



República Federativa do Brasil
Ministério da Indústria, Comércio Exterior
e Serviços
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) BR 102014006143-6 A2

(22) Data do Depósito: 14/03/2014

(43) Data da Publicação: 07/02/2017



(54) Título: MÉTODO E APARELHO PARA DETECÇÃO DE ILHAMENTO PARA CONVERSORES DE LAÇO DE REDE

(51) Int. Cl.: H02J 3/38

(52) CPC: H02J 3/382, H02J 3/386, H02J 2003/388

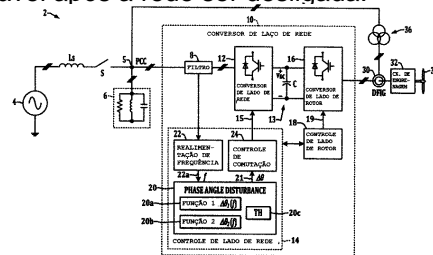
(30) Prioridade Unionista: 14/03/2013 US 13/827,630

(73) Titular(es): ROCKWELL AUTOMATION TECHNOLOGIES, INC

(72) Inventor(es): ZHENHUAN YUAN; SHAOFENG ZHANG; HAIHUI LU; LIXIANG WEI; RUSSEL J. KERKMAN; RICHARD LUKASZEWSKI; AHMED MOHAMED SAYED AHMED; ROBERT J. BREITZMANN

(74) Procurador(es): FLÁVIA SALIM LOPES

(57) Resumo: MÉTODO E APARELHO PARA DETECÇÃO DE ILHAMENTO PARA CONVERSORES DE LAÇO DE REDE Métodos e aparelhos são apresentados para detecção de ilhamento não intencional para conversores de lado de rede em que a perturbação de ângulo de fase é introduzida através de modificação de sinais de controle de comutação de conversor de lado de rede e um descasamento de potência reativa entre geração e a carga de rede é formada a partir da ocorrência do ilhamento não intencional, em que a perturbação de fase aplicada é determinada de acordo com duas curvas predefinidas para formar uma realimentação positiva equivalente em frequências diferentes para impedir o conversor de formar uma ilha em uma nova frequência estável após a rede ser desligada.



MÉTODO E APARELHO PARA DETECÇÃO DE ILHAMENTO PARA CONVERSORES DE LAÇO DE REDE

FUNDAMENTOS

[001] Sistemas de conversão de potência são usados para converter potência elétrica de uma forma para outra. Conversores de laço de rede podem ser usados em uma variedade de situações em que potência é convertida de uma forma para fornecer potência a uma carga e / ou a uma rede de potência. Por exemplo, conversores de laço de rede são usados para fazer a interface de células de combustível, células solares, sistemas de potência eólicos, baterias e outros sistemas de armazenamento de potência com a rede de potência. Esses conversores são muitas vezes capazes de operação regenerativa, onde a rede de potência pode ser convertida em potência DC para carregar baterias, ou potência de bateria DC pode ser convertida para fornecer potência AC para a rede. Ilhamento é uma condição na qual uma parte de um sistema de potência elétrica ou fornecimento de potência elétrica (EPS) de área é alimentada exclusivamente por uma ou mais EPSs locais através de pontos associados de conexão comum ou pontos de acoplamento comum (PCCs), enquanto esta porção do EPS de área é eletricamente separada do resto do EPS de área. Ilhamento pode ser intencional ou não, e vários padrões, incluindo UL1741 e padrões IEEE 929-2000 e 1547-2003 podem exigir proteção contra operação contínua de um inversor ou outro conversor e parte de uma carga de concessionária enquanto isolada deles restante do sistema de concessionária elétrico. Em particular, operação de conversor de potência contínua durante ilhamento de

recursos distribuídos involuntário é geralmente indesejável uma vez que a concessionária não pode controlar a voltagem e frequência na ilha, e excursões de frequência ou voltagem fora de limites aceitáveis podem danificar ou degradar equipamento de cliente. Além disso, ilhamento pode criar riscos para trabalhadores de linha de concessionária por fazer uma linha permanecer energizada quando é assumida ser desconectada de todas as fontes de energia. Além disso, reconexão ou refechamento em uma ilha pode resultar em tropeço de linha ou dano para equipamento de recursos distribuídos ou equipamento conectado devido ao fechamento de fase. Assim vários padrões da indústria pedem conversores de potência e outros recursos distribuídos (por exemplo, máquinas síncronas, máquinas de indução, inversores / conversores de potência, etc) que energizam uma parte de um EPS de área através de um PCC para detectar ilhamento não intencional e deixar de energizar o EPS de área.

[002] Várias técnicas têm sido desenvolvidas para detecção de ilhamento não intencional. No entanto, técnicas convencionais, até agora, estão longe de garantir identificação exata de ilhamento não intencional em aplicações de conversor de laço de rede e, portanto, permanece uma necessidade de um melhor aparelho e métodos para a detecção de ilhamento nos conversores de laço de rede.

SUMÁRIO

[003] Vários aspectos da presente divulgação são agora resumidos para facilitar a compreensão básica da divulgação, em que este sumário não é um amplo panorama da

divulgação, e destina-se nem a identificar certos elementos da divulgação, nem para delinear o seu alcance. Ao contrário, o objetivo principal deste sumário é apresentar vários conceitos de divulgação de uma forma simplificada, antes da descrição mais detalhada que é apresentada de seguida. A presente divulgação fornece técnicas para conversores de laço de rede para detectar ilhamento não intencional de forma eficaz. Uma perturbação de fase é introduzida para modificar correntes de referência de comando usadas por um estágio de conversor de lado de rede, e um descasamento de potência reativa entre a geração e a carga é então formado a partir da ocorrência da ilha. A perturbação de fase aplicada é determinada pela frequência que varia de acordo com curvas predefinidas e constitui uma reação positiva equivalente. Mais do que uma curva é aplicada para gerar a perturbação de fase adequada em diferentes frequências. A nova combinação de diferentes formas de curvas para perturbação de fase injetada, tais como curvas de seno e de tangente, pode ser vantajosamente empregada para evitar o conversor formar a ilha em uma nova frequência estável que está ainda dentro do intervalo normal de operação, após a rede ser desligada. Em certas implementações, o uso de uma curva de seno é usado primariamente em torno da frequência nominal, e, portanto, não há nenhuma preocupação sobre o desvio de frequência estando dentro do intervalo normal mediante ilhamento. Curvas de tangente vantajosamente forçam a frequência para longe do intervalo normal para detecção de condições de ilhamento não verificáveis utilizando técnicas convencionais. A perturbação de fase de pico da perturbação

de seno pode ser definida em um valor baixo de modo que tem pouco impacto sobre o sistema em condições de laço de rede quando a frequência tem apenas uma pequena variação.

[004] De acordo com um ou mais aspectos da presente divulgação, os métodos de detecção de ilhamento não intencionais são fornecidos, juntamente com meios legíveis por computador tendo instruções executáveis por computador para detectar ilhamento não intencional em um sistema de potência distribuído. O método inclui medição da frequência de um ponto de voltagem de acoplamento comum, e determinar primeiro e segundo valores de perturbação de ângulo de fase em função da frequência medida e primeira e segunda funções de perturbação de ângulo de fase correspondentes. Em certas modalidades, a primeira função de perturbação de ângulo de fase é uma função de seno, e a segunda função de perturbação de ângulo de fase é uma função de tangente. O método inclui ainda calcular um valor de perturbação de ângulo de fase final de acordo com o primeiro e segundo valores de perturbação de ângulo de fase, por exemplo, de acordo com o valor absoluto maior do primeiro e segundo valores de perturbação de ângulo de fase. Além disso, o método envolve modificar ou ajustar um ou mais valores de referência de comando de controle de corrente de conversor de lado de rede de acordo com o valor de perturbação de ângulo de fase final, e gerar sinais de controle de comutação para operar um conversor de lado de rede com base pelo menos parcialmente no valor ou valores de referência de comando de controle de corrente de conversor de lado de rede. A frequência no ponto de acoplamento comum é medida de novo, e ilhamento não intencional no sistema de potência

distribuído é detectado seletivamente com base na frequência medida da voltagem no ponto de acoplamento comum, por exemplo, por meio da identificação de ilhamento se a frequência medida difere de uma frequência de rede nominal, mais do que um valor de limiar.

[005] De acordo com outros aspectos da presente divulgação, um conversor de potência de laço de rede é fornecido, o qual inclui um estágio de conversor de lado de rede, assim como um controlador de lado de rede com um componente de perturbação de ângulo de fase e um componente de controle de comutação. O estágio de conversor de lado de rede inclui dispositivos de comutação acoplados entre o ponto de acoplamento comum de um sistema de potência distribuído e um barramento DC, e o controlador de lado de rede fornece os sinais de controle de comutação para o estágio de conversor de lado de rede. O componente de perturbação de ângulo de fase é operativo para determinar um primeiro valor de perturbação de ângulo de fase de acordo com a frequência de uma voltagem em um ponto de acoplamento comum e de acordo com uma primeira função de perturbação de ângulo de fase. Além disso, o componente de perturbação de ângulo de fase determina um segundo valor de perturbação de ângulo de fase de acordo com a frequência medida e uma segunda função de perturbação de ângulo de fase, e calcula um valor de perturbação de ângulo de fase final de acordo com o primeiro e segundo valores de perturbação de ângulo de fase. O componente de controle de comutação é operativo para ajustar um ou mais valores de referência de comando de controle de corrente de conversor de lado de rede de acordo com o valor de perturbação de

ângulo de fase final, e gerar os sinais de controle de comutação de conversor de lado de rede para o funcionamento do conversor de lado de rede de acordo com o(s) valor(es) de referência de comando de controle de corrente de conversor de lado de rede. O controlador de lado de rede é ainda operativo para detectar seletivamente ilhamento não intencional no sistema de potência distribuído pelo menos parcialmente de acordo com a frequência medida da voltagem no ponto de acoplamento comum.

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

[006] A descrição e desenhos seguintes estabelecem certas implementações ilustrativas da divulgação em detalhe, os quais são indicativos de várias formas exemplificativas em que os vários princípios da divulgação podem ser realizados. Os exemplos ilustrados, no entanto, não são exaustivos das muitas modalidades possíveis da divulgação. Outros objetos, vantagens e novas características da divulgação serão estabelecidos na seguinte descrição detalhada quando considerada em conjunto com os desenhos, nos quais:

[007] A Figura 1 é um diagrama esquemático ilustrando um exemplo de sistema de potência distribuído incluindo um conversor de laço de rede fazendo a interface de um sistema de conversão de energia eólica (WECS) com base em gerador de indução de dupla alimentação (DFIG) com uma rede de potência, e incluindo componentes de geração de perturbação de ângulo de fase para injetar seletivamente uma perturbação de ângulo de fase usando duas curvas diferentes para impedir o conversor de formar uma ilha em uma nova frequência estável que está ainda dentro do intervalo

normal de operação após a rede ser desconectada de acordo com um ou mais aspectos da presente divulgação;

[008] A Figura 2 é um fluxograma ilustrando um processo ou método exemplar para a detecção de ilhamento não intencional utilizando primeira e segunda curvas ou funções de perturbação de ângulo de fase, de acordo com outros aspectos da presente divulgação;

[009] A Figura 3 é um diagrama esquemático ilustrando mais detalhes de um controlador de lado de rede do sistema da Figura 1, incluindo uma primeira modalidade para a introdução de uma perturbação de ângulo de fase por modificar ou ajustar valores de referência de comando de controle de corrente de conversor de lado de rede de acordo com uma perturbação de ângulo de fase calculada;

[0010] A Figura 4 é um diagrama esquemático ilustrando uma outra modalidade de um controlador de lado de rede para introduzir uma perturbação de ângulo de fase por ajuste de valores de referência de comando de controle de corrente de conversor de lado de rede de acordo com a perturbação de ângulo de fase calculada;

[0011] A Figura 5 é um gráfico ilustrando ângulo de fase versus curvas de frequência mostrando uma curva de carga de RLC para uma dada porção de um sistema de potência distribuído e uma curva mostrando uma condição de potência equilibrada na qual correntes fluindo na rede são correntes nominais inferiores a 2% de conversor de laço de rede bem como o limite de perturbação de ângulo de fase;

[0012] A Figura 6 é uma curva ilustrando duas curvas de carga de ângulo de fase de RLC exemplares como uma função da frequência para duas situações de fator de

qualidade diferentes, bem como a primeira e segunda curvas de perturbação de ângulo de fase correspondente às funções de seno e tangente;

[0013] A Figura 7 é uma curva de perturbação de ângulo de fase mostrando seleção e utilização da perturbação tendo um valor máximo absoluto da primeira e segunda curvas de perturbação de ângulo de fase ao longo do tempo, de acordo com certas modalidades da presente descrição; e

[0014] A Figura 8 é um gráfico mostrando a frequência de saída de conversor de laço de rede como uma função do tempo utilizando os conceitos de introdução de perturbação de ângulo de fase selecionados da presente divulgação, durante uma condição de ilhamento.

DESCRIÇÃO DETALHADA

[0015] Referindo-nos agora às figuras, várias modalidades ou implementações são a seguir descritas, em conjunto com os desenhos, em que números de referência iguais são usados para referir-se a elementos iguais ao longo, e em que as várias características não são necessariamente desenhadas em escala.

[0016] Detecção de ilhamento não intencional é importante função de conversores de laço de rede para mitigar ou evitar danos ou degradação ao equipamento de sistema e garantir ou facilitar a segurança do pessoal de manutenção e engenharia. Várias técnicas foram previamente propostas para detecção de ilhamento incluindo proteção reativa, e abordagens ativas usando um inversor conectado à rede ou dispositivos externos. Técnicas de proteção reativa utilizam relés de voltagem e frequência para proteção anti-

ilha por medir variáveis elétricas no ponto de acoplamento comum (PCC) e detecção de condições que indicam a formação de uma ilha. Em alguns casos, no entanto, o esquema de proteção reativa é incapaz de detectar ilhamento onde o gerador é capaz de suportar a carga da ilha sem alteração substancial na voltagem ou frequência. Abordagens ativas podem empregar frequência e / ou amplitude de inversor de voltagem em PCC afastando-se de uma frequência nominal e / ou intervalo de voltagem para disparar uma relé de frequência e / ou voltagem interno. No entanto, certas situações de ilhamento permitem um inversor estabelecer uma nova frequência de operação estável que é um pouco perto do intervalo de frequência normal, em que relés de frequência internos podem não ser acionados mesmo que uma situação de ilhamento ocorreu. A utilização de dispositivos externos para injetar ativamente sinais de corrente com certas frequências outras do que a frequência fundamental facilita a medição da voltagem nessas frequências para detectar ilhamento por examinar mudanças de impedância. No entanto, estas técnicas não detectam de forma adequada todas as situações de ilhamento possíveis.

[0017] Patente US número 7.016.793, concedida em 21 de março de 2006 e aqui incorporada por referência, envolve injeção de uma perturbação no sistema através do controlador sincronamente giratório de corrente dq-quadro, e monitora o impacto de perturbação no PCC. Por usar realimentação positiva no eixo q e / ou d, a voltagem e / ou de frequência é expulsa. A publicação de pedido de patente US Número 2011/0187200, publicada em 4 de agosto de 2011 e aqui incorporada por referência, descreve introdução

de uma pequena perturbação para a fase da corrente de saída. Se a rede é conectada, a frequência da voltagem não será alterada, enquanto a frequência da voltagem vai desviar-se da frequência nominal devido à perturbação se uma condição de ilhamento existe. Um índice de covariância é calculado o qual correlaciona o desvio de fase na corrente para a mudança de frequência em voltagem, e, se o índice excede um limiar, uma perturbação maior é introduzida para a fase da corrente, o que irá conduzir a frequência para fora de uma sobre / sub janela de proteção de frequência. Publicação de pedido de patente US Número 2008/0204044, publicada em 28 de agosto de 2008 e aqui incorporada por referência, envolve a introdução de uma onda quadrada de referência de corrente reativa, detecção de mudanças de voltagem de carga em cada mudança na onda de referência de corrente reativa, e determinação se as mudanças de voltagem de carga detectadas ultrapassam um limiar de detecção de ilhamento predefinido. A publicação de pedido de patente US Número 2006/0146582, publicada em 6 de julho de 2006 e aqui incorporada por referência, consiste em determinar uma frequência de saída de corrente $fI_k = fV_{fk} + S \cdot \Delta f_0$, onde fI_k é uma frequência de saída de corrente predeterminada no k-ésimo ciclo de amostragem, fV_k é uma frequência da voltagem no k-ésimo ciclo de amostragem, fV_{fk} é uma frequência de voltagem filtrada por um filtro IIR para o k-ésimo ciclo de amostragem, Δf_0 é uma pequena variação de frequência de corrente, S é 1 se $fV_k - fV_{k-1} > 0$, 0 se $fV_k - fV_{k-1} = 0$, -1 se $fV_k - fV_{k-1} < 0$. Um fator de ponderação Ws pode ser projetado para acumular ou fortalecer a detecção: $fI_k = fV_{fk} + S \cdot F(Ws)$, onde $F(Ws)$ é

uma função do fator de ponderação de realimentação, e onde o fator de ponderação pode ser uma função degrau, uma função linear, uma função exponencial ou uma função polinomial. Da mesma forma, o ângulo de fase pode ser calculado por $\phi I_k = \phi I_{k-1} + S \cdot \Delta\phi_0$, onde ϕI_k e ϕI_{k-1} são ângulo de fase de saída predeterminado no k-ésimo ciclo de amostragem, respectivamente, $\Delta\phi_0$ é uma variação de uma perturbação de ângulo de fase pequena. Além disso, um fator de ponderação W_s pode ser concebido como $\phi I_k = \phi I_{k-1} + S \cdot F(W_s)$. Patente US número 6.429.546, concedida em 6 de agosto de 2002 e aqui incorporada por referência, descreve redução do tamanho de uma zona de não detecção em um sistema de potência conectado à rede tendo um gerador de potência elétrica com uma interface para a rede. Esta referência descreve medir desvio de frequência entre um sinal de saída da rede e um sinal de saída do sistema de potência conectado à rede; aplicação do desvio de frequência medida para o sinal de saída do sistema de potência conectado à rede; e quando a frequência medida do sinal de saída do sistema de potência conectado à rede satisfaz um nível de corte estabelecido, desconectar o sistema de potência conectado à rede. As chamadas técnicas de Derivação de Frequência de Modo (SMS) usam realimentação positiva para desestabilizar um recurso distribuído (DR) quando a rede não está presente de modo a forçar a frequência para desviar do valor nominal. Esta técnica aplica realimentação positiva para a fase da corrente de saída e, assim, a frequência de voltagem no PCC no curto prazo. No entanto, estas abordagens não forneceram garantias suficientes de que todas as situações de

ilhamento não intencionais são oportunamente detectadas.

[0018] A presente revelação utiliza vantajosamente duas ou mais curvas ou funções de perturbação de fase para introduzir uma perturbação de fase na saída de conversor de lado de rede de um conversor de laço de rede para a detecção inteligente de condições de ilhamento, em que a perturbação de ângulo de fase com o valor absoluto maior das duas perturbações de ângulo de fase calculadas de acordo com as curvas é utilizada para introdução da perturbação. Deste modo, a frequência de operação é expulsa a partir de pontos de operação de outro modo estáveis para facilitar a detecção de condições de ilhamento em situações em que as técnicas convencionais eram inoperantes e / ou lentas. As técnicas e aparelhos divulgados podem ser empregues em qualquer forma de conversor de laço de rede que desempenha funções de conversão de potência com pelo menos um estágio de conversor de potência conectado a um ponto de acoplamento comum. Exemplos de tais conversores utilizados em sistemas de potência eólica de interface são mostrados na publicação de pedido de patente US Número 2011/0295437 de Lu et al., publicada em 1 de dezembro de 2011 e atribuído ao requerente da presente divulgação Rockwell Automation Technologies, Inc., e a publicação de pedido de patente US Número 2012/0262129 de Lu et al., publicada em 18 de outubro de 2012 e atribuída ao requerente da presente divulgação, a totalidade das quais são aqui incorporadas por referência.

[0019] A Figura 1 ilustra um sistema de rede exemplar 2 incluindo uma fonte de potência de rede 4 e uma indutância de fonte associada L_s que é normalmente ligada a

um ponto de acoplamento comum 5, em que a figura ilustra um comutador S que representa a possibilidade de que a fonte de rede 4 possa ser desligada do PCC 5 para criar uma situação de ilhamento. Como observado acima, tal ilhamento pode ocorrer não intencionalmente, através do qual a fonte 4 é efetivamente desconectada ou isolada a partir do ponto de acoplamento comum 5. Como pode ser visto na Figura 1, uma carga de RLC 6 pode ser conectada com o PCC 5, e inclui um componente resistivo linha a linha, componente indutivo e um componente capacitivo, mostrado apenas como uma resistência, um indutor e um capacitor conectado em paralelo um com o outro para fins ilustrativos para representar a impedância complexa de todas as cargas que podem estar presentes na linha de transmissão de potência em um sistema de potência distribuído 2.

[0020] Também acoplado com o ponto de acoplamento comum 5 é um conversor de laço de rede 10, neste caso um conversor de potência eólica exemplar (WEC) ou sistema de energia eólica (WES) com um sistema de conversão de gerador de indução de alimentação dupla (DFIG) 30 convertendo potência mecânica a partir de uma turbina eólica 34 através de uma caixa de engrenagem 32 acionando um rotor do DFIG 30. O estator do DFIG 30 na modalidade da Figura 1 é conectado ao ponto de acoplamento comum 5 por meio de um transformador de três fases 36, como mostrado, e os enrolamentos de rotor do DFIG 30 são acoplados a um conversor de lado de rotor 16 do conversor de laço de rede 10. O rotor de DFIG fornece enrolamentos de rotor (único ou multifase) para transferência de potência AC entre o rotor e um conversor de DFIG consecutivo 10 incluindo o conversor

de lado de rotor 16 e um barramento DC 13 com um capacitor de enlace DC C fornecendo uma voltagem de barramento DC V_{DC} para um conversor de lado de rede 12. O conversor 10 pode, alternativamente, ser um conversor de fonte de corrente, por exemplo, tendo um circuito de enlace DC 13 com uma ou mais bobinas ou indutâncias de enlace DC (não mostradas) e sem o capacitor C. O estágio de conversor de lado de rede 12 é acoplado ao ponto de acoplamento comum 5 como mostrado por meio de um circuito de filtro multifásico 8 (por exemplo, um filtro LC de três fases, filtro LCL, indutores de três linhas L, etc), ou o conversor de lado de rede 12 pode ser conectado diretamente ao ponto de acoplamento comum 5 com o filtro 8 sendo omitido em outras implementações. O conversor de laço de rede 10, por outro lado pode, mas não necessariamente, incluir um transformador (não mostrado). O conversor de laço de rede pode também ser aplicado a um gerador síncrono de ímã permanente (PMSG), um gerador síncrono (SG), ou um gerador de indução (IG). Em certas modalidades, o conversor de laço de rede pode incluir apenas o conversor de lado de rede e ser aplicado a conjuntos de células solares, pilhas de células de combustível ou baterias.

[0021] O conversor de laço de rede ilustrado 10 é uma estrutura consecutiva de modo dual com circuito de conversor de lado de rotor 16 acoplado entre a conexão de rotor de DFIG e circuito intermediário DC 13 com dispositivos de comutação correspondentes (por exemplo, IGBTs ou outros dispositivos de comutação adequados) acoplados entre os terminais de rotor de DFIG e o barramento DC 13. O circuito de conversor de lado de rede

12 é acoplado entre o barramento DC 13 e a conexão de estator de DFIG através do PCC 5 e o transformador 36, e inclui um circuito de comutação com uma pluralidade de comutadores (por exemplo, IGBT ou outros dispositivos de comutação adequados). O conversor 10, neste exemplo, funciona de modo dual com o conversor de lado de rotor 16 fornecendo potência a partir da conexão de rotor ao circuito DC 13 em um primeiro modo e fornecendo potência a partir do circuito DC 13 para o rotor de DFIG em um segundo modo com os comutadores de conversor de lado de rotor sendo operados como um inversor de comutação. No primeiro modo, além disso, o circuito de conversor de lado de rede 12 funciona como um inversor para fornecer potência a partir do circuito DC 13 para o PCC 5 e, conseqüentemente, para o estator de DFIG por operação dos dispositivos de comutação de conversor de lado de rede. No segundo modo, o conversor de lado de rede 12 retifica potência do PCC 5 para carregar o capacitor C do barramento DC 13, onde retificadores e IGBTs do conversor de lado de rede 12 trabalham em conjunto para permitir fluxo de potência bidirecional no segundo modo (comutação de PWM). Em funcionamento, o modo de conversor de lado de rede pode ser definido de acordo com a velocidade de rotor, com corrente a partir do rotor de DFIG sendo utilizada no primeiro modo para alimentar o circuito DC 13 e o conversor de lado de rede 12 funciona como um inversor para fornecer potência para a rede quando a velocidade de rotor for superior ao valor nominal correspondente à frequência de rede. No segundo modo para velocidades de rotor abaixo da velocidade de rotação nominal, uma parte da potência de estator é alimentada para

o rotor através dos estágios de conversor 12 e 16, com o estágio de conversor de lado de rede 12 funcionando como um retificador para fornecer potência ao circuito intermediário 13 e o estágio de lado de rotor 16 invertendo a potência DC para fornecer potência aos enrolamentos de rotor de DFIG.

[0022] Como pode ser visto na Figura 1, o conversor de laço de rede 10 inclui um controlador de lado de rede 14 fornecendo sinais de controle de comutação de conversor de lado de rede 15 para os dispositivos de comutação do conversor de lado de rede 12, assim como um controlador de lado de rotor 18 fornecendo sinais de controle de comutação de lado de rotor 19 para o conversor de lado de rotor 16. O conversor 10 também inclui um ou mais sensores e / ou elementos de realimentação operativos para fornecer vários sinais de realimentação operacionais para um ou ambos os controladores 14, 18. Neste caso, dispositivos de detecção de voltagem (não mostrados) podem ser operacionalmente associados com a entrada e / ou saída ou nós internos do filtro 8 a fim de fornecer sinais de realimentação de voltagem ou valores indicativos da voltagem (s) no ponto de acoplamento comum 5. Como pode ser visto na Figura 1, por exemplo, como sinal ou sinais de realimentação de voltagem é / são fornecidos a um componente de realimentação de frequência 22 do controlador de lado de rede 14, o qual fornece um sinal ou valor de frequência medida 22a para um componente de perturbação de ângulo de fase 20 do controlador de lado de rede 14. O componente de perturbação de ângulo de fase 20 inclui a primeira e segunda funções de perturbação de ângulo de fase 20a e 20b, bem como um valor

de limiar 20c, e utiliza-os juntamente com a realimentação medida 22a (f) para fornecer um valor de perturbação de ângulo de fase final calculada $\Delta\theta$ para uma componente de controle de comutação 24 que gera os sinais de controle de comutação de conversor de lado de rede 15.

[0023] Em funcionamento, o componente de perturbação de ângulo de fase 20 determina um primeiro valor de perturbação de ângulo de fase $\Delta\theta_1$ de acordo com a frequência medida f e a primeira função de perturbação de ângulo de fase 20a, e também determina um segundo valor de perturbação de ângulo de fase $\Delta\theta_2$ de acordo com a frequência medida f e a segunda função de perturbação de ângulo de fase 20b. Com isto, o componente de perturbação de ângulo de fase 20 calcula o valor de perturbação de ângulo de fase final $\Delta\theta$ de acordo com o primeiro e segundo valores de perturbação de ângulo de fase $\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_2$. Conforme descrito a seguir, além disso, o componente de controle de comutação 24 ajusta um ou mais valores de referência de comando de controle de corrente de conversor de lado de rede i_{qref} e i_{dref} de acordo com o valor de perturbação de ângulo de fase final $\Delta\theta$, e gera os sinais de controle de comutação de conversor de lado de rede 15 para operação conversor de lado de rede 12 de acordo com o valor (s) de referência de comando de controle de corrente ajustado. Além disso, o controlador de lado de rede 14 detecta seletivamente ilhamento não intencional no sistema de potência distribuído 2 (por exemplo, abertura acidental do comutador S na Figura 1) pelo menos parcialmente de acordo com a frequência medida f da voltagem no ponto de acoplamento comum 5. Desta forma, o conversor de laço de

rede 10 detecta seletivamente ilhamento não intencional no sistema 2, e pode tomar uma ou mais ações corretivas ou de relatórios com base nesta detecção, tais como parar de gerar potência a partir do DFIG através do conversor 10, emitindo mensagens de aviso para outros dispositivos através de conexões de rede, etc.

[0024] A Figura 2 ilustra um método exemplar 100 para detectar ilhamento não intencional utilizando a primeira e segunda curva de perturbação de ângulo de fase 20a e 20b em conformidade com a presente descrição, em que o controlador de lado de rede 14 da Figura 1 pode ser operado em certas modalidades de acordo com o método 100. Neste sentido, o controlador 14 inclui pelo menos um processador programado para executar o processo 100 através do componente de perturbação de ângulo de fase 20 e o componente de controle de comutação 24, o que pode ser implementado usando hardware, software executado no processador, firmware executado no processador, lógica programável, ou combinações destes, etc, com instruções de programa sendo armazenadas em uma memória associada com o controlador de lado de rede 14. Neste aspecto, o método exemplar 100 da Figura 2 pode ser implementado usando instruções executáveis por computador a partir de um meio legível por computador não transitório, como uma memória de computador, uma memória dentro de um sistema de controle de conversor de potência (por exemplo, controlador 14), um CD-ROM, disco flexível, unidade flash, banco de dados, servidor, computador, etc, que tem instruções executáveis por computador para realizar os processos e funcionalidade de controlador aqui descritos. Enquanto o método exemplar

100 está representado e descrito na forma de uma série de ações ou eventos, será apreciado que os vários métodos da divulgação não estão limitados pela ordem ilustrada de tais ações ou eventos exceto quando especificamente aqui estabelecido. A este respeito, exceto quando especificamente fornecido a seguir, algumas ações ou eventos podem ocorrer em ordem diferente e / ou concomitantemente com outras ações ou eventos além daqueles ilustrados e descritos aqui, e nem todos os passos ilustrados podem ser necessários para implementar um processo ou método de acordo com a presente divulgação. Os métodos ilustrados podem ser implementados em hardware, software executado no processador, ou combinações dos mesmos, a fim de fornecer os conceitos de detecção de ilhamento aqui revelados.

[0025] A operação do conversor de laço rede 10 começa em 102 do método 100 da Figura 2, com a frequência de uma voltagem no PCC 5 sendo medida em 104. Em 106, um primeiro valor de perturbação de ângulo de fase $\Delta\theta_1$ é determinado pelo menos parcialmente de acordo com a frequência medida f e de acordo com a primeira função de perturbação de ângulo de fase 20a, e um segundo valor de perturbação de ângulo de fase $\Delta\theta_2$ é determinado em 108, pelo menos parcialmente de acordo com a frequência medida f e a segunda função de perturbação de ângulo de fase 20b.

[0026] Em 110, um valor de perturbação de ângulo de fase final $\Delta\theta$ é calculado ou determinado de outra forma pelo menos parcialmente de acordo com o primeiro e segundo valores de perturbação de ângulo de fase $\Delta\theta_1$ e $\Delta\theta_2$. Em certas modalidades, o valor de perturbação de ângulo de

fase final $\Delta\theta$ é calculado 110 de acordo com o valor absoluto maior do primeiro e segundo valores de perturbação de ângulo de fase $\Delta\theta_1$ e $\Delta\theta_2$. Por exemplo, o componente de perturbação de ângulo de fase ilustrado 20, vantajosamente, calcula o valor de perturbação de ângulo de fase final $\Delta\theta$ de acordo com a seguinte fórmula (1):

$$(1) \Delta\theta = \max[\text{abs}(\Delta\theta_1), \text{abs}(\Delta\theta_2)] * \text{sign}(f - f_g),$$

em que $\Delta\theta_1$ é o primeiro valor de perturbação de ângulo de fase, $\Delta\theta_2$ é o segundo valor de perturbação de ângulo de fase, f é a frequência medida no PCC 5, f_g é a frequência de rede nominal (por exemplo, 50 Hz em uma implementação), e o sign é a função de sinal com 1 para $f > f_g$, 0 para $f = f_g$, e -1 para $f < f_g$.

[0027] Um ou mais valores de referência de comando de controle de corrente de conversor de lado de rede i_{qref} ; i_{dref} são ajustados seletivamente em 112 de acordo com o valor de perturbação de ângulo de fase final $\Delta\theta$. Em 114, sinais de controle de comutação de conversor de lado de rede 15 são gerados pela operação do conversor de lado de rede 12 de acordo com o valor ou valores de referência de comando de controle de corrente de conversor de lado de rede i_{qref} , i_{dref} . A frequência no PCC 5 é de novo medida em 116. É feita uma determinação em 118 para saber se a frequência medida f é dentro de um valor de limiar TH (por exemplo, limiar 20c no componente de perturbação de ângulo de fase 20 da Figura 1) de uma frequência de rede nominal (por exemplo, 50 Hz ou 60 Hz, em certas implementações). Se assim for (NÃO em 118) o processo repete novamente em 106 como descrito acima, e de outra forma (SIM em 118), ilhamento não intencional é detectado em 120. Em certas

modalidades, ilhamento não intencional no sistema de potência distribuído 2 é detectado em 120 se a frequência medida f da voltagem no ponto de acoplamento comum 5 difere de uma frequência de rede nominal f_g por mais do que um valor de limiar $20c$.

[0028] Qualquer primeira e segunda funções de perturbação de ângulo de fase 20a e 20b pode ser empregue em várias implementações da presente divulgação. Nas modalidades ilustradas, por exemplo, a primeira função de perturbação de ângulo de fase 20a é uma função de seno, e a segunda função de perturbação de ângulo de fase 20b é uma função de tangente. Neste caso, o primeiro valor de perturbação de ângulo de fase $\Delta\theta_1$ é determinado em 106 por avaliar a seguinte primeira função de perturbação de ângulo de fase (2) para resolver para $\Delta\theta_1$ de acordo com a frequência medida f :

$$(2) \Delta\theta_1 = \theta_{m1} \sin((\Pi / 2) * ((f - f_g) / (f_{m1} - f_g))),$$

onde f é a frequência medida, f_g é a frequência de rede nominal, f_{m1} é uma primeira frequência predeterminada diferente da frequência de rede nominal f_g , e θ_{m1} é um primeiro ângulo de fase predeterminado. Neste caso, além disso, o ângulo de fase θ_{m1} e a frequência f_{m1} são selecionados para satisfazer a desigualdade $d(\Delta\theta_1)/df > d(\Delta\theta_{RLC})/df$; onde θ_{RLC} é um ângulo de fase de carga de RLC associado com a carga de RLC 6 determinada de acordo com a seguinte função (3):

$$(3) \theta_{RLC} = - \text{atan}[(R/\omega L_{QF=1}) - R\omega C_{QF=1}] * QF,$$

onde $R = V^2/P$, V é a voltagem no ponto de acoplamento comum, P é o valor de potência no ponto de acoplamento comum, $\omega = 2\Pi f$, Q_F é um fator de qualidade da carga de RLC

6 determinado como $Q_F = R(C_{QF}/L_{QF})^{1/2}$, $L_{QF} = V^2 / (2\pi f P_{QF})$, e $C_{QF} = (P_{QF}) / (2\pi f V^2)$.

[0029] Na implementação ilustrada, além disso, o segundo valor de perturbação de ângulo de fase $\Delta\theta_2$ é determinado em 108 de acordo com a frequência medida f e a seguinte segunda função de perturbação de ângulo de fase (4):

$$(4) \Delta\theta_2 = \theta_{m2} \tan((\Pi / 2) * ((f - f_g) / (f_{m2} - f_g))),$$

onde θ_{m2} e f_{m2} são selecionados de tal modo que o segundo valor de perturbação de ângulo de fase $\Delta\theta_2$ é maior do que o primeiro valor de perturbação de ângulo de fase $\Delta\theta_1$ na frequência de ponto de cruzamento, e em que a frequência de ponto de cruzamento é uma frequência em que o primeiro valor de perturbação de ângulo de fase $\Delta\theta_1$ é igual ao ângulo de fase de carga de RLC θ_{RLC} .

[0030] Referência também às Figuras 3 e 4, detalhes adicionais do controlador de lado de rede 14 são ilustrados, em que a Figura 3 mostra um primeira modalidade para a introdução da perturbação de ângulo de fase $\Delta\theta$ por modificar ou ajustar valores de referência de comando de controle de corrente de conversor de lado de rede de acordo com uma perturbação de ângulo de fase calculada. Como se vê nesta modalidade, o componente de realimentação de frequência 22 inclui um componente de circuito de fase bloqueado (PLL) ou zero-cruzamento, o qual pode ser implementado em hardware, software executado no processador, firmware executado no processador, lógica programável, ou suas combinações, no controlador de lado de rede 14, e que fornece um sinal ou valor de saída 22a que indica a frequência medida f da voltagem no ponto de

acoplamento comum 5. Este sinal ou valor de baixa frequência medida 22a é recebido pelo componente de perturbação de ângulo de fase 20 que fornece a perturbação de ângulo de fase final calculada $\Delta\theta$ como um sinal ou valor 21 para o controlador de comutação 24 para modificação dos sinais de controle de comutação de conversor de lado de rede 15. Nesta modalidade, a perturbação de ângulo fase final calculada $\Delta\theta$ é usada junto com valores de referência de comando de controle de corrente de conversor de lado de rede não modificados (old) i_{qref_old} e i_{dref_old} por um componente de ajuste 40 para calcular valores de referência de comandos de controle de corrente de conversor de lado rede ajustados i_{qref} 46 e i_{dref} 48 de acordo com a seguinte equação matricial (5):

$$(5) \quad \begin{bmatrix} i_{qref} \\ i_{dref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta) & \sin(\Delta\theta) \\ -\sin(\Delta\theta) & \cos(\Delta\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{qref_old} \\ i_{dref_old} \end{bmatrix}$$

Por esta operação, os valores de referência de comando de controle de corrente de conversor de lado de rede são ajustados de acordo com a perturbação de ângulo de fase calculada $\Delta\theta$, que é então usada no controle de circuito fechado da corrente de saída de conversor de lado de rede 12. Em particular, o exemplo ilustrado fornece um valor de referência ajustado de eixo q 46 para um somador 50 que fornece uma saída para um componente de controle de PID de eixo q (proporcional, integral, derivativo) 52 cuja saída é usada por uma desacoplamento e componente de planta de saída 54 para gerar o sinal de saída de eixo q ou valor i_{q_output} que é realimentado como uma entrada subtrativa para o somador 50 e é, posteriormente, utilizado pelo

controlador de comutação 24 para gerar os sinais de controle de comutação 15 para operar o conversor de lado de rede 12. Da mesma forma, o componente de ajuste 40 fornece uma saída de referência de eixo d i_{dref} 48 para um somador 60 cuja saída aciona um componente de PID de eixo d 62 e um desacoplamento de eixo d e componente de planta de saída 64 para gerar o valor de saída de corrente de eixo d i_{d_output} que é realimentado como uma entrada subtrativa para o somador 60 e é também utilizado na geração dos sinais de controle de comutação de lado de rede 15.

[0031] Outra modalidade não limitativa é mostrada na Figura 4, em que uma rotação síncrona ao componente de transformação de quadro de referência estacionário 42 recebe os valores de referência de comando de controle de corrente de conversor de lado de rede não modificados i_{qref_old} e i_{dref_old} bem como uma saída de ângulo de fase 22b θ do componente de PLL / zero-cruzamento 22, e fornece três sinais ou valores de quadro de referência estacionários para um estacionário para transformação de quadro de referência girando sincronamente 44. Além disso, um somador 41 adiciona o sinal ou valor de ângulo de fase 22b (θ) para a perturbação de ângulo de fase calculada $\Delta\theta$, e fornece a soma resultante como uma entrada para a transformação 44, que gera os valores de referência de comando de controle de corrente de conversor de lado de rede de eixo q e d ajustados i_{qref} 46 e i_{dref} 48 para uso pelos componentes de PID de eixo q e d conforme descrito acima em relação à Figura 3.

[0032] Desta forma, a perturbação de ângulo de fase é introduzida no ponto de acoplamento comum 5 de acordo com

$\Delta\theta$ calculada para modificar os valores de correntes de referência de comando de eixo q e d i_{qref} e i_{dref} . Um descasamento de potência reativa entre a geração e a carga é em seguida formado a partir da ocorrência do ilhamento no sistema 2. A perturbação de ângulo de fase aplicada, além disso, é determinada pela mudança de frequência de acordo com as curvas ou funções predefinidas 20a e 20b e forma uma realimentação positiva equivalente, em que as duas funções ou curvas são aplicadas para gerar a perturbação de ângulo de fase adequada em frequências diferentes f_{m1} e f_{m2} para impedir o conversor 10 de formação de uma ilha em uma nova frequência estável no interior do intervalo nominal após a fonte de rede 4 ser desligada. Curvas ou funções de seno e tangente 20a e 20b não precisam ser usadas em todas as modalidades, e são apenas exemplos não limitativos.

[0033] Referindo-se também às Figuras 5 a 8, os conceitos de perturbação de ângulo de fase nova e detecção de ilhamento da presente divulgação podem ser utilizados vantajosamente em um conversor de laço de rede 10 para fornecer um sistema robusto para detecção de ilhamento não intencional em um sistema de potência distribuído 2 enquanto fornecendo apenas um pequeno impacto sobre a operação normal. Em particular, as curvas ou funções de seno e tangente ilustradas 20a e 20b facilitam a operação em que a perturbação vai ser pequena ou zero quando a frequência f é perto do valor nominal em operação normal (por exemplo, 50 Hz, em um exemplo). Isto é particularmente vantajoso uma vez que IEEE std. 1547 requer a corrente fluindo para a rede sendo corrente nominal inferior a 2 % de conversor de potência sob a condição de equilíbrio. Além

disso, os conceitos divulgados facilitam uma frequência de operação de ilha ser autoexpulsa de novos pontos estáveis que ainda estão dentro do intervalo de frequência normal pelo mecanismo de realimentação positiva inerente por fornecer uma perturbação de ângulo de fase grande o suficiente para forçar a frequência para manter em movimento. Estas técnicas são igualmente aplicáveis para cargas com elevado fator de qualidade, e os métodos e aparelhos podem ser ajustados de acordo com um determinado fator de qualidade exigida Q_F . A este respeito, uma condição de potência equilibrada é o pior caso para detecção de ilhamento, mas os conceitos da presente divulgação são particularmente robustos onde o ângulo de fase do conversor de lado de rede 12 é maior do que o ângulo de fase da carga de RLC 6 durante uma condição de ilhamento.

[0034] Um gráfico 200 na Figura 5 ilustra o ângulo de fase versus curvas de frequência 202 e 204 mostrando uma curva de carga de RLC 202 para uma dada porção de um sistema de potência distribuído 2, bem como uma curva 204 mostrando uma condição de potência equilibrada em que menos de 2 % da corrente flui para a rede e o limite de perturbação de ângulo de fase. Formas de onda ou funções de seno 20a podem ser projetadas para fazer a primeira perturbação de ângulo de fase ($A\theta_1$) maior do que a curva de carga 202 com fatores de qualidade suficientemente grandes e específicos Q_F , por exemplo, um fator de qualidade $Q_F = 10$ (fator de potência equivalente = 0,1), em torno de uma frequência nominal (por exemplo, 50 Hz). No entanto, o ponto de cruzamento (ponto estável) pode ser ainda dentro

do limiar de frequência. Neste caso, uma forma de onda ou fórmula de tangente 20b pode ser usada para forçar a frequência para manter movimento a partir do ponto estável e acelerar a mudança de frequência durante ilhamento. Isto pode reduzir a diferença de tempos de detecção de ilhamento em diferentes pontos de descasamento de capacidade (por exemplo, % de C descasamento).

[0035] A Figura 6 ilustra um gráfico 210 com curvas de ângulo de fase de carga de RLC (θ_{RLC}) em função da frequência em torno de uma frequência de operação de rede nominal (1,00 pu.) correspondendo aos fatores de qualidade de 1 e 10 como mostrado. Além disso, o gráfico 210 na Figura 6 ilustra uma perturbação de ângulo de fase exemplar ($\Delta\theta_1$) como uma função de frequência calculada utilizando uma função de seno 20a, bem como uma perturbação de ângulo de fase exemplar ($\Delta\theta_2$) calculada utilizando uma função de tangente 20b. Neste caso, a curva ou a função de seno 20a é usada em torno da frequência nominal (1,00) onde θ_{m1} é a perturbação de ângulo de fase quando a frequência (f) no PCC 5 atinge o valor de f_{m1} . A função de tangente 20b é usada após a frequência exceder o ponto concebido, onde θ_{m2} é a perturbação de ângulo de fase quando a frequência (f) no PCC 5 atinge o valor $(f_{m2} + f_g) / 2$. Outras formas de curvas ou funções podem ser aplicadas de acordo com as características de carga ou condições de aplicação.

[0036] Para ilustrar, as curvas ou funções de perturbação de ângulo de fase predefinidas 20a e 20b podem ser determinadas pela seleção de um fator de qualidade específico, por exemplo, elevado o suficiente para cobrir a carga possível 6, e, em seguida, selecionar θ_{m1} e f_{m1} de

modo a garantir uma realimentação positiva uma vez que a frequência desvia devido a ilhamento, e, assim, assegura que a frequência irá mover para longe do ponto nominal durante condições reais de ilhamento. Em um exemplo, estes valores são selecionados a fim de satisfazer a seguinte desigualdade (6):

$$(6) \quad d(\Delta\theta_1) / df > d(\Delta\theta_{RLC})/df;$$

onde θ_{RLC} é o ângulo de fase de carga de RLC associado com a carga de RLC 6 determinado como $\theta_{RLC} = - \text{atan}[(R/\omega L_{QF=1}) - R\omega C_{QF=1}] * Q_F$, e em que $R = V^2 / P$, V é a voltagem de PCC e P é a potência de PCC, $\omega = 2\pi f$; e Q_F é o fator de qualidade da carga de RLC 6 determinado como $Q_F = R(C_{QF}/L_{QF})^{1/2}$, $L_{QF} = V^2 / (2\pi f P Q_F)$, e $C_{QF} = (P Q_F) / (2\pi f V^2)$.

[0037] Com base na curva de ângulo de fase de carga de RLC correspondente (θ_{RLC}) para o fator de qualidade selecionado Q_F , θ_{m2} e f_{m2} são selecionados de modo que o segundo valor de perturbação de ângulo de fase $\Delta\theta_2 > \Delta\theta_1$ no ponto de cruzamento de frequência onde o primeiro valor de perturbação de ângulo de fase $\Delta\theta_1$ é igual ao ângulo de fase de carga de RLC θ_{RLC} . Neste sentido, esta desigualdade garante que não há nenhum ponto de cruzamento entre a carga de RLC 6 e a função de tangente 20b após a frequência do ponto de cruzamento da carga de RLC e funciona, por exemplo, em 50,433 Hz em um caso usando uma frequência de rede nominal de 50 Hz, como pode ser visto no exemplo da Figura 6. A técnica divulgada (por exemplo, ver a equação (1) acima) calcula o valor de perturbação de ângulo de fase final $\Delta\theta$ de acordo com o valor absoluto maior do primeiro e segundo valores de perturbação de ângulo de fase $\Delta\theta_1$ e $\Delta\theta_2$, assegurando desse modo que a frequência de operação f

continua a aumentar durante condições de ilhamento. Em uma possível implementação para um fator de qualidade especificado de 10 e uma frequência de rede nominal de 50 Hz, esta abordagem fornece $\theta_{m1} = 10^\circ$, e $f_{m1} = 50,5$ Hz para a função de seno 20s, e $\theta_{m2} = 12.5^\circ$ e $f_{m2} = 51$ Hz para a função de tangente 20b.

[0038] As Figuras 7 e 8 ilustram os gráficos 220 e 230, respectivamente, mostrando uma curva de perturbação de ângulo de fase que descreve seleção e utilização de uma perturbação de ângulo de fase com o valor máximo absoluto da primeira e da segunda curva de perturbação de ângulo de fase $\Delta\theta_1$ e $\Delta\theta_2$ como uma função do tempo (Figura 7) bem como frequência de saída de conversor de laço de rede f em função do tempo (Figura 8) para a condição acima referida, em que ilhamento começa no tempo igual a zero, e ilhamento é detectado pela técnica revelada cerca de 111 ms depois. Como se vê na Figura 7, este exemplo utiliza diminuir constantemente ajustamentos de ângulo de fase, embora outras modalidades sejam possíveis usando perturbações de ângulo de fase crescentes. A Figura 7 ilustra a situação em que a primeira perturbação de ângulo de fase $\Delta\theta_1$ é inicialmente maior do que a segunda perturbação de ângulo de fase $\Delta\theta_2$, com o processo descrito acima 100 (Figura 2) empregando um realimentação positiva em que a frequência f é iterativamente medida e as novas perturbações de ângulo de fase são recalculadas a cada iteração. Ao longo do tempo, como visto na Figura 7, o valor absoluto da segunda perturbação de ângulo de fase $\Delta\theta_2$ excede o da primeira perturbação de ângulo de fase $\Delta\theta_1$ após algumas iterações. Como pode ser visto na Figura 8, a frequência de operação

medida 22a no ponto de acoplamento comum 5 gradualmente é afastada de qualquer ponto de operação potencialmente estável, em que o limiar 20c (TH), eventualmente, é excedido, e o conversor de laço de rede 10 é, assim, capaz de detectar a condição de ilhamento não intencional cerca de 111 ms após a desconexão inicial da fonte de rede 4.

[0039] De acordo com outros aspectos da presente divulgação, um meio legível por computador não transitório é fornecido, tal como uma memória de computador, uma memória dentro de um sistema de controle de conversor de potência (por exemplo, controlador 100), um CD-ROM, disco flexível, unidade flash, banco de dados, servidor, computador, etc, incluindo instruções executáveis por computador para a realização dos métodos acima descritos. Os exemplos acima são meramente ilustrativos das várias modalidades possíveis dos vários aspectos da presente divulgação, em que alterações e / ou modificações equivalentes ocorrerão a outros especialistas na técnica após a leitura e compreensão desta especificação e os desenhos anexos. Em particular com respeito às várias funções desempenhadas pelos componentes acima descritos (montagens, dispositivos, sistemas, circuitos, e outros semelhantes), os termos (incluindo uma referência a um "meio") utilizados para descrever estes componentes se destinam a corresponder, a menos de outra forma indicado, para qualquer componente, tal como hardware, software executado no processador, ou combinações dos mesmos, que desempenhe a função especificada do componente descrito (isto é, que é funcionalmente equivalente), embora não estruturalmente equivalente à estrutura descrita que

executa a função nas implementações ilustradas da divulgação. Além disso, apesar de uma característica particular da divulgação poder ter sido divulgada com respeito a apenas uma das várias implementações, tal característica pode ser combinada com uma ou mais outras características das outras implementações que possam ser desejadas e vantajosas para qualquer aplicação determinada ou particular. Além disso, na medida em que os termos "incluindo", "inclui", "tendo", "tem", "com", ou as suas variantes são utilizados na descrição e / ou nas reivindicações, os termos têm a intenção de serem inclusivos de maneira semelhante ao termo "compreendendo".

REIVINDICAÇÕES

1. Método (100) para detectar ilhamento não intencional em um sistema de potência distribuído (2), o método (100) caracterizado pelo fato de que compreende:

medir (104) uma frequência (f) de uma voltagem em um ponto de acoplamento comum (5) de um conversor de laço de rede (10) com uma carga (6);

determinar (106) um primeiro valor de perturbação de ângulo de fase ($\Delta\theta_1$) de acordo com a frequência medida (f) e uma primeira função de perturbação de ângulo de fase (20a);

determinar (108) um segundo valor de perturbação de ângulo de fase ($\Delta\theta_2$) de acordo com a frequência medida e uma segunda função de perturbação de ângulo de fase (20b);

calcular (110) um valor de perturbação de ângulo de fase final ($\Delta\theta$) de acordo com o primeiro e segundo valores de perturbação de ângulo de fase ($\Delta\theta_1, \Delta\theta_2$);

ajustar (112) pelo menos um valor de referência (i_{qref}, i_{dref}) de comando de controle de corrente de conversor de lado de rede de acordo com o valor perturbação de ângulo de fase final ($\Delta\theta$);

gerar (114) sinais (15) de controle de comutação de conversor de lado de rede para operar um conversor de lado de rede (12) conectado ao ponto de acoplamento comum (5) de acordo com o pelo menos um valor de referência de comando de controle de corrente de conversor de lado de rede (i_{qref}, i_{dref});

novamente medir a frequência (f) da voltagem no ponto de acoplamento comum (5); e

detectar seletivamente (118) ilhamento não intencional

no sistema de potência distribuído (2) com base na frequência medida (f) da voltagem no ponto de acoplamento comum (5).

2. Método (100), de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que compreende a detecção (120) de ilhamento não intencional no sistema de potência distribuído (2) se a frequência medida (f) da voltagem no ponto de acoplamento comum (5) difere de uma frequência de rede nominal por mais do que um valor de limiar (20c).

3. Método (100), de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o valor de perturbação de ângulo de fase final ($\Delta\theta$) é calculado (110) de acordo com o valor absoluto maior do primeiro e segundo valores de perturbação de ângulo de fase ($\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_2$).

4. Método (100), de acordo com a reivindicação 3, caracterizado pelo fato de que o valor de perturbação de ângulo de fase final ($\Delta\theta$) é calculado (110) de acordo com a seguinte fórmula:

$$\Delta\theta = \max[\text{abs}(\Delta\theta_1), \text{abs}(\Delta\theta_2)] * \text{sign}(f - f_g),$$

em que $\Delta\theta_1$ é o primeiro valor de perturbação de ângulo de fase, $\Delta\theta_2$ é o segundo valor de perturbação de ângulo de fase, f é a frequência medida, f_g é a frequência de rede nominal, e sign é a função de sinal com 1 para $f > f_g$, 0 para $f = f_g$, e -1 para $f < f_g$.

5. Método (100), de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato de que a primeira função de perturbação de ângulo de fase (20a) é uma função de seno, e em que a segunda função de perturbação de ângulo de fase (20b) é uma função de tangente.

6. Método (100), de acordo com a reivindicação 1,

caracterizado pelo fato de que a primeira função de perturbação de ângulo de fase (20a) é uma função de seno, e em que a segunda função de perturbação de ângulo de fase (20b) é uma função de tangente.

7. Método (100), de acordo com a reivindicação 6, caracterizado pelo fato de que o primeiro valor de perturbação de ângulo de fase ($\Delta\theta_1$) é determinado de acordo com a frequência medida (f) e a seguinte primeira função de perturbação de ângulo de fase (20a):

$$\Delta\theta_1 = \theta_{m1} \sin((\Pi / 2) * ((f - f_g) / (f_{m1} - f_g)),$$

onde f é a frequência medida, f_g é a frequência de rede nominal, f_{m1} é uma primeira frequência predeterminada diferente da frequência de rede nominal f_g , e θ_{m1} é um primeiro ângulo de fase predeterminado,

em que θ_{m1} e f_{m1} são selecionados para satisfazer a seguinte desigualdade:

$$d(\Delta\theta_1)/df > d(\Delta\theta_{RLC})/df;$$

em que θ_{RLC} é um ângulo de fase de carga associado com a carga determinada de acordo com a seguinte função:

$$\theta_{RLC} = - \operatorname{atan}[(R/\omega L_{QF}) - R\omega C_{QF}] * QF,$$

em que $R = V^2/P$, V sendo uma voltagem no ponto de acoplamento comum, P sendo um valor de potência no ponto de acoplamento comum, $\omega = 2\Pi f$, QF é um fator de qualidade da carga (6) determinado como $QF = R(C_{QF}/L_{QF})^{1/2}$, $L_{QF} = V^2 / (2\Pi f P QF)$, e $C_{QF} = (P QF) / (2\Pi f V^2)$.

8. Método (100), de acordo com a reivindicação 7, caracterizado pelo fato de que o segundo valor de perturbação de ângulo de fase ($\Delta\theta_2$) é determinado de acordo com a frequência medida (f) e a seguinte segunda função de perturbação de ângulo de fase (20b):

$$\Delta\theta_2 = \theta_{m2} \tan((\pi / 2) * ((f - f_g) / (f_{m2} - f_g))),$$

em que θ_{m2} e f_{m2} são selecionados de tal modo que o segundo valor de perturbação de ângulo de fase ($\Delta\theta_2$) é maior do que o primeiro valor de perturbação de ângulo de fase ($\Delta\theta_1$) em uma frequência de ponto de cruzamento, e em que a frequência de ponto de cruzamento é uma frequência em que o primeiro valor de perturbação de ângulo de fase ($\Delta\theta_1$) é igual ao ângulo de fase de carga ($\Delta\theta_{RLC}$).

9. Meio legível por computador com instruções executáveis por computador para detectar ilhamento não intencional em um sistema de potência distribuído (2), meio legível por computador caracterizado pelo fato de que compreende instruções executáveis por computador para:

medir (104) uma frequência (f) de uma voltagem em um ponto de acoplamento comum (5) de um conversor de laço de rede (10) com uma carga (6);

determinar (106) um primeiro valor de perturbação de ângulo de fase ($\Delta\theta_1$) de acordo com a frequência medida (f) e uma primeira função de perturbação de ângulo de fase (20a);

determinar (108) um segundo valor de perturbação de ângulo de fase ($\Delta\theta_2$) de acordo com a frequência medida e uma segunda função de perturbação de ângulo de fase (20b);

calcular (110) um valor de perturbação de ângulo de fase final ($\Delta\theta$) de acordo com o primeiro e segundo valores de perturbação de ângulo de fase ($\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_2$);

ajustar (112) pelo menos um valor de referência (i_{qref} , i_{dref}) de comando de controle de corrente de conversor de lado de rede de acordo com o valor perturbação de ângulo de fase final ($\Delta\theta$);

gerar (114) sinais (15) de controle de comutação de conversor de lado de rede para operar um conversor de lado de rede (12) conectado ao ponto de acoplamento comum (5) de acordo com o pelo menos um valor de referência de comando de controle de corrente de conversor de lado de rede (i_{qref} , i_{dref});

novamente medir a frequência (f) da voltagem no ponto de acoplamento comum (5); e

detectar seletivamente (118) ilhamento não intencional no sistema de potência distribuído (2) com base na frequência medida (f) da voltagem no ponto de acoplamento comum (5).

10. Conversor de potência de laço de rede (10), caracterizado pelo fato de que compreende:

um estágio de conversor de lado de rede (12) compreendendo uma pluralidade de dispositivos de comutação acoplados entre um ponto de acoplamento comum (5) de um sistema de potência distribuído (2) e um barramento DC (13), o estágio de conversor de lado de rede (12) operativo de acordo com uma pluralidade de sinais de controle (15) de comutação de conversor de lado de rede para transferir potência entre o ponto de acoplamento comum (5) e o barramento DC (13);

um controlador de lado de rede (14) operativo para fornecer os sinais de controle (15) de comutação de conversor de lado de rede para o estágio de conversor de lado de rede (12), e compreendendo:

um componente de perturbação de ângulo de fase (20) operativo para:

determinar (106) um primeiro valor de

perturbação de ângulo de fase ($\Delta\theta_1$) de acordo com a frequência (f) de uma voltagem em um ponto de acoplamento comum (5) e uma primeira função de perturbação de ângulo de fase (20a),

determinar (108) um segundo valor de perturbação de ângulo de fase ($\Delta\theta_2$) de acordo com a frequência medida (f) e uma segunda função de perturbação de ângulo de fase (20b), e

calcular (110) um valor de perturbação de ângulo de fase final ($\Delta\theta$) de acordo com o primeiro e segundo valores ($\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_2$) de perturbação de ângulo de fase; e um componente de controle de comutação operativo (24) para:

ajustar (112) pelo menos um valor de referência (i_{qref} , i_{dref}) de comando de controle de corrente de conversor de lado de rede de acordo com o valor de perturbação de ângulo de fase final ($\Delta\theta$), e

gerar (114) os sinais de controle (15) de comutação de conversor de lado de rede para operação do conversor de lado de rede (12) de acordo com pelo menos um valor de referência (i_{qref} , i_{dref}) de comando de controle de corrente de conversor de lado de rede;

em que o controlador de lado de rede (14) é operativo para detectar seletivamente (118) ilhamento não intencional no sistema de potência distribuído (2) com base na frequência (f) medida da voltagem no ponto de acoplamento comum (5).

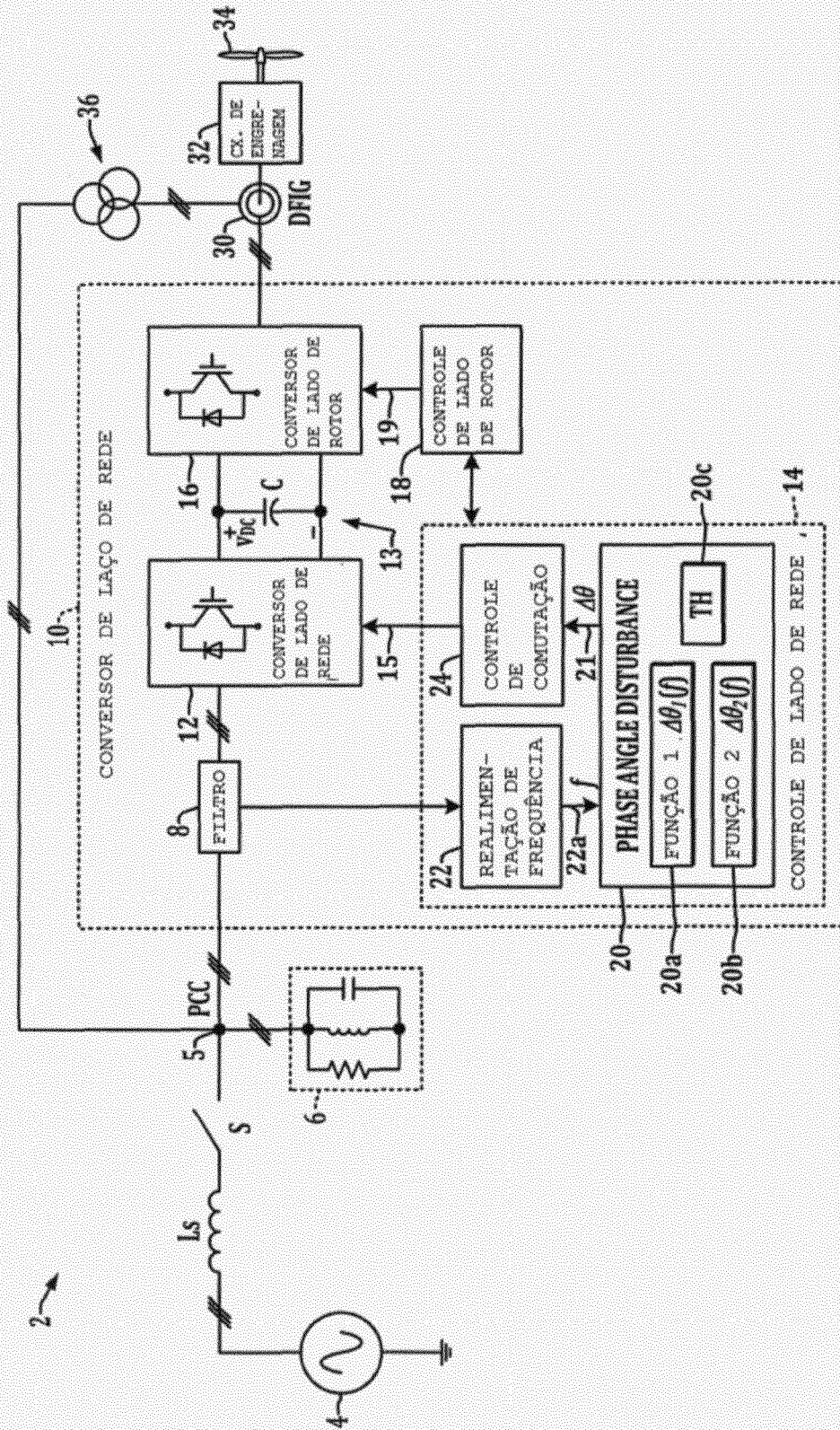


FIG. 1

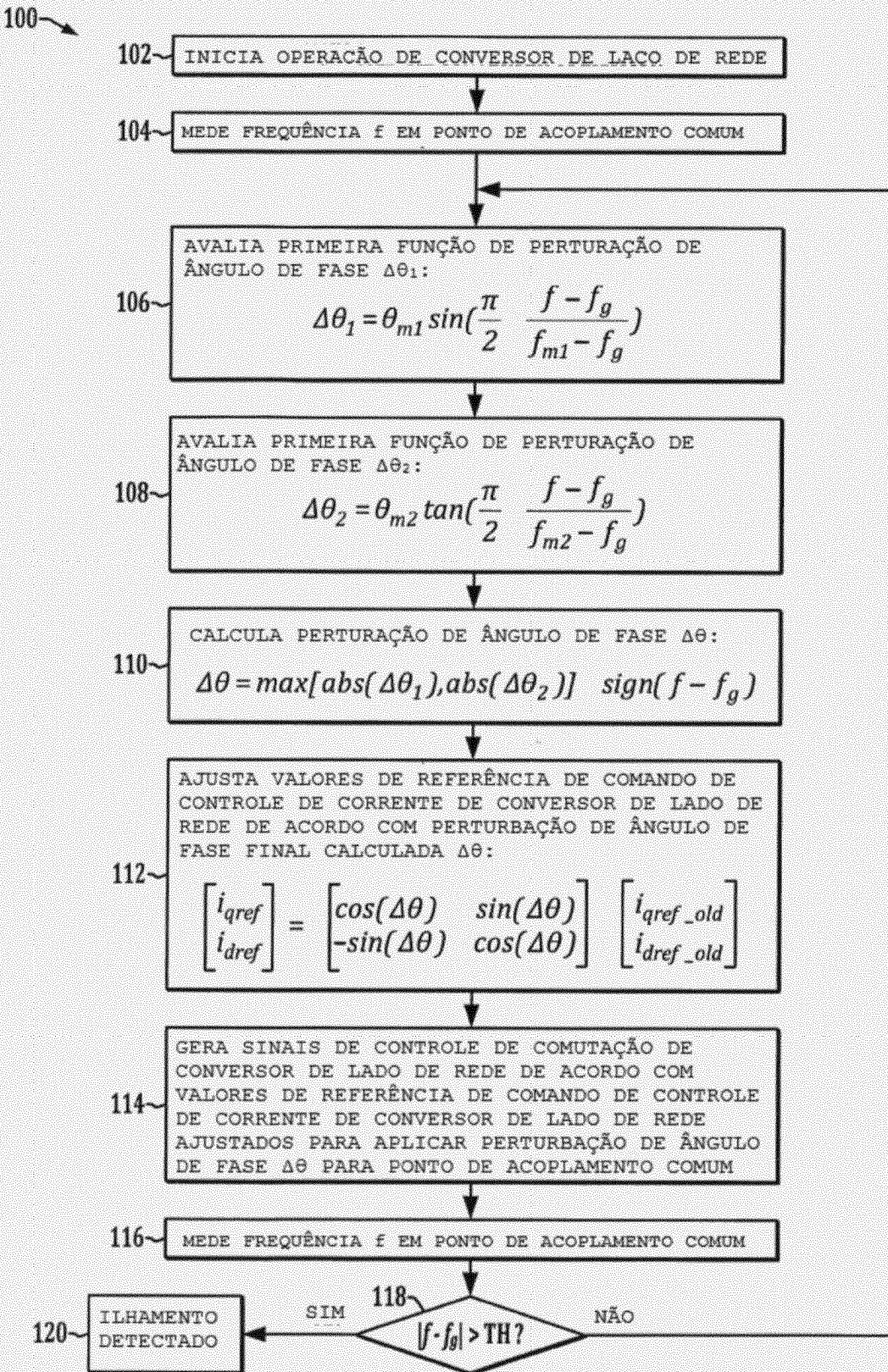


FIG. 2

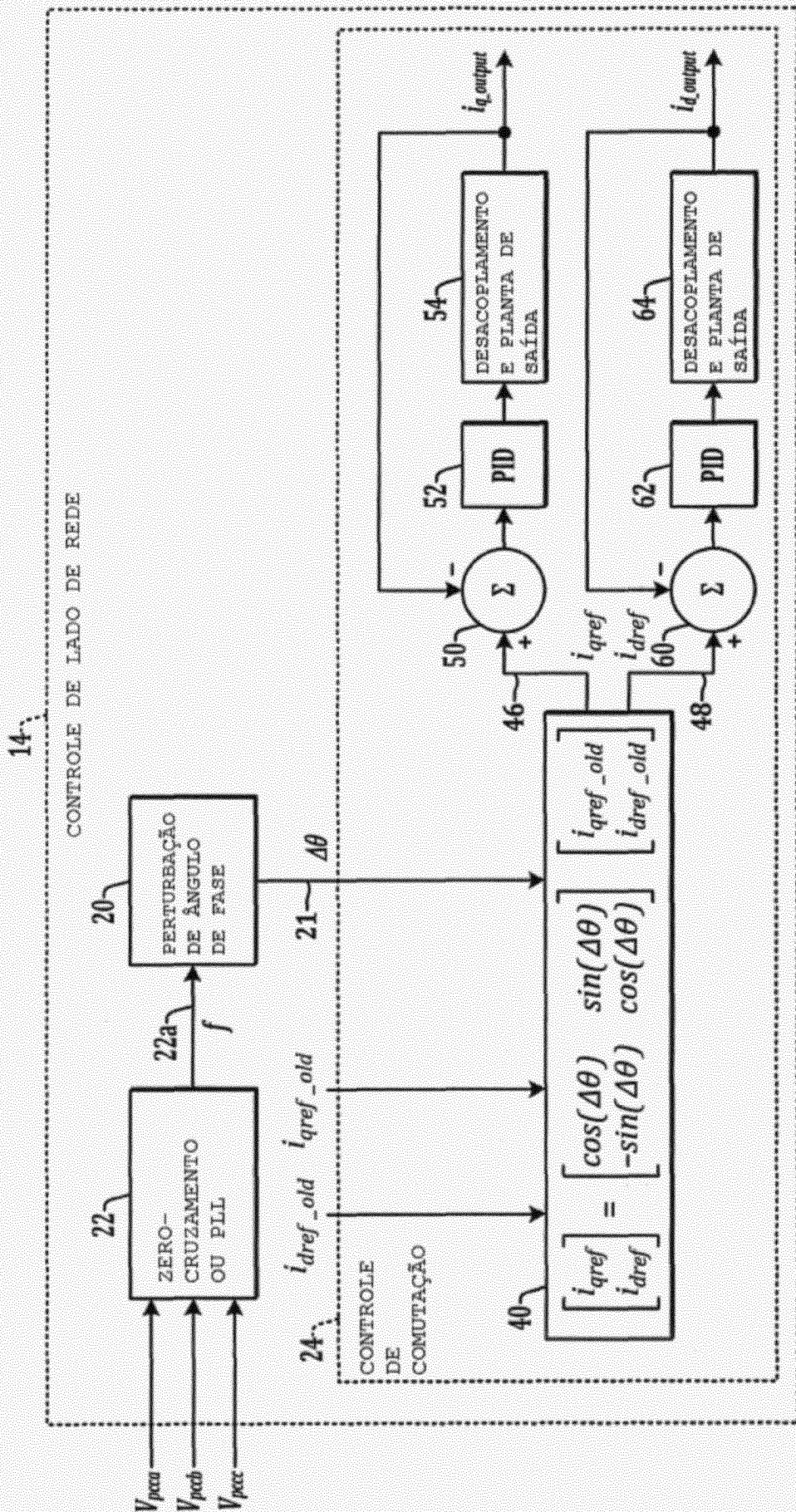


FIG. 3

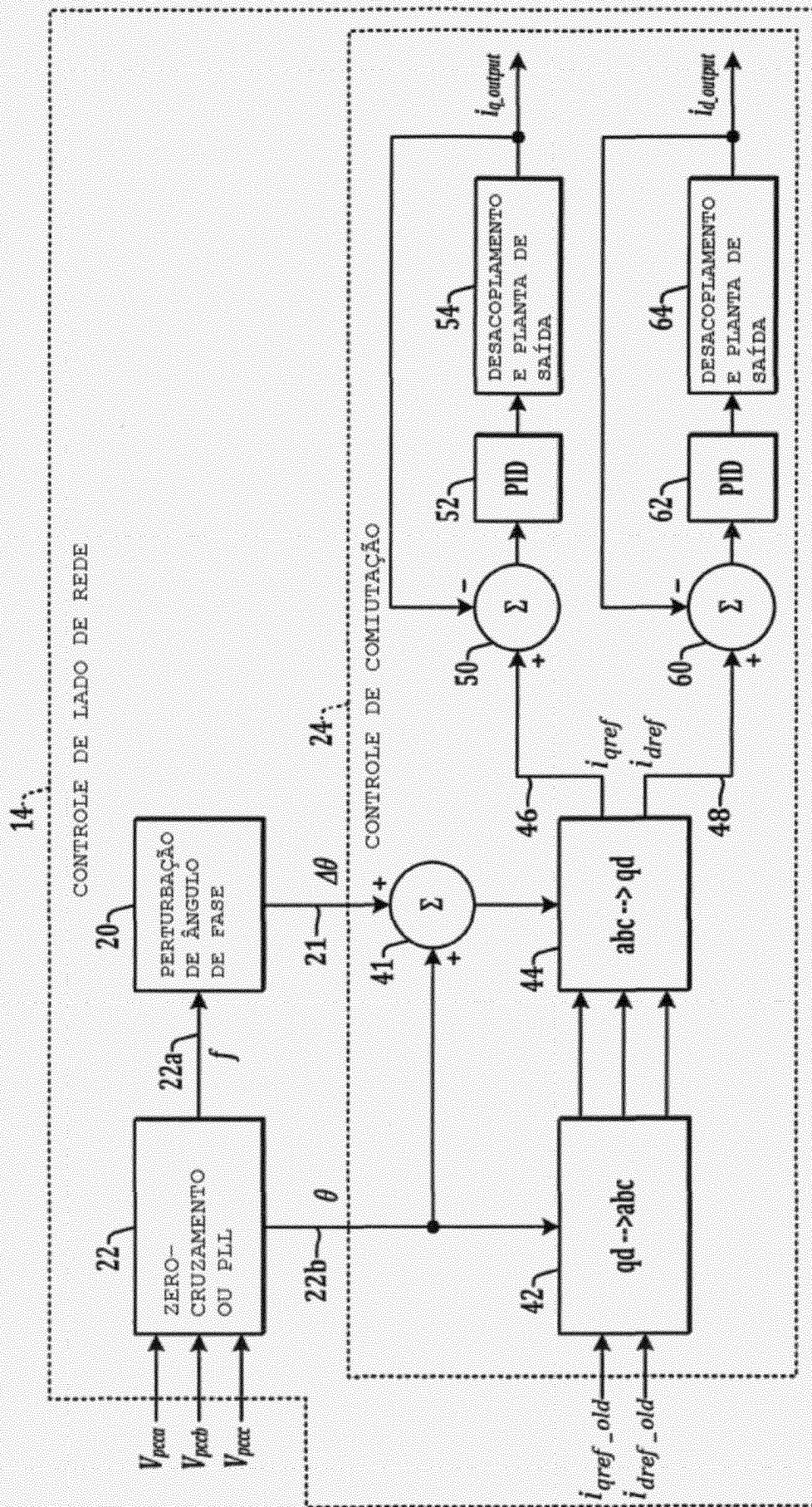


FIG. 4

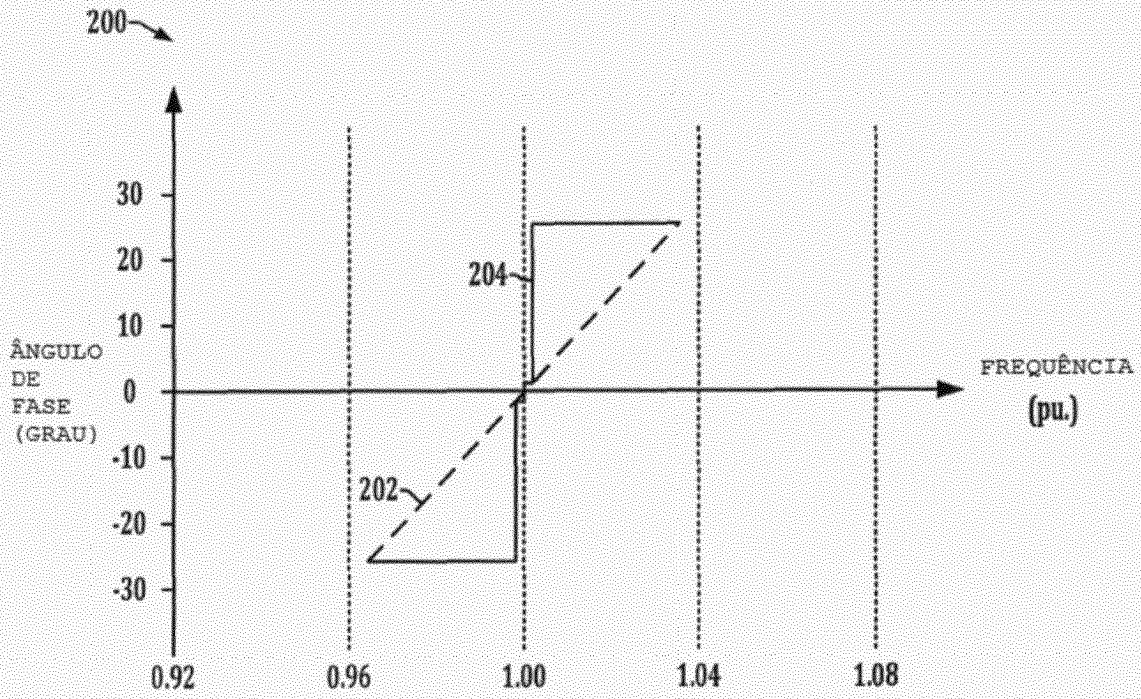


FIG. 5

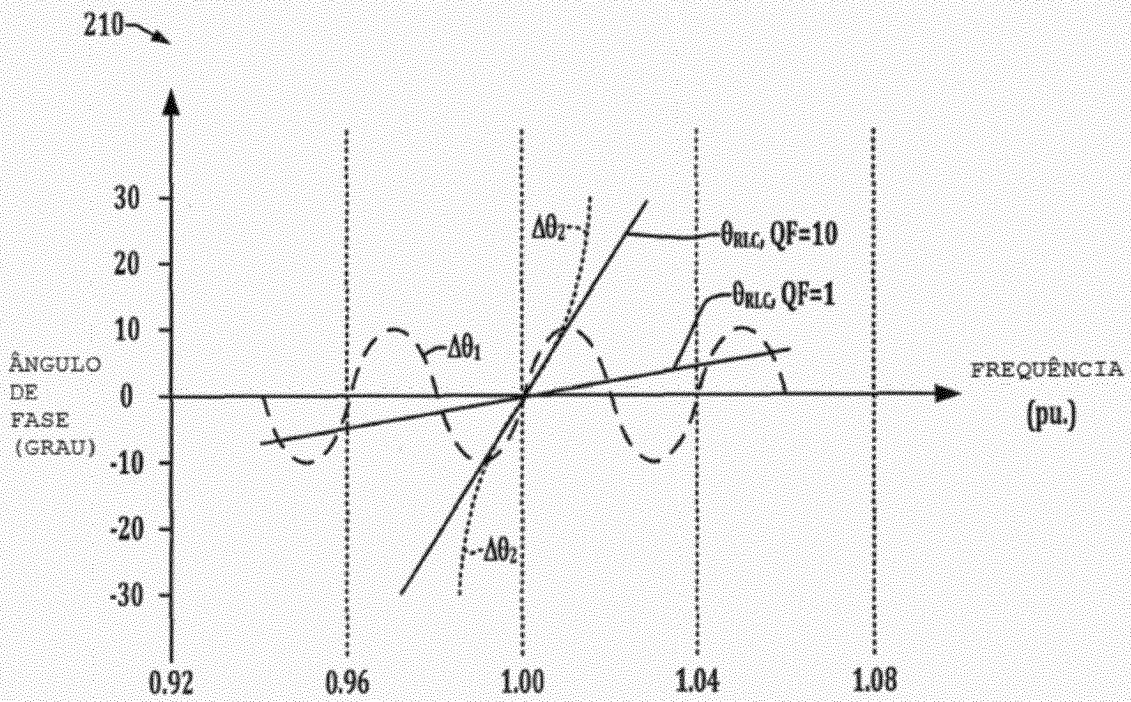


FIG. 6

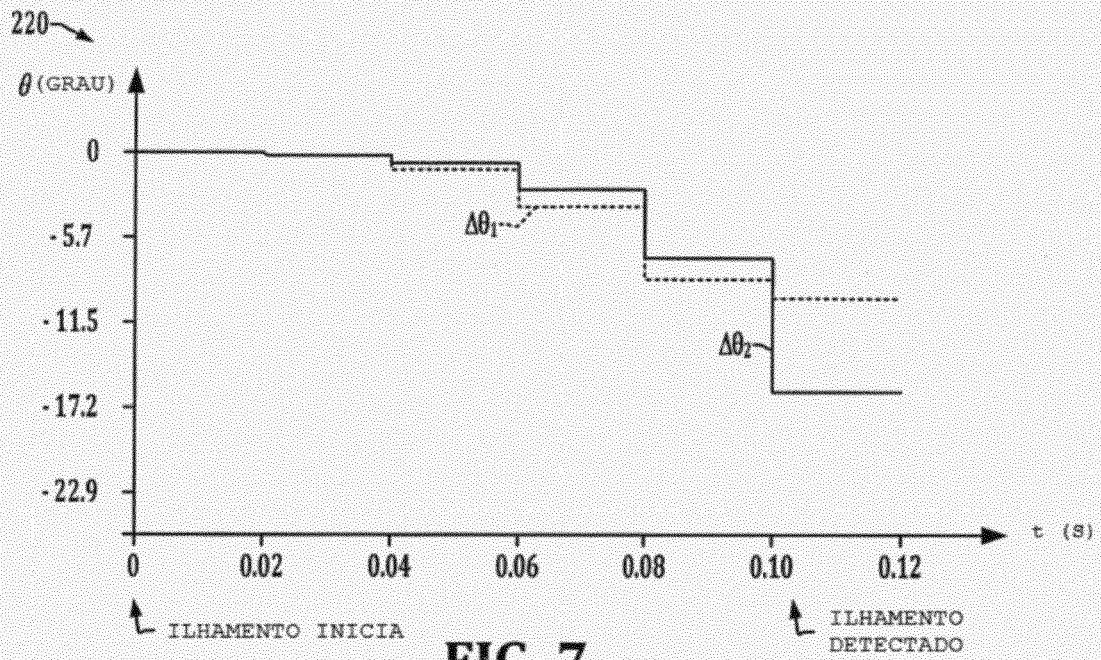


FIG. 7

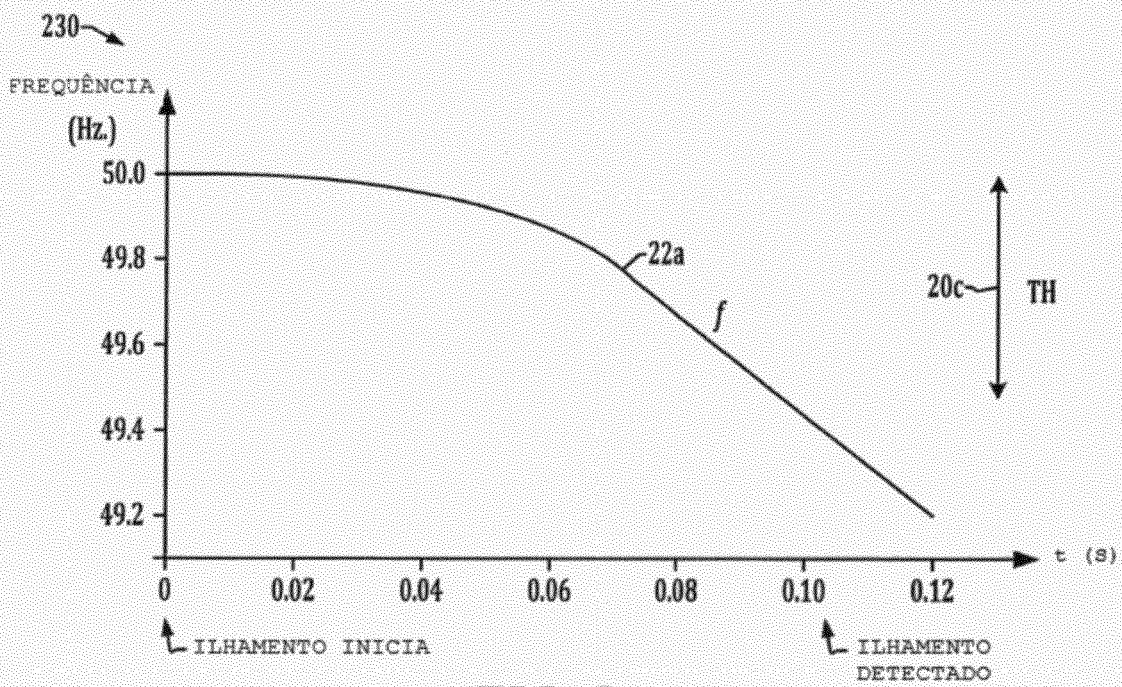


FIG. 8

RESUMO**MÉTODO E APARELHO PARA DETECÇÃO DE ILHAMENTO PARA
CONVERSORES DE LAÇO DE REDE**

Métodos e aparelhos são apresentados para detecção de ilhamento não intencional para conversores de lado de rede em que a perturbação de ângulo de fase é introduzida através de modificação de sinais de controle de comutação de conversor de lado de rede e um descasamento de potência reativa entre geração e a carga de rede é formada a partir da ocorrência do ilhamento não intencional, em que a perturbação de fase aplicada é determinada de acordo com duas curvas predefinidas para formar uma realimentação positiva equivalente em frequências diferentes para impedir o conversor de formar uma ilha em uma nova frequência estável após a rede ser desligada.