



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

(11) PI 1104890-5 B1



(22) Data do Depósito: 17/11/2011

(45) Data de Concessão: 08/12/2020

(54) Título: SISTEMA DE CONTROLE ELÉTRICO

(51) Int.Cl.: H02H 7/10; H02M 1/32.

(30) Prioridade Unionista: 19/11/2010 US 12/949,925.

(73) Titular(es): GENERAL ELECTRIC COMPANY.

(72) Inventor(es): AYMAN MOHAMED FAWZI EL-REFAIE; ROBERT DEAN KING.

(57) Resumo: SISTEMA DE CONTROLE ELÉTRICO Um sistema de controle elétrico inclui uma máquina de imã permanente (70) que tem um rotor (116) e um estator (118) e um conversor de energia (62) acoplado eletricamente a uma máquina de imã permanente (70) e configurado para converter a tensão de ligação DC para uma tensão de saída AC para controlar a máquina de imã permanente (70). O conversor de energia (62) inclui uma pluralidade de dispositivos de comutação de carboneto de silício (74 a 84) que tem uma capacidade de tensão que excede uma força eletromotriz inversa de linha a linha de pico da máquina de imã permanente (70) a uma velocidade máxima da máquina de imã permanente (70).

“SISTEMA DE CONTROLE ELÉTRICO”

CAMPO DA INVENÇÃO

[001] A presente invenção refere-se em geral a máquinas de imã permanente que têm alta densidade de energia e, mais particularmente, a um método e sistema para evitar condições de falha em máquinas de imã permanente de alta força eletromotriz (emf) inversa de alta densidade de energia através do fornecimento de conversores de energia que incluem transistores de efeito de campo de semicondutor de óxido metal (MOSFETs) de carboneto de silício.

ANTECEDENTES DA INVENÇÃO

[002] A necessidade por máquinas elétricas (ou seja, motores e geradores elétricos) de alta densidade de energia e alta eficiência tem imperado durante muito tempo para uma variedade de aplicações, particularmente para aplicações de tração de veículo híbrido e / ou elétrico. Devido a razões de fornecimento de energia a ambientais, tem acontecido uma crescente motivação para produzir veículos híbrido-elétricos e / ou elétricos que sejam tanto altamente eficientes como confiáveis, e ainda tenham preço razoável para o consumidor médio. Entretanto, a tecnologia de motor de propulsão disponível para veículos híbrido-elétricos e elétricos tem sido geralmente de custo proibitivo, o que reduz um de (ou ambos) a acessibilidade do consumidor ou lucratividade do fabricante.

[003] A maior parte dos veículos híbrido-elétricos e elétricos disponíveis comercialmente se baseia em máquinas elétricas de imã permanente interno (IPM) para aplicações de tração, visto que se descobriu que as máquinas de IPM têm alta densidade de energia e alta eficiência sobre uma grande amplitude de velocidades, e também são facilmente acondicionadas em veículos de tração dianteira. Entretanto, a fim de obter esta alta densidade de energia, as máquinas IPM têm que usar imãs caros produtos

sinterizados de alta energia. Além disso, as máquinas IPM rodam a alta velocidade (por exemplo, 14.000 rpm) para obter ótima densidade de energia. A densidade de energia de uma máquina de imã permanente é definida como a razão entre a saída de energia e o volume da máquina de imã permanente. Uma densidade de energia relativamente alta (por exemplo, alta saída de energia relativa ao volume) é tipicamente desejável. A alta densidade de energia permite que uma máquina de imã permanente tenha ou um tamanho geral menor para uma dada saída de energia ou uma saída maior para um dado tamanho.

[004] Conforme a velocidade do rotor da máquina de imã permanente aumenta, a tensão desenvolvida no estator (referenciada como a “emf inversa”) aumenta. Isto, por sua vez, requer que tensões cada vez mais altas sejam aplicadas para produzir o torque desejado. A emf inversa da máquina é proporcional a velocidade para uma máquina de imã permanente. Se o pico da emf inversa de linha a linha na velocidade máxima é maior do que a tensão da ligação CC, e se o controle sobre o conversor de energia é perdido, a máquina de imã permanente começará a operar em um modo de geração descontrolado (UCG). O UCG ocorre quando os sinais de porta de controle para todos os seis comutadores de inversor são desligados ou desconectados. Durante esta condição, o motor é conectado a fonte CC através dos diodos antiparalelos dos comutadores do inversor. Os diodos antiparalelos criam um trajeto potencial para a corrente fluir, que é dependente da condição de operação do motor e da tensão da fonte CC. Neste caso, a máquina de imã permanente atuará como um gerador convertendo energia rotacional em correntes elétricas e começará a descarregar energia na ligação CC através dos diodos antiparalelos no conversor de energia, provocando um aumento na tensão da ligação CC. Se esta energia não é dissipada, ou se o desenvolvimento

da tensão da ligação CC não é limitado, a capacidade de tensão nos dispositivos ativos no conversor de energia pode ser excedida pela tensão na ligação CC.

[005] A fim de minimizar ou impedir a ocorrência do modo de operação UCG, é tipicamente definido um limite na emf inversa da máquina ou um circuito adicional de travamento ou proteção contra curto circuito é adicionado em paralelo à ligação CC. Entretanto, limitar a emf inversa da máquina reduz a densidade de energia ou torque e capacidade de velocidade da máquina. Adicionalmente, adicionar um circuito de proteção contra curto circuito adiciona custo e complexidade ao conjunto de circuitos do sistema de controle da máquina de ímã permanente. A emf inversa de uma máquina também pode ser reduzida limitando a quantidade de força relativa dos ímãs na máquina, o que também impacta negativamente a densidade de energia ou torque.

[006] Portanto, é desejável eliminar configuração de um limite de emf inverso e / ou eliminar adição de um circuito de proteção contra curto circuito de modo que a capacidade de tensão do dispositivo não seja excedida durante um modo de operação UCG.

DESCRIÇÃO DA INVENÇÃO

[007] De acordo com um aspecto da invenção, um sistema de controle elétrico inclui uma máquina de ímã permanente que tem um rotor e um estator e um conversor de energia acoplado eletricamente a uma máquina de ímã permanente e configurado para converter a tensão de ligação CC para uma tensão de saída CA para controlar a máquina de ímã permanente. O conversor de energia inclui uma pluralidade de dispositivos de comutação de SiC que tem uma capacidade de tensão que excede uma emf inversa de linha a linha de pico da máquina de ímã permanente a uma velocidade máxima da máquina de ímã permanente.

[008] De acordo com outro aspecto da invenção, um método

para fabricar um sistema de controle elétrico inclui a etapa de fornecer um conversor de energia de SiC que tenha uma pluralidade de dispositivos de comutação de SiC e seja acoplável a uma fonte de alimentação. O método também inclui as etapas de fornecer uma máquina de imã permanente que tenha uma emf inversa de linha a linha de pico a velocidade máxima que seja maior do que a tensão de ligação CC da fonte de alimentação e acoplar o conversor de energia de SiC a uma máquina de imã permanente para controlar a máquina de imã permanente.

[009] De acordo com outro aspecto da invenção, um sistema de propulsão de veículo inclui um motor que tem um rotor de imã permanente e um estator. O sistema de propulsão também inclui uma ligação CC e um conversor de energia acoplado eletricamente entre a ligação CC e o motor de imã permanente para controlar o motor de imã permanente. O conversor de energia compreende uma pluralidade de dispositivos de comutação de SiC classificados para uma tensão de operação mais alta do que uma emf inversa máxima capaz de ser desenvolvida no estator do motor de imã permanente.

[010] Várias outras características e vantagens ficarão aparentes a partir da descrição detalhada a seguir e das figuras.

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

[011] Os desenhos ilustram realizações presentemente contempladas para executar a invenção.

[012] Nos desenhos:

A FIGURA 1 ilustra um sistema de controle de máquina de imã permanente convencional.

FIGURA 2 ilustra um sistema de controle de máquina de imã permanente de alta densidade de energia, de acordo com uma realização da invenção.

DESCRIÇÃO DE REALIZAÇÕES DA INVENÇÃO

[013] A FIGURA 1 ilustra um sistema de controle de máquina de imã permanente 10 trifásico convencional. O sistema 10 inclui uma ligação CC 12 que fornece uma tensão de entrada CC que é convertida ou invertida para uma forma de onda CA que aciona uma máquina de imã permanente 14. Um capacitor de filtro de entrada 16 é acoplado através da ligação CC 12 para filtrar a tensão VCC na ligação CC 12. Um conversor de energia 18 recebe a tensão de entrada da ligação CC 12 quando energia flui da ligação CC 12 para a máquina de imã permanente CA 14. Esta direção do fluxo de energia é frequentemente referenciado como operando em um modo de “motorização”. Quando a direção do fluxo de energia é da máquina de imã permanente 14 para o conversor de energia 18, a tensão de entrada para o conversor de energia 18 é CA da máquina de imã permanente 14, enquanto a saída do conversor de energia 18 é uma tensão CC na ligação CC 12. A operação com o fluxo de energia da máquina de imã permanente CA 14 para o conversor de energia 18 frequentemente é referenciada como operação em um modo regenerativo de frenagem que é útil, por exemplo, em um veículo onde é desejável manter um dado valor de velocidade em um grau de descida, ou durante a desaceleração do veículo.

[014] O conversor de energia 18 é um inversor trifásico típico 3 que tem dois dispositivos de comutação conectados em série por perna de fase. Por exemplo, dispositivos 20 e 22 formam uma primeira perna de fase, dispositivos 24 e 26 formam uma segunda perna de fase, e dispositivos 28 e 30 formam uma terceira perna de fase. Os dispositivos 20 a 30 são dispositivos de comutação de semicondutor de silício convencionais tais como, por exemplo, IGBT de silício, MOSFET, transistor de energia Darlington bi-polar de silício, GTO, SCR, ou dispositivos tipo IGCT. Os diodos 32, 34, 36, 38, 40, 42 são acoplados em relacionamento antiparalelo através dos respectivos dispositivos de comutação de silício 20 a 30.

[015] A FIGURA 2 ilustra um sistema de controle de máquina de imã permanente 44 de acordo com uma realização da invenção. O sistema de controle 44 inclui uma ligação CC 46 que tem uma tensão VS 48 de fonte CC. Sistema de controle 44 inclui a fonte de alimentação 50 que fornece tensão VS 48 de fonte CC. O sistema de controle 44 inclui preferencialmente dois contadores (C1, C2) 52, 54, ou pelo menos um contator C1 para conectar ou desconectar uma ligação CC 46 da fonte de alimentação 50. Em uma realização, a fonte de alimentação 50 inclui uma fonte CA 58 e um retificador 56 configurado para converter uma tensão da fonte CA 58 para a ligação CC ou tensão de fonte Vs. Em outra realização, a fonte de alimentação 50 inclui uma fonte de alimentação CC 58, tal como uma bateria, uma célula combustível, ou um volante com conversor eletrônico de energia associado. Em ainda outra realização, a fonte de alimentação 50 inclui uma fonte de alimentação CC 58, tal como uma bateria, uma célula combustível, um ultra capacitor, ou um volante com conversor eletrônico de energia associado a um conversor de tensão CC para CC bi-direcional 56 que reforça a tensão da fonte para a ligação CC ou tensão da fonte Vs. A ligação CC 46 fornece uma tensão CC de saída VCC 60 a um conversor de energia ou inversor 62. Um capacitor de filtro de entrada 64 é ilustrado entre uma saída CC positiva 66 e uma saída CC negativa 68 e serve para fornecer uma função de filtro para as correntes de alta frequência da fonte 50 para garantir a qualidade da energia entre saídas positiva e negativa 66, 68.

[016] O conversor de energia 62 recebe tensão CC de entrada VCC 60 da ligação CC 46 e converte a tensão CC de entrada para fornecer uma forma adequada de energia CA para acionar uma máquina de imã permanente 70, descrita em detalhes abaixo. Um controlador 72 também é incluído no sistema de controle 44 e inclui meios para abrir e fechar os contadores C1 e C2 52, 54 baseado nas entradas de tensão medidas Vs 48,

VCC 60, entradas de sensor de velocidade da máquina 70, somadas às entradas do operador bem como às falhas detectadas que podem ocorrer em um conversor de energia 62. O controlador 72 também inclui meios para controlar o comando de energia de reforço para o conversor de reforço bi-direcional 56.

[017] De acordo com uma realização, o conversor de energia 62 é um inversor CC para CA trifásico que tem uma pluralidade de dispositivos de comutação 74, 76, 78, 80, 82, 84. Cada dispositivo de comutação 74 a 84 inclui um MOSFET de carboneto de silício (SiC) 86, 88, 90, 92, 94, 96 e um diodo anti-paralelo associado 98, 100, 102, 104, 106, 108.

[018] SiC é uma substância cristalina que tem propriedades de material que fazem com que o mesmo seja uma alternativa atraente ao silício para aplicações de alta tensão e alta potência, por exemplo, o SiC tem uma grande lacuna de banda que fornece uma perda de corrente muito pequena, o que facilita operação em altas temperaturas. De fato, dispositivos semicondutores fabricados em um substrato de SiC pode suportar temperaturas acima de 200 graus C. O SiC também tem um campo de colapso alto que de aproximadamente dez vezes o do silício e uma condutividade térmica que é aproximadamente três vezes a do silício, o que permite que maiores densidades de energia sejam acomodadas como circuitos de SiC. Adicionalmente, a alta mobilidade de elétrons de SiC permite comutação de alta velocidade. Portanto, o SiC tem sido considerado como um material vantajoso para uso na fabricação de dispositivos semicondutores de energia de próxima geração. Tais dispositivos incluem, por exemplo, diodos Schottky, tiristores, e MOSFETs.

[019] Movendo da esquerda para a direita na FIGURA 2, dispositivos de comutação 74, 76 são associados com uma primeira fase de saída 110, dispositivos de comutação 78, 80 são associados com uma segunda

fase de saída 112, e dispositivos de comutação 82, 84 são associados com uma terceira fase de saída 114. Embora sejam ilustrados um conversor de energia trifásico e uma máquina de imã permanente trifásica 70 na FIGURA 2, um técnico no assunto entenderá que realizações da presente invenção são aplicáveis igualmente a uma realização monofásica ou outras realizações multifásicas. Por exemplo, realizações alternativas incluem configurações com variadas quantidade de fases, por exemplo, n-fase, onde $n = 1, 2, 4, 5, 7$, ou quantidade maior, em que cada fase do conversor de energia inclui uma pluralidade de dispositivos de comutação similar aos dispositivos 86, 88, cada um com diodos anti-paralelos associados similares aos diodos 98, 100.

[020] O conversor de energia 62 aciona uma máquina de imã permanente 70. Em uma realização, a máquina de imã permanente 70 é um motor de tração que inclui um rotor de imã permanente 116 e um estator 118, tal como, por exemplo, um motor de tração para propulsionar um veículo elétrico. O rotor de imã permanente 116, pode ser configurado como um rotor montado na superfície, interior, ou rotor de imã permanente aterrado, de acordo com várias realizações. Em uma realização alternativa, a máquina de imã permanente 70 é um alternador que inclui um rotor de imã permanente 116 e um estator 118, tais como, por exemplo, um alternador de imã permanente acoplado a um motor térmico dentro de uma Unidade de Energia Auxiliar (APU) para gerar energia elétrica para auxiliar na operação de um veículo elétrico-híbrido (HEV) ou um veículo elétrico-híbrido conectável (PHEV).

[021] A capacidade de alta tensão dos MOSFETs de SiC 86 a 96 permite que a máquina de imã permanente 70 seja projetada com uma emf inversa alta sem ter que se preocupar sobre o modo de geração descontrolado, o que aumenta significativamente a densidade de energia da máquina de imã permanente 70. Ou seja, os MOSFETs de SiC 86 a 96 têm uma capacidade de tensão que excede a tensão de ligação CC durante um modo de geração

descontrolado de máquina de imã permanente 70. Os módulos de energia IGBT de Si convencionais usados em circuitos de conversor de energia disponíveis comercialmente na estrada EV, HEV, e PHEV têm tipicamente uma capacidade de tensão de aproximadamente 600 V ou 1.200 V para alguns veículos maiores ou de alta performance incluindo SUVs, caminhões e ônibus. De acordo com uma realização, MOSFETs de SiC 86 a 96 são MOSFETs de SiC de alta tensão fabricados pela General Electric Company que tem uma capacidade de tensão de aproximadamente três a quatro kV. O conversor de energia de SiC 62 de alta tensão combinado com máquina de imã permanente multifásica de alta densidade de energia 70, permite aumentos de duas a quatro vezes da densidade de energia com uma melhoria substancial na tolerância a falhas durante períodos de perda de controle sobre o conversor de energia 62 ou perda do controle de porta para os módulos de energia dentro do conversor de energia 62. Devido aos MOSFETs de SiC 86 a 96 poderem ser fabricados para ser fisicamente menores do que MOSFETs de silício convencionais, os MOSFETs de SiC 86 a 96 podem ser acomodados em um ambiente de automóvel e podem ser operados a altas temperaturas.

[022] Tensão de emf excessiva da máquina de imã permanente 70 pode danificar a fonte de alimentação CC 58 da fonte de alimentação 50. Conseqüentemente, em uma realização, o controlador 72 é configurado para detectar uma falha no conversor de energia 62 e no conjunto de circuitos de controle de porta associado do conversor de energia 62. Por exemplo, uma falha pode ser detectada se uma emf inversa linha a linha ficar dentro de um percentual de limite da capacidade de tensão da fonte de alimentação CC 58. Se a falha é detectada, o controlador 72 pode ser programado para desconectar ou desacoplar a fonte de alimentação CC 58 do conversor de energia 62. Conseqüentemente, tensão de emf excessiva criada pela máquina de imã permanente 70 durante uma condição de falha dentro do conversor de

energia 62 não resultará em dano de sobre-tensão a fonte de alimentação CC 58. A capacidade de alta tensão do conversor de energia de SiC 62 e seus componentes associados 86 a 96 resistirão a emf inversa da máquina de imã permanente de alta energia 70, mesmo se uma falha potencial ocorrer enquanto a máquina 70 estiver operando em alta velocidade.

[023] Portanto, de acordo com uma realização da invenção, um sistema de controle elétrico inclui uma máquina de imã permanente que tem um rotor e um estator e um conversor de energia acoplado eletricamente a uma máquina de imã permanente e configurado para converter a tensão de ligação CC para uma tensão de saída CA para controlar a máquina de imã permanente. O conversor de energia inclui uma pluralidade de dispositivos de comutação de SiC que têm uma capacidade de tensão que excede uma emf inversa de linha a linha de pico da máquina de imã permanente a uma velocidade máxima da máquina de imã permanente.

[024] De acordo com outra realização da invenção, um método para fabricar um sistema de controle elétrico inclui a etapa de fornecer um conversor de energia de SiC que tem uma pluralidade de dispositivos de comutação de SiC e é acoplável a uma fonte de alimentação. O método também inclui as etapas de fornecer uma máquina de imã permanente que tem uma emf inversa de linha a linha de pico à velocidade máxima que é maior do que a tensão de ligação CC da fonte de alimentação e acoplar o conversor de energia de SiC a uma máquina de imã permanente para controlar a máquina de imã permanente.

[025] De acordo com ainda outra realização da invenção, um sistema de propulsão de veículo inclui um motor que tem um rotor de imã permanente e um estator. O sistema de controle também inclui uma ligação CC e um conversor de energia acoplado eletricamente entre a ligação CC e o motor de imã permanente para controlar o motor de imã permanente. O

conversor de energia compreende uma pluralidade de dispositivos de comutação de SiC capacitado para uma tensão de operação mais alta do que uma emf inversa máxima capaz de ser desenvolvida no estator do motor de imã permanente.

[026] Esta descrição escrita usa exemplos para revelar a invenção, incluindo o melhor modo, e também para permitir que qualquer técnico no assunto pratique a invenção, incluindo fazer e usar quaisquer dispositivos ou sistemas e executar quaisquer métodos incorporados. O escopo patenteável da invenção é definido pelas reivindicações, e pode incluir outros exemplos que ocorrem aos técnicos no assunto. Estes tais outros exemplos são entendidos como estando dentro do escopo das reivindicações se os mesmos tiverem elementos estruturais que não diferem da linguagem literal das reivindicações, ou se os mesmos incluírem elementos estruturais equivalentes com diferenças irrelevantes das linguagens literais das reivindicações.

REIVINDICAÇÕES

1. SISTEMA DE CONTROLE ELÉTRICO, que compreende:
uma máquina de imã permanente (70) que tem um rotor (116) e um estator (118); e

um conversor de energia (62) acoplado eletricamente a uma máquina de imã permanente (70) e configurado para converter a tensão de ligação CC para uma tensão de saída CA para controlar a máquina de imã permanente (70), em que o conversor de energia (62) compreende:

uma pluralidade de dispositivos de comutação de carboneto de silício (SiC) (74, 76, 78, 80, 82, 84) que tem uma capacidade de tensão que excede uma força eletromotriz (emf) inversa de linha a linha de pico da máquina de imã permanente (70) a uma velocidade máxima da máquina de imã permanente (70),

caracterizado por compreender um controlador (72) configurado para detectar se a força eletromotriz (emf) inversa de linha a linha fica dentro de um percentual de limite da capacidade de tensão de uma fonte de alimentação CC (58), em que o controlador (72) é programado para desconectar a fonte de alimentação CC (58) do conversor de energia (62) de modo a evitar danos de sobretensão à fonte de alimentação CC (58).

2. SISTEMA DE CONTROLE ELÉTRICO, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por a pluralidade de dispositivos de comutação de SiC (74, 76, 78, 80, 82, 84) compreender uma pluralidade de transistores de efeito de campo de semicondutor de óxido de metal (MOSFETs) de SiC (86, 88, 90, 92, 94, 96).

3. SISTEMA DE CONTROLE ELÉTRICO, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por compreender uma tensão máxima de ligação CC do sistema de controle elétrico que é menor do que a capacidade de tensão da pluralidade de MOSFETs de SiC (86, 88, 90, 92, 94, 96).

4. SISTEMA DE CONTROLE ELÉTRICO, de acordo com a reivindicação 3, caracterizado por a pluralidade de MOSFETs de SiC (86, 88, 90, 92, 94, 96) ter uma capacidade de tensão maior do que três kV.

5. SISTEMA DE CONTROLE ELÉTRICO, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por a máquina de imã permanente (70) compreender um motor de tração de imã permanente multifásico que compreende uma de 3, 5, 7, e 9 fases.

6. SISTEMA DE CONTROLE ELÉTRICO, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por a máquina de imã permanente (70) compreender um motor de tração de imã permanente monofásico.

7. SISTEMA DE CONTROLE ELÉTRICO, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por a máquina de imã permanente (70) compreender um alternador de imã permanente multifásico acoplado a um motor térmico.

8. SISTEMA DE CONTROLE ELÉTRICO, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por o conversor de energia (62) adicionalmente compreender uma pluralidade de diodos (98, 100, 102, 104, 106, 108) conectados em uma disposição antiparalela com a pluralidade de MOSFETs de SiC (86, 88, 90, 92, 94, 96).

9. SISTEMA DE CONTROLE ELÉTRICO, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por o conversor de energia (62) ser um conversor de energia trifásico.

10. SISTEMA DE CONTROLE ELÉTRICO, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por compreender, ainda:

uma ligação CC (46) acoplada ao conversor de energia (62); e

uma fonte de tensão (50) acoplada à ligação CC (46) e configurada para fornecer uma tensão de fonte para a ligação CC (46).

10

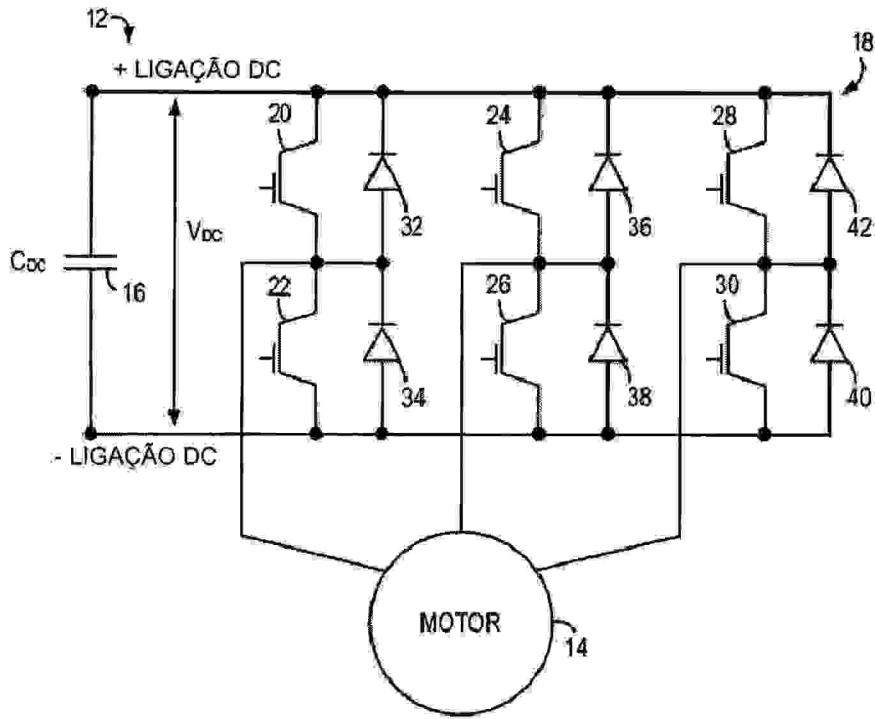


Fig. 1
(Arte Anterior)

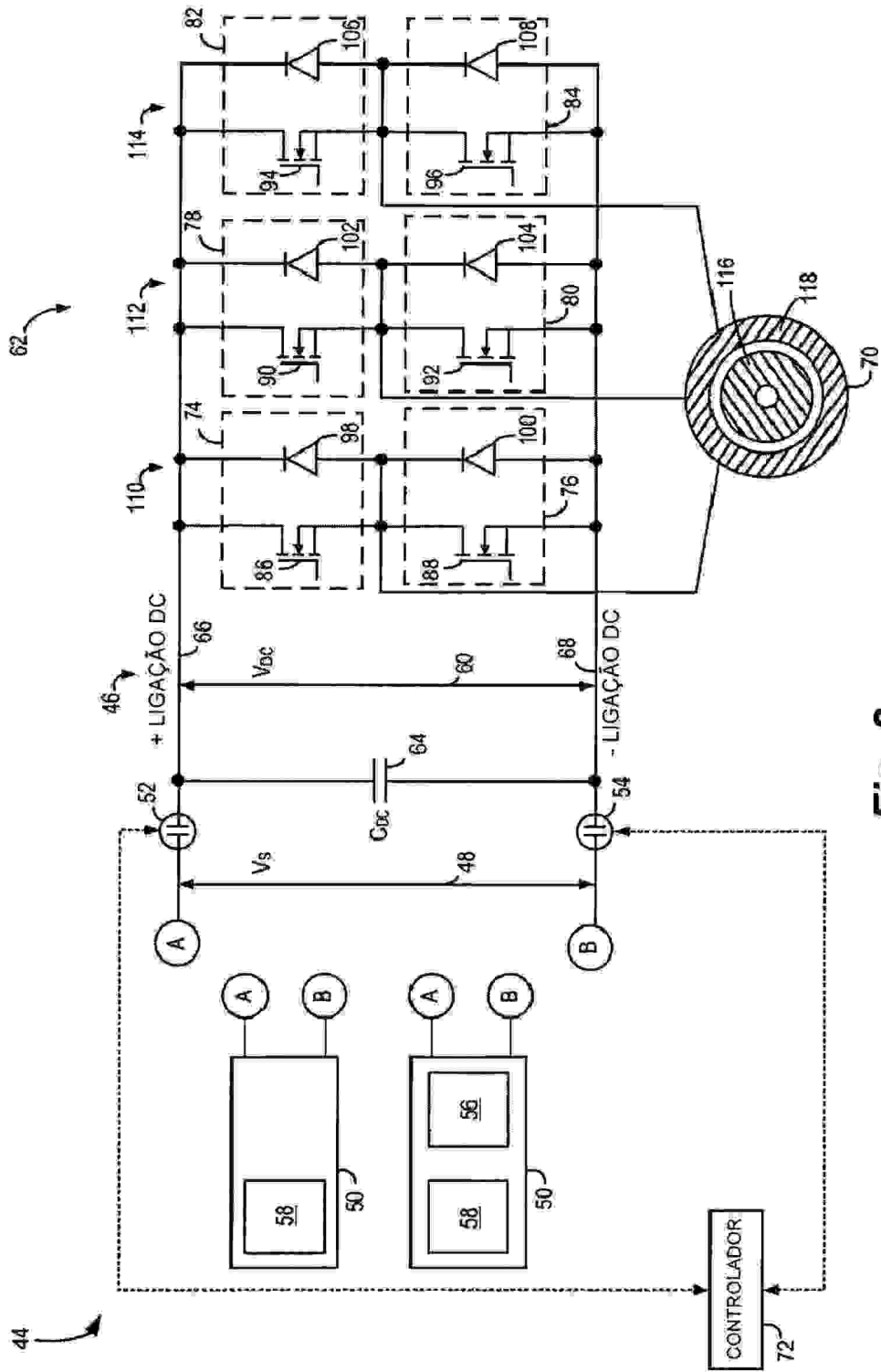


Fig. 2