



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

(11) PI 0610135-6 B1

(22) Data do Depósito: 19/05/2006

(45) Data de Concessão: 16/01/2018



* B R P I 0 6 1 0 1 3 5 B 1 *

(54) Título: CIRCUITO DE FRENAGEM E DISPOSITIVO ELÉTRICO

(51) Int.Cl.: H02M 5/458; H02P 23/06

(30) Prioridade Unionista: 18/05/2006 US 11/419,064, 19/05/2005 US 60/682,781

(73) Titular(es): SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT

(72) Inventor(es): MUKUL RASTOGI; RICHARD OSMAN; YUSUKE FUKUTA

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para "**CIRCUITO DE FRENAGEM E DISPOSITIVO ELÉTRICO**".

REFERÊNCIA CRUZADA A PEDIDOS RELACIONADOS

Este pedido de patente reivindica prioridade para e incorpora
5 como referência em sua totalidade o Pedido de Patente Provisória pendente U.S. Nº 60/682.781, intitulado "VFD with limited regeneration capability", depositado em 19 de maio de 2005.

ANTECEDENTES

Nos últimos anos, os circuitos para aplicações de acionamento
10 de frequência variável de tensão média (VFD) receberam atenção. Vários métodos novos foram introduzidos na década passada. Por exemplo, em um circuito compreendendo inversores conectados em série, conforme descrito na Patente U.S. Nº 5.625.545 de Hammond, cuja exposição é incorporada aqui como referência em sua totalidade, um inversor ou uma célula de po-
15 tência 110 inclui um retificador de ponte de diodo trifásico 112, um ou mais capacitores de corrente contínua (CC) 114, e um inversor de ponte H 116. O retificador 112 converte a tensão de corrente alternada (CA) de entrada 118 em uma tensão CC substancialmente constante que é suportada pe-
los capacitores 114 que são conectados através da saída de retificador 112.
20 O estágio de saída do inversor 110 inclui um inversor de ponte H 116 que inclui dois pólos, um pólo esquerdo e um pólo direito, cada um com dois dispositivos. O inversor 110 transforma a tensão CC através dos capacitores CC 114 em uma saída CA 120 usando modulação de largura de pulso (PWM) dos dispositivos semicondutores no inversor de ponte H 116.

25 Um circuito incluindo células de potência, tal como 110 na FIG. 1, quando conectado a uma carga, tal como um motor, pode prover potência a partir de uma fonte de entrada para o motor, quando operando no modo de motorização. Contudo, quando a velocidade do motor precisa ser reduzida, a potência do motor precisa ser absorvida pelo inversor. Este modo de opera-
30 ção, quando a potência deve ser absorvida pelo inversor, é referido como o modo de regeneração. Os retificadores de ponte de diodo 112 em cada célula de potência não permitem que a potência seja transferida de volta para a

fonte. Daí, a potência absorvida pelo circuito é estritamente limitada pelas perdas no inversor e os capacitores em cada célula de potência e, usualmente, está na faixa de em torno de 0,2% a em torno de 0,5% da potência nominal.

- 5 A exposição contida aqui descreve tentativas para resolução de um ou mais dos problemas descritos acima.

SUMÁRIO

Em uma modalidade, um circuito de frenagem inclui um arranjo de células de potência eletricamente conectadas para o recebimento de po-
10 tência a partir de uma fonte e o envio de potência para uma carga. O circuito inclui uma primeira fileira de células de potência regenerativas, uma segunda fileira de células de potência não regenerativas e um circuito de controle. As voltagens de saída das células de potência regenerativas e das células de
15 potência não regenerativas podem ser mantidas pelo menos substancialmente nos seus valores nominais, quando a carga for operada a menos do que o fluxo nominal e a menos do que a corrente nominal. O circuito de controle pode pelo menos substancialmente usar a capacidade de corrente das células de potência regenerativas e das células de potência não regenerati-
20 vas, quando a carga for operada no fluxo nominal e na corrente plena. Uma queda de voltagem pode ocorrer através de todas as células, durante uma frenagem.

Em algumas modalidades, cada célula de potência regenerativa pode incluir uma ponte inversora, um conjunto de capacitor eletricamente conectado através dos terminais da ponte inversora, e uma extremidade di-
25 anteira ativa compreendendo uma pluralidade de transistores eletricamente conectados como uma ponte trifásica. Em uma modalidade alternativa, cada célula de potência regenerativa pode incluir uma ponte inversora, um conjunto de capacitor eletricamente conectado através dos terminais da ponte in-
30 versora, um retificador de ponte de diodo trifásico eletricamente conectado através dos terminais, e uma combinação de transistor e resistor conectados em série que é eletricamente conectada através dos terminais. Em qualquer modalidade, a ponte inversora pode compreender, por exemplo, um inversor

de ponte H de quatro transistores ou um inversor de ponte H de oito transistores, com base em uma conexão grampeada de ponto neutro.

Em algumas modalidades, cada célula de potência não regenerativa pode incluir uma ponte inversora, um conjunto de capacitor eletricamente conectado através dos terminais da ponte inversora e um retificador de ponte trifásico conectado eletricamente através dos terminais. Esta ponte inversora também pode compreender, por exemplo, um inversor de ponte H de quatro transistores ou um inversor de ponte H de oito transistores, com base em uma conexão grampeada de ponto neutro. Em algumas modalidades, as células de potência regenerativas e as células de potência não regenerativas são instaladas de forma removível e intercambiável em um alojamento.

Em uma modalidade alternativa, um dispositivo elétrico inclui uma pluralidade de células de potência monofásicas conectadas para o recebimento de potência a partir de uma fonte e o envio de potência para uma carga. As células de potência monofásicas incluem uma primeira fileira de células de potência regenerativas e uma segunda fileira de células de potência não regenerativas. Cada célula de potência não regenerativa pode incluir uma ponte inversora, um conjunto de capacitor eletricamente conectado através dos terminais da ponte inversora e um retificador de ponte trifásico conectado eletricamente através dos terminais. As células de potência não regenerativas podem prover potência reativa, quando a pluralidade de células for usada para a frenagem de um motor.

Em uma modalidade alternativa, um dispositivo elétrico inclui uma primeira fileira que inclui pelo menos três células de potência não regenerativas monofásicas, uma segunda fileira que inclui células de potência regenerativas trifásicas, e um circuito de controle. Cada célula de potência não regenerativa inclui uma ponte inversora, e um retificador de ponte trifásico eletricamente conectado através dos terminais. Quando o dispositivo é usado para frenagem de um motor, a célula de potência trifásica não é requerida, e as células de potência não regenerativas provêem potência reativa.

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

Aspectos, recursos, benefícios e vantagens da presente invenção serão evidentes com respeito à descrição a seguir e aos desenhos associados, dos quais:

5 a FIG. 1 descreve uma célula de potência da técnica anterior.

A FIG. 2 descreve um circuito que compreende uma pluralidade de células de potência conectadas a uma carga.

As FIGs. 3A e 3B são um diagrama de blocos de células de potência regenerativas de exemplo.

10 A FIG. 4 é um diagrama de um arranjo de células de potência regenerativas e células de potência não regenerativas.

As FIGs. 5A e 5B ilustram relações de exemplo de voltagem e corrente para motorização, regeneração e frenagem máxima em várias modalidades.

15 A FIG. 6 ilustra uma relação de exemplo de voltagem e corrente de um circuito em uma faixa de velocidade de motor que é maior do que a velocidade na qual o fluxo nominal pode ser aplicado ao motor.

A FIG. 7 ilustra uma relação de exemplo de voltagem e corrente em uma faixa de velocidade de motor que é menor do que a velocidade na qual o fluxo nominal pode ser aplicado ao motor, mas maior do que a velocidade na qual a corrente nominal pode ser aplicada ao motor.

20

A FIG. 8 é um diagrama de blocos de um circuito de controle de exemplo.

As FIGs. 9A a 9D ilustram resultados de simulação de um acionamento de frequência variável em várias velocidades de motor.

25

DESCRIÇÃO DETALHADA

Antes dos presentes métodos, sistemas e materiais serem descritos, é para ser compreendido que esta exposição não está limitada a metodologias em particular, sistemas e materiais descritos, já que estes podem variar. Também é para ser compreendido que a terminologia usada na descrição é para fins de descrição das versões particulares ou modalidades apenas, e não é pretendida para limitação do escopo. Por exemplo, conforme

30

usado aqui e nas reivindicações em apenso, as formas singulares "um", "uma" e "o(a)" incluem referências no plural, a menos que o contexto claramente dite de outra forma. A menos que definidos de outra forma, todos os termos técnicos e científicos usados aqui têm os mesmos significados que
 5 comumente compreendido por alguém de conhecimento comum na técnica. Além disso, pretende-se que os termos a seguir tenham as definições a seguir aqui:

conjunto de capacitor - um ou mais capacitores.

compreendendo - incluindo, mas não limitando.

10 *circuito de controle* - um primeiro dispositivo elétrico que sinaliza para um segundo dispositivo elétrico para mudar um estado do segundo dispositivo elétrico.

eletricamente conectado ou eletricamente acoplado - conectado de uma maneira adaptada para a transferência de energia elétrica.

15 *inversor de ponte H* - um circuito para fluxo de potência controlado entre circuitos CA e CC tendo quatro transistores e quatro diodos. Com referência à FIG. 1, um inversor de ponte H 116 geralmente inclui uma primeira perna de fase e uma segunda perna de fase eletricamente conectadas em paralelo. Cada perna inclui duas combinações de transistor / diodo. Em
 20 cada combinação, o diodo é eletricamente acoplado através da base e do emissor do transistor.

inversor - um dispositivo que converte a potência CC em potência CA ou a potência CA em potência CC.

25 *voltagem média* - uma voltagem nominal maior do que 690 Volts (V) e menos de 69 quilovolts (kV). Em algumas modalidades, a voltagem média pode ser uma voltagem entre em torno de 1000 V e em torno de 69 kV.

30 *conexão grampeada de ponto neutro* - no contexto de um inversor de ponte H de oito transistores, um arranjo de oito transistores para incluir uma primeira perna de fase e uma segunda perna de fase eletricamente conectadas em paralelo nos terminais CC. Cada perna inclui quatro transistores. O ponto médio entre o par superior de transistores e o ponto médio

entre o par inferior de transistores de cada perna de fase são eletricamente conectados através de diodos para a formação de um ponto neutro.

célula de potência não regenerativa - uma célula de potência que não tem a capacidade de absorver potência regenerativa.

- 5 *célula de potência* - um dispositivo elétrico que tem uma entrada ~~de corrente alternada trifásica e uma saída de corrente alternada monofásica.~~

fileira - um arranjo de células de potência estabelecido através de cada fase de um sistema de envio de potência trifásico.

- 10 *velocidade nominal* - número de vezes que o eixo de um motor pode girar em um período de tempo, tais como revoluções por minuto (RPM), quando está operando em seu torque nominal.

célula de potência regenerativa - uma célula de potência que tem a capacidade de absorver potência regenerativa.

- 15 *substancialmente* - até uma grande extensão ou grau.

retificador de ponte trifásico - um dispositivo que inclui um arranjo de dispositivos semicondutores, tais como diodos, que converte corrente alternada trifásica em corrente contínua.

- Em várias modalidades, um circuito de potência de nível múltiplo
- 20 usa inversores monofásicos de célula regenerativa e de célula não regenerativa conectados em série para a provisão de uma capacidade de frenagem limitada. A Figura 2 ilustra uma modalidade de exemplo de um circuito que tem tais inversores. Na Figura 2, um transformador 210 envia potência de voltagem média trifásica para uma carga 230, tal como um motor de indução
- 25 trifásico através de um arranjo de inversores monofásicos (também referidos como células de potência). O transformador 210 inclui enrolamentos primários 212 que excitam vários enrolamentos secundários 214 a 225. Embora o enrolamento primário 212 seja ilustrado como tendo uma configuração em estrela, uma configuração de malha também é possível. Ainda, embora os
- 30 enrolamentos secundários 214 a 225 sejam ilustrados como tendo uma configuração de malha, enrolamentos secundários configurados em estrela são possíveis, ou uma combinação de enrolamentos em estrela e malha pode

ser usada. Ainda, um número de enrolamentos secundários ilustrados na Figura 2 é meramente de exemplo, e outros números de enrolamentos secundários são possíveis. O circuito pode ser usado para aplicações de voltagem média ou, em algumas modalidades, outras aplicações.

5 Qualquer número de fileiras de células de potência é conectado entre o transformador 210 e a carga 230. Uma "fileira" é considerada como sendo um conjunto trifásico, ou um grupo de células de potência estabelecidas através de cada uma das três fases do sistema de envio de potência. Com referência à Figura 2, a fileira 250 inclui as células de potência 251 a 253, uma fileira 260 inclui as células de potência 261 a 263, a fileira 270 inclui as células de potência 271 a 273, e a fileira 280 inclui células de potência 281 a 283. Menos de quatro fileiras ou mais de quatro fileiras são possíveis. Um sistema de controle central 295 envia sinais de comando para os controles locais em cada célula por fibras óticas ou um outro meio de comunicações com fio ou sem fio 290.

Conforme mencionado acima, as células de potência da técnica anterior, tais como aquelas ilustradas na Figura 1, não permitem qualquer quantidade significativa de regeneração. De modo a se obter a capacidade de frenagem desejada nas modalidades descritas aqui, células de potência alternativas são usadas. As Figuras 3A e 3B mostram duas modalidades de células de potência que permitem uma regeneração. Com referência à Figura 3A, uma célula de potência 300 inclui uma extremidade dianteira ativa 310 que serve como uma ponte trifásica, conforme recebe potência de enrolamentos secundários trifásicos dedicados do transformador através de uma entrada 342. A célula 300 também inclui uma pluralidade de dispositivos de controle de corrente, tais como transistores ou tiristores 312 a 317, por exemplo, transistores bipolares de porta isolada (IGBTs), tiristores comutados de porta integrada ou outros dispositivos, geralmente referidos aqui como transistores de extremidade dianteira. Embora seis transistores em um formato de ponte - neste exemplo, três pares de dois transistores cada conectados em paralelo através dos terminais DC - sejam ilustrados na Figura 3A, outros números de transistores podem ser usados. Estes transistores podem

ser controlados por um sistema de controle local e um remoto (292 e 295, respectivamente, na Figura 2) para a transferência de energia em qualquer direção, desse modo se permitindo uma motorização ou regeneração para capacidade plena (isto é, de forma aproximada ou plenamente 100%). Qualquer método adequado para a obtenção dessa operação com transistores de extremidade dianteira pode ser usado. O restante da célula de potência 300 inclui um ou mais capacitores 320 e um inversor de ponte H 330, cada um conectado através da saída ou dos terminais DC da extremidade dianteira ativa 310, para enviar potência AC para a saída 344. Outras pontes inversoras podem ser usadas como substitutos para a ponte H de quatro transistores 330 ilustrada na Figura 3A. Por exemplo, uma ponte H compreendendo oito transistores com base na conexão grampeada de ponto neutro pode ser usada.

Em uma modalidade alternativa, a Figura 3B ilustra uma célula de potência 350 a qual inclui os elementos de um retificador 360, capacitores 375 e uma ponte inversora, tal como um inversor de ponte H 380 conectado em paralelo entre uma entrada 392 e uma saída 394. Um retificador de ponte de diodo trifásico 360 recebe potência de enrolamentos secundários trifásicos dedicados do transformador através da entrada 392. Além disso, um circuito de freio 370 inclui um transistor 374 (referido aqui como o transistor de freio) e um resistor 372 eletricamente conectado em série um com respeito ao outro e em paralelo através dos capacitores DC 375 e da saída DC do retificador 360. O transistor de freio 374 é controlado por um controlador local, e, durante a motorização do transistor de freio 374, é controlado para estar "desligado" e não participar na transferência de energia a partir da entrada AC 392 para a saída AC 394. Contudo, durante uma regeneração, o transistor de freio 374 pode ser controlado para ligar e desligar, de modo a dissipar a energia do motor no resistor 372 e, daí, manter a voltagem DC através dos capacitores 375 em um valor predeterminado.

Uma célula de potência que permite que a potência seja absorvida a partir do motor é referida aqui como uma célula regenerativa (RC) e uma célula de potência que não permite qualquer quantidade significativa de

regeneração (tal como uma mostrada na Figura 1 e descrita acima) é referida como uma célula não regenerativa (NRC). Embora dois exemplos de RCs sejam mostrados nas Figuras 3A e 3B, outras células RC podem ser usadas nas modalidades descritas aqui.

- 5 Assim, com referência de volta à Figura 2, as fileiras 250 e 270 ~~podem compreender células regenerativas e as fileiras 260 e 280 podem~~ compreender células não regenerativas, ou vice-versa. Deve ser notado que o número de células por fase descrito na Figura 2 é de exemplo, e mais ou menos do que quatro fileiras podem ser possíveis em várias modalidades.
- 10 Por exemplo, duas fileiras, quatro fileiras, oito fileiras e outros números de fileiras são possíveis. De fato, o número de células de potência regenerativas usadas pode ser selecionado com base no grau desejado de frenagem provida. Além disso, as células de potência podem ser instaladas de forma removível em um alojamento, de modo que uma unidade de alojamento única
- 15 ca possa ser usada para várias aplicações, com células regenerativas sendo trocadas por células não regenerativas, ou vice-versa, dependendo da aplicação desejada, tal como uma frenagem ou uma regeneração desejada.

Para a obtenção de uma capacidade de regeneração plena para um circuito, tal como aquele mostrado na Figura 2, RCs podem ser usadas

20 no circuito inteiro de células de potência. Contudo, em muitas aplicações, a capacidade de frenagem que é necessária é uma fração muito menor da capacidade nominal da carga, tal como aproximadamente 10 por cento a aproximadamente 20% para propulsão de navios e aplicações de ventilador grande. O uso de RCs no circuito inteiro torna a solução mais dispendiosa

25 do que precisa ser. Contudo, foi descoberto um exemplo de arranjo de inversores conectados em série que provê uma capacidade de frenagem limitada, mas não plena.

Com referência à Figura 4, um arranjo conectado em série de inversores pode ser usado para a conexão de ambas RCs e NRCs no mesmo

30 circuito. Uma primeira fileira 410 inclui três RCs monofásicas 411, 412 e 413 (uma célula para cada fase em um circuito trifásico), enquanto uma segunda fileira 420 inclui três NRCs monofásicas 421, 422 e 423 (também uma

para cada fase). Nesta modalidade, um primeiro terminal de saída de cada célula RC é eletricamente conectado ao terminal de saída de polaridade oposta para a célula NRC correspondente de fase. O segundo terminal de saída de cada célula RC é eletricamente conectado a uma linha de saída.

- 5 Os terminais de saída remanescentes de todas as três células RC na fileira ~~são eletricamente conectados uns aos outros para a formação de um ponto~~ de estrela 440. Conforme mostrado na Figura 2, fileiras adicionais, tais como quatro fileiras no total, seis fileiras no total, oito fileiras no total ou mais, podem estar presentes no circuito. O número de fileiras de RCs selecionado
- 10 pode ser determinado com base no nível desejado de regeneração requerida.

Em algumas modalidades, o circuito pode incluir um recurso de desvio que permite uma operação continuada do circuito se uma ou mais das células falharem. Por exemplo, conforme ilustrado na Patente U.S. Nº

15 5.986.909 e, em particular, na Figura 1B e no texto associado, as quais são incorporadas aqui como referência, um desvio pode criar um percurso de derivação entre as linhas de saída de uma célula de potência, se a célula falhar, de modo que a corrente então possa fluir através do desvio, ao invés da célula de potência.

20 Durante uma motorização, as fileiras de RC e as fileiras de NRC podem prover uma quantidade substancialmente igual de potência para a carga. Contudo, durante uma regeneração, os retificadores de ponte de diodo na NRC impedem uma transferência de potência para a utilidade, mas transistores de extremidade dianteira (AFE) nas RCs são controlados para

25 absorverem a energia de frenagem pela transferência de potência a partir da carga (tal como um motor) na fonte de entrada. O controle de transistores de extremidade dianteira pode ser o mesmo ou um similar a métodos de controle conhecidos, tal como a regulação da voltagem DC em cada RC. Contudo, o controle das pontes H de saída pode requerer métodos diferentes. Por exemplo,

30 a Figura 5A ilustra vetores de voltagem e de corrente de exemplo durante uma motorização, enquanto a Figura 5B ilustra vetores de voltagem e de corrente de exemplo durante uma regeneração. Quando da motoriza-

ção, conforme ilustrado na Figura 5A, os vetores de voltagem de saída de célula 1 (uma RC) e de célula 2 (uma NRC) são ao longo da voltagem de motor. Cada célula de potência provê uma quantidade igual ou substancialmente igual de potência para a carga. Com referência à Figura 5B, durante uma regeneração, a voltagem de célula 2 (NRC) é controlada para estar em ~~quadratura com respeito à corrente de acionamento. Isto impede a célula 2~~ de absorver qualquer potência real (ou ativa). Contudo, a saída de célula 1 (RC) deve constituir a diferença entre a voltagem de motor e a saída de célula 2. Isto restringe a quantidade de voltagem disponível que o acionamento pode produzir e requererá uma operação de fluxo reduzido em altas velocidades, durante uma regeneração. Quando uma mistura de NRC e RC é usada, conforme mostrado na Figura 4, um torque de frenagem máxima é obtido quando as voltagens de NRC e RC também estiverem em quadratura uma com a outra, conforme mostrado na Figura 5C. Embora seja notado que uma relação em quadratura (ou 90 graus) seja desejada para manutenção de um fluxo de potência zero para as células NRC, para uma implementação prática, este ângulo pode ser reduzido abaixo de 90 graus, para se garantir que nenhuma potência flua para as células NRC ou alguma potência flua para fora das células NRC.

20 A abordagem de ter ambos os conjuntos de células (NRC e RC) gerando voltagens durante o processo de frenagem inteiro permite uma frenagem contínua durante a faixa de velocidade inteira. Diferentemente dos métodos da técnica anterior, os métodos descritos aqui podem produzir um torque regenerativo, ~~antes de a velocidade de motor ter caído abaixo da ca-~~

25 pacidade de voltagem do RC. As voltagens de saída de células são substancialmente usadas (com perdas normais de sistema) para a provisão de potência para o motor, quando o motor estiver funcionando à ou próximo de sua velocidade nominal. Quando a voltagem de motor é reduzida (como para uma frenagem), as NRCs e as RCs também participam, de modo que as

30 NRCs provejam uma potência reativa durante uma frenagem, e a corrente seja revertida através das RCs. Assim, diferentemente da técnica anterior, todas as células podem participar durante a frenagem.

Para as finalidades da discussão a seguir, os símbolos abaixo são definidos em uma base por unidade, conforme se segue:

Capacidade de voltagem da RC, $V_{RC} = x$ por unidade

Capacidade de voltagem da NRC, $V_{NRC} = (1-x)$ por unidade

5 Capacidade de voltagem total de acionamento = 1,0 por unidade

Corrente não de carga de motor = I_{NL}

Velocidade abaixo da qual o fluxo nominal pode ser aplicado no motor = w_V

Velocidade abaixo da qual a corrente nominal pode ser aplicada no motor =

10 w_I

Capacidade de torque de frenagem = T_B

Corrente de torque = I_{qs}

Corrente de magnetização = I_{ds}

Velocidade de motor = w

15 Voltagem de motor = V_{motor}

Para compreensão da operação de um circuito de acionamento de exemplo com capacidade de frenagem limitada, a faixa de velocidade de operação inteira pode ser considerada como incluindo três faixas de velocidade, conforme descrito abaixo. Durante cada faixa de velocidade, pode haver um limite separado no torque de frenagem obténível. Este limite depende das capacidades de voltagem relativas da RC e da NRC e da corrente de magnetização do motor. Embora a descrição abaixo seja no contexto de um motor de indução, resultados similares podem ser obtidos com um motor síncrono pela operação a uma voltagem reduzida no lado de estator. Embora a capacidade de voltagem total do acionamento seja descrita abaixo como tendo um valor unitário de 1,0, este valor pode ser diferente de 1,0, desde que x seja menor do que aquele valor.

20

25

Faixa de velocidade Nº 1: $w_V \leq w \leq 1,0$

Nesta faixa de velocidade, o acionamento não pode operar o motor no fluxo nominal, por causa da exigência de operar a célula NRC em quadratura com a corrente de motor. Daí, o motor é operado a um fluxo reduzido e a uma corrente reduzida. Com referência à FIG. 6, a saída de vol-

30

tagem máxima é dada como:

$$V_{\max} = \sqrt{(1 - 2x + 2x^2)} \quad (1)$$

Para aumentar ou obter o máximo torque possível nesta faixa de velocidade, o motor pode ser operado na ou próximo desta voltagem máxima. Portanto, as voltagens para as células são fixadas em $V_{RC} = x$ e $V_{NRC} = (1 - x)$. Conforme a velocidade diminui da velocidade nominal, um fluxo de motor gradualmente aumenta até ser igual ao valor nominal em $w = w_v$. Daí, em termos por unidade, $w_v = V_{\max}$. Com referência novamente à FIG. 6, a corrente de torque é obtida como:

$$I_{qs} = x I_{ds} / (1 - x) \quad (2)$$

Na velocidade nominal, a capacidade de torque de frenagem (mínima) então pode ser dada pela equação a seguir:

$$T_B = V_{\max} I_{qs} \approx I_{NL} (1 - 2x + 2x^2) x / (1 - x) \quad (3)$$

onde é assumido que em cargas leves e fluxo reduzido, $I_d \approx I_{NL} V_{\max}$.

15 Faixa de velocidade Nº 2: $w_l \leq w \leq w_v$

Nesta faixa de velocidade, o motor é operado a um fluxo nominal, mas a uma corrente reduzida, e a RC provê uma saída nominal. Daí, com referência à FIG. 7:

$$V_{RC} = x \text{ e } V_{NRC} = \sqrt{(w^2 - x^2)}, \text{ onde } w \text{ representa a velocidade e a} \quad (4)$$

$$\text{e } I_{qs} = x I_{ds} / \sqrt{(w^2 - x^2)} \quad (5)$$

conforme a veículo aumenta, I_q se torna maior e se aproxima da corrente de torque nominal. Quando $w = w_l$ (onde $w_l = x / PF_{\text{rated}}$), a corrente nominal é aplicada ao motor e o torque de frenagem nominal pode ser obtido.

Faixa de velocidade Nº 3: $0 \leq w \leq w_l$

Nesta faixa de velocidade, o motor é operado no fluxo nominal e na corrente nominal. As voltagens a partir da NRC e da RC são reduzidas linearmente com a velocidade, conforme mostrado abaixo, de modo que a corrente de motor seja mantida nominal:

$$V_{RC} = x w / w_l \quad (6)$$

$$V_{NRC} = w \sqrt{(w_l^2 - x^2)} / w_l \quad (7)$$

As equações acima mostram métodos de exemplo para uma operação controlada das RCs e das NRCs durante uma regeneração. Um diagrama de blocos mostrando um sistema de controle de exemplo 800 para implementação dessa equação em um controlador de acionamento de motor

5 típico é dado na FIG. 8. Nesta figura, o "Gerador de Referência de Fluxo" 805, a "Alocação de Voltagem de Regeneração Limitada" 810 e o "Limite de Regeneração" 815 ajudam a prover um controle de regeneração limitado. Conforme mostrado na figura, o circuito de exemplo inclui pelo menos duas

10 entradas, a demanda de fluxo λ_{DMD} 801 e a referência de velocidade w_{ref} 802. O Gerador de Referência de Fluxo 805 calcula a referência de fluxo usando a voltagem máxima dada pela equação (1) acima e a frequência de estator, w_s 804, e provê a referência de fluxo, λ_{ref} 803, como uma saída. O Gerador de Referência de Fluxo 805 também assegura que a referência de fluxo seja sempre menor do que ou igual à demanda de fluxo, λ_{DMD} 801. O

15 Regulador de Fluxo 820 compensa a diferença entre a referência de fluxo, λ_{ref} 803, e o feedback de fluxo, λ_{DS} 809, onde λ_{DS} 809 é o valor de fluxo real estimado dado pela voltagem de motor medida e pela velocidade de estator. A saída do Regulador de Fluxo 820 é a referência de corrente de magnetização de motor, $i_{ds\ ref}$ 821.

20 A velocidade de referência, w_{ref} 802, é comparada com a velocidade de motor, w 850, no Regulador de Velocidade 855, o qual provê uma referência de corrente de torque de motor, $i_{qs\ ref}$ 858 como a saída. Quando o motor é comandado para desacelerar, o bloco de Limite de Regeneração 815 calcula as equações (2) e (5) acima e provê um limite sobre a referência

25 de corrente de torque.

O circuito mostrado na FIG. 8 inclui dois Reguladores de Corrente 860 e 862, que controlam a corrente de magnetização e a corrente de torque. Suas saídas são referências de voltagem, $V_{ds\ ref}$ 863 e $V_{qs,ref}$ 861. O bloco de Alocação de Voltagem de Regeneração Limitada 810 divide as referências de voltagem de motor $V_{ds\ ref}$ 863 e $V_{qs,ref}$ 861, em referências de voltagem para RCs e NRCs. No bloco de Alocação de Voltagem de Regeneração

30 Limitada 810, a magnitude das voltagens para RC e RNC pode ser pri-

meiramente encontrada usando-se x , V_{motor} e w_s a partir das equações (4), (6) e (7) acima. Então, as componentes de eixo d e q dos comandos de voltagem para as NRCs e as RCs (V_{qdsNRC} 868 e V_{qdsRC} 869) são identificadas usando-se $I_{ds\ ref}$ e $I_{qs\ ref}$. Finalmente, as componentes de eixo d e q de VRC e VNRC são convertidas para voltagens trifásicas no quadro estacionário e são usadas como referências para a geração de comandos de voltagem de PWM para controle dos inversores.

As FIGs. 9A a 9D provêm resultados de simulação de exemplo para mostrarem a operação na regeneração para uma configuração de acionamento, tal como aquela mostrada na FIG. 4 com $x = 0,5$ (isto é, um número igual de RCs e NRCs). Deve ser notado que ter um número igual de RCs e NRCs não é uma exigência das modalidades descritas aqui. O acionamento pode ser comandado para ir para regeneração em $t = 5$ segundos pela diminuição da velocidade de referência w_{ref} .

As FIGs. 9A e 9B ilustram uma velocidade de motor de exemplo (FIG. 9A) e a voltagem de saída (FIG. 9B) de um acionamento que tem uma combinação de fileiras de RC e de NRC. Em cada Figura, tempo = 0 a tempo = 5 segundos representa uma motorização, enquanto os períodos de tempo remanescentes representam diferentes faixas de velocidade de frenagem. Diferentemente da técnica anterior, conforme ilustrado nas FIGs. 9A a 9B, uma queda de voltagem está presente através das células de potência não regenerativas durante uma frenagem. De fato, uma voltagem como essa está presente durante o período de frenagem inteiro.

Com referência à FIG. 9B, durante a Faixa de Velocidade N° 1, a voltagem de saída de acionamento é mantida no valor especificado pela equação (1), enquanto as voltagens de saída de RC e NRC são mantidas em seus respectivos valores nominais (isto é, 100%). Na Faixa de Velocidade N° 2, a voltagem de NRC é reduzida, ao passo que a voltagem de RC é mantida em sua voltagem nominal, conforme dado pela equação (4). Assim que a velocidade de motor entra na Faixa de Velocidade N° 3, a voltagem de ambas a RC e a NRC diminui linearmente, conforme o motor desacelera, conforme especificado pelas equações (6) e (7).

A FIG. 9C mostra componentes de corrente de motor de exemplo durante uma regeneração. Na Faixa de Velocidade Nº 1, a corrente de magnetização (I_{DS}) é diminuída para satisfazer à voltagem de motor máxima especificada pela equação (1). Subseqüentemente, a corrente de torque (I_{QS}) também é reduzida, de modo que a corrente de motor permaneça em quadratura com respeito à voltagem de saída de NRC, conforme mostrado na FIG. 6. Por toda a Faixa de Velocidade Nº 1, a corrente de magnetização e a corrente de torque aumentam igualmente em relação, de modo a se levar o fluxo de motor para seu valor nominal (isto é, aproximadamente 100%), enquanto se mantém o fator de potência e se guarda a relação de quadratura entre a corrente de motor e a voltagem de saída das células NRC. Durante a Faixa de Velocidade Nº 2, há mais espaço para a acomodação da corrente de torque maior, conforme a voltagem de NRC diminui, conforme evidente a partir da FIG. 7. Conforme foi mencionado anteriormente, a Faixa de Velocidade Nº 3 começa no instante em que a corrente de motor total atinge seu valor nominal.

A FIG. 9D mostra uma potência ativa enviada a partir do acionamento, as células RC e as células NRC. A potência ativa da NRC permanece substancialmente zero por toda a duração da desaceleração de motor. Neste exemplo, toda a potência ativa (ou a potência total) do motor é absorvida pela RC, desse modo ilustrando que os métodos descritos aqui podem desviar de forma bem-sucedida toda a potência absorvida a partir do motor para a RC, durante uma regeneração. Além disso, a potência gerada no motor é controlada para ser menor do que a classificação de potência de RC.

Conforme notado acima, pode haver um número diferente de RCS e de NRCs do que os exemplos expressamente descritos aqui. Quando a combinação de RCs para NRCs é mudada, o valor de torque de frenagem a uma velocidade plena também pode mudar, de acordo com a equação (3). Isto é tabulado na tabela a seguir de torque de frenagem para combinações diferentes de células, assumindo-se uma corrente sem carga de motor, I_{NL} , igual a 25%:

Relação de RC para NRC, x	Torque de frenagem a velocidade plena
0,25	5,4%
0,33	6,9%
0,40	8,7%
0,50	12,5%
0,60	19,5%
0,667	27,8%

Conforme notado acima, quando o recurso de by-pass é provido com cada uma das células de potência, então é possível operar o circuito se uma ou mais das células de potência falharem. Sob uma condição como essa, as equações providas acima ainda podem ser aplicadas, mas com ligeiros ajustes, conforme detalhado aqui. Quando uma ou mais células de potência são desviadas, a capacidade de voltagem total da RC e da NRC pode mudar para y e z , respectivamente, de modo que $t = y + z$. O mesmo procedimento, conforme detalhado nas equações (1) a (7) acima pode ser seguido, usando-se t , y , z ao invés de $1,0$, x e $1 - x$, para a determinação da operação do controle com um número menor de células de potência no circuito.

Ainda outras modalidades tornar-se-ão prontamente evidentes para aqueles versados nesta técnica a partir da leitura da descrição detalhada recitada acima e dos desenhos de certas modalidades de exemplo. Deve ser compreendido que numerosas variações, modificações e modalidades adicionais são possíveis e, assim sendo, todas essas variações, modificações e modalidades devem ser consideradas como estando no espírito e no escopo deste pedido. Por exemplo, independentemente do conteúdo de qualquer porção (por exemplo, título, campo, antecedentes, sumário, resumo, figura de desenho, etc.) deste pedido, a menos que claramente especificado ao contrário, tal como através de uma definição explícita, não há uma exigência de inclusão em qualquer reivindicação aqui (ou de qualquer reivindicação de qualquer pedido reivindicando prioridade para este) de qualquer característica em particular descrita ou ilustrada, função, atividade ou elemento, qualquer seqüência em particular de atividades, ou qualquer inter-relação em particular de elementos. Mais ainda, qualquer atividade pode ser

repetida, qualquer atividade pode ser realizada por múltiplas entidades, e/ou qualquer elemento pode ser duplicado. Ainda, qualquer atividade ou elemento pode ser excluído, a seqüência de atividades pode variar e/ou a inter-relação de elementos pode variar. Assim sendo, as descrições e os desenhos devem ser considerados como sendo de natureza ilustrativa, e não como restritivos. Mais ainda, quando qualquer número ou faixa é descrito aqui, a menos que declarado claramente de outra forma, o número ou a faixa é aproximado. Quando qualquer faixa é descrita aqui, a menos que declarado claramente de outra forma, aquela faixa inclui todos os valores ali e todas as subfaixas ali. Qualquer informação de qualquer material (por exemplo, uma patente dos Estados Unidos, um pedido de patente dos Estados Unidos, livro, artigo, etc.) que tenha sido incorporada como referência aqui, é incorporada apenas como referência até a extensão em que nenhum conflito exista entre essa informação e as outras declarações e desenhos estabelecidos aqui. No caso desse conflito, incluindo um conflito que tornaria inválida qualquer reivindicação aqui ou buscando prioridade para esta, então, qualquer informação conflitante como essa nesse material incorporado como referência não é especificamente incorporada como referência aqui.

REIVINDICAÇÕES

1. Circuito de frenagem, que compreende:

um arranjo de células de potência eletricamente conectadas para o recebimento de potência a partir de uma fonte e para o envio de potência para uma carga, **caracterizado pelo fato de que** o arranjo compreende:

uma primeira fileira (410) de células de potência regenerativas (411, 412, 413); e

uma segunda fileira (420) de células de potência não regenerativas (421, 422, 423); e

um circuito de controle (292, 295).

2. Circuito, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** uma queda de voltagem está presente através das células não regenerativas durante uma frenagem da carga.

3. Circuito, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** as voltagens de saída das células de potência regenerativas e das células de potência não regenerativas são mantidas pelo menos substancialmente nos seus valores nominais, quando a carga for operada a menos do que o fluxo nominal e a menos do que a corrente nominal.

4. Circuito, de acordo com a reivindicação 3, **caracterizado pelo fato de que** o circuito de controle pelo menos substancialmente usa a capacidade de corrente das células de potência regenerativas, quando a carga for operada no fluxo nominal e a menos do que a corrente nominal.

5. Circuito, de acordo com a reivindicação 4, **caracterizado pelo fato de que** o circuito de controle pelo menos substancialmente usa a capacidade de corrente das células de potência regenerativas e das células de potência não regenerativas, quando a carga for operada no fluxo nominal e na corrente plena.

6. Circuito, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** cada célula de potência regenerativa (300) compreende:

uma ponte inversora (330);

um conjunto de capacitores (320) eletricamente conectado através dos terminais da ponte inversora; e

uma extremidade dianteira ativa (310) compreendendo uma pluralidade de transistores eletricamente conectados como uma ponte trifásica.

7. Circuito, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** cada célula de potência regenerativa (350) compreende:

5 uma ponte inversora (380);

~~um conjunto de capacitores (375) eletricamente conectado através dos terminais da ponte inversora;~~

um retificador de ponte de diodo trifásico (360) eletricamente conectado através dos terminais; e

10 uma combinação de transistor (374) e resistor (372) conectados em série que é eletricamente conectada através dos terminais.

8. Circuito, de acordo com a reivindicação 7, **caracterizado pelo fato de que** a ponte inversora compreende um inversor de ponte H de quatro transistores ou um inversor de ponte H de oito transistores com base em
15 uma conexão grampeada de ponto neutro.

9. Circuito, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** cada célula de potência não regenerativa (421, 422, 423) compreende:

 uma ponte inversora;

20 um conjunto de capacitor eletricamente conectado através dos terminais da ponte inversora; e

um retificador de ponte trifásico eletricamente conectado através dos terminais.

~~10. Circuito, de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado**~~
25 **pelo fato de que** a ponte inversora compreende um inversor de ponte H de quatro transistores ou um inversor de ponte H de oito transistores com base em uma conexão grampeada de ponto neutro.

11. Circuito, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** as células de potência regenerativas e as células de potência não regenerativas são instaladas de forma removível e intercambiável
30 em um alojamento.

12. Dispositivo elétrico, que compreende:

uma pluralidade de células de potência monofásicas eletricamente conectadas para o recebimento de potência a partir de uma fonte e para o envio de potência para uma carga, **caracterizado pelo fato de que** as células de potência monofásicas compreendem uma primeira fileira (410)
 5 de células de potência regenerativas (411,412,413) e uma segunda fileira (420) de células de potência não regenerativas (421,422,423);

em que cada célula de potência não regenerativa compreende:

uma ponte inversora;

um conjunto de capacitor eletricamente conectado através dos
 10 terminais da ponte inversora; e

um retificador de ponte trifásico eletricamente conectado através dos terminais;

e em que as células de potência não regenerativas provêem potência reativa, quando a pluralidade de células for usada para a frenagem de um motor.

15 13. Dispositivo, de acordo com a reivindicação 12, **caracterizado pelo fato de que** cada célula de potência regenerativa (300) compreende:

uma ponte inversora (330) ;

um conjunto de capacitores (320) eletricamente conectado atra-
 20 vés dos terminais da ponte inversora; e

uma extremidade dianteira ativa (310) compreendendo uma pluralidade de transistores (312, 313, 314, 315, 316, 317) eletricamente conectados como uma ponte trifásica.

25 14. Dispositivo, de acordo com a reivindicação 12, **caracterizado pelo fato de que** cada célula de potência regenerativa (350) compreende:

uma ponte inversora (380);

um conjunto de capacitores (375) eletricamente conectado através dos terminais da ponte inversora; e

30 um retificador de ponte de diodo trifásico (360) eletricamente conectado através dos terminais; e

uma combinação (370) de transistor (374) e resistor (372) conec-

tados em série que é eletricamente conectada através dos terminais.

15. Dispositivo, de acordo com a reivindicação 12, **caracterizado pelo fato de que:**

5 uma queda de voltagem está presente através das células não regenerativas durante uma frenagem da carga;

~~as voltagens de saída das células de potência regenerativas e~~
das células de potência não regenerativas são mantidas pelo menos substancialmente nos seus valores nominais, quando a carga for operada a menos do que o fluxo nominal e a menos do que a corrente nominal;

10 o circuito de controle pelo menos substancialmente usa a capacidade de corrente das células de potência regenerativas, quando a carga for operada no fluxo nominal e a menos do que a corrente nominal; e

o circuito de controle pelo menos substancialmente usa a capacidade de corrente das células de potência regenerativas e das células de
15 potência não regenerativas, quando a carga for operada no fluxo nominal e na corrente plena.

16. Dispositivo elétrico, **caracterizado pelo fato de que** compreende:

20 uma primeira fileira (420) compreendendo pelo menos três células de potência não regenerativas monofásicas (421, 422, 423);

uma segunda fileira (410) compreendendo pelo menos três células de potência regenerativas monofásicas (411, 412, 413);

um circuito de controle (292, 295);

em que cada célula de potência não regenerativa compreende:

25 uma ponte inversora;

um conjunto de capacitor eletricamente conectado através dos terminais da ponte inversora; e

um retificador de ponte trifásico eletricamente conectado através dos terminais; e

30 em que quando o dispositivo é usado para a frenagem de um motor, uma célula de potência trifásica não é requerida e as células de potência não regenerativas provêm potência reativa.

17. Dispositivo, de acordo com a reivindicação 16, **caracterizado pelo fato de que** cada célula de potência regenerativa (300) compreende:

uma ponte inversora (330);

5 um conjunto de capacitores (320) eletricamente conectado através dos terminais da ponte inversora; e

uma extremidade dianteira ativa (310) compreendendo uma pluralidade de transistores (312, 313, 314, 315, 316, 317) eletricamente conectados como uma ponte trifásica.

10 18. Dispositivo, de acordo com a reivindicação 16, **caracterizado pelo fato de que** cada célula de potência regenerativa (350) compreende:

uma ponte inversora (380);

um conjunto de capacitores (375) eletricamente conectado através dos terminais da ponte inversora;

15 um retificador de ponte de diodo trifásico eletricamente conectado através dos terminais (360); e

uma combinação (370) de transistor (374) e resistor (372) conectados em série que é eletricamente conectada através dos terminais.

20 19. Dispositivo, de acordo com a reivindicação 16, **caracterizado pelo fato de que:**

uma queda de voltagem está presente através das células não regenerativas durante uma frenagem da carga;

25 as voltagens de saída das células de potência regenerativas e ~~das células de potência não regenerativas são mantidas pelo menos substancialmente~~ nos seus valores nominais, quando a carga for operada a menos do que o fluxo nominal e a menos do que a corrente nominal;

as células de potência regenerativas extraem substancialmente a corrente nominal, quando a carga for operada no fluxo nominal e a menos do que a corrente nominal; e

30 as células de potência regenerativas e as células de potência não regenerativas extraem substancialmente a corrente nominal, quando a carga for operada no fluxo nominal e na corrente plena.

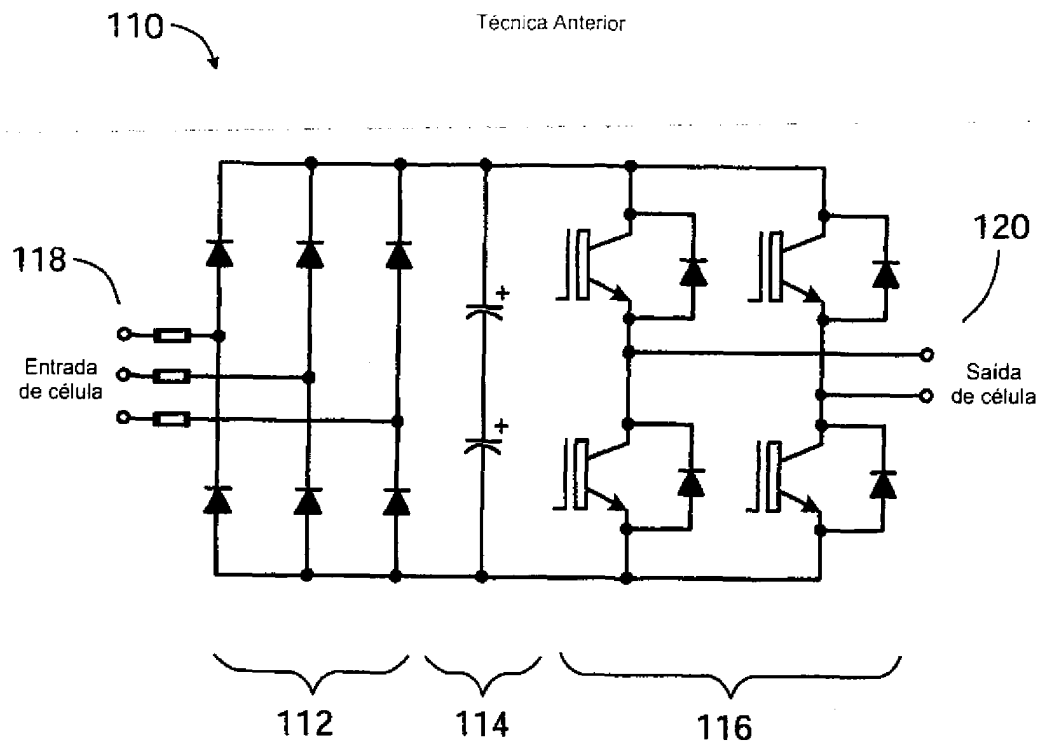
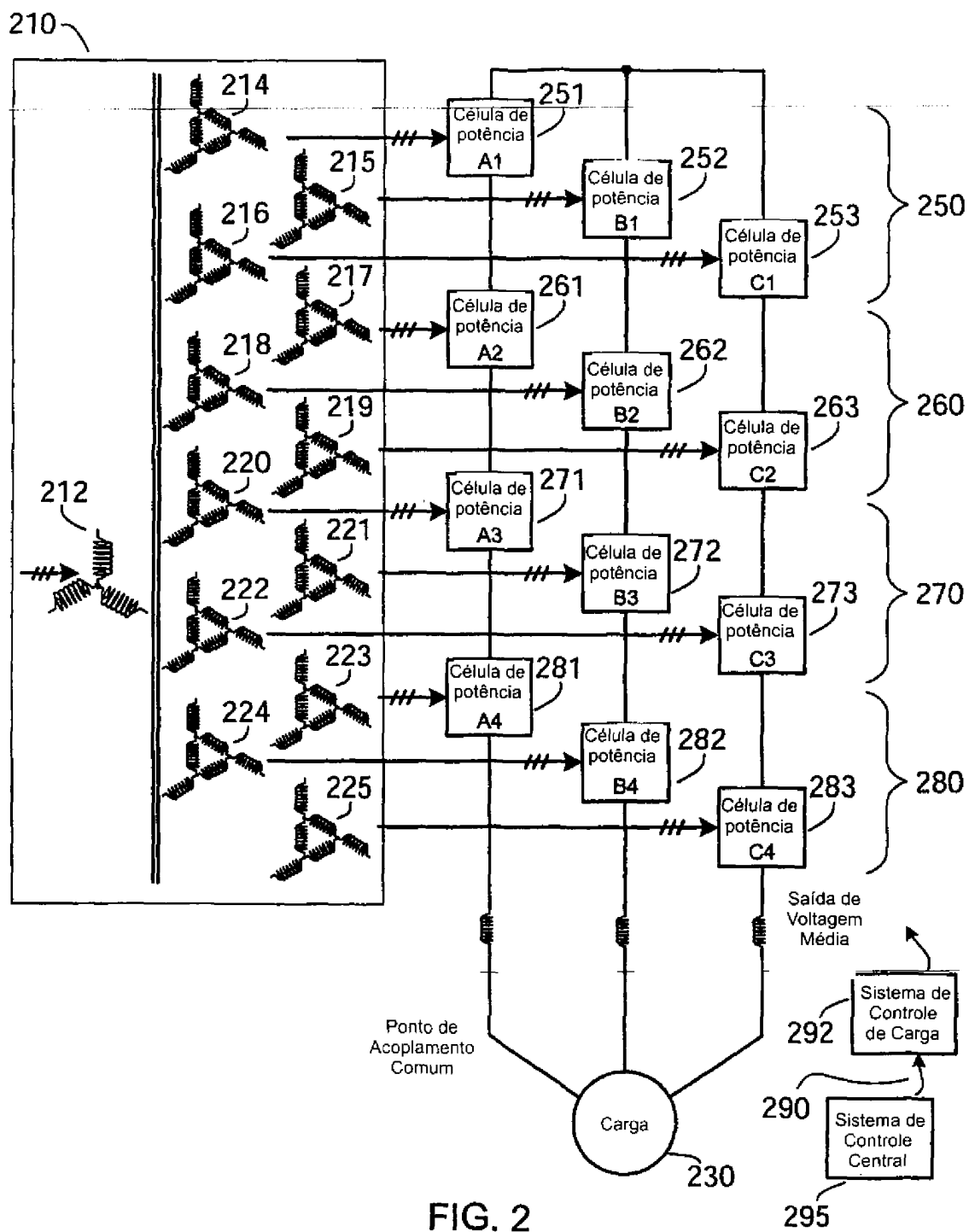


FIG. 1



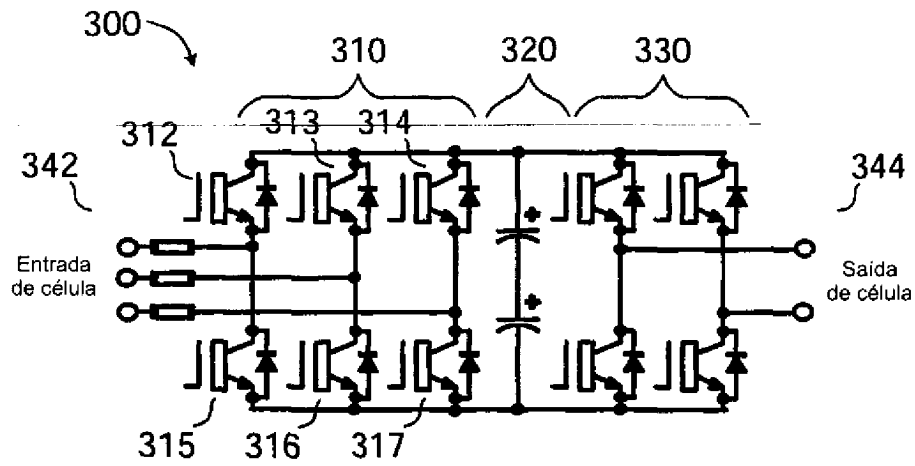


FIG. 3A

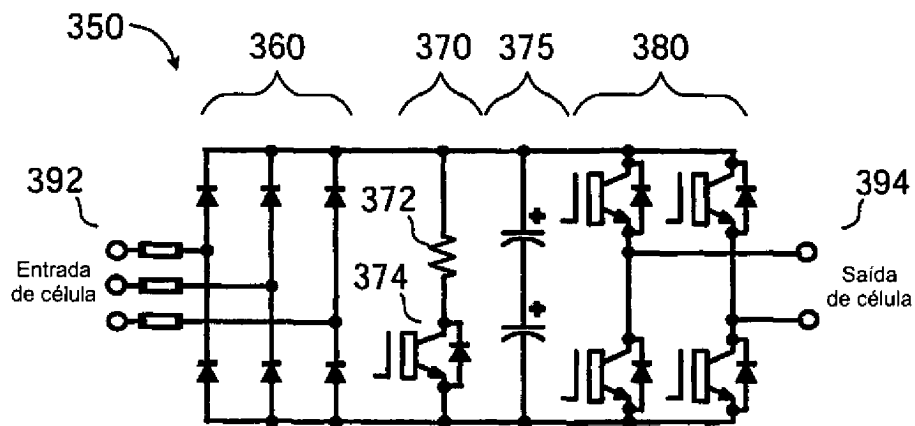


FIG. 3B

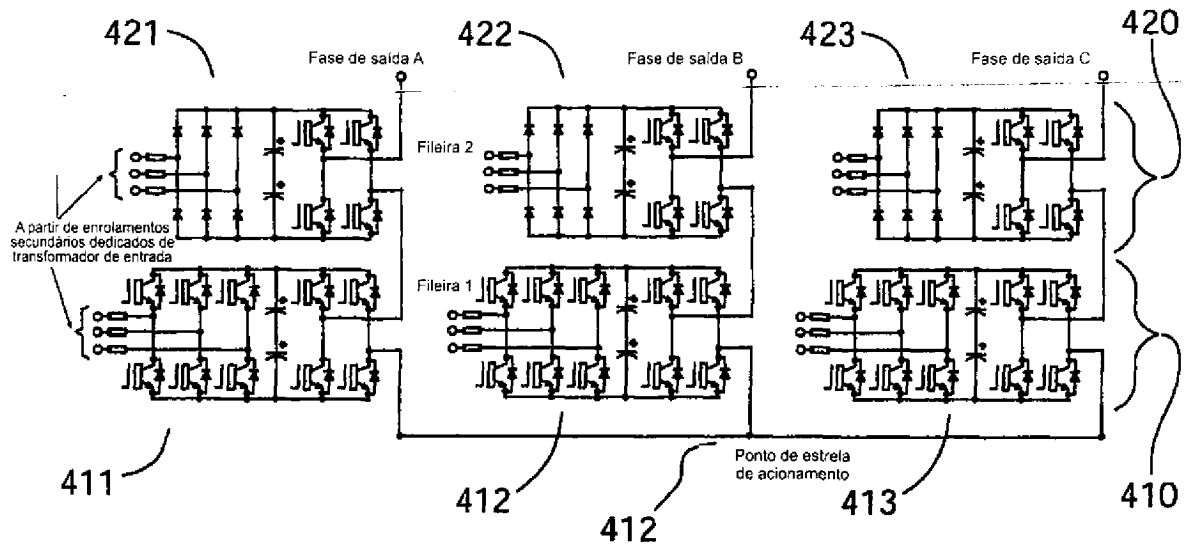


FIG. 4

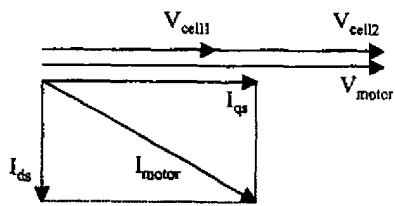


FIG. 5A

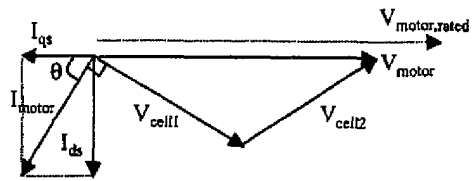


FIG. 5B

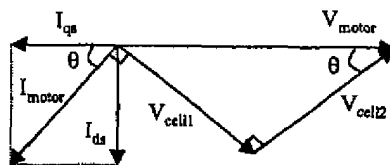


FIG. 5C

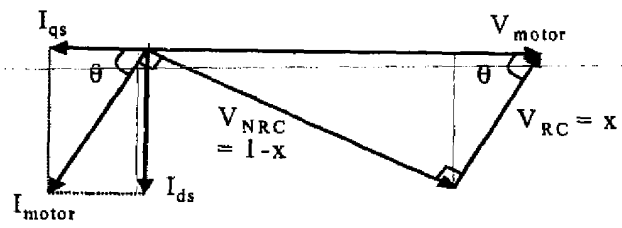


FIG. 6

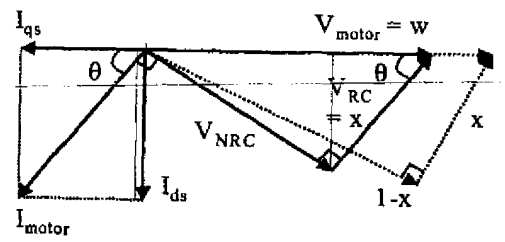


FIG. 7

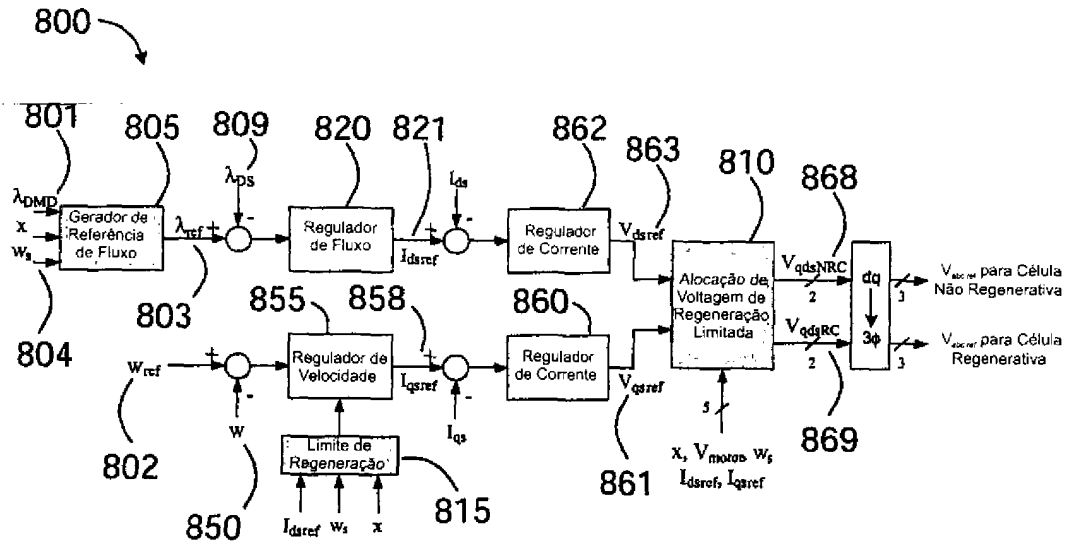


FIG. 8

FIG. 9A

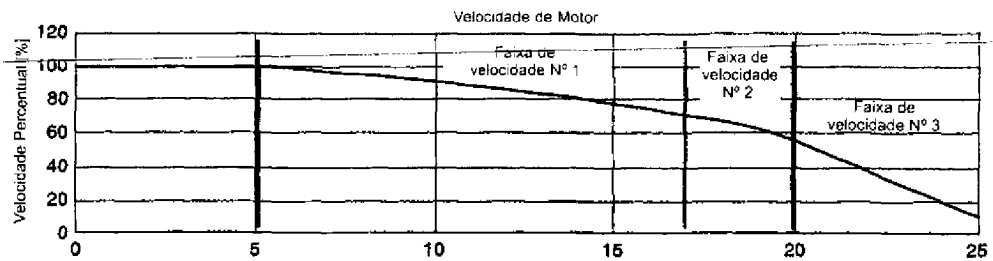


FIG. 9B

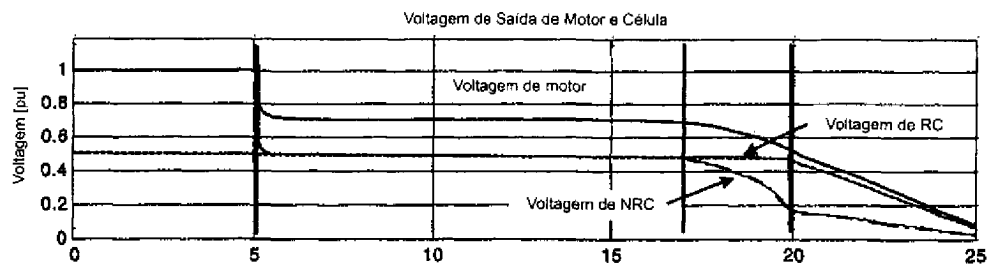


FIG. 9C

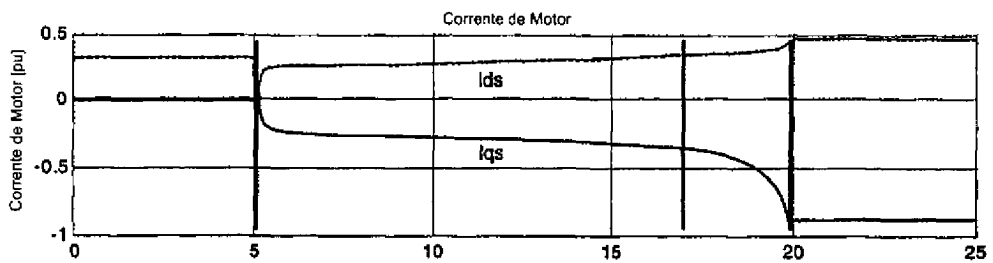


FIG. 9D

