



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

(11) PI 1014501-0 B1



(22) Data do Depósito: 15/06/2010

(45) Data de Concessão: 12/05/2020

(54) Título: MÉTODO E DISPOSITIVO DE CONTROLE PARA CONTROLAR UM DISPOSITIVO INVERSOR COMUTADO POR CAPACITOR, DISPOSITIVO INVERSOR COMUTADO POR CAPACITOR E SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA DE CORRENTE CONTÍNUA

(51) Int.Cl.: H02J 3/36; H02J 3/16.

(30) Prioridade Unionista: 18/06/2009 SE 0900830-1.

(73) Titular(es): ABB TECHNOLOGY AG.

(72) Inventor(es): PAULO FISCHER DE TOLEDO.

(86) Pedido PCT: PCT EP2010058329 de 15/06/2010

(87) Publicação PCT: WO 2010/146024 de 23/12/2010

(85) Data do Início da Fase Nacional: 15/12/2011

(57) Resumo: "CONTROLE DE UM DISPOSITIVO INVERSOR PARA SUPORTAR UM SISTEMA CA". A presente invenção refere-se a um método para controlar um dispositivo inversor, um dispositivo de controle bem como 5 um dispositivo inversor e um sistema de transmissão de energia de corrente contínua. O sistema de transmissão de energia de corrente contínua (10) é fornecido para conexão a um barramento de tensão CA (13) de um sistema de energia CA (14) e compreende o dispositivo de controle (24) e o dispositivo inversor (18) 10 que converte entre energia CC e energia CA. O dispositivo de controle (24) recebe medições da tensão (VCA) no barramento de tensão CA (13) e controla o dispositivo inversor (18) para fornecer uma tensão CA constante no barramento.

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para
**"MÉTODO E DISPOSITIVO DE CONTROLE PARA CONTROLAR UM
DISPOSITIVO INVERSOR COMUTADO POR CAPACITOR,
DISPOSITIVO INVERSOR COMUTADO POR CAPACITOR E SISTEMA
DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA DE CORRENTE CONTÍNUA".**

CAMPO DA INVENÇÃO

[001] A presente invenção refere-se geralmente a sistemas de transmissão de energia. Mais particularmente a presente invenção refere-se a um método e dispositivo de controle para controlar um dispositivo inversor conectado a um barramento de tensão CA de um sistema de energia CA, tal dispositivo inversor bem como a um sistema de transmissão de energia de corrente contínua.

ANTECEDENTES

[002] O fenômeno relacionado com conversor de Corrente Contínua de Alta Tensão (HVDC) conectado a rede CA fraca tem sido estudado extensivamente. Ver, por exemplo, "Guia para planejamento de ligações CC terminando em localizações CA que têm baixas cargas máximas de Curto-Circuito " - Parte I: fenômeno de interação CA/DC, grupo de trabalho CIGRE 14.07, Relatório 68, Junho de 1992 e "guia IEEE para planejamento de ligações CC terminando em localizações CA que têm baixas cargas máximas de Curto-Circuito", Padrão IEEE 1204 a 1997.

[003] Este fenômeno tem diferentes implicações no projeto de sistema HVDC. As seguintes questões são de interesse especial:

- Risco de instabilidade de tensão / potência
- Altas sobretensões temporárias
- Frequências de ressonância baixas
- Tempos de reinício longos
- Risco de falhas de comutação

[004] Todos estes fatores influenciam desempenho do sistema, e

para mitigar seus efeitos pode ser necessário instalar equipamento adicional como compensadores estáticos ou síncronos, o que aumenta o custo geral do equipamento instalado.

[005] Uma medida da força do sistema CA é dada pela razão de curto-circuito, SCR. Esta é definida como a razão entre a capacidade de curto-circuito da rede CA no barramento de comunicação e o nível de energia CC nominal. Um sistema CA é usualmente considerado como fraco se SCR é menor do que 3.

[006] A estabilidade Tensão / Potência é uma questão básica de interesse quando conversores HVDC com conversores de linha comutados são conectados a um sistema CA fraco. O mecanismo básico em situações instáveis é a incapacidade do sistema de energia conectado para fornecer a energia reativa necessária pelo conversor para manter tensão de sistema aceitável.

[007] A concepção tradicional de um inversor de linha comutado assume operação com ângulo de extinção constante γ . Esta concepção permite a operação dos conversores com consumo mínimo de energia reativa, e quantidade reduzida de compensação de desvio de energia reativa. Alternativamente, outras propriedades de operação também podem ser descobertas como tensão CC constante ou ângulo de disparo constante α . Entretanto, todas estas condições operacionais implicam em condições de limitação similares em termos de força do sistema CA conectado.

[008] Para mitigar a interação entre conversor e o sistema CA conectado tem sido desenvolvido um conversor que usa Conversor Comutado por Capacitor (conversor CCC). O conversor CCC é um conversor clássico baseado em tiristor fornecido com capacitor em série colocado entre as válvulas conversoras e o transformador do conversor. Os capacitores em série usados nestes conversores são frequentemente denotados como capacitores de comutação. Este tipo

de conversor é descrito, por exemplo, por T. Jonsson e P. E. Bjorklund em "Conversores Comutados por Capacitor para HVDC", IEEE PES Conferência de PowerTech, Estocolmo, págs. 44 a 51, Junho de 1995.

[009] De acordo com o artigo por Jonsson e Bjorklund o conversor CCC tem desempenho melhorado comparado a um conversor HVDC convencional, especialmente quando o conversor CCC é conectado a um sistema CA fraco. Estudos têm demonstrado que pode ser possível conectar estes tipos de conversores a sistemas CA que são tão fracos como tendo $SCR = 1$. Deve ser observado aqui que sistemas HVDC convencionais com conversor de linha comutada e conversores sem assistência de capacitores em série são limitados a $SCR \approx 2$.

[0010] Entretanto ainda existe uma necessidade por melhoria na operação de ambos os conversores, convencional e CCC, quando o sistema CA ao qual os mesmos são conectados é fraco.

SUMÁRIO DA INVENÇÃO

[0011] O objetivo da presente invenção é fornecer um controle aprimorado de um converter que opera para converter entre CA e CC, quando o conversor é conectado a um sistema CA fraco.

[0012] Este objetivo está de acordo com um primeiro aspecto da presente invenção obtido através de um método para controlar um dispositivo inversor que é conectado a um barramento de tensão CA de um sistema de energia CA e que converte entre energia CC e energia CA, em que o método compreende as etapas de: receber medições de tensão no barramento de tensão CA, e controlar o dispositivo inversor para fornecer uma tensão CA constante no barramento baseado nas medições recebidas.

[0013] Este objetivo está de acordo com um segundo aspecto da invenção obtido através de um dispositivo de controle para controlar um dispositivo inversor conectado a um barramento de tensão CA de

um sistema de energia CA, em que o dispositivo de controle é configurado para: receber medições de tensão no barramento de tensão CA, e controlar o dispositivo inversor para fornecer uma tensão CA constante no barramento.

[0014] Este objetivo está de acordo com um terceiro aspecto da invenção obtido através de um dispositivo inversor para conexão a um barramento de tensão CA de um sistema de energia CA e configurado para converter entre energia CC e energia CA que compreende uma seção de conversão de tensão, e uma unidade de controle configurada para receber medições de tensão no barramento de tensão CA, e controlar a seção de conversão de tensão para fornecer uma tensão CA constante no barramento.

[0015] O objetivo é, além disso, de acordo com um quarto aspecto da invenção obtido através de um sistema de transmissão de energia de corrente contínua para conexão a um barramento de tensão CA de um sistema de energia CA e que compreende um dispositivo inversor configurado para converter entre energia CC e energia CA e um dispositivo de controle, em que o dispositivo de controle é configurado para receber medições de tensão no barramento de tensão CA, e controlar o dispositivo inversor para fornecer uma tensão CA constante no barramento.

[0016] A invenção tem uma quantidade de vantagens. A mesma pode ser combinada com um sistema CA fraco. Através da emulação de um conversor de fonte de tensão de acordo com os princípios da invenção é possível gerar energia reativa para e receber energia reativa de um sistema CA, o que aumenta o transiente mecânico e estabilidade de tensão dos sistemas CA e CC combinados.

BREVE DESCRIÇÃO DAS FIGURAS

[0017] A presente invenção será descrita a seguir com referências sendo feitas aos desenhos em anexo, onde

- [0018] a figura 1 mostra esquematicamente a U_{cc} / I_{cc} característica de um conversor retificador e um conversor inversor,
- [0019] a figura 2 mostra a U_{cc} / I_{cc} característica de um conversor retificador e um conversor inversor descrevendo a operação de uma ligação de transmissão HVDC,
- [0020] a figura 3 mostra esquematicamente um circuito de comutação de um HVDC conversor com capacitor em série conectado a uma fonte de tensão trifásica através de um transformador trifásico,
- [0021] a figura 4 mostra uma comparação da U_{cc} / I_{cc} característica para um conversor clássico e um CCC,
- [0022] a figura 5A mostra uma curva MPC para um sistema HVDC clássico com uma Razão de Curto-Circuito igual a 2,
- [0023] a figura 5B mostra uma curva MPC para um sistema HVDC CCC também com uma razão de Curto-Circuito igual a 2,
- [0024] a figura 6 mostra esquematicamente um sistema HVDC de acordo com a invenção.
- [0025] A figura 7 mostra um esquema em blocos de um dispositivo de controle para um conversor inversor de acordo com a invenção,
- [0026] a figura 8 mostra um fluxograma de uma quantidade de etapas de método de acordo com a invenção,
- [0027] a figura 9 mostra um esquema em blocos em uma variação de um dispositivo de controle de acordo com a invenção que fornece variação de ângulo de disparo,
- [0028] a figura 10 mostra um esquema em blocos de uma quantidade de unidades que fornecem determinação de margem de comutação,
- [0029] a figura 11 mostra um esquema em blocos de unidade de controle de compensação,
- [0030] a figura 12 mostra um esquema em blocos uma unidade de relaxamento de controle de tensão,

[0031] a figura 13 mostra esquematicamente uma unidade de detecção de operação de desvio,

[0032] a figura 14 mostra uma comparação da U_{cc} / I_{cc} característica para um conversor clássico, um conversor CCC e um conversor CCC sendo controlado de acordo com os princípios da invenção, e

[0033] a figura 15 mostra curvas MPC para um conversor inversor CCC com controle de margem de comutação constante e para um conversor CCC com controle de tensão CA constante de acordo com a invenção.

DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO

[0034] A seguir, será dada uma descrição detalhada das modalidades preferenciais de um dispositivo, método e sistema de acordo com a presente invenção. Entretanto, primeiro será dada alguma informação de fundamentos em relação às estratégias de controle convencionais.

[0035] O sistema de controle tradicional usado para controlar o fluxo de energia em uma linha CC pode ser visualizado na U_{cc} / I_{cc} característica (característica que representa o relacionamento entre a corrente contínua, I_{dc} , através e tensão contínua, U_{cc} , através do conversor) para duas estações conversoras. Isto é mostrado esquematicamente na figura 1, figura que mostra as características de um retificador (no primeiro quadrante e um inversor (no quarto quadrante com uma linha tracejada).

[0036] Basicamente, a U_{cc} / I_{cc} característica de um retificador pode ser descrita pelo relacionamento do retificador

$$U_{dc} = U_{di0} \cos \alpha - (d_{xN} + d_{rN}) \frac{U_{di0N}}{I_{dcN}} I_{dc} \quad (1)$$

[0037] onde U_{di0} é a tensão contínua sem carga, U_{di0N} é a tensão contínua sem carga em uma posição de drenagem do transformador conversor nominal e tensão CA nominal, α é um ângulo

de disparo de válvula do conversor, dx_N é a queda de tensão indutiva relativa em corrente contínua classificada e em tensão contínua sem carga, dr_N é a queda de tensão resistiva em operação classificada, I_{ccN} é a corrente contínua classificada e I_{cc} é a corrente contínua.

[0038] Operação com α mínimo constante significa uma U_{cc} / I_{cc} característica que começa na válvula

$$U_{cc0} = U_{di0} \cos \alpha \quad (2)$$

[0039] Isto dá uma inclinação negativa para aumento de I_{cc} .

[0040] Deve ser observado que o fator $(d_{xN} + d_{rN}) \frac{U_{di0N}}{I_{dcN}}$ é uma constante, relacionada diretamente à impedância do transformador conversor. A U_{dc} máxima é obtida se α estiver em seu valor mínimo (tipicamente 5°).

[0041] Operar com I_{cc} constante e α variável significa uma linha vertical no diagrama U_{dc} / I_{dc} . Este é o modo normal de operação do retificador no qual o retificador controla a corrente contínua variando α para alcançar a tensão no lado CC.

[0042] A U_{cc} / I_{cc} característica para o lado do inversor é descrita com um relacionamento similar, como

$$U_{dc} = - \left(U_{di0} \cos \gamma - (d_{xN} - d_{rN}) \frac{U_{di0N}}{I_{dcN}} I_{dc} \right) \quad (3)$$

[0043] A U_{cc} / I_{cc} característica total para um conversor pode ser apresentada como na figura 1. O sinal negativo no membro da direita da Eq. (3) aparece no quarto quadrante do diagrama U_{cc} / I_{cc} assumindo que a região do retificador está no primeiro quadrante.

[0044] No diagrama o símbolo γ_0 é usado para representar o menor valor de γ de operação.

[0045] Em um sistema de transmissão o conversor retificador tem seu catodo conectado à linha enquanto para o conversor inversor é seu que é conectado à linha. Assumindo que a definição de sinal para U_{cc} está de acordo com aquela da Eq. (3), ou seja, a mesma é

positiva quando a expressão é positiva, isto significa que a região de operação do inversor também está no primeiro quadrante.

[0046] A posição horizontal da linha vertical na figura 1 é definida pela ordem da corrente, ou seja, o ponto determinado no sistema de controle de corrente. Fazendo a ordem da corrente no inversor um pouco menor do que aquela do retificador (normalmente chamada de uma ordem de margem de corrente e denotada por ΔI_0) e $U_{di0} \cos \gamma_{min}$ no inversor ligeiramente menor do que $U_{di0} \cos \alpha_{min}$ no retificador, então de acordo com a figura 2 é obtida a U_{dc} / I_{dc} característica que descreve a operação de uma ligação de transmissão de Corrente Contínua de Alta Tensão (HVDC).

[0047] Como pode ser visto na figura 2, que mostra as características combinadas de um retificador R e um inversor I (também aqui mostra as características de um inversor com uma linha tracejada), o ponto de operação PoO é obtido como o ponto de cruzamento entre a característica de retificador e nova característica de inversor.

[0048] Em geral, o retificador controla a corrente contínua (no controle de realimentação) variando seu ângulo de controle α . Se a redução de tensão CA ocorre na rede do retificador, o sistema de controle de corrente do inversor irá reagir à corrente contínua reduzida e aumentará γ , pelo que U_{dc} na extremidade do inversor é diminuída. Portanto o inversor assume o controle de corrente e restaura operação estável com uma corrente contínua igual à corrente de referência no inversor, que é normalmente de 0,1 pu menor do que a ordem de corrente do retificador ($\Delta I_0 = 0,1$ pu). pu aqui denota por unidade e indica uma corrente normalizada.

[0049] Com o HVDC comutado por capacitor, os princípios de controle são na maior parte dos aspectos similar aos controles usados em um conversor convencional sem capacitores comutados em série.

[0050] Um circuito de comutação para um conversor CCC é mostrado esquematicamente na figura 3. Aqui existem três fontes CA u_a , u_b , u_c , cada uma conectada a uma bobina correspondente TIA, TIB e TIC um transformador. Cada bobina então é conectada em série com capacitores de comutação CA1, CA2 e CA3, em que cada capacitor de comutação é então conectado a uma seção de conversão de tensão composto de uma quantidade de válvulas conversoras. Aqui há uma primeira e quarta válvulas V1 e V4 conectadas em série entre dois pólos CC, onde o primeiro capacitor de comutação CA1 é conectado à junção entre estas duas válvulas V1e V4. Existem também uma terceira e sexta válvulas V3 e V6 conectadas em série entre os mesmos dois pólos CC, onde o segundo capacitor de comutação CA2 é conectado à junção entre estas duas válvulas V3 e V6. Existem finalmente uma segunda e quinta válvulas V5 e V2 conectadas em série entre os dois pólos CC, onde o terceiro capacitor de comutação CA3 é conectado à junção entre estas duas válvulas V5 e V2. As válvulas podem ser concebidas na forma de pares de tiristores V1, V4, V3, V6 e V5, V2, tiristores estes que são disparados usando ângulo de fase baseados em sinais de disparo ou ângulos de disparo. Estes tiristores que, além disso, compõem uma ponte de válvula de 6 pulsos.

[0051] Geralmente, o ângulo de disparo é definido como o ângulo de fase entre o cruzamento de zero da tensão de comutação e o instante de disparo de uma válvula. Em um conversor com capacitores de comutação, como indicado na figura 3, a tensão de comutação é composta da tensão de barramento CA e um componente de tensão relacionado às tensões de capacitor. A aplicação da definição geral de ângulo de disparo requer o conhecimento das tensões de comutação para as válvulas.

[0052] A filosofia de controle para o conversor comutado por

capacitor não depende da medição direta das tensões de capacitor. A tensão através do capacitor é predita com o uso das principais equações de circuito baseadas na tensão de barramento CA e na corrente contínua medidas. O ângulo de disparo é, portanto, definido como o ângulo de fase entre a tensão de barramento CA e o instante de disparo.

[0053] Similar a um sistema de transmissão HVDC convencional, o esquema de controle convencional usado em transmissão HVDC comutada por capacitor terá uma estação sempre controlando a corrente e a outra estação controlando a tensão CC. As funções básicas de controle são, portanto, o controle de corrente e o controle de tensão. Também, os comutadores do respectivo transformador conversor são usados para manter o ângulo de disparo nominal e a tensão CC da estação em controle de corrente e tensão respectivamente.

[0054] O controlador de corrente está controlando a corrente CC, I_{cc} , para um dado valor de referência, a ordem da corrente. Cada estação, retificador e inversor, inclui um controlador de corrente, mas apenas um dos controladores de corrente tem que estar ativo de cada vez. Se o controle de corrente é para ser manipulado pelo retificador, o inversor é forçado a tomar o controle de tensão subtraindo sua ordem de corrente por uma corrente marginal (ΔI_0). O inversor em seguida determinará a tensão CC.

[0055] Similar ao conversor clássico sem capacitor de comutação, um esquema de operação alternativo para o inversor é obter uma ordem α que resulta em operação na menor margem de comutação, valor γ_0 . Esta característica de operação para o conversor inversor é normalmente chamada de operação em controle de margem de comutação mínima, onde o ângulo de disparo é determinado por um limite α máximo. O controle da tensão CC é então obtido usando

controle de comutador transformador conversor.

[0056] Outro esquema de operação para o inversor é usar uma função de controle de realimentação com controle de tensão CC constante. Deste modo, a tensão CC é controlada em um dado valor de referência. A função de controle de tensão dá uma ordem α que fica controlando o ângulo de disparo máximo α do controlador de corrente do inversor. Neste caso, em estado estável de operação o controlador de corrente do inversor é normalmente forçado para o seu limite máximo pela margem de corrente, que resulta no controlador de tensão estando em vigor.

[0057] Em um conversor clássico o consumo de energia reativa da ponte de válvula e transformador conversor ficam na ordem de 0,45 a 0,55 pu com base na energia transmitida. Esta energia reativa é fornecida usualmente por compensação de desvio.

[0058] Em um conversor CCC típico o desvio requerido é de aproximadamente 1/4 até 1/2 do que é necessário para um conversor HVDC clássico. Esta necessidade considera o consumo de energia reativa no conversor, no transformador conversor e a energia reativa gerada pelo capacitor de comutação, que são calculados como os tempos de reatância do quadrado da corrente fundamental.

[0059] Como já mencionado, quando operando como um inversor clássico, o conversor pode ser operado na menor margem de comutação, o valor γ_0 . Esta margem de comutação é selecionada de tal forma que o conversor possa operar com consumo reduzido de energia reativa e risco reduzido de falhas de comutação. Entretanto, a margem de comutação constante não resulta em características de impedância negativa como indicado na figura 2. Se, entretanto, o inversor é controlado para manter um ângulo de disparo constante, α , uma característica de impedância ligeiramente positiva é obtida dando desempenho mais estável independentemente do retificador. Para um

conversor clássico, entretanto não é possível manter ângulo de disparo constante em níveis crescentes de corrente contínua. Nestas condições é acionado um controle de disparo protetor que resulta em operação em valor γ_{min} , que é a margem de comutação mínima para evitar falha de comutação.

[0060] Entretanto, a margem de comutação de um conversor CCC aumenta com o aumento da corrente contínua. Quando considerando o efeito da impedância do sistema CA nas características de impedância do inversor, um sistema CA fraco resulta em uma contribuição de impedância negativa. Para um conversor clássico com controle de margem de comutação constante, isto resulta em uma U_{cc} / I_{cc} característica ainda mais negativa como indicado na figura 4, que mostra uma comparação de uma U_{cc} / I_{cc} característica para um conversor clássico e um CCC. A U_{cc} / I_{cc} característica correspondente para um caso de controle de margem de comutação constante resulta em menos sensibilidade à impedância do sistema CA como mostrado na figura 4 como uma inclinação de U_{cc} / I_{cc} quase plana, indicada por uma linha fina. Isto fornece estabilidade melhorada.

[0061] A estabilidade de um inversor conectado a um sistema CA pode ser analisada usando uma Curva de Potência Máxima (MPC). A MPC mostra a transferência de potência ativa para o sistema CA modelado com uma fonte infinita e uma impedância de curto-circuito, para um inversor, operando em controle de margem de comutação mínima.

[0062] A MPC demonstra a resposta do sistema quando muda dinamicamente a corrente contínua, I_{cc} , a partir do ponto de operação nominal. Apenas a resposta dinâmica inicial é modelada o que indica que nenhuma ação a partir do controle de tensão sistema CA é incluído.

[0063] Na figura 5 as curvas MPC são dadas para um sistema com a razão de Curto-Circuito igual a 2, ($SCR = 2$). Aqui a figura 5A se refere a um HVDC clássico e a figura 5B se refere a um HVDC CCC.

[0064] Quando usando CCC, um aumento na corrente contínua resultará em uma contribuição de tensão de comutação a partir dos capacitores de comutação, o que estende o intervalo de ângulo de disparo o que resulta em consumo reduzido de energia reativa. Este é o oposto do comportamento de um HVDC clássico onde um aumento de corrente contínua requer um ângulo de disparo reduzido a fim de manter uma margem de comutação suficiente, o que provoca o aumento do consumo de energia reativa. O resultado das características de energia CCC é que a margem para o ponto de transferência de energia, no MPC, é significativamente melhorado, resultando em melhor estabilidade.

[0065] O MPC para conversor clássico indica que o limite de estabilidade é alcançado em corrente de 1 pu, em um $SCR = 2$. Foi descoberto que o ponto crítico de estabilidade correspondente para CCC é logo abaixo de $SCR=1$. Consequentemente, usando CCC, pode ser obtida uma operação de inversor mais estável para condições de sistema CA mais fracas do que é possível na prática para um HVDC clássico.

[0066] A figura 6 mostra esquematicamente um sistema de transmissão de energia de corrente contínua, que de acordo com uma variação da invenção é um sistema HVDC 10 que é conectado em uma extremidade a um primeiro sistema CA 12 através de um primeiro transformador T1 e em uma segunda extremidade a um segundo sistema CA 14 através de um segundo transformador T2.

[0067] O sistema HVDC 10 tem um primeiro conversor 16, aqui um conversor retificador, conecta a primeira extremidade do sistema HVDC a um primeiro transformador T1 através de um capacitor de

comutação CA. Este primeiro transformador T1 é conectado a um barramento de tensão CA 11 do primeiro sistema CA 12. Também existe um segundo conversor 18, aqui um conversor inversor, na segunda extremidade do sistema HVDC 10 conectado a um segundo transformador T2 através de um segundo capacitor de comutação CB. O segundo transformador T2 é conectado adicionalmente a um barramento de tensão CA 13 do segundo sistema CA 14. O segundo conversor 18 aqui também é um dispositivo inversor de acordo com a invenção. Estes dois conversores 16 e 18 são por sua vez conectados um ao outro através de uma linha de transmissão de energia CC 20, ou seja, uma ligação de transmissão HVDC. A ligação de transmissão HVDC pode ser fornecida de várias formas. No caso em que a mesma é fornecida para transmissão recíproca entre dois sistemas CA, então a mesma pode apenas incluir reatores reguladores. Se é desejada transmissão por longas distâncias a ligação pode ser fornecida através de uma combinação de linhas de transmissão de sobrecarga e reatores reguladores (linha de transmissão HVDC) ou uma combinação de cabos subterrâneos e reatores reguladores (cabo de transmissão HVDC). Finalmente na figura 6 existe uma primeira unidade de controle 22 para controlar o primeiro conversor 16 e uma segunda unidade de controle 24 para controlar o segundo conversor 18. Em relação à segunda unidade de controle 24 também existe um elemento de controle de Tensão e Cálculo de ângulo de Referência (VARC) 26. Como alternativa este elemento pode ser completamente omitido. O elemento 26 é usado em controle tradicional e fornece referências de entrada para a segunda unidade de controle 24 que coordena a tensão CC, ângulo de extinção γ e ângulo de disparo α no segundo conversor 16. Na presente invenção o elemento 26 ainda é usado, mas as referências são deslocadas de modo que é fornecido um novo percurso de controle como uma função principal de controle

para a operação do conversor 26. É por isto que este elemento 26 é mostrado como uma caixa tracejada. A segunda unidade de controle 24, além disso, forma um dispositivo de controle de acordo com a invenção.

[0068] O segundo conversor 18, que é um dispositivo inversor de acordo com a invenção, inclui uma seção de conversão de tensão, que pode ser fornecida através de uma ponte de válvula usando elementos interruptores do tipo de girar, como tiristores como mostrado na figura 3.

[0069] O primeiro e segundo conversores 16 e 18 são aqui conversores CCC. No caso de conversores clássicos, ou seja, em vez disso devem ser usados conversores de linha comutada convencionais, os capacitores de comutação CA e CB devem ser omitidos.

[0070] Agora, é descrito o princípio de controle típico usado na ligação de transmissão HVDC.

[0071] Como mencionado previamente, em geral o controle de corrente de uma ligação de transmissão HVDC é para ser manuseado pelo retificador, ou seja, o primeiro conversor 16.

[0072] Um conversor inversor clássico executa normalmente o controle de tensão. A este respeito o mesmo normalmente opera em um ângulo de extinção mínimo permitido γ para uma comutação segura. No caso de um inversor CCC é usado um princípio similar, exceto pelo fato de que a contribuição de tensão de comutação dos capacitores é levada em conta. Esta contribuição estende o intervalo de ângulo de disparo de operação. Neste caso o mesmo é denotado por uma operação de conversor CCC a um mínimo permitido γ' , ou seja, a um ângulo de extinção mínimo permitido. Deve ser observado que a margem de comutação ou ângulo de extinção γ' corresponde ao ângulo entre a corrente de válvula zero (fim de sobreposição) e a

tensão de válvula que cruza zero.

[0073] Tanto para um conversor clássico como para um conversor inversor CCC, a operação normal de controle de tensão CC é executada por um comutador de carga transformador conversor, que determina o valor de referência para a margem de comutação.

[0074] A característica de operação alternativa para o inversor é operar mantendo um ângulo de disparo constante, α que tem estabilidade de sinal baixa melhorada do sistema de controle de corrente no retificador.

[0075] Outra alternativa para a operação do inversor que tem sido mencionada é controlar a tensão CC. A referência de comutação é determinada com base em sistema de controle de realimentação lento tendo a tensão CC à entrada para o controlador. Neste caso o sistema controlador de tensão tem um tempo de resposta na ordem de 100 a 200 ms.

[0076] A presente invenção é direcionada para fornecer uma nova estratégia de controle para a operação do conversor inversor do sistema HVDC 10, ou seja, do segundo conversor 18 na figura 6. Esta estratégia de controle está de acordo com a presente invenção para operar o inversor emulando um conversor de fonte de tensão e controlando a tensão CA do barramento do conversor. Isto significa que a estratégia de controle da presente invenção é dirigida para controlar a Tensão CA na conexão ao segundo sistema CA na figura 6, ou seja, no barramento 13.

[0077] O esquema de controle para o inversor de acordo com a invenção pode incluir os seguintes laços de controle:

- Um laço de controle principal que fornece tensão CA constante para a operação do inversor. O dispositivo de controle usa a tensão CA medida no barramento do filtro, ou seja, a tensão na interface no segundo sistema CA;

- Transitoriamente, uma função de controle de corrente CC pode ser selecionada (normalmente o retificador controla a corrente CC, mas durante transições tais como perturbações da rede CA conectada, a função de controle de corrente CC no inversor pode ser selecionada para recuperar a ligação de transmissão HVDC da falha);

- A operação transitória do conversor inversor também pode ser feita com margem de comutação constante, quando a margem de comutação calculada é menor do que uma referência mínima, para evitar falha de comutação;

- Controle PLL usado para sincronizar o oscilador de laço de bloqueio de fase interna com o sistema CA; e

- Cálculo de tensão CA através do capacitor em série.

[0078] Deve ser observado que o esquema de controle de acordo com a invenção é particularmente adequado com o conversor CCC considerando que o segundo capacitor de comutação fornece uma contribuição de tensão para a tensão de comutação, o que proporciona um intervalo de operação de ângulo de disparo estendido. Quando dimensionado adequadamente o segundo capacitor de comutação o mesmo permite que o conversor gere ou absorva energia reativa do segundo sistema CA conectado, tornando possível controlar a tensão CA no barramento de comutação e, portanto, permitir que o controle emule um conversor de fonte de tensão que pode tanto adicionar como remover energia reativa para o segundo sistema CA.

[0079] A funcionalidade do sistema de controle será primeiro discutida com referência a Figura 7, que mostra um esquema em blocos de vários elementos de controle na segunda unidade de controle 24 na figura 6, ou seja, no dispositivo de controle da presente invenção.

[0080] Na figura 7 existe uma unidade de ordem de corrente dependente de tensão (VDCOL) 28 que recebe uma tensão CC

medida UDC da linha de energia CC. Esta unidade VDCOL 28 por sua vez é conectada a uma primeira unidade de combinação 30, primeira unidade de combinação 30 esta que também recebe a corrente CC medida CC IDc e uma margem de corrente ΔI_0 . A primeira unidade de combinação 30 por sua vez é conectada a uma entrada de sinal de um amplificador controlador de corrente CC (CCA) 32, que é provido de dois terminais de limitação de saída e um terminal de saída. Os terminais de limitação de saída são aqui um terminal de limitação de saída mínima min lim e um terminal de limitação de saída máxima max lim. O terminal de saída da unidade CCA 32 é conectado a uma unidade de Controle do Disparo de Conversor (CFC) 34, que fornece um sinal de controle α ou ângulo de disparo para o segundo conversor ou de preferência para as válvulas conversoras do segundo conversor.

[0081] Além disso, existe aqui um controlador de tensão CA 36 (mostrado como uma caixa tracejada), que inclui um elemento de controle de PI 40 que recebe medições de tensão de barramento CA UAC e um elemento de controle de ganhos 38 que recebe dados de condição da rede 10. O controlador de tensão CA 36 é conectado a um primeiro terminal de entrada de uma segunda unidade de combinação 42, aqui na forma de um bloco de seleção de mínimo.

[0082] Dinamicamente o elemento de controle de PI 40 do controlador de tensão CA 36 tem uma ramificação proporcional em paralelo com uma ramificação de controle de integração.

[0083] O elemento de controle de ganhos 38 pode ser importante para obter uma assistência de estabilidade de tensão correta quando conectado a um sistema muito fraco. Em um sistema CA fraco conectado é requerido um esquema de controle ligado para o ângulo de disparos dos conversores, e, portanto, é possível obter uma resposta rápida na manutenção da tensão CA controlada.

[0084] O ganho usado nas ramificações de controle ramificações

pode aqui, além disso, ser controlado pelo elemento de controle de ganhos 38 do controlador de tensão CA 36 baseado nas condições da rede IO do barramento CA 13, onde o ganho é ligado no caso de o sistema ser fraco e relaxado se o sistema é forte. As condições da rede podem aqui ser obtidas através de sinais de supervisão do sistema de energia CA ou através de uma técnica de controle adaptativa que mede a força da rede CA.

[0085] Na figura também existe um controlador de α max 44 (controlador de ângulo máximo de disparo) (mostrado com uma caixa tracejada), controlador este que inclui um primeiro elemento de cálculo de α max 46 que recebe dados de entrada na forma de UdIO, a corrente CC ICC na linha de transmissão HVDC e uma referência de margem de comutação γ_{ref} . O controlador de α max também inclui um segundo elemento de cálculo de α max 48, que recebe a tensão UdIO e as medições de corrente CC ICC. O primeiro e segundo elementos de cálculo de α max 46 e 48 são ambos conectados a uma primeira unidade de soma 50, que por sua vez é conectada ao segundo terminal de entrada da segunda unidade de combinação 42. A segunda unidade de combinação 42 finalmente tem uma saída, que é conectada a um terminal de limitação de saída máxima max lim da unidade CCA 32. O controlador de α max 44 também pode incluir um elemento de determinação de margem de comutação, que pode ser fornecido como uma parte do, por exemplo, um dos elementos de cálculo de α max.

[0086] A função de controle básica do inversor é o sistema de circuito fechado para o controle de tensão CA e controle de corrente contínua que inclui:

- O controle de tensão CA
- O amplificador de controle de corrente CC (CCA) e
- O controle de disparo do conversor (CFC)

[0087] Dentro deste circuito existe um limitador de ordem de corrente, que inclui o limitador de ordem de corrente dependente de tensão (VDCOL) 28.

[0088] A unidade de controle de disparo de conversor (CFC) 34 gera os pulsos de controle CC que são aplicados ao segundo conversor. Esta unidade inclui uma função que determina os limites mínimo e máximo de ângulo de disparo e uma função que determina uma margem constante de controle de comutação.

[0089] A unidade CFC 34 inclui um oscilador de circuito de fase bloqueado sincronizado à tensão de comutação através de um circuito de realimentação. O controlador 34 é otimizado para mitigar a influência das trocas de fase rápidas e perturbações nas formas de onda de tensão quando detectar os cruzamentos de zero da tensão de comutação para gerar os pulsos de controle que correspondem à ordem de disparo dos controladores.

[0090] Outra função que pode ser incluída na unidade CFC 34 é o controle de inversor no controle de margem de comutação. Na operação do inversor o ângulo de disparo α nunca deve exceder o valor de α máximo que corresponde ao ângulo de extinção mínimo permitido γ para comutação segura. Este valor de margem de comutação segura, γ_0 , é definido como a área remanescente tensão / tempo sob o semicírculo da tensão de comutação da extremidade de sobreposição até a extremidade de tensão de comutação. A área de tensão / tempo necessária é diretamente relacionada à reatância de comutação do transformador conversor.

[0091] A unidade CCA 32 recebe um valor de referência para a corrente contínua. A ordem de corrente é comparada com um sinal de resposta de corrente e o sinal de saída, a ordem de ângulo de disparo, α ordem, é entregue para o sistema de controle de disparo (CFC).

[0092] A unidade CCA 32 recebe o sinal da primeira unidade de

combinação 30, que forma uma junção de soma, onde a diferença entre a ordem de corrente e resposta de corrente é formada. Nesta junção de soma a ordem de margem de corrente ΔI_0 é somada na operação do inversor. O modo normal convencional é que o retificador controla a corrente CC, mas o inversor pode assumir o controle da corrente CC do retificador e isto é alcançado em ordem de corrente reduzida, com margem de corrente ΔI_0 . Neste caso o controle da corrente CC é feito variando α , o que significa que os sinais na unidade CCA 32 estão dentro das limitações.

[0093] Dinamicamente a unidade CCA 32 pode ter uma ramificação proporcional em paralelo com uma ramificação de integração. O integrador na unidade CCA tem uma limitação interna máxima e mínima. A limitação máxima depende do modo e condições de operação do conversor. A geração de sinal de limitação máxima é produzida por funções externas à unidade CCA 32, e aqui pelo controlador de tensão CA 36 e / ou o controlador de α max 44. Este sinal é obtido a partir da segunda unidade de combinação 42, que em uma primeira modalidade das invenções seleciona o sinal que tem o menor valor dos sinais fornecido pelo controlador de tensão CA 36 e controlador de α max 44 para ser usado como ângulo de disparo máximo, que são descritos abaixo.

[0094] O controlador de tensão CA 36 é o elemento central para a operação de acordo com a invenção. Sob operação normal, o conversor inversor 18 controlará a tensão CA no barramento do filtro 13, enquanto injeta a energia ativa que é controlada pelos conversores retificadores 16.

[0095] Quando o conversor é conectado a um sistema CA forte quando comparado à classificação do conversor, os controles podem precisar ser relaxados, caso contrário pode ser observada instabilidade de controle. Isto é devido ao fato de que o conversor não

pode executar a mesma compensação dinâmica quando conectado a um sistema CA forte. Isto deve requerer uma classificação consideravelmente mais alta do conversor para executar a mesma compensação dinâmica. Embora o conversor não seja capaz de ter um controle da tensão CA ligado quando conectado a um sistema CA forte, isto em princípio não é um problema. O sistema CA conectado é naturalmente estável e é capaz de receber a energia ativa dos conversores sem suporte de tensão e sem risco de colapso de tensão.

[0096] O ajuste dos ganhos de controle pode ser feito pelo IO de sinais de supervisão (condições de rede) obtidos a partir da rede CA conectada, ou por uma técnica de controle adaptativo que mede a força da rede.

[0097] Controlando a tensão CA o conversor pode fornecer suporte de tensão e evitar colapso de tensão, melhorar a estabilidade transitória e, se necessário, amortecer oscilações de energia (com uma ajuda de um circuito de controle adicional sintonizado na frequência de oscilação apropriada).

[0098] A U_{cc} / I_{cc} característica apresentada na figura 4 mostra uma característica de segmento de inclinação negativa quando o inversor está operando com margem de comutação constante. Para melhorar a estabilidade de sinal baixa, pode ser obtida uma inclinação positiva por uma limitação máxima dependente de corrente do integrador na unidade CCA 32. (Deve ser observado que em operação normal a ordem de margem de corrente no inversor, ΔI_o , força o integrador da unidade CCA contra esta limitação). A saída do controlador de α_{max} 44 é o ângulo de disparo calculado para uma dada referência de margem de comutação, γ_{ref} , e condições de operação obtidas a partir de medição de I_{DC} e U_{dio} . O sistema de controle tem um tempo de resposta no intervalo de 100 a 150 ms.

[0099] No primeiro elemento de cálculo de α_{max} 46 do

controlador de $\alpha_{\max}$ 44 é determinada uma primeira contribuição de controle $\alpha_{\max_CALC}$ com base na margem de comutação γ_{ref} . Esta primeira contribuição de controle $\alpha_{\max_CALC}$ pode ser composta de duas partes. Uma primeira parte $\alpha_{\max} 1$ é obtida a partir da expressão

$$\cos\alpha - \cos(\alpha + \mu) = 2d_{sN} \frac{I_{DC}}{I_{dCN}} \frac{U_{di0N}}{U_{di0}} \quad (4)$$

[00100] Para um dado γ_{ref} , então a primeira parte é obtida como

$$\cos\alpha_{\max 1} = 2d_{sN} \frac{I_v}{I_{dCN}} \cdot \frac{U_{di0N}}{U_{di0}} - \cos\gamma'_{ref} \quad (5)$$

[00101] Uma segunda parte da primeira contribuição de controle pode ser usada para atingir a inclinação positiva aumentada. A mesma é calculada como o produto de uma constante K_1 e a diferença entre a ordem de corrente e a resposta de corrente

$$\frac{\Delta U_{di0 \max 2}}{U_{di0}} = K_1 \frac{(I_o - I_{dc})}{I_{dCN}} \quad (6)$$

[00102] Em um conversor CCC, quando operando como inversor, o tempo de recuperação de tiristor mínimo, margem de comutação, também tem que ser alcançado. O tempo de recuperação de tiristor é definido como o tempo entre o tiristor desligar, o tempo do estabelecimento da tensão inversa, e o cruzamento de zero da tensão da válvula. Considerando que o conceito de controle é baseado em não ter qualquer medição direta da tensão de comutação ou tensão de válvula, a margem de comutação então tem que ser predita, resolvendo equações do circuito principal. A segunda contribuição do controlador de $\alpha_{\max}$ 44 é um limite de ângulo de disparo que corresponde a uma margem de comutação mínima que é calculada no segundo elemento de cálculo de $\alpha_{\max}$ 48. Esta segunda contribuição do controle é descrita posteriormente (ver equação 10).

[00103] Aqui a primeira e segunda contribuições de controle juntas fornecem uma margem de comutação com base no fator de controle $\alpha_{\max_Y'}$.

[00104] Assumindo que sob condições de operação normais o conversor inversor é operado através do controlador de tensão CA, o controlador de α max 44 é deslocado determinando $\gamma_{ref} < \gamma$, onde γ é a margem de comutação de operação obtida a partir do controlador de tensão CA.

[00105] A unidade VDCOL 28 reduz a ordem de corrente como uma função de diminuição da tensão contínua. Esta é incluída por razão de estabilidade do sistema em situações críticas e para melhoria da recuperação após perturbações.

[00106] A função de controle básica da invenção é mudar o ângulo de disparo com base na tensão CA medida a fim de gerar ou absorver energia reativa e a fim de controlar a tensão CA no barramento de tensão CA. Na primeira modalidade da invenção isto é feito usando o controle do conversor para aumentar ou diminuir o atraso do ângulo máximo de disparo α_{MAX} , ou seja, fornecer um limite máximo variável da unidade CCA 32.

[00107] Como pode ser entendido a partir do que foi descrito acima o dispositivo de controle da invenção recebe medições de tensão UCA, ou seja, medições da tensão no barramento de tensão CA 13, e controla o dispositivo inversor 18 para fornecer uma tensão CA constante no barramento.

[00108] Isto significa que, além disso, o elemento de controle de PI 40 do controlador de tensão CA 36 determina pelo menos uma parte de um fator de controle α_{MAX_UCA} que é dependente das tensões CA medidas UCA. Deste fator de controle baseado em tensão CA é obtido um atraso de ângulo de disparo máximo variável α_{MAX} que é usado para variar o intervalo operacional da unidade CCA 32, ou seja, o intervalo dentro do qual seu sinal de saída aparece. O atraso de ângulo máximo de disparo α_{MAX} é, portanto, variável e dependente da tensão CA.

[00109] Isto, portanto influencia a ordem de ângulo de disparo fornecida pela unidade CCA 32, que por sua vez fornece uma variação a correspondente do ângulo de disparo. Desta forma as válvulas conversoras são controladas para gerar energia reativa para ou receber energia reativa do barramento de tensão CA.

[00110] A operação do dispositivo de controle pode ser sumarizada nas seguintes etapas de método, que são mostradas em um fluxograma na figura 8.

[00111] O dispositivo de controle recebe medições de tensão UAC, ou seja, medições de uma tensão no barramento de tensão CA 13, etapa 50, no controlador de tensão CA 36, onde é determinado um fator de controle α_{MAX_UAC} que é dependente das tensões CA medidas UAC, etapa 52. Este fator de controle α_{MAX_UAC} dependente de tensão CA pode como foi descrito acima ser obtido através da aplicação da tensão medida em uma ramificação de controle proporcional e em uma ramificação de controle de integração em paralelo com a ramificação de controle proporcional. Aqui também é possível ajustar o ganho usado nas ramificações de controle com base nas condições da rede do barramento de tensão CA. O fator de controle α_{MAX_UAC} é então usado para obter um atraso de ângulo máximo de disparo variável α_{MAX} .

[00112] A margem de comutação com base no fator de controle $\alpha_{MAX_y'}$, também é determinada pelo controlador α_{max} 44 com base na margem de comutação y' , etapa 56. Este ângulo de margem de comutação y' é um valor mínimo pré-selecionado que garante comutação da corrente entre válvulas sem o risco de falhas de comutação. Aqui o fator de controle $\alpha_{max_y'}$ baseado em margem de comutação pode ser composto das primeira e segunda contribuições de controle α_{MAX_CALC} e α_{MAX_CCC} mencionadas acima, onde a primeira contribuição de controle pode incluir as primeira e segunda

partes mencionadas acima. Com base no fator de controle α_{MAX_UCA} de pendente de tensão CA e no fator de controle α_{MAX_Y} baseado na margem de comutação, o ângulo máximo de disparo variável α_{MAX} é então determinado pela segunda unidade de combinação 42. Quando ambos os fatores de controle são usados, estes podem ser combinados, etapa 58, para obter o atraso de disparo máximo variável α_{MAX} . Na primeira modalidade da invenção a combinação é executada através da seleção de um dos dois fatores para fornecer o atraso máximo de disparo e neste caso seleciona o fator que tem o menor valor, ou seja, o fator que fornece o menor atraso de disparo máximo. O atraso de ângulo de disparo máximo variável α_{MAX} é então usado para variar o intervalo de operação da unidade CCA 32, ou seja, portanto, o intervalo dentro do qual seus sinais de saída aparecem não é fixo. O atraso de ângulo máximo de disparo α_{MAX} é, portanto, variável e dependente da tensão CA, a qual influencia a ordem de ângulo de disparo fornecida pela unidade CCA 32. Isto significa que a unidade CCA 32 determina a ordem de ângulo de disparo α_{ordem} , etapa 60, e fornece a mesma para a unidade CFC 34, que por sua vez fornece uma variação correspondente do ângulo de disparo CC, etapa 62, e usa este ângulo para controlar as válvulas conversoras, etapa 64.

[00113] A ordem do ângulo de disparo também pode de acordo com a invenção ser determinada com base no controle de corrente contínua, onde a magnitude da ordem do ângulo de disparo é limitada pela margem de comutação determinada.

[00114] Outra forma para descrever a presente invenção é como segue:

[00115] No esquema de controle convencional o ângulo de disparo para o conversor inversor é determinado através da predição do instante de disparo assumindo que os conversores estão operando

com ângulo de extinção constante (γ constante, γ' ref).

[00116] Para determinar o ângulo de disparo que corresponde a um γ constante = γ' ref (note-se que a margem de comutação deve ser igual ou maior do que a condição de tempo de recuperação do tiristor), usando as seguintes equações do sistema com respeito à α e γ' têm que ser resolvidas:

$$\left. \begin{aligned} u_{\gamma}(\mu + \gamma', u_{dio}, i_d, \alpha, \mu) &= 0 \\ i_1(\mu, u_{dio}, i_d, \alpha) & \end{aligned} \right\} \Rightarrow \alpha = \alpha_{\gamma}. \quad (7)$$

[00117] Este é um conjunto de equações não lineares e a solução pode ser obtida numericamente. Entretanto uma boa precisão pode ser obtida diretamente quando se usa a seguinte equação para prever o ângulo de disparo:

$$\begin{aligned} \alpha_{\gamma=\gamma'_{ref}} &= 180^\circ - \arccos \left[\cos(\gamma'_{ref}) - 2d_{xl} \frac{i_d}{U_{dio}} \right] + \\ & k_0 + k_1 d_{xc} \frac{i_d}{U_{dio}} + k_2 \left(d_{xc} \frac{i_d}{U_{dio}} \right)^2 + \\ & k_{gp0} + k_{gp1} (\gamma'_{ref} - \gamma'_{base}) d_{xc} \frac{i_d}{U_{dio}} + k_{gp2} \left[(\gamma'_{ref} - \gamma'_{base}) d_{xc} \frac{i_d}{U_{dio}} \right]^2 \end{aligned} \quad (8)$$

[00118] Os coeficientes k_0 , k_1 , k_2 , k_{gp0} , k_{gp1} , k_{gp2} são determinados em um valor base de margem de comutação $\gamma'_{ref} = \gamma'_{base}$. O valor mínimo de margem de comutação é usado para o valor base. Em uma variação da invenção $\gamma'_{base} = 15^\circ$.

[00119] Aqui a express $\arccos \left[\cos(\gamma'_{ref}) - 2d_{xl} \frac{i_d}{U_{dio}} \right]$ corresponde à primeira parte da primeira contribuição de controle pelo primeiro elemento de cálculo de α_{MAX} do controlador de α_{MAX} descrito acima (equação 5), enquanto a expressão

$$\begin{aligned} & k_0 + k_1 d_{xc} \frac{i_d}{U_{dio}} + k_2 \left(d_{xc} \frac{i_d}{U_{dio}} \right)^2 + k_{gp0} + \\ & k_{gp1} (\gamma'_{ref} - \gamma'_{base}) d_{xc} \frac{i_d}{U_{dio}} + k_{gp2} \left[(\gamma'_{ref} - \gamma'_{base}) d_{xc} \frac{i_d}{U_{dio}} \right]^2 \end{aligned}$$

[00120] corresponde à segunda contribuição de controle fornecida pelo segundo elemento de cálculo de α_{MAX} 48.

[00121] Na segunda modalidade da invenção o circuito de controle loop do controlador é basicamente um regulador de PI comum que tem a tensão CA medida no barramento do filtro de conversor como uma variável de controle principal. O ângulo de disparo do inversor é então determinado de

$$\alpha = 180^\circ - \alpha_{MAX_UAC} + d\alpha_{MAX_CCC} \quad (9)$$

onde

$$d\alpha_{MAX_CCC} = k_0 + k_1 I_{xc} \frac{i_d}{U_{dio}} + k_2 \left(I_{xc} \frac{i_d}{U_{dio}} \right)^2 + k_{pp1} + k_{gp1} (Y'_{CULr} - Y'_{CULr}) I_{xc} \frac{i_d}{U_{dio}} + k_{pp2} \left[(Y'_{CULr} - Y'_{CULr}) I_{xc} \frac{i_d}{U_{dio}} \right]^2 \quad (10)$$

[00122] que também corresponde à segunda contribuição do segundo elemento de cálculo de α_{max} na primeira modalidade. Aqui Y'_{Calc} é o valor de extinção real, cuja determinação será descrita posteriormente.

[00123] A figura 9 mostra uma variação do elemento de controle de PI 40 e elemento de controle de ganhos 38 do controlador de tensão CA juntamente com a segunda unidade de combinação 42. O elemento de controle de PI 40 aqui inclui uma quarta unidade de combinação 66, que recebe a tensão medida UCA, compara a mesma com a tensão de referência UCA_REF e fornece a diferença para uma primeira unidade de multiplicação 68. A tensão de referência UAC_REF pode ser determinada pelo operador. O valor da referência pode entretanto ser influenciado pela capacidade do conversor para controlar a tensão CA. O elemento de controle de ganhos 38 também é conectado a esta primeira unidade de multiplicação 68 para ajustar esta diferença de sinal.

[00124] A primeira unidade de multiplicação 68 é, além disso,

conectada à segunda unidade de multiplicação 70 para multiplicar com o elemento de controle proporcional P bem como com a primeira unidade de integração 72. As saídas destas duas últimas unidades 70 e 72 são conectadas a primeira unidade de soma 74, para fornecer as ramificações proporcional paralela e de controle de integração. Uma saída da primeira unidade de soma 74 é conectada a quinta unidade de combinação 76, quinta unidade de combinação 76 esta que recebe a segunda contribuição $d\alpha_{MAX_CCC}$ do controlador de α max e o ângulo de valor de π ou 180 graus e executa a operação de acordo com a equação (9) O resultado desta operação é fornecido para uma sexta unidade de combinação 77, que combina o resultado da operação de acordo com a equação (9) com o resultado das operações de acordo com a equação (8) quando determinada para o menor valor do ângulo de extinção. A segunda unidade de combinação 42 é aqui composta da quinta e sexta unidades de combinação. Nesta modalidade o menor valor é selecionado pela sexta unidade de combinação 77. Considerando que a função baseada na equação (8) prevê o ângulo de disparo associado com uma margem de comutação mínima, por exemplo, 22 graus, isto significa que a operação normal do controlador de tensão CA é alcançada se a margem de comutação excede esta margem de comutação mínima.

[00125] Para calcular a margem de comutação ou ângulo de extinção γ'_{Calc} é usada uma expressão derivada da equação (10). O cálculo é feito considerando que o ângulo de disparo e o ângulo de extinção calculado γ'_{Calc} é a variável a ser determinada. Nesta determinação do ângulo de extinção γ'_{Calc} é usada a seguinte equação.

$$\alpha = 180^\circ - \arccos \left[\cos(\gamma'_{ref} + \Delta\gamma') - 2d_{ref} \frac{I_M}{U_{ref}} \right] + d\alpha_{MAX_CCC} \quad (11)$$

[00126] Para obter uma solução é proposto um procedimento

iterativo. A figura 10 mostra um esquema em blocos de um elemento de determinação de margem de comutação 79, que pode ser fornecido como uma parte de uma unidade de determinação de α max.

[00127] Existe uma segunda unidade de soma 78 que recebe um valor de referência de ângulo de extinção γ'_{ref} e um sinal de diferença de ângulo de extinção $\Delta\gamma'$. A soma destes é fornecida como o ângulo de extinção calculado γ'_{Calc} e também é fornecido como sinal de entrada para uma primeira e segunda unidades de processamento 80 e 82. Na primeira unidade de processamento 80, o valor de $d\alpha_{MAX2}$ é determinado de acordo com a equação (10) e na segunda unidade de processamento 82 é determinada a expressão na equação (11) exceto pelo valor de $d\alpha_{MAX_CCC}$. As duas unidades de processamento 80 e 82 são então conectadas a uma terceira unidade de soma 84 que executa uma soma e a soma resultante, que é a soma de acordo com a expressão na equação (11), é fornecida para uma segunda unidade de integração 86, que integra a soma para obter o sinal de diferença de ângulo de extinção $\Delta\gamma'$, que é fornecido para a segunda unidade de soma 78.

[00128] A segunda unidade de integração 86 aqui reduz o erro de estado estável para a variável $d\alpha_{MAX_CCC}$ quando soma a contribuição $\Delta\gamma'$ ao valor de referência $\Delta\gamma'_{ref}$, valor de referência que pode, por exemplo, ser determinado para 22 graus. Para controlar a tensão CA do sistema CA conectado o conversor HVDC pode, além disso, usar sua capacidade de classificação interna da geração máxima e absorção máxima de energia reativa.

[00129] A capacidade máxima de geração de energia reativa pode ser determinada pela operação no ângulo mínimo de extinção. Para reduzir o risco de falhas de comutação frequentes este parâmetro pode ser estabelecido em 18 graus ou maior. O valor é escolhido dependendo das características do sistema de rede conectado.

[00130] A capacidade máxima de absorção de energia reativa do conversor é uma função da energia transmitida e nível de tensão CA do sistema. Os fatores de limitação são: as tensões nas válvulas conversoras quando operam em ângulos muito grandes e nível da tensão através das válvulas.

[00131] É possível que existam diversos conversores atuando como inversores e sendo conectados ao segundo sistema CA. Neste caso os mesmos podem ter esquemas de controle idênticos. Estes inversores podem, portanto, estar controlando a mesma tensão de barramento CA.

[00132] Para evitar a instabilidade de controle entre os conversores pode ser introduzido um ajuste no controle. O ajuste atua no valor de referência U_{ac_REF} no controlador de tensão CA. Uma implementação deste tipo de controle de ajuste pode usar o valor real do ângulo de extinção (γ'_{Calc}), os valores de ângulo de extinção máximo e mínimo, γ'_{MAX} e γ'_0 respectivamente, e um ganho K_{droop} . Tipicamente K_{droop} é configurado para 20 unidades. A seguinte expressão pode ser usada:

$$\Delta U_{ac_ref_droop} = \frac{\gamma'_{Calc} - \frac{\gamma'_{MAX} + \gamma'_0}{2}}{\frac{\gamma'_{MAX} - \gamma'_0}{2}} \cdot \frac{1}{K_{droop}} \quad (12)$$

[00133] Um esquema em blocos esboçando uma solução de hardware para executar este controle de ajuste de acordo com a equação (12) é mostrado esquematicamente na figura 11. A figura 11, portanto mostra uma unidade de controle de ajuste 87.

[00134] Existe aqui uma quarta unidade de soma 88 que tem duas entradas nas quais a mesma recebe o ângulo de extinção máximo γ'_{MAX} e o ângulo de extinção mínimo γ'_0 (em alguns casos 22 graus). Em paralelo com esta unidade de soma existe uma sétima unidade de combinação 90 que recebe os mesmos dois sinais. A quarta unidade de soma 88 forma uma soma dos dois ângulos e a sétima unidade de

combinação 90 forma uma diferença dos dois ângulos. A saída da quarta unidade de soma 88 é conectada à entrada de uma primeira unidade de divisão 92, enquanto a saída da sétima unidade de combinação 90 é conectada à entrada de uma segunda unidade de divisão 94. Estas duas unidades de divisão 92 e 94 dividem a soma e a diferença, respectivamente, por dois. A primeira unidade de divisão 92 também é conectada a uma oitava unidade de combinação 96, que também recebe o ângulo de extinção real γ'_{Calc} e combina estes. Neste caso a combinação é executada através da subtração da contribuição fornecida pela primeira unidade de divisão 92 a partir do ângulo de extinção real γ'_{Calc} . A oitava unidade de combinação 96 fornece o resultado para uma terceira unidade de divisão 98, terceira unidade de divisão 98 esta que também recebe o resultado da divisão feita pela segunda unidade de divisão 94. A terceira unidade de divisão 98 divide o resultado da combinação recebido da oitava unidade de combinação 96 pelo resultado da divisão executada pela segunda unidade de divisão 94 e fornece o resultado desta última divisão para uma quarta unidade de divisão 100, que divide os valores que recebe pelo ganho K_{droop} . O resultado desta última divisão é fornecido para uma quinta unidade de soma 102, que soma o resultado da divisão a uma tensão de referência UCA_REF e fornece o resultado desta operação como uma tensão de referência ajustada UCA_REF_DROOP .

[00135] Portanto pode ser visto que as unidades na figura 11 executam a função mostrada na equação (12). Desta forma a unidade de controle de ajuste 87 adapta o fator de controle dependente de tensão CA, aqui através do ajuste da tensão de referência, baseado no ganho de ajuste e nas margens de comutação máxima e mínima.

[00136] É possível que os conversores possam ser operados sob certas condições anormais da rede CA. Para ser capaz de

controlar a tensão de barramento CA isto deve requerer operação do conversor fora da capacidade de absorção de energia reativa estável máxima. Para evitar esta condição é introduzido um circuito adicional no controlador que compara o ângulo de extinção real γ'_{Calc} com o ângulo máximo permitido γ'_{MAX} . Se o ângulo de extinção real excede o valor máximo então a tensão de referência CA para o controlador de tensão CA é relaxada permitindo a operação em diferentes valores determinados pelo operador. Sob esta condição o valor de referência é levado para um valor maior do que o valor determinado pelo operador.

[00137] A implementação desta função pode ser feita de acordo com o diagrama de blocos apresentado na figura 12, que mostra uma unidade de relaxamento de controle de tensão 103. Na figura 12 existe uma nona unidade de combinação 104 que recebe o ângulo de extinção real γ'_{Calc} e ângulo máximo permitido γ'_{MAX} . A nona unidade de combinação 104 então determina a diferença entre os dois. Esta diferença é fornecida para uma terceira unidade de integração 106, que executa integração da diferença entre os ângulos de extinção real e máximo permitido. A diferença integrada é então fornecida da terceira unidade de integração 106 para uma sexta unidade de soma 108, onde a diferença integrada é adicionada a uma tensão de referência ajustada UCA_REF_DROOP e como resultado é obtida uma tensão de referência limitada UCA_REF_LIM . Esta função pode ser implementada como uma alternativa em relação à original, tensão de referência não ajustada UCA_REF .

[00138] Se a tensão de referência CA excede a condição de operação normal máxima, que pode tipicamente ser 1,05 pu, O conversor irá operar fora de seus valores projetados normais. Para evitar isto, pode ser fornecida uma unidade de detecção de desvio de operação, que compara o fator de controle de tensão CA com um limite de condição de operação. A figura 13 mostra esquematicamente

esta unidade de detecção de desvio de operação 109. A unidade de detecção de desvio de operação 109 recebe um valor que representa o fator de controle dependente de tensão CA, aqui exemplificado pela tensão de referência UAC_REF e compara o mesmo com um limite de tensão de operação, aqui como exemplo configurado para 1,05 pu. Se este limite é excedido, a unidade de detecção de desvio de operação 109 envia uma ordem de redução de energia PRO para a primeira unidade de controle para reduzir a corrente na linha de energia 20 até que a tensão tenha alcançado 1,05 pu. Se ocorre uma condição anormal a unidade de detecção de desvio de operação pode desta forma garantir uma redução de energia automática.

[00139] Quando todas as funções de controle são combinadas o esquema de controle total é muito robusto, não apenas em termo de estabilidade de sinal baixa, mas também em termos de desempenho sob condições de falha na rede CA conectada. Isto tem sido verificado considerando diferentes sistemas CA conectados com alto SCR ($SCR > 3$) o baixo SCR ($SCR \approx 0.1$).

[00140] Anteriormente foi mencionado que um conversor clássico, quando operando em margem de comutação constante, valor γ constante, resulta em características estáticas de impedância negativa como indicado na curva 110 na figura 14, figura esta que mostra uma comparação de uma U_{dc} / I_{dc} característica para um conversor clássico, um conversor CCC e um conversor CCC sendo controlado de acordo com os princípios da invenção. Alternativamente, para melhorar a estabilidade de sinal baixa do sistema de controle, os controles podem ser modificados mantendo um ângulo de disparo constante, α , que resulta em impedância característica levemente positiva Com o conversor CCC a margem de comutação aumenta em um aumento da corrente contínua, e, portanto a impedância característica do inversor é melhorada mesmo com operação de

margem de comutação constante, como visto na figura 14, curva 112.

[00141] Agora, assumindo que se o conversor inversor CCC está operando com a tensão CA mantida constante, então é obtida uma impedância característica positiva de inversor como é indicado na figura 14, curva 114. Deve ser observado que com o aumento da corrente CC, a contribuição do capacitor de comutação também aumenta, fornecendo margem de comutação adicional para a válvula. Isto permite um aumento do ângulo de disparo com um aumento de corrente CC, o que permite a manutenção de uma margem de comutação constante. Adicionalmente, como a tensão CA é mantida constante por uma segunda unidade de controle. Ou seja, a unidade de controle da invenção, a margem de comutação pode ser reduzida, o que resulta na característica estática se tornando insensível à impedância do sistema CA.

[00142] Anteriormente também foi mencionado que quando usando CCC, um aumento na corrente contínua resultará em uma contribuição de tensão de comutação a partir dos capacitores de comutação, que estende o intervalo de ângulo de disparo que resulta em um consumo reduzido de energia reativa. O resultado da energia característica de CCC é que a margem para o ponto de pico de transferência de energia, no MPC, é melhorada significativamente, o que resulta em melhor estabilidade quando comparada com um conversor clássico. As curvas típicas MPC para um inversor conversor CCC conectado a um sistema com $SCR = 2$ são mostradas na figura 15, curvas 116, figura esta que mostra curvas MPC para um conversor inversor CCC com controle de margem de comutação constante e para um conversor CCC com controle de tensão CA constante de acordo com a invenção.

[00143] Assumindo que o conversor inversor CCC é agora operado com tensão CA constante, a curva MPC se torna insensível ao sistema

CA conectado, quando a tensão CA é controlada pelo conversor. A resposta do sistema quando mudando dinamicamente a corrente contínua, I_d , do ponto de operação nominal é uma linha reta como indicado na figura 15, curvas 118. Em princípio, o MPC indica não existe limite de estabilidade uma vez que a curva não tem um valor máximo de pico, em qualquer sistema CA conectado mesmo para uma rede passiva ($SCR = 0$).

[00144] O dispositivo de controle da presente invenção pode ser fornecido através do uso de dispositivos discretos. Como uma alternativa o mesmo pode, além disso, ser compreendido que o mesmo pode ser fornecido na forma de um processador com memória de programa anexa que compreende código de programa de computador que executa a funcionalidade de controle desejada quando executado no processador.

[00145] O dispositivo de controle pode, além disso, ser uma parte do conversor inversor.

[00146] O conversor da invenção é com vantagem um conversor CCC. Neste tipo de conversor deve haver pelo menos um capacitor conectado em série entre a seção de conversão de tensão do conversor e o barramento de tensão CA.

[00147] A partir da discussão precedente fica evidente que a presente invenção pode ser variada de várias formas. Consequentemente deve ser compreendido que a presente invenção é para ser limitada apenas pelas concretizações a seguir.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para controlar um dispositivo inversor comutado por capacitor (18) sendo conectado a um barramento de tensão CA (13) de um sistema de energia CA (14) e converter entre energia CC e energia CA, o dispositivo inversor (18) incluindo uma quantidade de válvulas conversoras (V1, V2, V3, V4, V5, V6) em uma ponte de válvula de 6 pulsos e o método caracterizado pelo fato de que compreende as etapas de

receber (50) medições da tensão (U_{CA}) no barramento de tensão CA (13),

aplicar a tensão CA medida em uma ramificação de controle proporcional para obter (52) um fator de controle dependente de tensão CA (α_{MAX_UCA}) que aumenta ou diminui um sinal de limitação máxima (α_{MAX}) a fim de fornecer uma tensão CA constante,

determinar (56) um fator de controle (α_{MAX_Y}) com base na margem de comutação como um ângulo de disparo calculado para uma dada margem de referência de margem de comutação (γ_{ref}), e

combinar (58) o fator de controle dependente de tensão CA e margem de comutação com base no fator de controle através de selecionar o menor do fator de controle baseado em margem de comutação e fator de controle dependente de tensão CA como o sinal de limitação máxima (α_{MAX}), e

controlar o dispositivo inversor (18) para fornecer uma tensão CA constante no barramento baseado nas medições recebidas através de

fornecer o sinal de limitação máxima (α_{MAX}) para um terminal de limitação de saída máxima (max lim) de um amplificador controlador de corrente CC (32) que determina uma ordem de ângulo de disparo baseado em um controle de corrente contínua (28) e sendo forçado contra a limitação máxima, e

controlar (64) o ângulo de disparo (α) das válvulas conversoras usando uma ordem de ângulo de disparo (α_{ordem}) na saída do amplificador de controle de corrente CC para gerar energia reativa para ou absorver energia reativa do barramento de tensão CA (13).

2. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que compreende adicionalmente a etapa de ajustar o fator de controle dependente de tensão CA baseado em um ganho de ajuste (K_{droop}) e margens de comutação máxima e mínima (γ'_{MAX} , γ'_0).

3. Método, de acordo com a reivindicação 1 ou 2, caracterizado pelo fato de que compreende adicionalmente a etapa de comparar o fator de controle dependente de tensão CA ($U_{\text{CA_REF}}$) com um limite de condição de operação e enviar uma ordem de redução de energia (PRO) para uma unidade de controle (22) para um retificador (16) sendo conectado ao inversor através de uma linha de energia CC (20) para reduzir a corrente CC da linha de energia CC no caso de o limite ser excedido.

4. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 3, caracterizado pelo fato de que o fator de controle dependente de tensão CA é usado para obter um atraso de ângulo de disparo máximo variável (α_{MAX}) usado no controle do ângulo de disparo.

5. Dispositivo de controle (24) para controlar um dispositivo inversor (18) comutado por capacitor que compreende uma quantidade de válvulas conversoras (V1, V2, V3, V4, V5, V6) em uma ponte de válvula de 6 pulsos e conectado a um barramento de tensão CA (13) de um sistema de energia CA (14), caracterizado pelo fato de que o dito dispositivo de controle (24) compreende

um controlador de tensão CA (36) que compreende uma ramificação de controle proporcional e configurado para aplicar tensões CA medidas no barramento de tensão CA (13) em uma ramificação de controle proporcional para obter um fator de controle

dependente de tensão CA (α_{MAX_UCA}) que aumenta ou diminui um sinal de limitação máxima (α_{MAX}) a fim de fornecer uma tensão CA constante, sendo que o controle do ângulo de disparo é feito com base no fator de controle dependente de tensão CA e uma margem de comutação (γ'),

um controlador de α max (44) configurado para determinar um fator de controle ($\alpha_{MAX_Y'}$) com base na margem de comutação (γ') como um ângulo de disparo calculado para uma dada margem de referência de comutação (γ_{ref}), e

uma unidade de combinação (42) configurada para combinar o fator de controle dependente de tensão CA e o fator de controle baseado na margem de comutação através de selecionar o menor do fator de controle baseado em margem de comutação e de fator de controle dependente de tensão CA como o sinal de limitação máxima (α_{MAX}), e

um amplificador controlador de corrente (32) conectado à unidade de combinação (42) através de um terminal limitação máxima (max lim), sendo que

a unidade de combinação é adicionalmente configurada para fornecer o sinal de limitação máxima (α_{MAX}) para o terminal de limitação de saída máxima (max lim) do amplificador controlador de corrente CC (32) que determina uma ordem de ângulo de disparo baseado em um controle de corrente contínua (28) e sendo forçado contra a limitação máxima, e

o amplificador de controle de corrente CC é configurado para fornecer uma ordem de ângulo de disparo (α_{ordem}) como uma saída para controlar o ângulo de disparo das válvulas conversoras (V1, V2, V3, V4, V5, V6) do dispositivo inversor (18) para fornecer uma tensão CA constante no barramento e para gerar energia reativa para ou absorver energia reativa do barramento de tensão CA.

6. Dispositivo de controle, de acordo com a reivindicação 5, caracterizado pelo fato de que compreende adicionalmente uma unidade de controle de ajuste (87) configurada para ajustar o fator de controle dependente de tensão CA baseada em um ganho de ajuste (K_{droop}) e margens de comutação máxima e mínima (γ'_{MAX} , γ'_0).

7. Dispositivo de controle, de acordo com a reivindicação 5 ou 6, caracterizado pelo fato de que compreende adicionalmente uma unidade de detecção de desvio de operação (109) configurada para comparar o fator de controle dependente de tensão CA ($U_{\text{CA_REF}}$) com um limite de condição de operação e enviar uma ordem de redução de energia (PRO) para uma unidade de controle (22) para um retificador (16) que está conectado ao dispositivo inversor (18) através de uma linha de energia CC (20) para reduzir a corrente CC da linha de energia CC no caso de o limite ser excedido.

8. Dispositivo inversor (18) comutado por capacitor (18) para conexão a um barramento de tensão CA (13) de um sistema de energia CA (14) e configurado para converter entre energia CC e energia CA, caracterizado pelo fato de que compreende

uma seção de conversão de tensão, e

uma unidade de controle (24) que implementa o dispositivo de controle como definido em qualquer uma das reivindicações 5 a 7.

9. Sistema de transmissão de energia de corrente contínua (10) para conexão a um barramento de tensão CA (13) de um sistema de energia CA (14), caracterizado pelo fato de que compreende um dispositivo inversor (18) comutado por capacitor (18) configurado para converter entre energia CC e energia CA e um dispositivo de controle (24) como definido em qualquer uma das reivindicações 5 a 7.

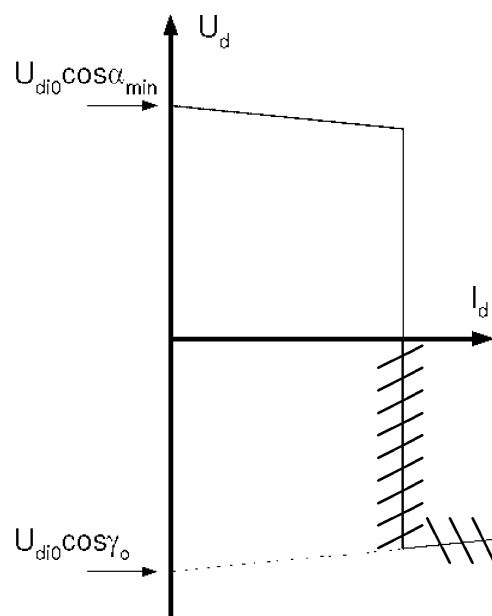


Fig. 1

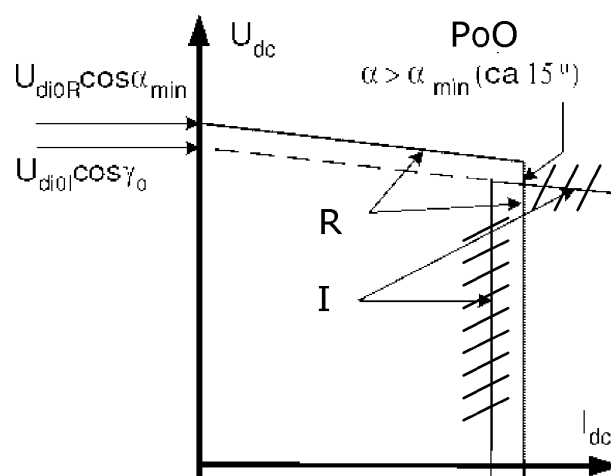


Fig. 2

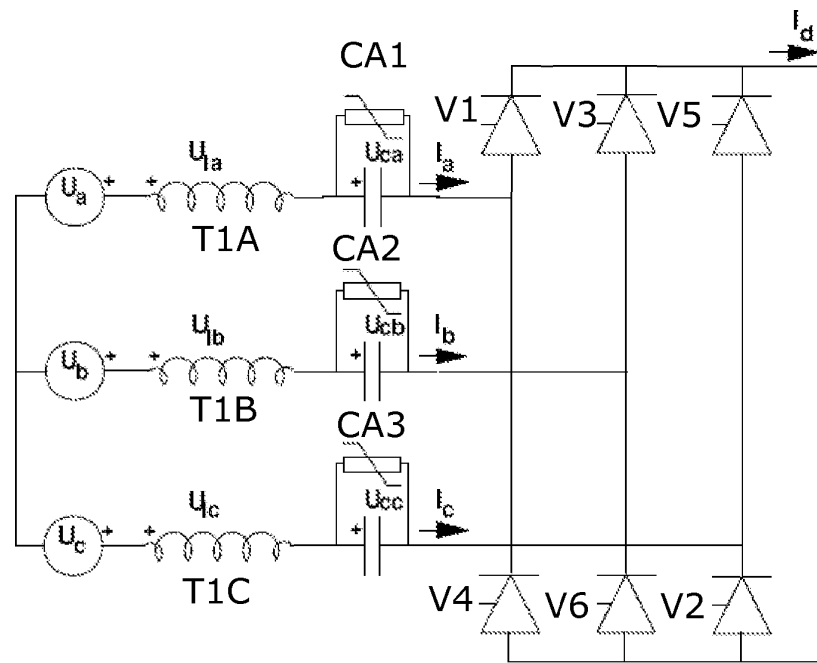


Fig. 3

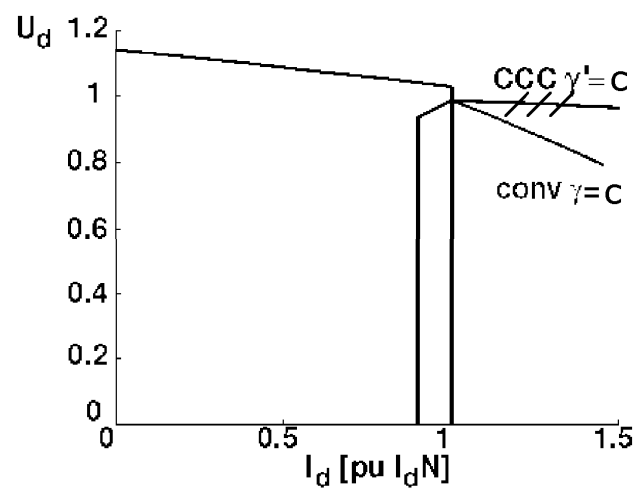


Fig. 4

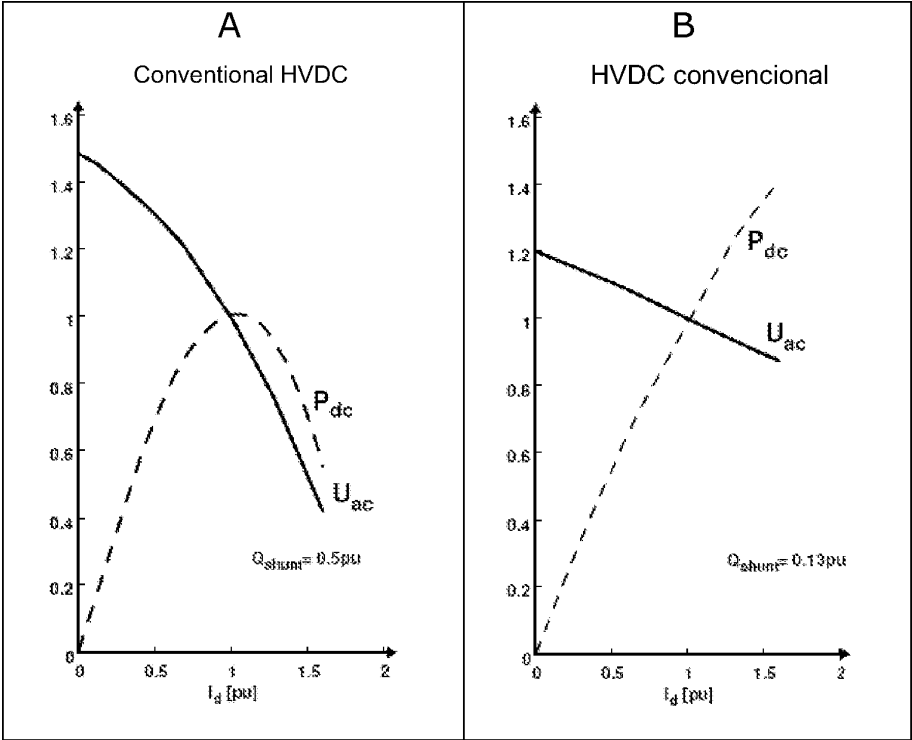


Fig. 5A

Fig. 5B

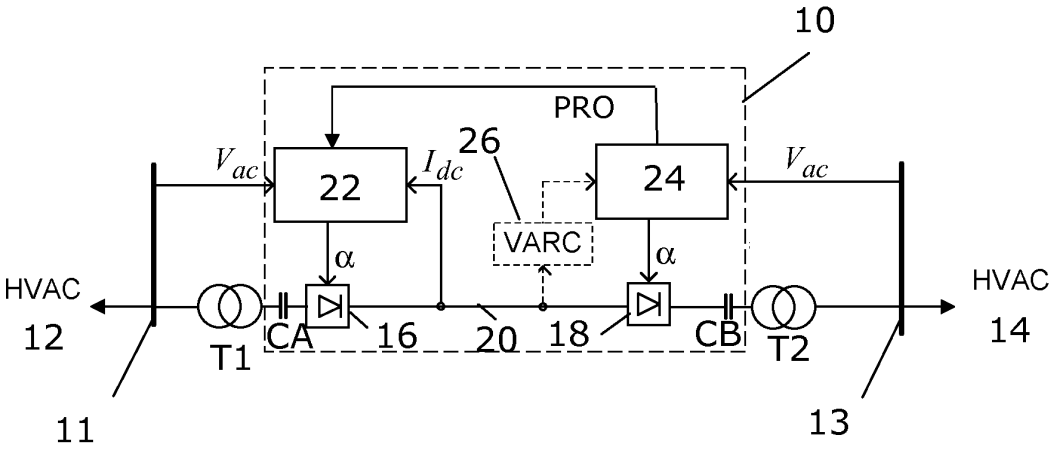


Fig. 6

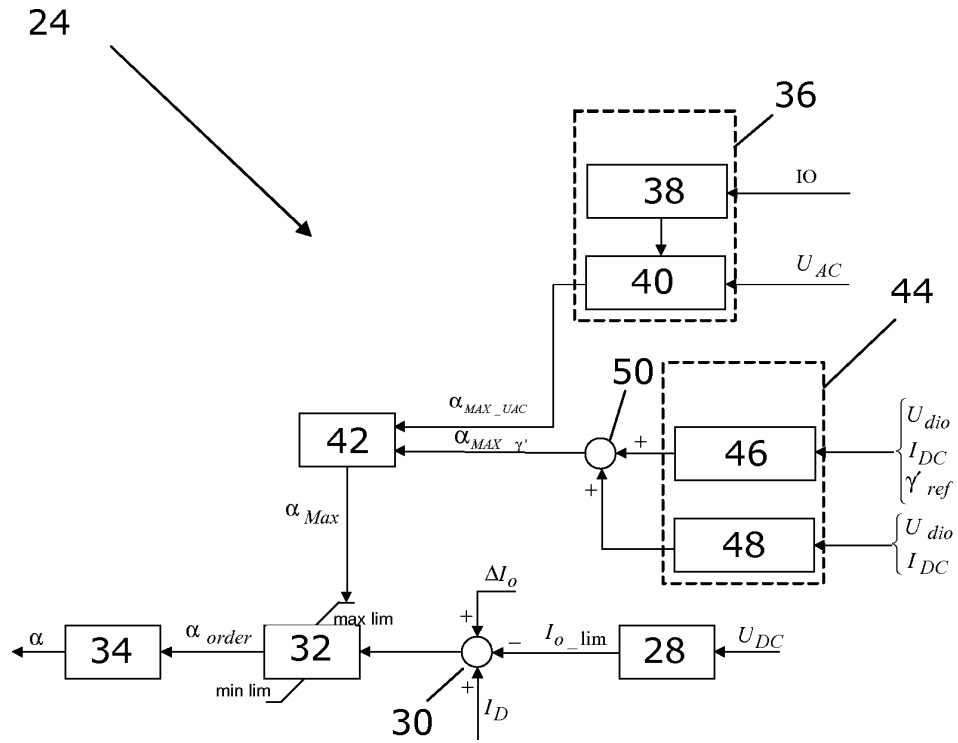


Fig. 7

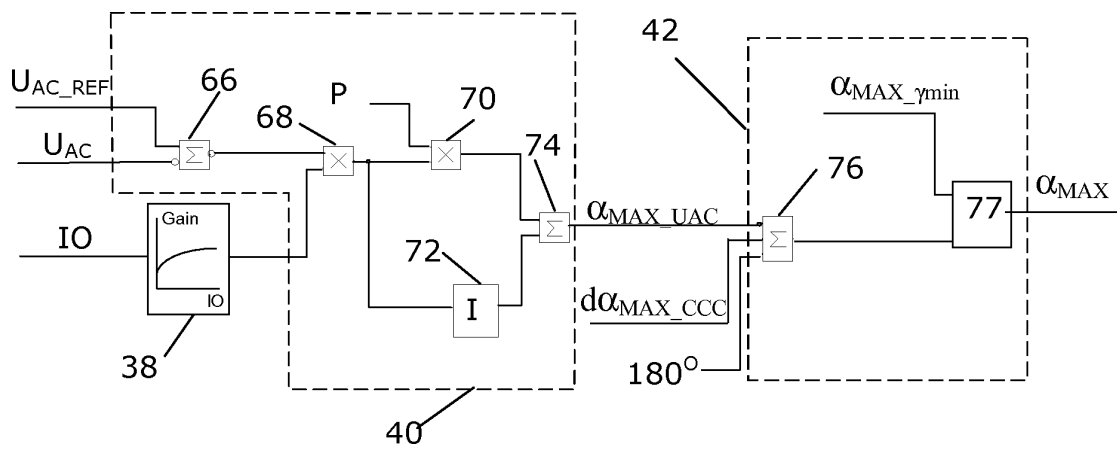


FIG. 9

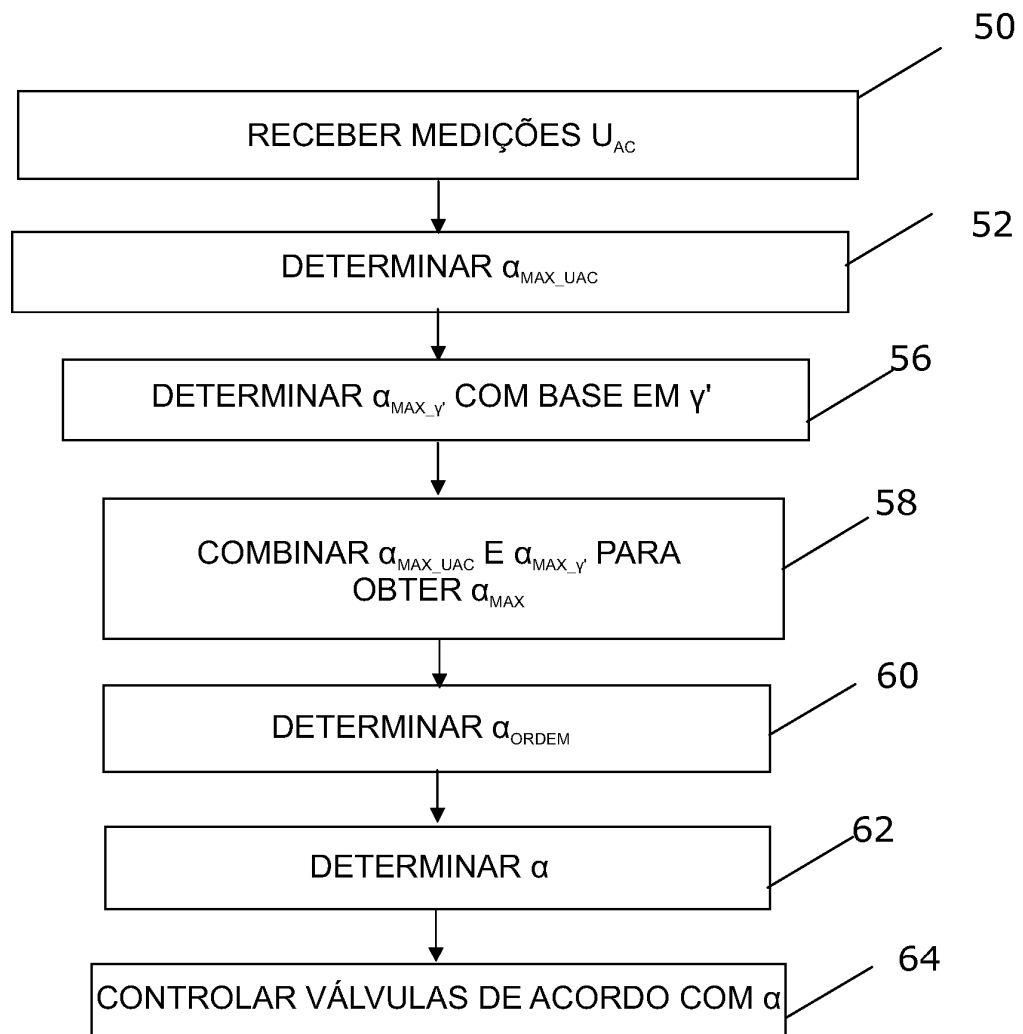


FIG. 8

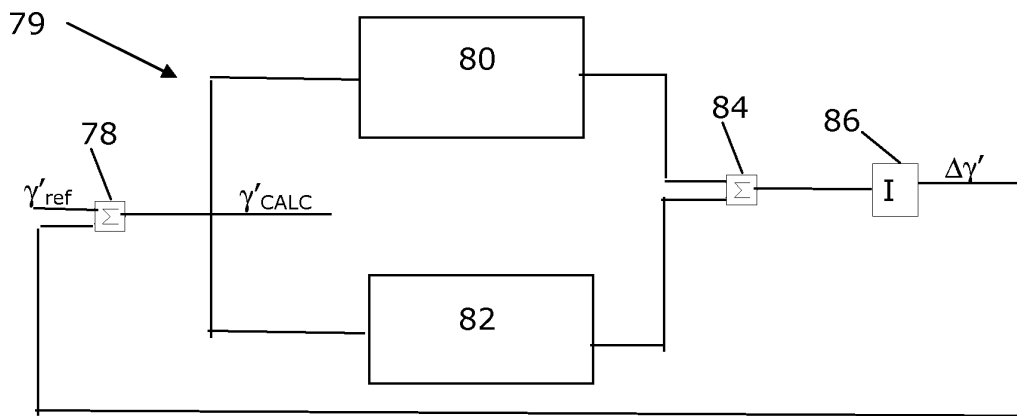


FIG. 10

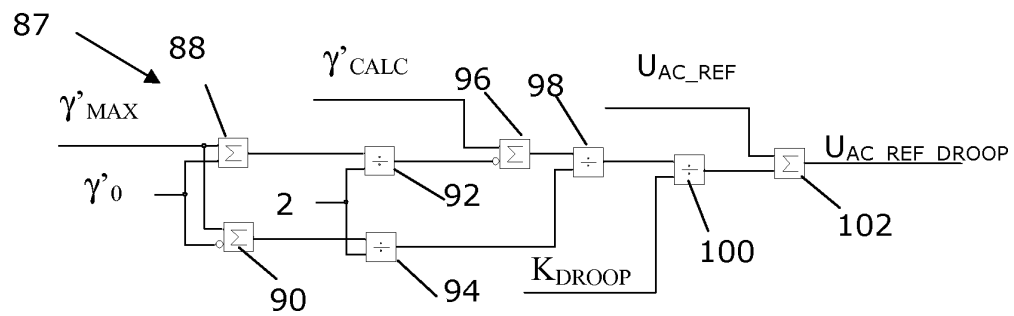


FIG. 11

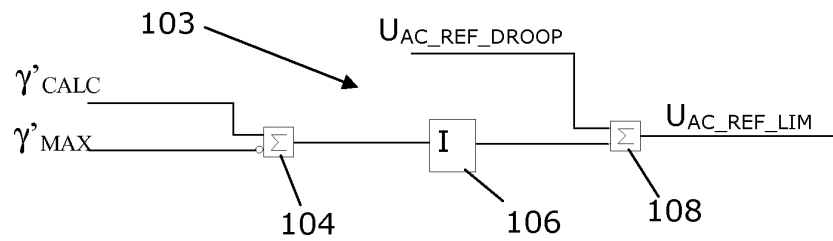


FIG. 12

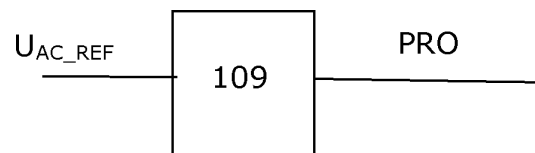


FIG. 13

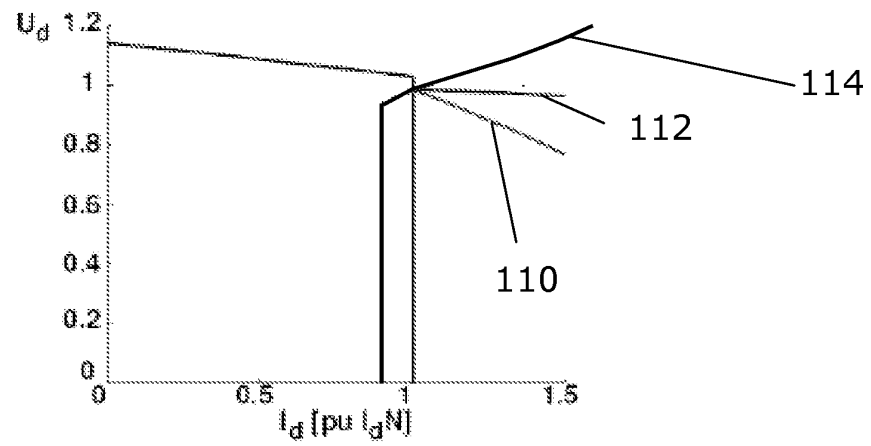


Fig. 14

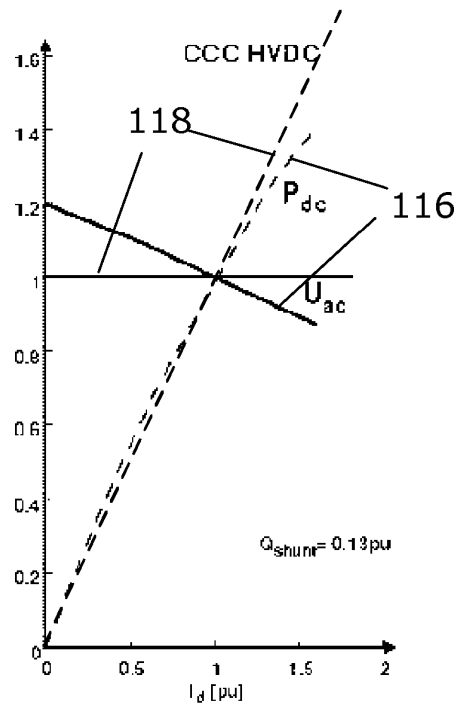


Fig. 15