



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

(11) PI 0515356-5 B1

(22) Data do Depósito: 30/08/2005

(45) Data de Concessão: 10/10/2017



(54) Título: "FORNO ELÉTRICO E MÉTODO PARA OPERAR UM FORNO ELÉTRICO"

(51) Int.Cl.: F27D 11/10; F27D 19/00

(30) Prioridade Unionista: 01/09/2004 US 60/606,342

(73) Titular(es): HATCH LTD.

(72) Inventor(es): MOHAMMAD SEDIGHY

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para **"FORNO ELÉTRICO E MÉTODO PARA OPERAR UM FORNO ELÉTRICO"**

Campo da Invenção

[001] A presente invenção refere-se geralmente aos sistemas e métodos para minimizar perda de condução elétrica durante a entrada de material de alimentação para um forno.

Antecedentes da Invenção

[002] Existe um número de contextos em cuja energia e/ou estabilização de corrente e compensação de desequilíbrio é desejável mitigar as ineficiências e avaria em potencial que podem resultar em demandas de energia flutuante. Por exemplo, no caso de fornos a arco elétricos de corrente alternativa (CA), os arcos de alta resistência são usados para fundir ou refinar minério, metais e/ou outros materiais, e esses arcos de alta energia comportam-se como impedâncias de variação de tempo não linear. A energia ativa ou reativa consumida por um forno a arco elétrico tende a flutuar devido às condições de operação que mudam freqüentemente, fazendo com que a freqüência e/ou distúrbios de voltagem que podem negativamente impactar o suprimento de energia e outras cargas conectadas ao mesmo suprimento de energia.

[003] Além disso, os fornos a arco elétricos tendem a serem conectados como cargas trifásicas e podem puxar correntes desequilibradas do suprimento de energia, o que pode levar a desequilíbrios de voltagem. O desequilíbrio de corrente resultante pode exceder a capacidade de corrente desequilibrada do sistema de suprimento.

[004] A perda de arco entre o eletrodo e o banho de forno causa severas flutuações de energia e corrente puxada pelo forno do suprimento de energia.

[005] Tal perda de arco pode resultar da, por exemplo, entrada súbita de novo material de alimentação no forno. No caso de fornos de

fusão, o novo material é freqüentemente adicionado ao forno, enquanto o forno está em operação e é tipicamente depositado em torno da área onde os eletrodos estão produzindo centelhas. O novo material de alimentação tipicamente tem uma resistência elétrica relativamente alta, e o material não pode sempre ser uniformemente distribuído. O material de alimentação desigualmente distribuído pode puxar alta resistência material mediante um ou mais eletrodos, fazendo com que a resistência do percurso do centelhamento seja significativamente aumentada, o que pode levar à extinção do arco.

[006] As perdas do arco fazem com que a energia e corrente do forno caiam. Em um forno de 3 fases, 3 eletrodos, por exemplo, uma perda de arco mediante um eletrodo causa uma queda de 50% na energia do forno. Como resultado, o operador do forno ou o sistema de regulagem automática do eletrodo pode ter que abaixar um ou mais dos eletrodos para estabelecer contato com material de baixa resistência no forno e lentamente elevar os eletrodos a fim de retornar os eletrodos para suas posições normais de operação.

[007] As perdas de arco usualmente não ocorrem mediante todos os eletrodos ao mesmo tempo. Como resultado de uma perda de arco, as correntes de forno podem se tornar severamente desequilibradas. Esse desequilíbrio afeta a operação do gerador de energia e outras cargas acopladas ao gerador. Em algumas circunstâncias, os distúrbios de energia e corrente resultantes da perda de arco podem levar à paralisação temporária de energia para o forno, e possivelmente até mesmo paralisação temporária do gerador. Se o forno ou o gerador for paralisado, pode haver retardo significativo antes dele ser reiniciado, resultando em reduzida eficiência de operação e perda econômica substancial.

[008] É desejado endereçar ou melhorar um ou mais dos problemas descritos acima, ou pelo menos fornecer uma alternativa útil para

sistemas ou métodos prévios.

Sumário da Invenção

[009] Aspectos da invenção referem-se geralmente a métodos e sistemas para minimizar perda de condução elétrica em um forno elétrico durante a entrada de material de alimentação para o forno, e para fornos elétricos empregando tais sistemas e métodos. A fim de evitar perda do arco ou outra perda de condução, ou pelo menos reduzir sua probabilidade, pelo menos um eletrodo no forno é abaixado em antecipação à entrada do material de alimentação. A reduzida probabilidade de perda de condução contribui para eficiência aumentada do forno e uma probabilidade reduzida do forno, ou um gerador de energia suprindo energia para o forno, necessitando ser paralisado.

[0010] Em um aspecto, a invenção refere-se a um sistema de forno elétrico acoplado a um suprimento de energia. O sistema de forno inclui um eletrodo, um sistema de controle de reator variável para manutenção de um ponto de referência de energia, incluindo um reator variável acoplado entre o eletrodo e a linha de suprimento de energia, e um sistema de controle de alimentação para controlar a entrada de materiais novos para o forno, o sistema de controle de alimentação tendo uma saída para um sinal de solicitação de alimentação. O sistema de forno também inclui um sistema de posicionamento de eletrodo acoplado ao eletrodo para controlar uma posição do eletrodo, o sistema de posicionamento do eletrodo tendo uma entrada para receber o sinal de solicitação de alimentação e tendo um componente de "sobreposição" ou "override" para abaixar o eletrodo em resposta ao sinal de solicitação de alimentação.

[0011] Em um aspecto adicional, a invenção refere-se a um método para controlar um forno elétrico durante a entrada de material de alimentação para o forno. O forno compreende pelo menos um eletrodo posicionável por um sistema de posicionamento de eletrodo e um

sistema de controle de alimentação para controlar a entrada de material de alimentação para o forno, o sistema de controle de alimentação tendo uma saída para um sinal de solicitação de alimentação. O método compreende as etapas de receber no sistema de posicionamento de eletrodo o sinal de solicitação de alimentação do sistema de controle de alimentação e abaixar o eletrodo em resposta ao sinal de solicitação de alimentação.

[0012] Em um outro aspecto, a invenção refere-se a um sistema para minimizar perda de condução elétrica durante entrada do material de alimentação para um forno elétrico, o sistema compreendendo pelo menos um eletrodo disposto dentro do forno. Um suprimento de energia é acoplado à pelo menos um eletrodo de modo que cada eletrodo seja acoplado a uma respectiva fase do suprimento de energia. Um sistema de controle de alimentação controla a entrada do material de alimentação para o forno e tem uma saída para um sinal de solicitação de alimentação. Um sistema de posicionamento de eletrodo é acoplado a cada eletrodo para controlar uma posição do eletrodo dentro do forno, o sistema de posicionamento de eletrodo tendo uma entrada para receber o sinal de solicitação de alimentação e tendo um dispositivo de posicionamento para fazer com que pelo menos um eletrodo seja abaixado em resposta ao sinal de solicitação de alimentação.

[0013] Para um forno a arco, a invenção reduz a probabilidade de perda de arco entre um eletrodo e o material de alimentação durante a entrada de novo material de alimentação no forno por abaixamento do eletrodo em antecipação da entrada do material de alimentação. Em algumas modalidades, um reator variável é fornecido entre o eletrodo e o suprimento de energia para assistir na manutenção de um ponto de ajuste, tal como um ponto de ajuste de energia ou de corrente, durante o abaixamento e subsequente levantamento do eletrodo. O uso do reator variável nesse contexto vantajosamente possibilita que maior

estabilidade de corrente e de energia seja obtida durante o reposicionamento do eletrodo.

[0014] A probabilidade reduzida de perda de arco resultante de modalidades da invenção contribui para maior equilíbrio total de corrente e estabilidade de energia, bem como estabilidade total de operação do forno, e desse modo aumenta a eficiência de energia do forno e reduz a probabilidade do gerador do forno ou de energia necessitar ser paralisado.

Breve Descrição dos Desenhos

[0015] Uma referência será agora feita, a título de exemplo, aos desenhos em anexo, que mostram modalidades da presente invenção, e em que:

A Figura 1 mostra um diagrama por fase de um circuito simplificado de um forno a arco elétrico;

A Figura 2 mostra um diagrama de um circuito simplificado de múltiplos fornos a arco elétricos supridos por um sistema de energia trifásico de 3 cabos;

A Figura 3 mostra um diagrama em bloco por fase de um sistema de controle de energia de acordo com uma modalidade da presente invenção;

A Figura 4 mostra graficamente um exemplo de diagramas de fasor de um primeiro forno mediante uma perda de condição de arco;

A Figura 5 mostra graficamente um exemplo de diagramas de fasor de outros fornos compensando a perda de condição de arco mostrado na Figura 4;

A Figura 6 mostra graficamente um exemplo de diagramas de fasor do total de energia puxada dos fornos representados nas Figuras 4 e 5;

A Figura 7 mostra, em forma de fluxograma, um método de

estabilizar a puxada de energia através de cargas múltiplas;

A Figura 8 mostra, em forma de fluxograma, um método de compensar desequilíbrio em cargas multifásicas; e

A Figura 9 mostra, em forma de fluxograma, um método de regular a posição do eletrodo.

Descrição de Modalidades Específicas

[0016] Embora as modalidades descritas aqui geralmente se refiram a fornos a arco elétricos trifásicos, de três cabos com um eletrodo por fase, deve ser entendido que a invenção é aplicável a fornos tendo somente um eletrodo, se produzindo centelhas ou não produzindo centelhas e de CC ou CA, ou outros números de eletrodos. Em particular, a invenção pode ser aplicada a fornos tendo dois eletrodos por fase de um suprimento de energia multifásica. Por exemplo, a invenção pode ser aplicada a um forno trifásico tendo seis eletrodos.

[0017] Deve ser entendido que para toda espécie de configuração de forno elétrico, é necessário fornecer um percurso de retorno para a corrente que está passando através do eletrodo. Isso pode ser através dos condutores do suprimento de energia trifásica ou pode ser através de um condutor dedicado separado aos condutores de suprimento. No caso de um forno de um eletrodo, o percurso de retorno da corrente pode ser através de um meio condutivo fixado em contato elétrico com o resíduo metálico ou metal fundido.

[0018] Um método e um sistema para estabilizar energia em um forno a arco elétrico é descrito em detalhes na patente US 6.603.795 para Ma et al., cujos conteúdos são aqui incorporados a título de referência.

[0019] Ma et al. descrevem um sistema de controle de energia que varia a impedância reativa entre os eletrodos de um forno a arco elétrico e a linha de suprimento de energia em resposta às características medidas do forno. Em particular, o sistema descrito monitora a volta-

gem e corrente puxada por um eletrodo no forno a arco de eletrodo e determina a impedância do eletrodo. Baseado na impedância do eletrodo, o sistema de controle de energia ajusta a impedância reativa para minimizar flutuações de energia vistas pela rede de suprimento de energia. Ele faz isso ajustando uma reatância variável. O tempo de resposta associado com esse sistema de controle é na ordem de cerca de um ciclo elétrico, fornecendo uma resposta relativamente rápida.

[0020] Ma et al. também descrevem um controlador de posição de eletrodo que controla um sistema de posicionamento de eletrodo para ajustar a altura do eletrodo baseado em características medidas do eletrodo. Por exemplo, o controlador de posição de eletrodo pode monitorar a impedância do eletrodo por monitoração da voltagem e características de corrente para o forno e pode regular a altura do eletrodo para minimizar as flutuações de energia devido às mudanças na impedância do eletrodo. O tempo de resposta desse sistema de controle é relativamente lento, sendo na ordem de alguns segundos.

[0021] Uma referência é primeiro feita à Figura 1, que mostra um diagrama de circuito simplificado 10 de um forno a arco elétrico de acordo com Ma et al. O circuito 10 mostra uma voltagem em linha 12, uma impedância de arco 14, uma reatância de circuito fixada 16, e uma reatância variável 18. A impedância de arco 14 inclui uma reatância de arco X_{arc} e uma resistência de arco R_{arc} . A reatância de circuito fixada 16 pode incluir reatância do transformador do forno e quaisquer cabos de energia, condutores, e trabalho de barramento entre o sistema de suprimento e o eletrodo, onde tal reatância pode ser considerada constante como comparado à impedância de arco 14.

[0022] Se a resistência do circuito total do circuito 10 é dada pela variável R e a corrente é dada pela variável I , então a energia reativa P consumida pelo circuito 10 é governada pela equação $P=RI^2$. A impedância de arco 14 é variável e pode mudar abruptamente, o que pode

causar mudanças na corrente I . Em particular, a corrente I pode ser interrompida se o arco for extinguido.

[0023] A fim de manter a energia P em um ponto de ajuste de energia, a reatância variável 18 é ajustada para compensar mudanças à resistência do circuito total R e à corrente I . Será entendido que se a corrente do eletrodo I cai abaixo de um valor $I_{crítico}$ então o circuito 10 será incapaz de manter a energia P em um nível fixado e a energia P cairá abaixo do ponto de ajuste de energia. Esse valor $I_{crítico}$ coincide com a reatância variável 18 sendo reduzida ao seu valor mínimo.

[0024] Pode ter um ajuste de reatância variável máxima que limitaria a habilidade do circuito 10 para manter a energia P no ponto de ajuste se a corrente sobe acima de um valor $I_{máx.}$.

[0025] Quedas súbitas na corrente do eletrodo podem ser encontradas com forno a arco de eletrodo em CA quando um novo material de alimentação é introduzido ao forno. Se o novo material interromper o percurso do arco ele pode temporariamente causar um grande aumento na impedância do eletrodo e uma grande queda na corrente do eletrodo I .

[0026] Essa dificuldade na manutenção do ponto de ajuste de energia também surge no contexto de cargas trifásicas, como será explanado com referência à Figura 2, que mostra um circuito simplificado 20 para fornos a arco elétricos múltiplos 22 (tendo circuitos de suprimento de energia respectivos F_1, F_2, \dots, F_n). A voltagem em linha é mostrada em três fases 12a, 12b, 12c. Cada forno inclui três eletrodos de arco elétrico, A, B e C (não mostrado) – um por cada fase.

[0027] Cada fase de cada circuito de suprimento de energia para o forno a arco elétrico inclui uma reatância variável 18 (mostrada individualmente como $X_{varA1}, X_{varB1}, X_{varC1}, \dots$) e um reatância de circuito fixada 16. Cada fase também inclui a impedância de arco 14, que é composta da reatância do arco ($X_{varA1}, X_{varB1}, X_{varC1}$) e da resistência do

arco (R_{varA1} , R_{varB1} , R_{varC1}) ligadas em um ponto neutro comum N. Desde que, em geral, as voltagens de fonte, impedâncias de arco 14 e reatâncias variáveis 18 não sejam equilibradas entre as fases, o ponto neutro N não está necessariamente em potencial de terra.

[0028] Como com o caso de fase única, a impedância de arco 14 pode variar abruptamente, tal como quando o percurso de arco é interrompido. Variações na impedância do arco causam uma mudança correspondente na corrente I. A reatância variável 18 é ajustada para compensar a mudança na corrente de modo a ajustar a corrente e manter o ponto de ajuste de energia. No caso trifásico, a mudança na corrente I usualmente ocorre em uma das fases, em vez de em todas as três juntas. Dessa maneira, isso tende a causar desequilíbrio entre as fases de um forno a arco. Como a flutuação de energia, o desequilíbrio de corrente apresenta problemas para o gerador de energia. Em alguns casos, um desequilíbrio significativo pode causar retardos dentro do sistema de energia to.trip, disparando uma interrupção.

[0029] Para uma extensão, o desequilíbrio dentro de um forno devido a variações na impedância de arco 14 de uma fase pode ser compensado ajustando as reatâncias variáveis 18 para cada uma das fases. No entanto, haverá um limite para a extensão para a qual essa ação corretiva é eficiente e esse limite corresponde à faixa ajustável das reatâncias variáveis 18. Além disso, o objetivo da manutenção do ponto de ajuste de energia pode ser computado para o objetivo de manutenção de equilíbrio de fase. Por exemplo, equilibrando completamente as fases no caso de extinção de um arco pode envolver redução da corrente das outras fases para zero, que resultaria em uma queda total de energia indesejável para zero.

[0030] Os exemplos acima esboçam dois objetivos: o primeiro é manter o ponto de ponto de da energia para uma carga única multifásica; o segundo é minimizar o desequilíbrio da fase para uma carga

única multifásica. Dois objetivos adicionais possíveis ou objetivos de controle são, em uma modalidade, a manutenção do ponto de referência de energia total para pelo menos duas cargas multifásicas puxando energia de uma fonte comum e minimizando o desequilíbrio de energia total para pelo menos duas cargas multifásicas. No caso de estabilização de energia ativa e compensação de desequilíbrio de cargas de 3 cabos de 3 fases, esses quatro objetivos ou objetivos de controle podem ser expressados usando as seguintes quatro fórmulas:

$$P_{3-\phi} = \operatorname{Re}(\overline{V_a I_a^*}) + \operatorname{Re}(\overline{V_b I_b^*}) + \operatorname{Re}(\overline{V_c I_c^*}) = P_{sp} \quad \text{para cada 3 - carga trifásica} \quad (1)$$

$$|\overline{I_2}| = \text{valor mín. para carga multifásica} \quad (2)$$

$$\sum_{F1}^{Fn} P_{3-\phi} = \sum_{F1}^{Fn} \left[\operatorname{Re}(\overline{V_a I_a^*}) + \operatorname{Re}(\overline{V_b I_b^*}) + \operatorname{Re}(\overline{V_c I_c^*}) \right] = P_{totalsp} \quad (3)$$

$$\left| \sum_{F1}^{Fn} \overline{I_2} \right| = \text{valor mín.} \quad (4)$$

onde $(\overline{I_a}) + (\overline{I_b}) + (\overline{I_c}) = 0$ e $\overline{I_2}$ é a corrente de seqüência negativa.

[0031] A corrente de seqüência negativa é uma medida de desequilíbrio de corrente dada pela seguinte equação de decomposição:

$$\overline{I_2} = \frac{1}{3}(\overline{I_a} + a^2 \overline{I_b} + a \overline{I_c}) \quad (5)$$

onde $a = -0,5 + j0,866$, I_2 é a corrente de seqüência negativa, I_a é o vetor da corrente da fase A, I_b é o vetor da corrente da fase B, e I_c é o vetor da corrente da fase C.

[0032] Em uma modalidade, a presente invenção aplica as quatro equações objetivas de controle acima em uma ordem de prioridade como dado acima – isto é, os primeiros dois objetivos são de manter o ponto de referência de energia para um forno individual (Equação 1) e minimizar o desequilíbrio de energia dentro do forno individual (Equa-

ção 2); e se essas duas condições não podem ser satisfeitas fazendo ajustes às reatâncias variáveis 18 dentro do forno individual, então são feitos ajustes às reatâncias variáveis 18 dentro de outros fornos a fim de satisfazer a terceira e a quarta condições (Equações 3 e 4). A terceira condição é que, independente se os pontos de referência de energia do forno individual P_{sp} são satisfeitos, a energia total somada deve satisfazer o ponto de ajuste de energia total $P_{totalsp}$. A quarta condição é que, independente do estado de desequilíbrio da corrente $|I_2|$ dentro de um forno individual, o desequilíbrio total para todos os fornos combinados devem ser minimizados.

[0033] As condições antes mencionadas não são todas as condições necessárias. Algumas modalidades podem incluir somente algumas dessas condições. Além disso, será entendido que as condições podem ser em uma diferente ordem de prioridade. Por exemplo, em uma modalidade, o objetivo de minimizar o desequilíbrio total (Equação 4) pode tomar precedência sobre o objetivo de manutenção do ponto de ponto de ajuste de energia total (Equação 3).

[0034] Embora as expressões antes mencionadas se refiram à manutenção do ponto de ponto de de energia real (ativo) para cada carga, elas podem ser aplicadas à manutenção de outros pontos de ajuste e de energia. Por exemplo, elas podem ser aplicadas a um sistema para manutenção de um ponto de referência de energia imaginário (reativo), um ponto de ajuste de energia aparente, ou uma combinação de energias como um ponto de ajuste de fator de energia.

[0035] As referências aqui a estabilização de energia, pontos de ajuste de energia, e medições de energia podem igualmente se aplicar à estabilização de corrente, pontos de referência de corrente, e medições de corrente. Em outras palavras, as modalidades descritas podem fornecer estabilização de corrente da mesma maneira que elas fornecem estabilização de energia.

[0036] Os aspectos de compensação de desequilíbrio podem, em algumas modalidades, ter um objetivo ou condição de manter um nível predeterminado de corrente em desequilíbrio do que minimizar ou eliminar a corrente em desequilíbrio.

[0037] Em algumas modalidades, as cargas associadas com diferentes fases podem propositalmente ter diferentes pontos de ajuste de energia e/ou de corrente, significando que o sistema total tem um certo nível de desequilíbrio controlado. Tal desequilíbrio pode, por exemplo, ser desejável em um forno para fornecer mais energia e/ou corrente ao eletrodo mais perto do orifício da torneira do forno. Isso facilita o aquecimento local do banho na área do orifício da tomada e, conseqüentemente, redução local na viscosidade do banho e uma habilidade aperfeiçoada para a torneira do material líquido do forno.

[0038] Uma referência é agora feita à Figura 3, que mostra um diagrama em bloco de um sistema de controle de energia 100 de acordo com uma modalidade da presente invenção. O sistema de controle de energia 100 inclui dois fornos (cargas), 101a e 101b. Somente uma modalidade de fase única é ilustrada no diagrama para melhor simplicidade de descrição; no entanto, aqueles versados na técnica irão apreciar que as funções e princípios de operação do controle de fase única, descritos e ilustrados, podem ser estendidos aos sistemas multifásicos. Adicionalmente, o sistema de controle de energia pode ser usado para controlar energia a mais do que dois fornos.

[0039] Para facilidade de referência nessa descrição, se uma referência é feita às partes ou funções indicadas por referência numérica tendo tanto sufixos -a quanto -b, os sufixos podem ser omitidos. Por exemplo, "o forno 101" será usado para indicar uma referência aos fornos 101a e 101b, a não ser que indicado de outra forma.

[0040] Cada forno 101 (cada fase no caso de uma modalidade de trifásico) inclui um eletrodo 112 acoplado ao lado secundário de um

transformador de forno 114. O lado primário do transformador de forno 114 é acoplado a uma fonte de suprimento de energia de barramento 110 através de uma reatância de circuito fixada 116 e de um reator variável 118.

[0041] Em uma modalidade, o reator variável 118 inclui um indutor 120 conectado em paralelo com uma combinação em série de um indutor 123 e um comutador de tiristor 122. Cada comutador de tiristor 122 inclui um par de tiristores dispostos em polaridade oposta um do outro.

[0042] Cada forno (ou fase) inclui um sistema de controle de reator variável, que inclui um primeiro transformador de voltagem 130 para medir a voltagem no lado do suprimento do reator variável 118, um segundo transformador 132 para medir a voltagem na lateral do forno do reator variável 118, um transformador de corrente 134 para medir a corrente principal que flui para o transformador do forno 114, e um controlador do reator 128.

[0043] O controlador do reator 128 recebe informação do primeiro e do segundo transformadores de voltagem 130, 132, do transformador de corrente 134, e de uma entrada de ponto de referência de energia 136 desejado. O controlador do reator 128 controla o reator variável 118 baseado nos cálculos executados usando tal informação.

[0044] O controlador do reator 128 pode compreender um dispositivo programável, tal como um processador de sinal digital, um microcontrolador, um microprocessador, um computador pessoal, ou um circuito integrado de aplicação específica (ASIC). O controlador do reator 128 pode operar mediante controle de programa armazenado, o controle de programa armazenado implementando as funções e operações descritas aqui e sendo armazenadas em elemento de memória, tal como firmware. A programação adequada do controlador do reator 128 para implementar as funções ou operações descritas aqui estarão

dentro do entendimento de alguém versado na técnica. Aqueles versados na técnica também irão apreciar que o controlador do reator 128 pode ser implementado usando outras combinações de hardware e/ou software.

[0045] O controlador do reator 128 controla a reatância do reator variável 118 pelo ajuste dos ângulos de disparo dos tiristores 122, aumentando ou diminuindo desse modo a corrente através do indutor 123. Baseadas em leituras de corrente e voltagem contínuas adquiridas dos primeiro e segundo transformadores de voltagem 130, 132, e do transformador de corrente 134, o controlador do reator 128 destrava os tiristores 122 para variar a reatância a fim de regular equilíbrios ou desequilíbrios de energia no forno a arco 101 (em torno do ponto de ajuste de energia desejado 136) que resulta de flutuações na impedância do arco.

[0046] Cada forno 101 (ou fase) pode adicionalmente incluir um controlador de posição do eletrodo 148 que recebe entradas de um transformador de voltagem 158 e de um transformador de corrente 160 na lateral secundária do transformador de forno 114. O controlador de posição do eletrodo 148 é operativamente acoplado a um sistema de movimento do eletrodo 154 para ajustar a altura dos eletrodos 112, e, por conseguinte, a impedância do arco. O controlador de posição do eletrodo 148 pode, desse modo ajustar a altura dos eletrodos 112 a fim de compensar mudanças na impedância do arco. Será apreciado que o tempo de resposta do sistema de posicionamento do eletrodo é tipicamente pelo menos uma ordem de magnitude mais lenta do que o sistema de reatância variável.

[0047] Um sistema de alimentação em lote 170 é acoplado a cada forno 101 para suprir material novo para o forno 101 para computar a remoção de material processado do forno 101. Cada sistema de alimentação em lote 170 é controlado por um controlador de taxa de ali-

mentação 172. O controlador de taxa de alimentação 172 regula o suprimento de material novo e tem uma saída acoplada ao controlador de posição do eletrodo 148 através da qual ele fornece o controlador de posição do eletrodo 148 com um sinal de dados correspondente à taxa de alimentação do material novo. O controlador de posição do eletrodo 148 usa esse sinal de dados para antecipar mudanças para a impedância do arco ou para compensar mudanças na impedância do arco. Por exemplo, em antecipação da introdução de material novo para um dos fornos 101a, o controlador de posição do eletrodo 148a pode iniciar o abaixamento do eletrodo 112a.

[0048] O controlador do reator 128a mantém o nível de ponto de referência da energia e/ou corrente do forno, apesar do abaixamento do eletrodo 112a e da conseqüente redução na impedância do arco, mudando a reatância do reator variável 118a e, por conseguinte, impedindo a energia ou corrente de substancialmente variar do ponto de ajuste.

[0049] Se o eletrodo não tem um reator variável acoplado a ele para compensar a impedância reduzida durante o abaixamento do eletrodo, a energia e corrente do eletrodo mudam. Em tal caso, a energia e a corrente podem ambas aumentar ou a energia pode diminuir enquanto a corrente aumenta. Enquanto o forno terá uma probabilidade reduzida de perda de condução elétrica por causa do abaixamento preventivo do eletrodo antes da entrada do material de alimentação, o uso de um reator variável para compensar variações de impedância como descrito fornece estabilidade de energia e corrente aperfeiçoada durante o movimento do eletrodo.

[0050] A ação de antecipação do controlador de posição do eletrodo 148 posiciona os eletrodos 112a em tal altura como para mitigar contra o material novo que está entrando no forno interrompendo o percurso do arco. Essa altura pode estar, por exemplo, em ou ligeira-

mente acima da superfície do banho de escória. Ao mesmo tempo, o controlador do reator 128 tenta manter o ponto de ajuste de energia ou de corrente do forno através de ajustes ao reator variável 118.

[0051] Mediante conclusão da alimentação de material novo no forno, o sistema de alimentação do lote 170 fornece um sinal de final de alimentação para o controlador de posição do eletrodo 148 e o eletrodo 112 é elevado em direção a sua posição prévia pelo controlador de posição de eletrodo 148 e conseqüentes ajustes aos reatores variáveis 118 são feitos pelo controlador do reator 128 para tentar manter o ponto de referência de energia e/ou de corrente do forno durante o movimento do eletrodo 112.

[0052] Com referência também à Figura 9, é mostrado, em forma de fluxograma, um método 600 de regular a posição do eletrodo. O método 600 começa na etapa 602, quando o controlador de posição do eletrodo 148 recebe um sinal de solicitação de alimentação do controlador de taxa de alimentação 172 indicando que o novo material é para ser introduzido ao forno 101. O sinal de solicitação de alimentação pode resultar de uma instrução de alimentação manual iniciada pelo operador, ou pode resultar de uma instrução de alimentação automatizada no caso de um controle de alimentação automatizado e o sistema de posicionamento de eletrodo tal como é comercialmente disponível de Hatch Limited em Ontário, Canadá. O sistema de controle de forno Minstral[®], comercialmente disponível de Mintek em Randburg, África do Sul, pode também ser usado como um sistema de posicionamento de eletrodo adequado. Uma vez que o controlador de posição de eletrodo 148 recebe o sinal de solicitação de alimentação ele cancela o ajuste de impedância do eletrodo na etapa 604 e inicia o abaixamento do(s) eletrodo(s) 112 na etapa 606.

[0053] Enquanto o(s) eletrodo(s) 112 está/estão sendo abaixado(s), na etapa 608 o controlador de reator 128 mantém o ponto de

ajuste de energia e/ou de corrente através de ajustes ao reator variável 118. Na etapa 610, o controlador de posição do eletrodo 148 determina se o eletrodo 112 alcançou ou não a posição desejada. Ele pode tomar essa decisão na base de impedância do eletrodo e/ou comprimento do arco calculado alcançando um valor limite. O valor limite pode corresponder a uma altura em que o eletrodo 112 está em contato direto com o banho de escória, minimizando desse modo a possibilidade de que o novo material poderia interromper o percurso do arco. Tomaria tipicamente poucos segundos para o eletrodo 112 ser abaixado para tal nível.

[0054] Uma vez que o eletrodo 112 alcançou a altura desejada, então na etapa 612 o controlador de posição do eletrodo 148 envia um sinal de capacitação para o controlador de taxa de alimentação 172 para indicar que o controlador de taxa de alimentação 172 pode agora iniciar a introdução de novo material de alimentação para o forno. Desse modo, na etapa 614, o sistema de alimentação 170 começa a introduzir novo material para o forno 101.

[0055] O sistema de alimentação 170 envia ao controlador de posição do eletrodo um sinal de conclusão (não mostrado), tal como um sinal de final de alimentação, na etapa 616 para indicar o final do processo de alimentação. Em resposta ao sinal de final de alimentação na etapa 618, o controlador de posição do eletrodo começa a retirar ou levantar o eletrodo. Enquanto a altura do eletrodo 112 está sendo alterada, o controlador de reator 128 ajusta o valor de reator variável 118 para manter um ponto de ajuste de energia e/ou de corrente na etapa 620. Na etapa 622, o controlador de posição do eletrodo 148 determina se o eletrodo 112 alcançou ou não a altura desejada. Essa determinação pode ser baseada na impedância do eletrodo, que pode ser comparada com o ponto de ajuste da impedância do eletrodo que foi temporariamente sujeito a um "override" na etapa 604, ou mediante a

saída de um sensor dedicado ou dispositivo de medição física. Uma vez que a impedância do eletrodo (ou comprimento do arco ou outra medida) alcança o ponto de ajuste apropriado, então na etapa 624, o controlador de posição do eletrodo 148 mantém a posição do eletrodo e retorna para operação normal.

[0056] Em um forno a arco multifásico, de múltiplos eletrodos, a posição de cada eletrodo em cada fase pode ser controlada independentemente de cada outro eletrodo. Dessa maneira, um sistema de posicionamento de eletrodo (não mostrado), incluindo um controlador de posição do eletrodo 148, pode determinar a posição apropriada de eletrodo de cada eletrodo, dependendo de um número de fatores. Tais fatores podem incluir, por exemplo, a taxa de alimentação do novo material que está sendo suprido ao forno, os locais em que o material de alimentação está entrando no forno, qualquer desgaste na ponta do eletrodo, a espécie de material de alimentação que está sendo alimentado no forno, a altura aparente do banho de escória e outras condições de operação ou ambientais.

[0057] O assumir de cada eletrodo é controlado normalmente pelo controlador de posição de eletrodo para satisfazer um ponto de ajuste de impedância, de energia e/ou de corrente, esse controle pode necessitar ser cancelado pelo sistema de posicionamento de eletrodo em resposta ao recebimento do sinal de solicitação de alimentação, de modo que o eletrodo possa ser abaixado. Dessa maneira, o sistema de posicionamento de eletrodo pode ter um componente de "override", tal como uma função de "override" programável fornecida no software residente no sistema de posicionamento de eletrodo.

[0058] Deve ser entendido que essa modalidade pode ser aplicada aos eletrodos não produzindo centelhas (imersos), bem como a eletrodos produzindo centelhas. Para fornos empregando eletrodos imersos, a introdução do material de alimentação pode causar um distúrbio da

superfície de escória. Abaixando a ponta do eletrodo de um eletrodo imerso em antecipação a entrada do material de alimentação, a ponta do eletrodo é mantida mais distante da superfície, onde o distúrbio está ocorrendo, reduzindo desse modo a probabilidade de perda de condução devido ao distúrbio. Isso seria vantajoso para eletrodos em cerca de 10% de imersão, por exemplo.

[0059] Em certas modalidades, as flutuações na impedância do arco podem ser compensadas através de ajuste do reator variável 118, ajuste da posição do eletrodo, ou ambos. Será também apreciado que o ajuste da posição do eletrodo é uma ação corretiva que tipicamente requer mais tempo do que o ajuste do reator variável 118, o qual pode ocorrer com cada metade de ciclo da voltagem de suprimento. Desse modo, o sistema de controle de reatância variável (isto é, reator variável 118 em combinação com o controlador do reator 128) pode responder mais rapidamente às variações em impedância do arco do que o sistema de posicionamento de eletrodo, permitindo que o sistema de posicionamento de eletrodo reaja às variações.

[0060] Os métodos e os sistemas descritos aqui podem ser implementados usando sistemas de controle de reatância variável, sistemas de posicionamento de eletrodo, ou ambos, para o propósito de reagir às flutuações de energia e/ou corrente e/ou controlar desequilíbrios. Embora as modalidades a seguir se refiram ao uso de um sistema de controle de reatância variável para estabilização de energia e/ou corrente ou compensação de desequilíbrio, a presente invenção não é limitada ao uso de um sistema de controle de reatância variável. Outras modalidades podem empregar um sistema de posicionamento de eletrodo sozinho ou em combinação com um sistema de controle de reatância variável.

[0061] Com referência outra vez à Figura 3, o sistema de controle de energia 100 adicionalmente inclui um controlador central 200. O

controlador central 200 é acoplado a cada forno (ou fase) para receber dados de medição com respeito às características de operação de cada forno. Por exemplo, em uma modalidade, o controlador central 200 é acoplado a cada controlador do reator 128, e em particular a cada transformador de corrente 134 para receber medições de corrente para cada forno.

[0062] O controlador central 200 inclui entradas adicionais acopladas a cada controlador do reator 128 ou especificamente a cada primeiro transformador de voltagem 130 para receber uma medição da voltagem na lateral de suprimento do reator variável 118 de cada forno. Em outras palavras, o controlador central 200 recebe medições de voltagem e corrente para cada forno (ou fase). O controlador central 200 pode receber as medições de voltagem e corrente através de acoplagem direta com transformadores de corrente e voltagem adicionais dedicados, os transformadores de corrente e voltagem 134, 130 usados no circuito de controle de reatância variável, ou indiretamente de uma ou mais portas de saída do controlador do reator 128. Será apreciado que podem existir outros arranjos pelos quais o controlador central 200 é fornecido com medições de voltagem e/ou corrente para cada um dos fornos (ou fases).

[0063] As características de operação monitoradas pelo controlador central 200 incluem o ajuste ou valor de cada reator variável 118. Esse ajuste de reator variável é admitido ao controlador central 200 de cada controlador do reator 128. Por exemplo, cada controlador do reator 128 produz seu ajuste de reatância calculada para o controlador central 200.

[0064] O controlador central 200 adicionalmente inclui uma entrada para receber um valor de ponto de referência de energia total 208. O valor de ponto de ajuste de energia total 208 é calculado a partir da soma das entradas dos pontos de ajuste de energia individuais dese-

ados 136 para cada forno. Preferivelmente, o controlador central 200 recebe os valores do ponto de ajuste de energia individual 136 de cada um dos controladores do reator 128 e calcula o valor de ponto de ajuste de energia total 208 pela soma dos valores recebidos.

[0065] O controlador central 200 pode compreender um processador de sinal digital, um microprocessador, um microcontrolador, ou outro dispositivo programável para executar um programa armazenado em memória, por exemplo, firmware, para implementar as funções descritas aqui. Será apreciado que as funções do controlador central 200 podem ser implementadas usando um número de diferentes configurações de hardware e/ou software. A programação adequada do controlador central 200 estará dentro do conhecimento daqueles versados na técnica com respeito à presente descrição.

[0066] O controlador central 200 regula a operação total de todos os fornos (e a energia de cada fase para cada forno multifásico) de acordo com uma ou mais condições descritas acima. Desse modo, o controlador central 200 inclui uma primeira porta de saída 202 fornecendo assim instruções ao controlador do reator 128 para ajustar o reator variável 118. Em uma modalidade, o controlador central 200 também inclui uma segunda porta de saída 204 acoplada ao controlador de posição do eletrodo 148. O controlador central 200 produz um segundo sinal de controle através da segunda porta de saída 204, fornecendo assim instruções ao controlador de posição do eletrodo 148 para ajustar a altura do eletrodo. Os primeiro e segundo sinais de controle podem compreender um valor calculado pelo controlador central 200 para satisfazer a uma ou mais das condições. O valor calculado pelo controlador central 200 irá se sobrepor (“override”) ao valor calculado pelo controlador do reator 128 para governar seu controle do reator variável 118 correspondente.

[0067] Em uma modalidade, o controlador central 200 estabiliza o

consumo de energia de cargas múltiplas trifásicas, de modo a satisfazer a primeira e/ou terceira condição descrita acima. A primeira condição (exemplificada pela Equação 1) requer que a soma da puxada de energia por cada eletrodo de um forno deve se igualar a um valor de ponto de ajuste de energia para aquele forno. A terceira condição (exemplificada pela Equação 3) requer que a soma do consumo de energia individual por todos os fornos deveria se igualar ao valor do ponto de ajuste de energia total para todo o sistema. O controlador central 200 monitora as características de operação para cada um dos fornos (ou fases) e identifica se um forno (ou fase) foi incapaz de compensar uma queda na energia em uma base individual. Por exemplo, o forno trifásico A pode experimentar uma queda em energia trifásica e pode tentar compensar usando os reatores variáveis 118. O controlador central 200 monitora as correntes e as voltagens V_{linhaA} e o ajuste dos reatores variáveis 118, para um dado forno A. Se o ajuste dos reatores variáveis 118 alcança um valor mínimo ou um valor máximo, e a puxada de energia pelo forno A desvia do ponto de ajuste de energia P_{spA} por mais do que uma quantidade predeterminada P , então o controlador central 200 irá atuar para compensar o desvio. O controlador central 200 calcula a extensão para a qual a energia puxada pelo forno A não alcança (ou se torna maior do que) o ponto de referência de energia P_{spA} , e instrui os fornos remanescentes a aumentar ou diminuir sua energia puxada por quantidade certa para compensar o desvio de energia no forno A.

[0068] Similarmente, por exemplo, dentro de um forno único trifásico uma fase pode experimentar uma queda ou elevação na energia e o controlador central 200 pode tentar compensar usando o reator variável 118 associado com aquela fase. Se o controlador do reator 128 para aquela fase for incapaz para compensar porque o ajuste de reator variável 118 alcança um valor máximo ou mínimo e a energia não re-

tornou ao seu ponto de ajuste, então o controlador central 200 determina que o controlador do reator 128 para aquela fase é incapaz para endereçar, sozinho, a mudança de energia. Dessa maneira, o controlador central 200 pode determinar a quantidade pela qual as fases remanescentes devem aumentar ou diminuir sua energia puxada para compensar pelo escasseamento ou elevação em uma fase. Ele então emite sinais de controle para instruir os controladores do reator 128 nas outras fases para ajustar seu consumo de energia através de ajuste do seu ponto de ajuste, e, por conseguinte, o valor do seu reator variável 118.

[0069] Com referência também à Figura 7, é mostrado um fluxograma de um método 400 de estabilizar o consumo de energia de pelo menos duas cargas. O método 400 começa na etapa 402, em que o controlador central 200 monitora as características de operação das cargas elétricas nos fornos. Em particular, o controlador central 200 monitora se a carga está ou não operando no ponto de ajuste de energia pré-ajustado. Ele também monitora se o valor ou ajuste do reator variável de cada carga alcançou ou não um ajuste máximo ou mínimo. Na etapa 404, o controlador central determina se uma ação corretiva é ou não requerida avaliando se a energia puxada por uma carga foi desviada de um ponto de ajuste. Ele também avalia se o reator variável associado com a carga (ou no caso de uma carga trifásica, qualquer um dos três reatores variáveis) alcançou um valor máximo ou mínimo. Se essas duas condições tiverem ocorrido, então o controlador central reconhece que uma compensação é requerida para estabilizar o consumo de energia e o método continua para a etapa 406. Se essas condições não existem, isto é, se a energia puxada não desvia do ponto de ajuste ou o reator variável associado não alcançou um valor máximo ou mínimo, então o método retorna à etapa 402 para continuar a monitorar a situação.

[0070] Será apreciado que as cargas podem ser por cargas de fase dentro de um forno trifásico individual, ou podem ser cargas trifásicas associadas com fornos múltiplos. Será também entendido que no último caso o controlador central pode receber entradas individuais para cada fase dentro de cada forno e pode monitorar reatores variáveis de cada fase dentro de cada forno.

[0071] Na etapa 406, o controlador central determina a extensão para a qual ele deve tomar ação corretiva para manter todo um ponto de referência de energia global. Ele calcula a diferença entre a energia puxada medida e o ponto de referência de energia global. Por exemplo, se uma das cargas tem um ponto de ajuste de energia de 70 MW e caiu para uma energia puxada real de 50 MW, e duas outras cargas estão puxando energia no ponto de ajuste de 70 MW, então existe um escasseamento de circuito simplificado 20 MW.

[0072] Na etapa 408, o controlador central determina a mudança de energia requerida dentro dos outros fornos (diferente da dificuldade de experiência do forno) para compensar a diferença calculada. O controlador central pode empregar um número de regras ou algoritmos para determinar a extensão para a qual outras cargas devem compensar um escasseamento de energia. Em algumas modalidades, a energia puxada adicional requerida pode ser repartida igualmente entre outros fornos. Em outras modalidades, regras mais complicadas podem ser solicitadas determinando o repartimento relativo da energia puxada adicional requerida. Em uma modalidade, o controlador central pode incluir uma memória armazenando uma tabela de conferência. A tabela de conferência pode especificar, para escasseamentos de energia particulares associados com cargas particulares, os aumentos de energia correspondentes que as outras cargas estão para implementar. O controlador central pode adicionalmente aplicar interpolação para valores que caem entre duas entradas na tabela de conferência.

Os valores da tabela de conferência podem ser parcialmente baseados na curva de capacidade do tempo curto térmico do suprimento de energia e do processo para o ponto de operação do forno particular.

[0073] Uma vez determinados pelo controlador central os aumentos de energia relativos requeridos das outras cargas para compensar o escasseamento de energia, então na etapa 410 ele emite comandos de “override” de energia aos controladores de reator variável associados com as outras cargas. Ele pode, por exemplo, enviar um sinal de controle especificando um novo ponto de ajuste de energia de carga específica. Alternativamente, ele pode enviar um sinal de controle especificando um incremento pelo qual o ponto de ajuste de energia de carga específica deve ser aumentado. O comando de cancelar energia pode também incluir uma duração de “override”. A duração de “override” pode ser um valor predeterminado armazenado no controlador central. A duração de “override” pode depender da situação e pode ser especificada pela tabela de conferência.

[0074] Cada um dos controladores de reator variável associados com as outras cargas recebe seu comando de “override” de energia na etapa 412 e, desse modo ajusta seu ponto de ajuste de energia de carga específica. Na etapa 414, os controladores do reator variável reagem ao ponto de ajuste de energia de carga específica ajustado determinando um novo valor para seu reator variável associado. Dessa maneira, os valores dos reatores variáveis são mudados e a energia puxada por cada uma das outras cargas é variada para satisfazer os pontos de ajuste de energia de carga específica. Os controladores do reator variável mantêm esses pontos de ajuste de energia de carga específica ajustados até que a duração de cancelamento expire. Na etapa 416, os controladores do reator variável determinam se a duração de “override” expirou ou não. Se expirou, então na etapa 418 eles reajustam seus pontos de ajuste de energia de carga específica para

remover o componente de “override” e retornam à operação normal. O método 400 então retorna para a etapa 402, em que o controlador central continua sua função de monitoração.

[0075] Em uma modalidade alternativa, na etapa 418 o controlador central reavalia o consumo de energia das cargas e determina se a carga problemática retornou ou não à operação normal, por exemplo, se o problema de deficiência de energia foi resolvido ou não. Se foi, então ele cancela os comandos de cancelamento e retorna para a etapa 402. Se não, então ele pode tanto estender o período de “override”, modificar os comandos de “override” de acordo com instruções adicionais na tabela de conferência, ou cancelar o “override” e alertar um operador para o problema.

[0076] Em uma outra modalidade alternativa, o sistema de controle não caracteriza sistemas de controle de reatância variável individual associados com cada reator variável. De preferência, o sistema de controle central controla diretamente cada reator variável. Por exemplo, uma carga trifásica pode ter um reator variável para cada fase e o sistema de controle pode fornecer um controlador central acoplado a cada reator variável para monitorar características de operação de cada fase e administrar ajustes correspondentes para cada reator variável. Tal modalidade pode ser implementada como uma carga trifásica de configuração Y, isto é uma carga suprida via um sistema de 3 cabos com nenhuma conexão de cabo. Pode-se aplicar diferentes pontos de ajuste a cada fase da carga trifásica, resultando em um nível predeterminado de desequilíbrio. A inter-relação das três cargas leva a um sistema de equações que o controlador central soluciona de modo a determinar ajustes necessários a todos os três reatores variáveis a fim de endereçar desvios de um ou mais dos pontos de ajuste. Mudanças em um reator variável afetam as características de operação de todas as fases. Para ajustar as características de uma fase a fim de endere-

çar desvio de um ponto de ajuste, ajustes são feitos para todos os reatores variáveis. O ajuste para cada reator variável é determinado tomando-se em conta as características de todas as fases.

[0077] Além de, ou como uma alternativa a, implementar uma função de estabilização de energia, o controlador central pode implementar uma função de compensação de desequilíbrio. A segunda condição fixada acima (Equação 2) estabelece que o desequilíbrio dentro de uma carga trifásica deve ser minimizado. A quarta condição (Equação 4) estabelece que todo o desequilíbrio dentro de um sistema de carga trifásica múltiplo deve ser minimizado.

[0078] Com referência outra vez à Figura 3, o controlador central 200 monitora a extensão de desequilíbrio dentro de uma ou mais cargas trifásicas. No caso de um forno único tendo uma carga trifásica, o controlador central 200 determina a extensão de desequilíbrio dentro da carga trifásica e fornece instruções corretivas aos controladores do reator variável 128 para minimizar o desequilíbrio. No caso de fornos múltiplos cada um tendo cargas trifásicas, o controlador central 200 determina se a combinação total dos fornos exibe desequilíbrio. Ele pode avaliar se todo o desequilíbrio é devido a um desequilíbrio significativo dentro de um dos fornos e se aquele forno é incapaz para compensar. Ele então fornece instruções corretivas aos fornos remanescentes.

[0079] Por exemplo, no caso de um forno único o controlador central 200 monitora a corrente em cada fase e determina a corrente de seqüência negativa I_2 para o forno de acordo com a Equação 5. Se o cálculo de corrente de seqüência negativa I_2 indica que o forno está desequilibrado, então o controlador central 200 pode determinar ação corretiva para minimizar o desequilíbrio. Por exemplo, ele pode concluir que o desequilíbrio resulta de uma medição de corrente baixa em uma das fases e ele pode corrigir o desequilíbrio abaixando a corrente

nas outras duas fases. Será entendido que isso resultaria em corrente puxada reduzida e necessitaria ser avaliada contra o objetivo de manutenção de um ponto de ajuste de energia. O controlador central 200 pode incluir um armazenamento de memória de regras lógicas ou uma tabela de conferência para resolver a ação corretiva apropriada para uma situação dada.

[0080] Para compensar uma situação de desequilíbrio, o controlador central 200 produz sinais de comando aos controladores do reator variável 128 e em resposta os controladores do reator variável 128 ajustam seus reatores variáveis 118 associados. Como descrito acima, em uma modalidade os sinais de comando podem compreender um “override” do ponto de ajuste de energia para ser usado no lugar do ponto de ajuste de energia normal para a carga. Em outra modalidade, o sinal de comando pode compreender um aumento ou diminuição do ponto de ajuste de energia incremental. Será apreciado que outros sinais de comando podem ser usados, incluindo especificar um ponto de ajuste de corrente ou um valor ou ajuste do reator variável.

[0081] No caso de múltiplos fornos, o controlador central 200 pode monitorar o desequilíbrio total resultante das cargas trifásicas múltiplas e o ajuste dos reatores variáveis 118 para cada carga trifásica. O controlador central 200 pode também ou alternativamente monitorar desequilíbrio significativo em qualquer uma das cargas trifásicas múltiplas. Se uma condição de desequilíbrio existe e um ou mais reatores variáveis 118 estão em seus ajustes mínimo e máximo então uma ação corretiva pelo controlador central 200 pode ser requerida.

[0082] Aqueles versados na técnica reconhecerão que no caso de fornos múltiplos, cada forno pode ter seu próprio controlador de nível ‘central’ ou ‘intermediário’ acoplado aos três controladores do reator variável 128 associados com as três cargas de fase. O controlador central 200 pode então se comunicar diretamente com os controlado-

res intermediários. Em outras palavras, pode existir um "ninho" de controladores. O controlador central 200 pode também, ou alternativamente, se comunicar diretamente com os controladores do reator variável 128 para cada fase. Para monitorar o desequilíbrio de cada carga o controlador central 200 pode receber medições de corrente diretamente através dos transformadores de corrente 134. Em uma outra modalidade, o controlador central 200 obtém medições de corrente dos controladores do reator variável 128 por fase. Ainda em uma outra modalidade, o controlador central 200 obtém medições de corrente do controlador intermediário para cada forno. Em outras modalidades, o controlador central 200 pode receber condição de desequilíbrio calculada de cada forno trifásico de seu controlador intermediário associado.

[0083] Em qualquer evento, o controlador central 200 monitora o desequilíbrio total e/ou o desequilíbrio de fornos individuais, e monitora se um reator variável associado com um dos fornos experimentando desequilíbrio está no fim de sua faixa de ajustes ou valores. Isso indica que o forno é incapaz de compensar a situação de desequilíbrio sozinho. Dessa maneira, o controlador central 200 tenta compensar o desequilíbrio de um forno introduzindo descentralização de desequilíbrio nos outros fornos.

[0084] O controlador central 200 determina a quantidade de corrente de seqüência negativa I_2 requerida para descentralizar a corrente de seqüência negativa I_2 associada com o forno desequilibrado. Como explanado acima em conexão com estabilização de energia, o controlador central 200 pode utilizar regras lógicas ou algoritmos para calcular as mudanças apropriadas requeridas dos fornos remanescentes para gerar a descentralização da corrente de seqüência negativa I_2 . O controlador central 200 pode consultar uma tabela de conferência armazenada em memória no controlador central 200 para determinar a ação corretiva apropriada. A ação corretiva pode incluir instruir os ou-

tros fornos para aumentar ou diminuir energia ou corrente em uma ou mais fases. O sinal de comando emitido pelo controlador central 200 ao controlador intermediário ou aos controladores do reator variável 128 pode incluir pontos de ajuste de energia ou de corrente de “override” para fases específicas, e pode incluir uma duração de “override”. Em uma modalidade em que o controlador central 200 envia seu sinal de comando para um controlador intermediário e o sinal de comando especifica uma corrente de seqüência negativa I_2 específica requerida do forno, então o controlador intermediário pode armazenar uma tabela de conferência fixando os valores de reatância variáveis associados com correntes de seqüência negativa I_2 específicas, energia puxada, e impedâncias de arco. Uma interpolação pode ser usada para determinar valores entre entradas na tabela. O controlador intermediário pode então emitir sinais de controle aos controladores do reator variável 128 por fase especificando o ajuste dos seus reatores variáveis 118 associados.

[0085] Uma referência é agora feita à Figura 8, que mostra um método 500 de compensação por desequilíbrio em uma ou mais cargas multifásicas.

[0086] O método 500 começa na etapa 502, em que o controlador central monitora características de operação de uma ou mais cargas/fases. Em particular, o controlador central monitora se as cargas/fases estão desequilibradas ou não além de um limite. O limite pode ser ajustado para zero, significando que qualquer desequilíbrio será notado, mas na prática o limite pode ser ajustado de modo a permitir uma pequena quantidade de desequilíbrio sem compensação de disparo. Por exemplo, o limite pode ser ajustado para cerca de 10%. O controlador central pode também monitorar se o valor ou o ajuste do reator variável de qualquer fase em uma ou mais cargas alcançou ou não um ajuste máximo ou mínimo.

[0087] Na etapa 504, o controlador central determina se a ação corretiva é ou não requerida avaliando se o desequilíbrio em uma ou mais cargas excede o limite. Ele pode adicionalmente identificar a carga particular que causou o desequilíbrio total – isto é, a carga desequilibrada. Ele também avalia se o reator variável associado com a carga desequilibrada alcançou um valor máximo ou mínimo. Se essas condições ocorreram, então o controlador central reconhece que a compensação é requerida para reequilibrar o consumo de energia e o método continua para a etapa 506. Se essas condições não existem, isto é, se o sistema total é equilibrado ou se o reator variável associado não alcançou um valor máximo ou mínimo, então o método retorna para a etapa 502 para continuar monitorando a situação.

[0088] Na etapa 506, o controlador central determina a extensão para a qual ele deve tomar ação corretiva para compensar o desequilíbrio detectado. Em uma modalidade de carga multifásica única, ele determina a magnitude do desequilíbrio em uma fase e determina os ajustes que devem ser feitos às outras fases para compensar e equilibrar o sistema. Em uma modalidade de múltiplos fornos, ele determina a corrente de seqüência negativa I_2 para o forno desequilibrado a fim de identificar a extensão para a qual uma descentralização da corrente de seqüência negativa é requerida das outras cargas de modo a equilibrar o sistema total.

[0089] Na etapa 508, o controlador central determina as mudanças de corrente e/ou energia requeridas dentro dos outros fornos (diferente da dificuldade de experiência do forno) para compensar o desequilíbrio. Por exemplo, e como descrito a título de exemplo abaixo em conexão com as Figuras 4 a 6, em um cenário de múltiplas cargas o controlador central pode determinar as correntes de seqüência negativa necessárias em cada fase para cancelar as correntes de seqüência negativa atribuíveis à carga desequilibrada. O controlador central pode

então alocar as correntes de seqüência negativa por fase para cada uma das cargas e calcular os ajustes de fase requeridos em cada carga para introduzir desequilíbrio suficiente para produzir a corrente de seqüência negativa.

[0090] O controlador central pode empregar um número de regras ou algoritmos para determinar como outras cargas podem compensar desequilíbrio. Em algumas modalidades, o desequilíbrio requerido pode ser repartido igualmente entre outros fornos. Em outras modalidades, regras mais complicadas podem aplicar para determinar o repartimento relativo do desequilíbrio requerido. Em uma modalidade, o controlador central pode incluir uma memória armazenando uma tabela de conferência. A tabela de conferência pode especificar, para condições particulares de desequilíbrio os correspondentes ajustes de energia e/ou corrente em cada fase das outras cargas para impedir o desequilíbrio. O controlador central pode adicionalmente aplicar interpolação para valores que caem entre duas entradas na tabela de conferência.

[0091] Uma vez que o controlador central determinou a energia relativa e/ou ajustes requeridos de cada fase nas outras cargas para compensar o desequilíbrio, então na etapa 510 ele emite comandos de "override" para os controladores do reator variável associados com outras fases/cargas. Ele pode, por exemplo, enviar um sinal de controle especificando um novo ponto de ajuste de energia ou de corrente de carga específica. Alternativamente, ele pode enviar um sinal de controle especificando um incremento pelo que o ponto de ajuste de energia ou de corrente de carga específica existente deve ser aumentado. O comando de "override" pode também incluir uma duração de "override". A duração de "override" pode ser um valor predeterminado armazenado no controlador central. A duração do "override" pode depender da situação e pode ser especificado pela tabela de conferência.

[0092] Cada um dos controladores do reator variável associado com cada fase nas outras cargas recebe seu comando de “override” na etapa 512 e, desse modo ajusta sua operação. Isso pode, por exemplo, incluir ajustar um ponto de ajuste de carga específica (ou fase específica) de energia ou de corrente. Na etapa 514, os controladores do reator variável ajustam seu reator variável associado para cumprir com os ajustes de “overrrdie” especificados pelo comando de “override”. Dessa maneira, os valores dos reatores variáveis são mudados e a energia e/ou corrente puxada por cada uma das outras fases/cargas é variada. Os controladores do reator variável mantêm os pontos de ajuste de energia e/ou corrente de carga específica ajustados até que a duração do “override” expire. Na etapa 516, os controladores do reator variável determinam se a duração do “override” expirou ou não. Se expirou, então na etapa 518 eles reajustam seus pontos de ajuste de energia e/ou corrente de carga específica para remover o componente de “override” e retornar à operação normal. O método 500 então retorna para a etapa 502, em que o controlador central continua sua função de monitoração.

[0093] Em uma modalidade alternativa, na etapa 518 o controlador central reavalia o desequilíbrio das cargas e determina se a carga problemática retornou ou não para a operação normal, por exemplo, se o problema de desequilíbrio foi ou não resolvido. Se foi, então ele cancela os comandos de “override” e retorna para a etapa 502. Se não foi, então ele pode tanto estender o período de “override”, modificar os comandos de “overide” de acordo com instruções adicionais na tabela de conferência, ou anular o “override” e alertar um operador para o problema.

[0094] Uma referência é agora feita às Figuras 4, 5 e 6 que graficamente mostram diagramas de fasor para uma modalidade exemplar de acordo com a presente invenção. Na modalidade exemplar, o sis-

tema de controle de energia 100 (Fig. 3) inclui quatro cargas trifásicas: Fornos F1, F2, F3, e F4. O arco na fase A do Forno F1 foi extinto.

[0095] A Figura 4 mostra quatro diagramas de fasor 250, 252, 254, 256 baseados na corrente puxada pelo Forno F1. O primeiro diagrama de fasor 250 mostra os componentes a-b-c dessas três fases da carga trifásica, onde uma das fases caiu. Em particular, o primeiro diagrama de fasor 250 mostra um componente de corrente 258 da fase B e um componente de corrente 260 da fase C. Nenhum componente de corrente da fase A é visível devido à perda de arco na fase A.

[0096] Aqueles versados na técnica apreciarão que um conjunto de vetores trifásicos pode ser decomposto em três conjuntos de vetores equilibrados: o conjunto de seqüência positiva, o conjunto de seqüência zero e o conjunto de seqüência negativa. Todos os fasores dentro do conjunto de seqüência positiva têm a mesma magnitude, como têm todos os fasores dentro do conjunto de seqüência negativa e o conjunto de seqüência zero. Um sistema perfeitamente equilibrado terá um conjunto de seqüência positiva que corresponde ao diagrama de fasor de corrente a-b-c. Um sistema desequilibrado terá um conjunto de seqüência negativa e/ou um conjunto de seqüência zero com fasores de magnitude não zero. Para o sistema de 3 cabos tal como o do exemplo, nenhuma corrente de seqüência zero pode fluir, então o conjunto de seqüência zero para todas as condições talvez tenha magnitude zero.

[0097] Na Figura 4, o terceiro diagrama de fasor 254 mostra o conjunto de fasores de seqüência positiva para o caso onde o arco na fase A foi perdido. O quarto diagrama de fasor 256 mostra o conjunto de seqüência negativa. O conjunto de seqüência positiva inclui fasores de seqüência positiva para a fase A 262, fase B 264, e fase C 266. Similamente, o conjunto de seqüência negativa inclui fasores de seqüência negativa para a fase A 268, fase B 270, e fase C 272. Será perce-

bido que somando o terceiro diagrama de fasor 254 e o quarto diagrama de fasor 256 resultará no primeiro diagrama de fasor 250, já que o fasor de seqüência positiva para a fase A 262 irá cancelar o fasor de seqüência negativa para a fase A 268.

[0098] O sistema de controle de energia 100 reconhece que a energia caiu no Forno F1 e que o controlador do reator 128 (Fig. 3) para o Forno F1 foi incapaz de corrigir a queda em energia e a condição de desequilíbrio. A energia total puxada pelos quatro fornos cai através da quantidade que o Forno F1 escasseia do seu ponto de ajuste de energia e a condição de desequilíbrio no Forno F1 causa uma condição de desequilíbrio total na energia puxada pelos quatro fornos. Dessa maneira, o sistema de controle de energia 100 instrui os controladores do reator variável 128 para os Fornos F2, F3, e F4 para ajustar os reatores variáveis 118 (Fig. 3) para os Fornos F2, F3 e F4, para aumentar a energia puxada por aqueles fornos e introduzir uma medida de desequilíbrio de fase para impedir o desequilíbrio causado pelo Forno F1.

[0099] A Figura 5 mostra quatro diagramas de fasor 280, 282, 284, 286, baseados na corrente nos Fornos F2, F3 e F4, depois que os controladores do reator 128 ajustam os reatores variáveis 118. O primeiro diagrama de fase 280 mostra fasores de corrente para a fase A 288, fase B 290, e fase C 292. Os fasores 288, 290, 292 têm diferentes magnitudes e não estão 120 graus fora de fase um do outro – isto é eles não são equilibrados.

[00100] O terceiro diagrama de fasor 284 mostra os fasores de seqüência positiva para a fase A 294, fase B 296 e fase C 298, e o quarto diagrama de fasor 286 mostra os fasores de seqüência negativa para a fase A 300, fase B 302, e a fase C 304. A magnitude dos fasores de seqüência negativa 300, 302, 304 no quarto diagrama de fasor 286 são indicativos da quantidade de desequilíbrio introduzida a cada

um dos Fornos F2, F3, e F4 através do ajuste de seus reatores variáveis 118.

[00101] A Figura 6 mostra quatro diagramas de fasor 310, 312, 314, 316 para a soma total de correntes puxadas por todos os quatro Fornos F1, F2, F3 e F4. Será apreciado que a soma de correntes é equilibrada, como indicado pela ausência de quaisquer fasores de seqüência negativa no quarto diagrama de fasor 316 e pela correspondência entre o primeiro diagrama de fasor 310 e o terceiro diagrama de fasor 314.

[00102] As duas tabelas seguintes ilustram adicionalmente o exemplo acima descrito. A primeira tabela, Tabela 1, mostra os valores de certas variáveis no caso onde não existe sistema de estabilização de energia. A segunda tabela, Tabela 2, mostra os valores daquelas variáveis depois dos ajustes pelo sistema de controle de energia 100 (Fig. 3).

Tabela 1 – nenhuma estabilização de energia ou compensação de desequilíbrio

	X_{varA}	X_{varB}	X_{varC}	P_{sP}	P	I_A	I_B	I_C	I_1	I_2	I_2/I_1
	Ohms	Ohms	Ohms	MW	MW	A	A	A	A	A	%
F1	3,9	3,9	3,9	70	35	0	1262	1262	729	729	100.0
F2	3,9	3,9	3,9	70	70	1458	1458	1458	1458	0	0,0
F3	3,9	3,9	3,9	70	70	1458	1458	1458	1458	0	0,0
F4	3,9	3,9	3,9	70	70	1458	1458	1458	1458	0	0,0
Total				280	245				5103	729	14,29

Tabela 2 – estabilização de energia e compensação de desequilíbrio

	X_{varA}	X_{varB}	X_{varC}	P_{sP}	P	I_A	I_B	I_C	I_1	I_2	I_2/I_1
	Ohms	Ohms	Ohms	MW	MW	A	A	A	A	A	%
F1	0	0	0	70	46	0	1443	1443	833	833	100.0
F2	0	6,8	0,5	70	78	1783	1431	1373	1516	269	17.74
F3	0	6,8	0,5	70	78	1783	1431	1373	1516	269	17.74
F4	0	6,8	0,5	70	78	1783	1431	1373	1516	269	17.74
Total				280	280				5371	49	0,91

[00103] Será percebido que a corrente na fase A do Forno F1 é ze-

ro em ambos os casos e que o primeiro forno, F1, é sistema de controle de energia 100% desequilibrado. Em ambos os casos, o ponto de ajuste de energia desejado para cada forno é 70 MW com todo ponto de referência de energia total de 280 MW. No caso onde não existe estabilização de energia, os três outros fornos F2, F3, e F4 são completamente equilibrados e operam no ponto de ajuste de energia de 70 MW. O resultado total para o sistema nesse caso é uma queda de energia de cerca de 35 MW e um equilíbrio de além de impedância de arco 14%. Os sistemas de suprimento de energia para forno podem normalmente tolerar um desequilíbrio de até 10% por períodos limitados de tempo, mas um maior grau de desequilíbrio prolongado pode resultar em superaquecimento e possivelmente paralisação do gerador.

[00104] No segundo caso, onde o sistema de controle de energia 100 causou reatâncias variáveis e/ou ajustes de posição do eletrodo para serem feitos às reatâncias variáveis 118 (Fig. 3) em Fornos F2, F3 e F4, a energia total puxada dos quatro fornos é mantida no ponto de ajuste de energia total de 280 MW aumentando a energia puxada pelos fornos F2, F3 e F4. Estará aparente na Tabela 2 que ajustes foram feitos aos reatores variáveis 118 nos fornos F2, F3 e F4 de modo a ajustar a corrente puxada por cada fase daqueles fornos, aumentando desse modo a energia consumida e aumentando o desequilíbrio em cada forno. O desequilíbrio introduzido aos fornos F2, F3 e F4 é aproximadamente 17,74%, enquanto o efeito é reduzir o desequilíbrio de fase total visto pelo gerador de energia para menos do que 1%.

[00105] Embora o reator variável 118 tenha sido mostrado como incluindo um par único de comutadores de tiristor, será apreciado que outras configurações devem ser usadas para o reator variável 118, tal como um comutador de tiristor de múltiplos estágios, por exemplo. Alternativamente, outros tipos de comutadores de energia poderiam ser

usados no lugar de tiristores.

[00106] A presente invenção pode ser incorporada em outras formas específicas sem afastar-se do espírito ou de suas características essenciais. Certas adaptações e modificações da invenção podem estar aparentes para aqueles versados na técnica. Por conseguinte, as modalidades acima discutidas são consideradas ilustrativas e não restritivas, sendo o escopo da invenção indicado pelas reivindicações em anexo em vez da descrição precedente, e todas as mudanças que vêm dentro do significado e faixa de equivalência das reivindicações pretendem ser abrangidas nelas.

REIVINDICAÇÕES

1. Forno elétrico (100, 101a, 101b) acoplado a um suprimento de energia (110), compreendendo pelo menos um eletrodo (112, 112a, 112b), um sistema de controle de reator variável (128, 128a, 128b) para manter um ponto de ajuste, incluindo um reator variável (118, 118a, 118b) acoplado entre cada um do pelo menos um eletrodo (112, 112a, 112b) e o suprimento de energia (110) e um sistema de posicionamento de eletrodo (148, 148a, 148b) acoplado ao pelo menos um eletrodo para controlar a posição do pelo menos um eletrodo (112, 112a, 112b);

caracterizado pelo fato de compreender ainda:

um sistema de controle de alimentação (172, 172a, 172b) para controlar a entrada de materiais de alimentação para o forno, o sistema de controle de alimentação (172, 172a, 172b) tendo uma saída para um sinal de solicitação de alimentação, sendo que:

o sistema de posicionamento de eletrodo possui uma entrada, para receber o sinal de solicitação de alimentação, e dispositivo de posicionamento (148, 148a, 148b) para abaixar o pelo menos um eletrodo (112, 112a, 112b) em resposta ao sinal de solicitação de alimentação.

2. Forno elétrico de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que o dispositivo de posicionamento (148, 148a, 148b) compreende um componente de "override" que produz um sinal de capacitação quando o pelo menos um eletrodo (112, 112a, 112b) é abaixado a uma altura desejada, o sistema de controle de alimentação (172, 172a, 172b) recebendo o sinal de capacitação e iniciando a entrada de material em resposta ao sinal de capacitação.

3. Forno elétrico de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado** pelo fato de que a altura desejada corresponde a uma impedância de eletrodo predeterminada, e em que o componente de cancelamento

lamento mede uma impedância do eletrodo e produz o sinal de capacitação quando a impedância medida alcança a impedância de eletrodo predeterminada.

4. Forno elétrico de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que o pelo menos um eletrodo (112, 112a, 112b) é abaixado até pelo menos um eletrodo contatar, ou é posicionado adjacente, um banho de escória no forno (100, 101a, 101b).

5. Forno elétrico de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que o sistema de controle do reator variável (128, 128a, 128b) ajusta o reator variável (118, 118a, 118b) para manter o ponto de ajuste para o forno durante o abaixamento do pelo menos um eletrodo (112, 112a, 112b).

6. Forno elétrico de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que o sistema de posicionamento de eletrodo monitora uma impedância do eletrodo e ajusta a altura do pelo menos um eletrodo (112, 112a, 112b) para manter a impedância do eletrodo em um ponto de ajuste de impedância e em que o dispositivo de posicionamento (148, 148a, 148b) cancela o dito ponto de ajuste de impedância em resposta ao sinal de solicitação de alimentação.

7. Forno elétrico de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que o sistema de controle de alimentação (172, 172a, 172b) é configurado para produzir um sinal de final de alimentação para o sistema de posicionamento de eletrodo (148, 148a, 148b) depois da entrada do material de alimentação, e o sistema de posicionamento de eletrodo (148, 148a, 148b) eleva o pelo menos um eletrodo (112, 112a, 112b) em resposta ao sinal de final de alimentação.

8. Forno elétrico de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que o suprimento de energia (110) supre energia multifásica e o forno elétrico (100, 101a, 101b) compreende múltiplos eletrodos (112, 112a, 112b), cada eletrodo sendo acoplado a uma fase

respectiva do suprimento de energia multifásica (F_1, F_2, \dots, F_n), e cada eletrodo e acoplado a um sistema de controle de reator variável respectivo (128, 128a, 128b) e ao sistema de posicionamento do eletrodo (148, 148a, 148b).

9. Método para operar um forno elétrico (101, 101a, 101b) acoplado a um suprimento de energia (110), o forno incluindo pelo menos um eletrodo (112, 112a, 112b) posicionável por um sistema de posicionamento de eletrodo (148, 148a, 148b) e um sistema de controle de alimentação (172, 172a, 172b) para controlar a entrada de material de alimentação para o forno, o sistema de controle de alimentação tendo uma saída para um sinal de solicitação de alimentação, **caracterizado** pelo fato de compreender as etapas de::

receber no sistema de posicionamento de eletrodo (148, 148a, 148b) o sinal de solicitação de alimentação do sistema de controle de alimentação (172, 172a, 172b); e

abaixar o referido pelo menos um eletrodo (112, 112a, 112b) em resposta ao sinal de solicitação de alimentação.

10. Método de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado** pelo fato de compreender ainda a etapa de produzir um sinal capaz para o sistema de controle de alimentação quando o pelo menos um eletrodo (112, 112a, 112b) alcança uma altura desejada, o sistema de controle de alimentação (172, 172a, 172b) recebendo o sinal de capacitação e iniciando entrada do material de alimentação em resposta ao sinal de capacitação.

11. Método de acordo com a reivindicação 10, **caracterizado** pelo fato de que a referida altura desejada corresponde a uma impedância de eletrodo predeterminada, e a etapa de abaixar o pelo menos um eletrodo (112, 112a, 112b) inclui medir uma impedância do pelo menos um eletrodo e produzir um sinal de capacitação quando a impedância medida alcança a impedância do eletrodo predeterminado.

12. Método de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado** pelo fato de que a etapa de abaixar é terminada quando o pelo menos um eletrodo (112, 112a, 112b) contata, ou é posicionado adjacente, um banho de escória no forno (100, 101a, 101b).

13. Método de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado** pelo fato de que pelo menos um reator variável (118, 118a, 118b) é acoplado a um eletrodo respectivo e ao suprimento de energia para manter um ponto de ajuste, o método compreendendo adicionalmente a etapa, durante a etapa de abaixar, de ajustar o pelo menos um reator variável(118, 118a, 118b) para manter o ponto de ajuste para o (100, 101a, 101b).

14. Método de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado** pelo fato de compreender ainda as etapas de monitorar uma impedância de eletrodo e ajustar a altura do pelo menos um eletrodo (112, 112a, 112b) para manter a impedância do eletrodo em um ponto de ajuste de impedância, sendo que a etapa de abaixar o pelo menos um eletrodo inclui um "override" do ponto de ajuste da impedância em resposta ao sinal de solicitação de alimentação.

15. Método de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado** pelo fato de compreender ainda as etapas de receber um sinal de final de alimentação do sistema de controle de alimentação (172, 172a, 172b) e elevar o pelo menos um eletrodo (112, 112a, 112b) em resposta ao sinal de final de alimentação.

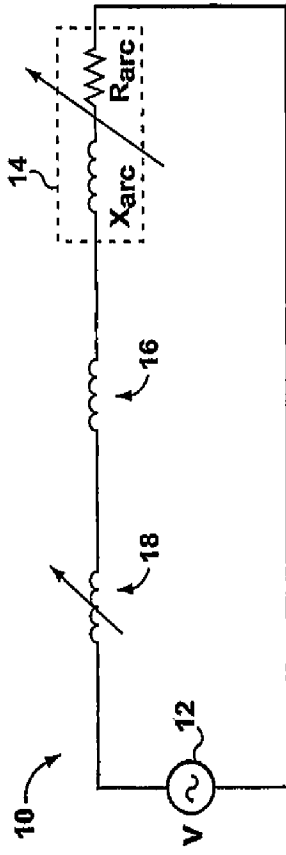


FIG. 1

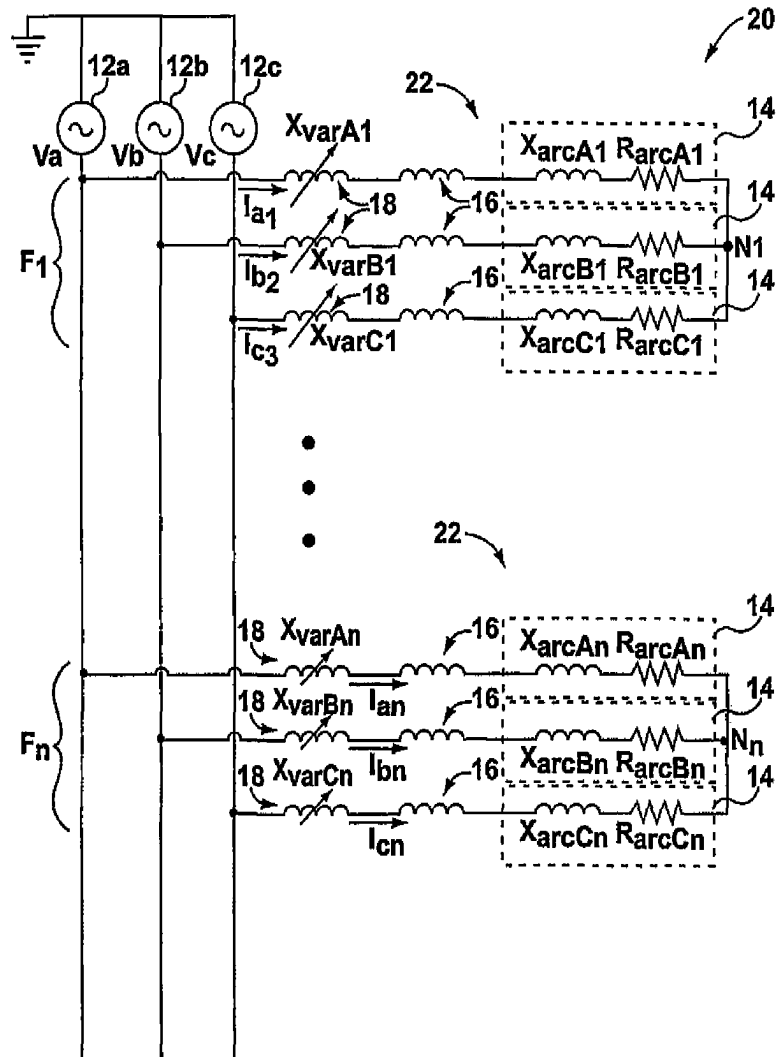


FIG. 2

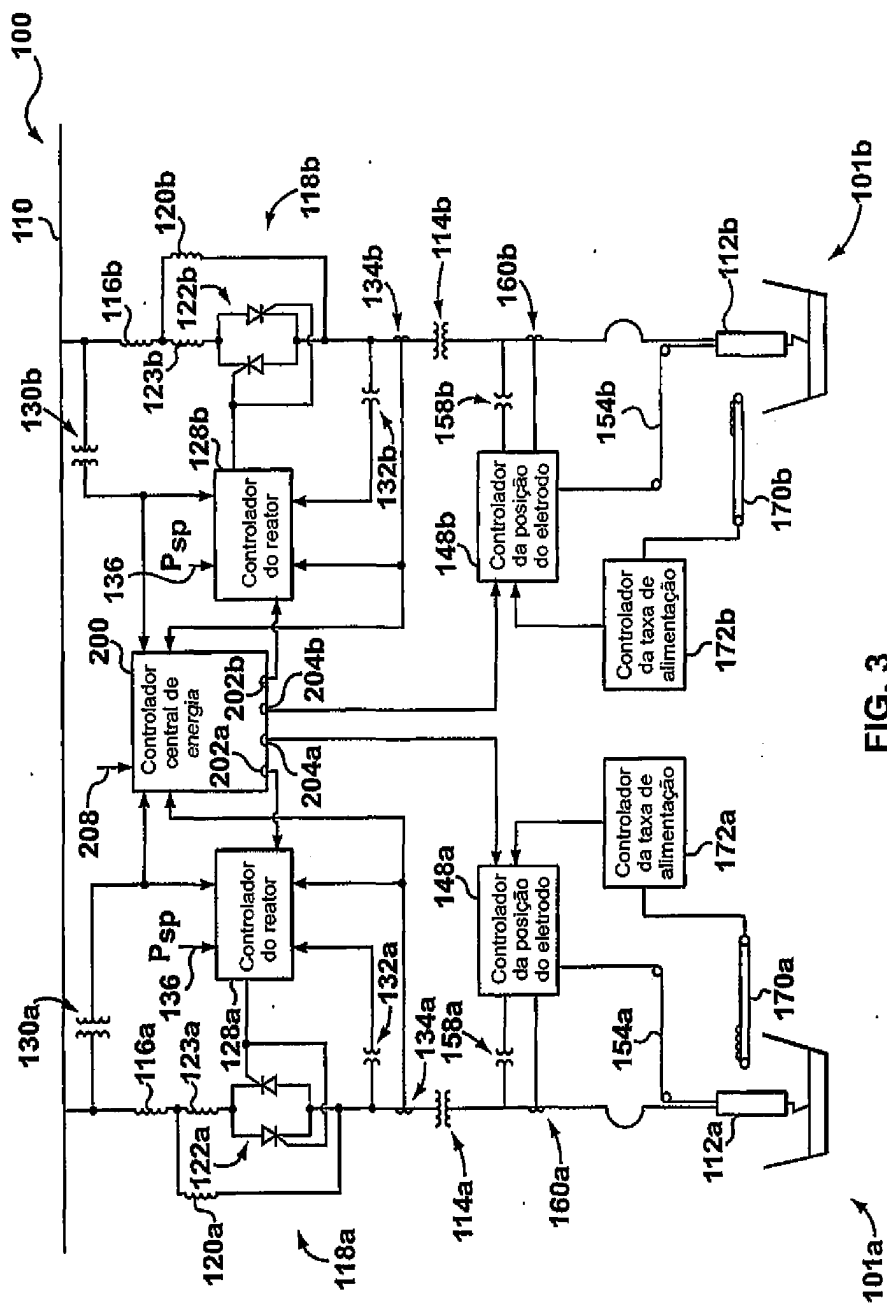


FIG. 3

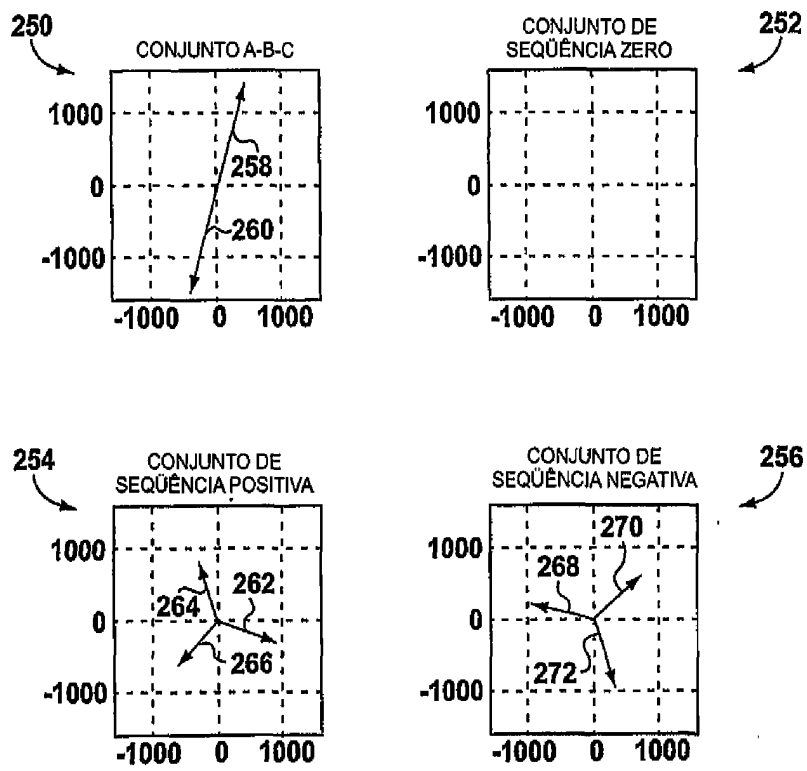
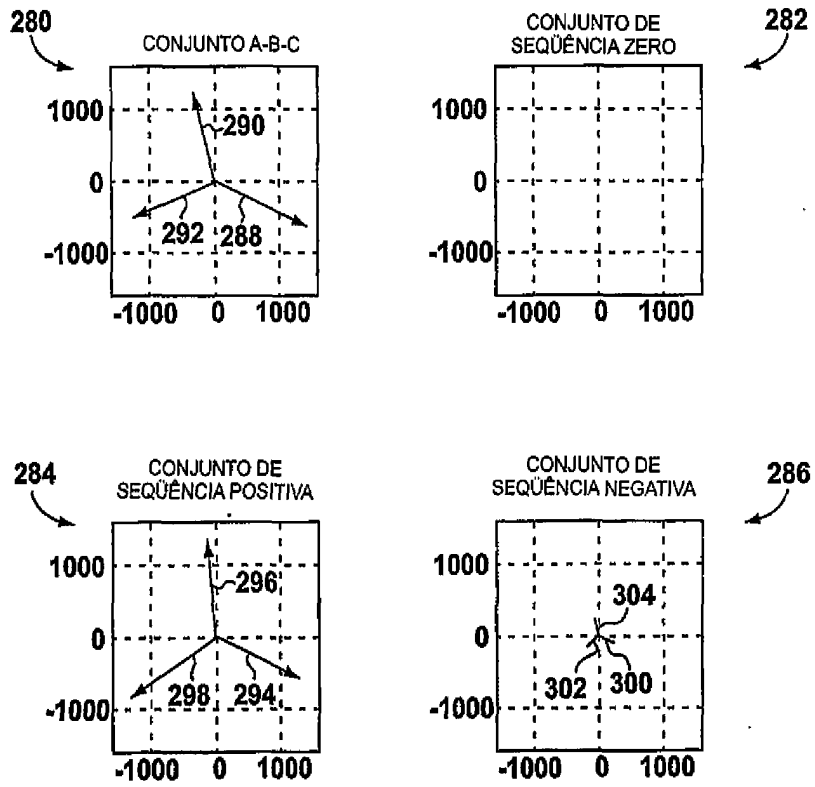


FIG. 4

**FIG. 5**

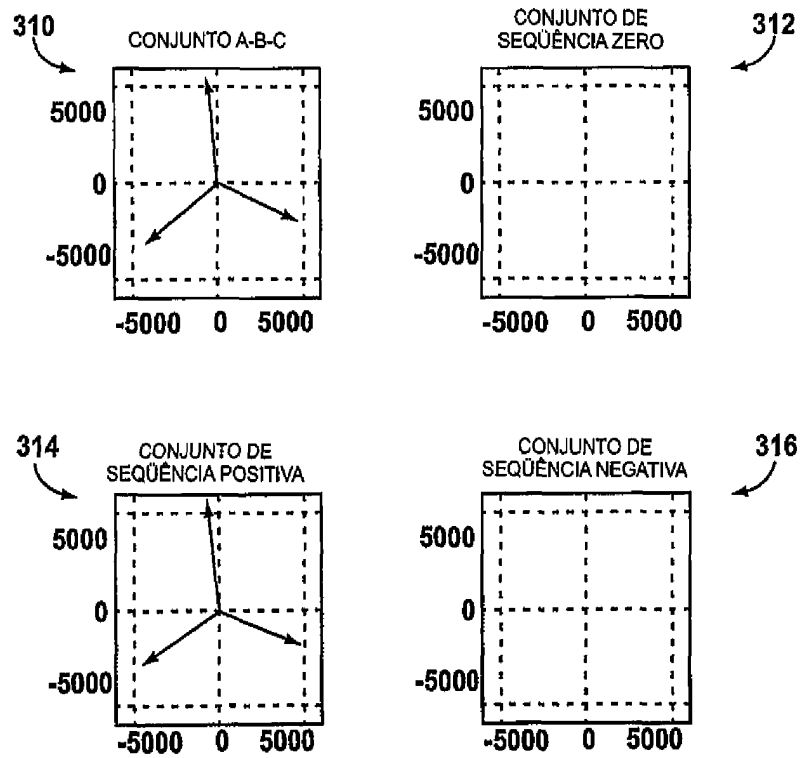
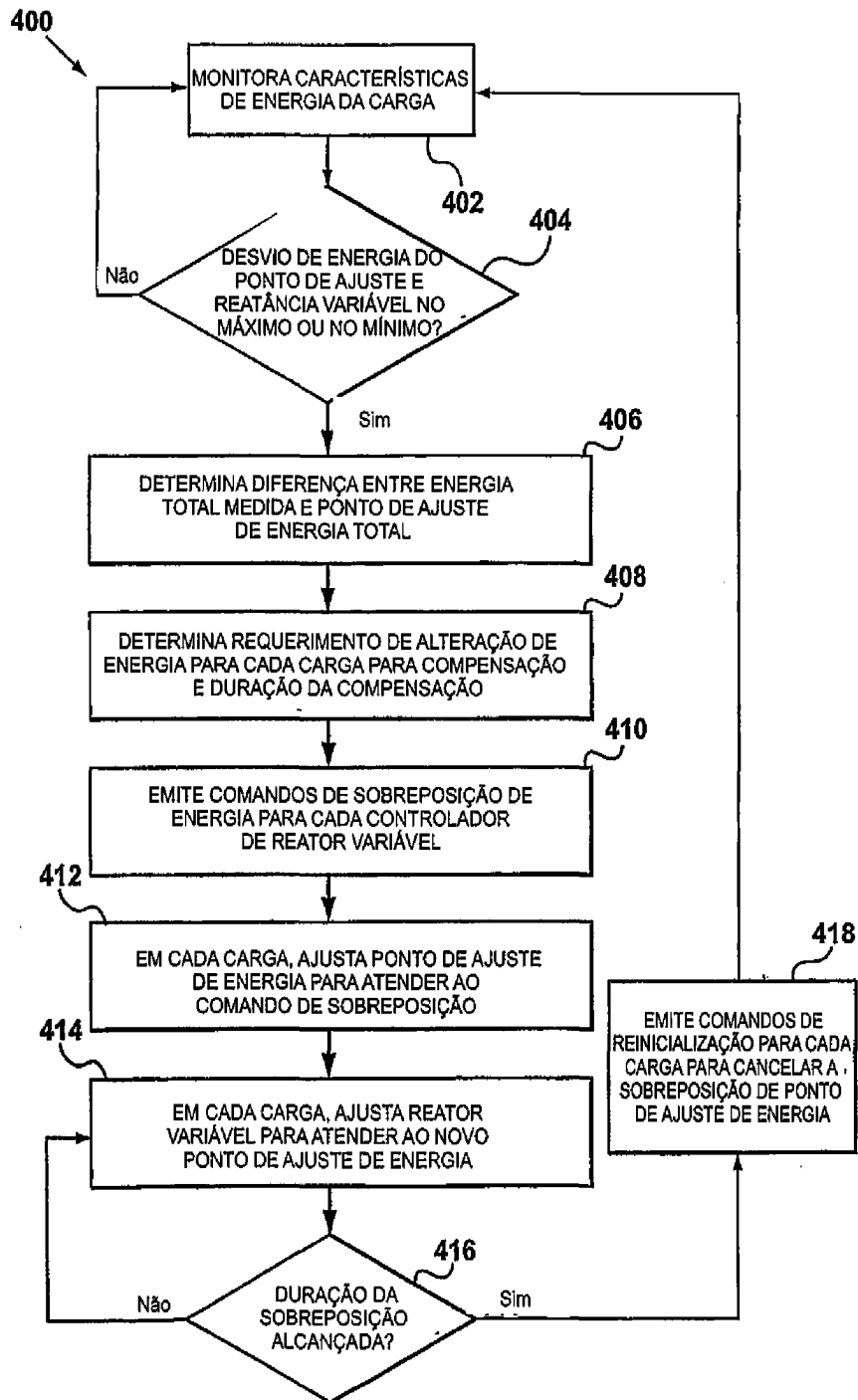
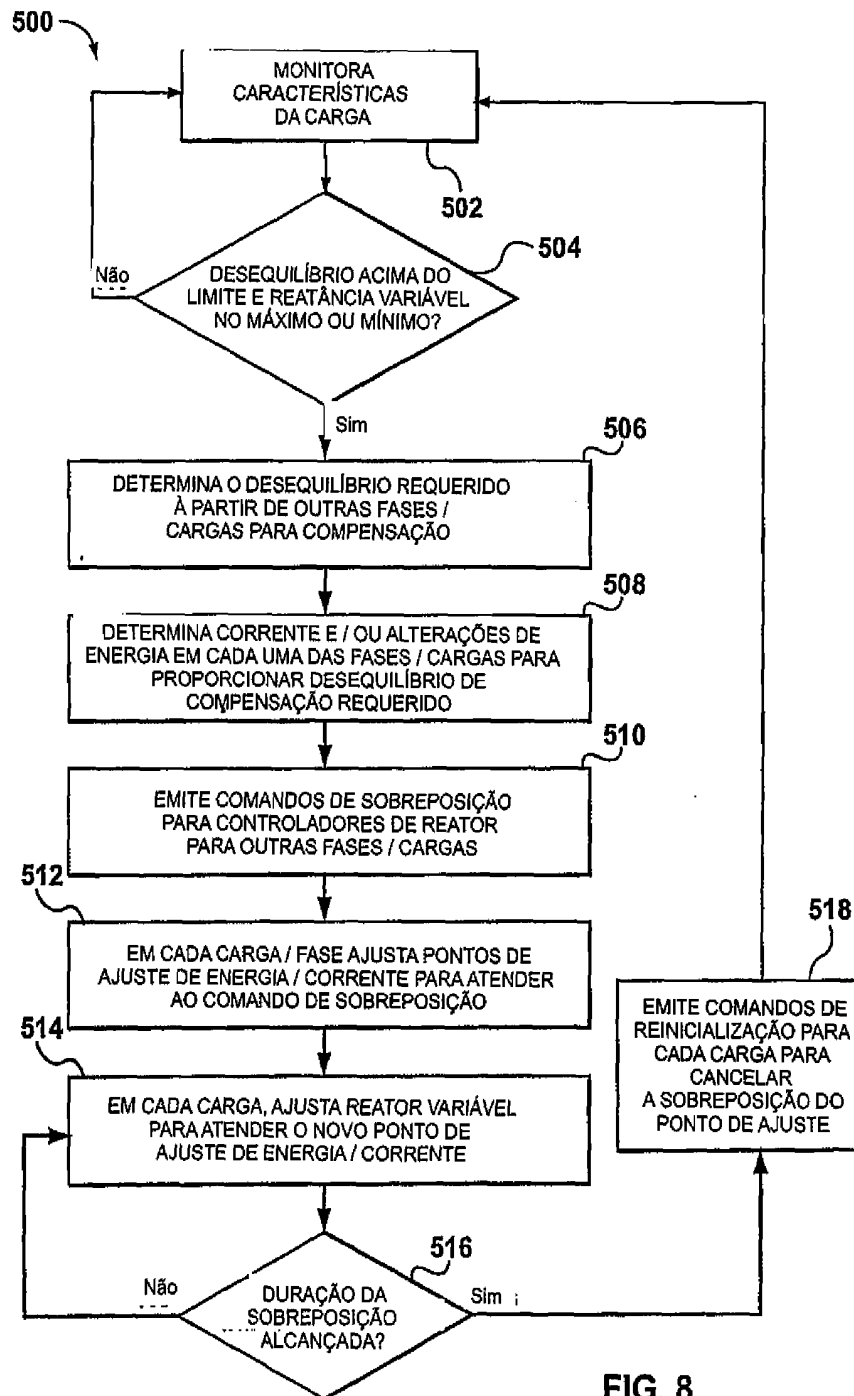


FIG. 6





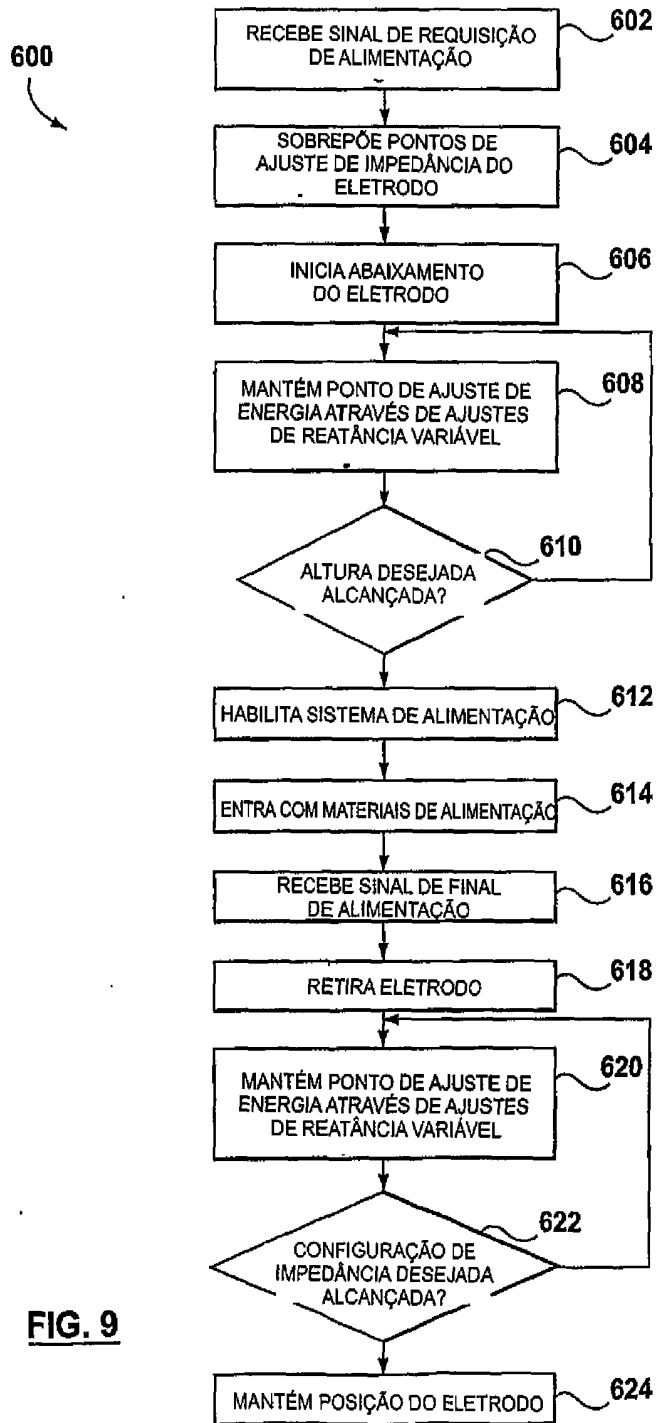


FIG. 9