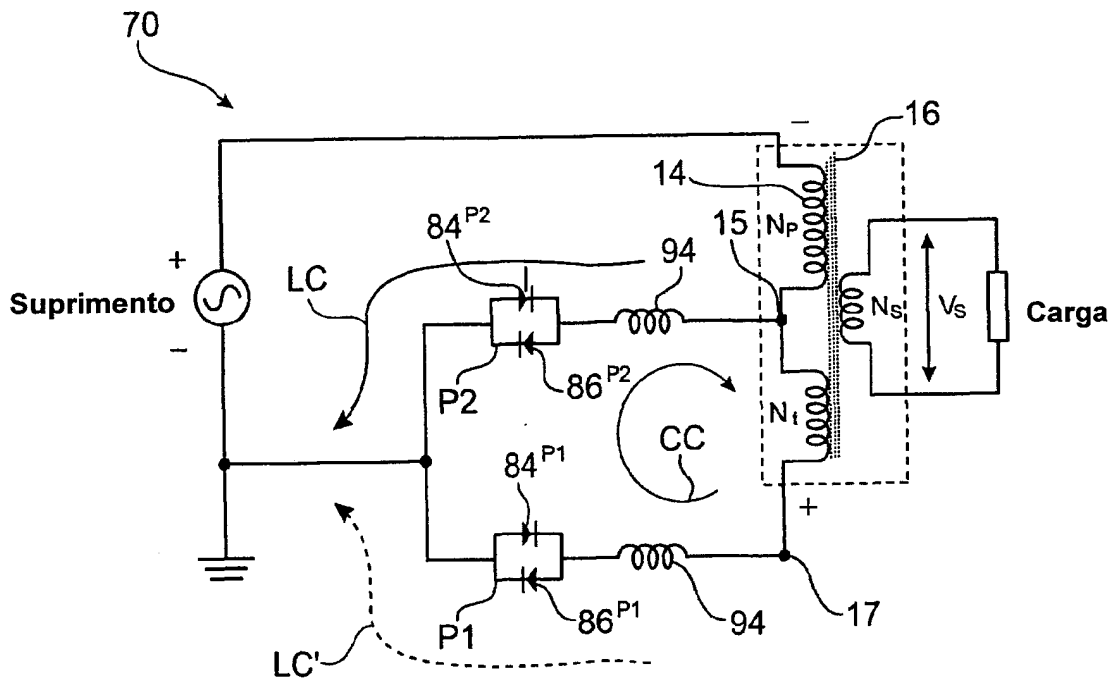


FIG.5(e)(i)

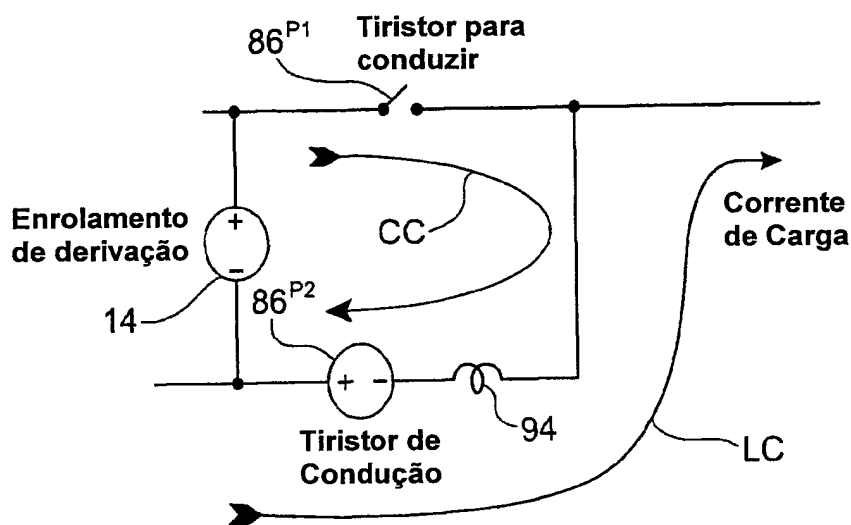


FIG.5(e)(ii)

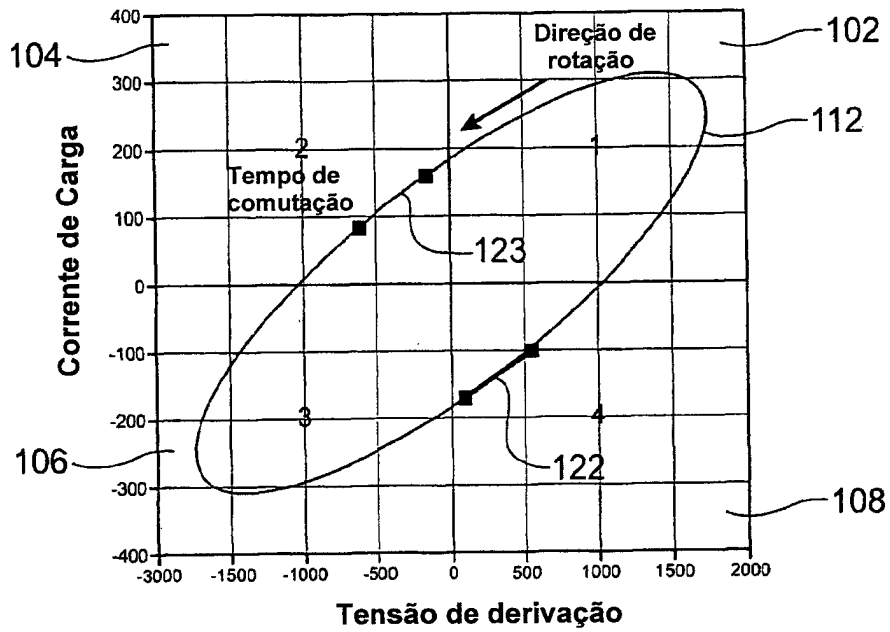


FIG. 6(a)

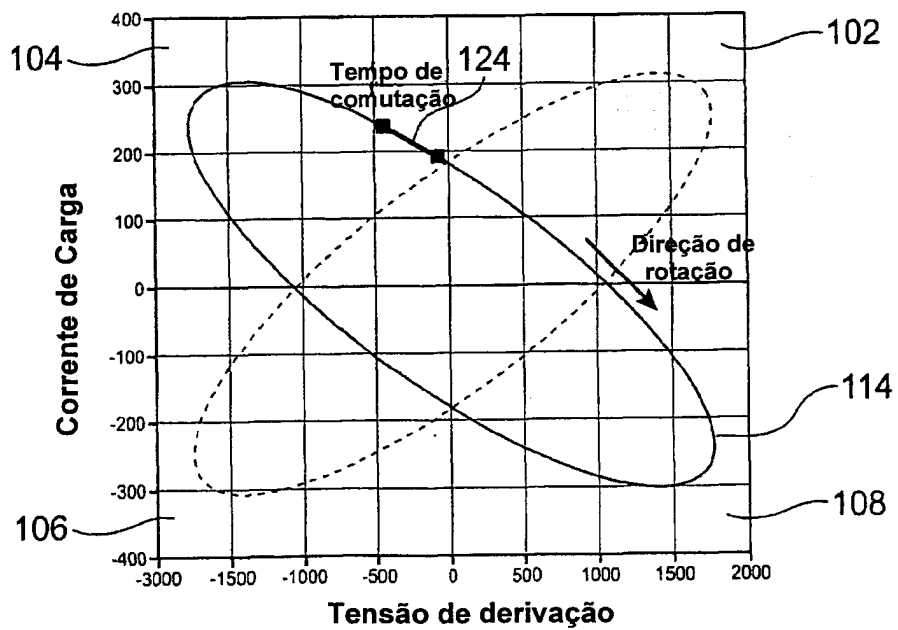


FIG. 6(b)

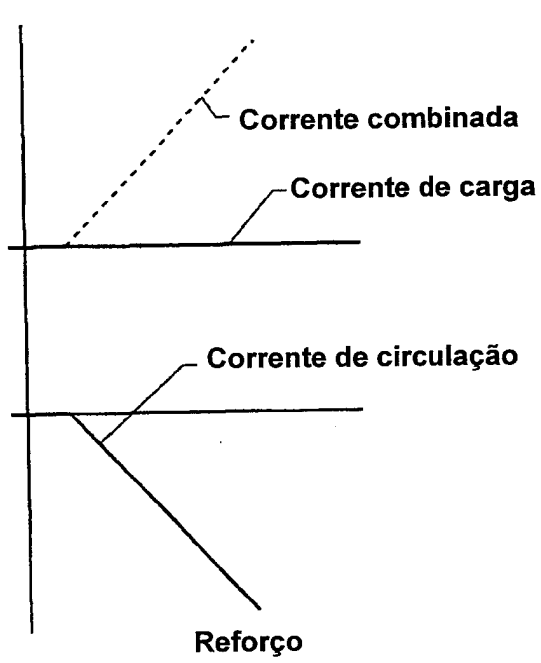


FIG.7(a)

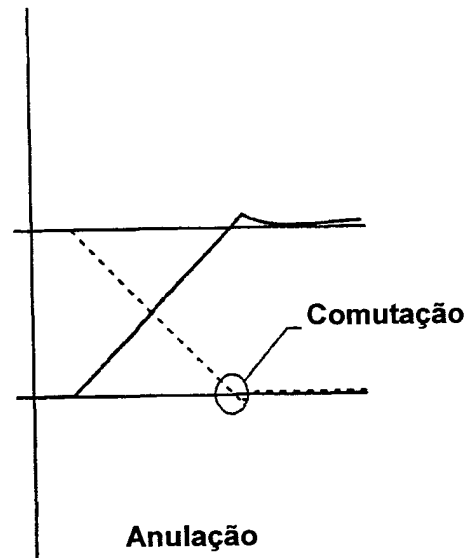


FIG.7(b)

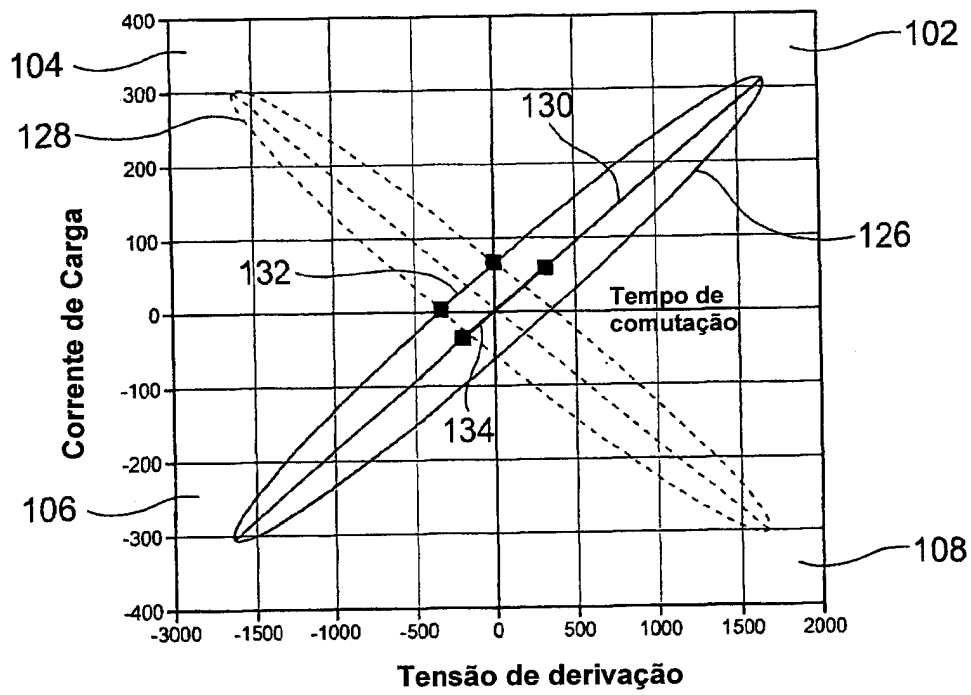


FIG.8

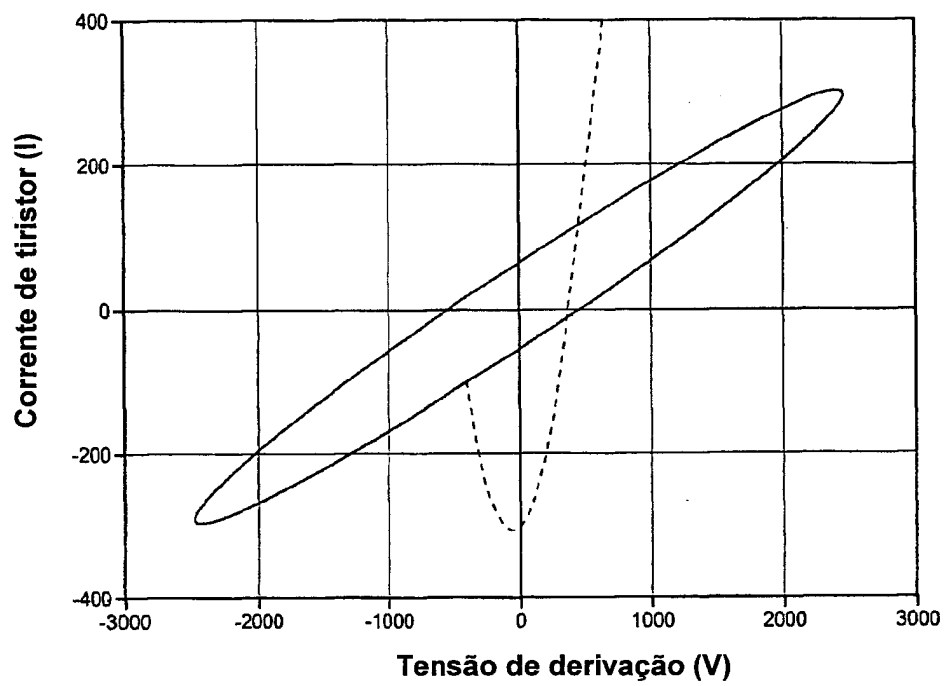


FIG.9