



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

(21) PI 1104288-5 A2

(22) Data do Depósito: 31/10/2011

(43) Data da Publicação: 12/01/2016

(RPI 2349)



(54) Título: SISTEMA DE ACIONAMENTO ELÉTRICO

(51) Int. Cl.: H02P 27/06; H02P 27/08

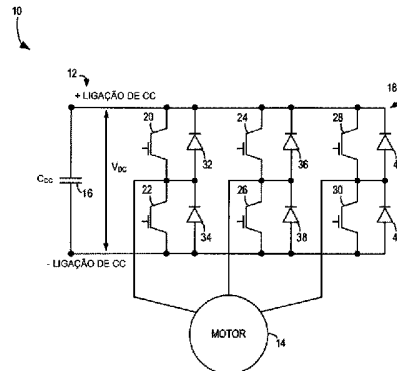
(30) Prioridade Unionista: 19/11/2010 US 12/949,882

(73) Titular(es): GENERAL ELETRIC COMPANY

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

(74) Procurador(es): PRISCILA PENHA DE BARROS THEREZA

(57) Resumo: SISTEMA DE ACIONAMENTO ELÉTRICO. Trata-se de um sistema de acionamento elétrico que inclui uma máquina de indução (60) e um conversor de energia (58) eletricamente acoplado à máquina de indução (60) para acionar a máquina de indução (60). o conversor de energia (58) compreende uma pluralidade de dispositivos de chaveamento de carboneto de silício (SiC) (72-82). O sistema de acionamento elétrico ainda inclui um controlador (114) que é eletricamente acoplado ao conversor de energia (58) e que é programado para transmitir sinais de chaveamento para a pluralidade de dispositivos de chaveamento de SiC (72- 82) em uma dada frequência de chaveamento de tal forma que uma ondulação da corrente entre picos é menor do que aproximadamente cinco por cento.



“SISTEMA DE ACIONAMENTO ELÉTRICO”

ANTECEDENTES DA INVENÇÃO

As realizações da invenção se referem, geralmente, a motores de indução que têm uma baixa indutância de dispersão e, mais particularmente, a um método e sistema para projetar máquinas de indução de alta eficiência de baixa indutância mediante o fornecimento de conversores de energia que incluem transistores de efeito de campo de semicondutor de óxido metálico (MOSFETs).

As máquinas de indução são tipicamente acionadas com a utilização de um conversor de energia com dispositivos de chaveamento de silício ativo. Os dispositivos de chaveamento são tipicamente operados com a utilização de uma técnica de modulação por largura de pulso (PWM) para converter uma energia de alimentação CC em uma energia CA que possa ser utilizada para acionar a máquina de indução. Na PWM, os dispositivos de chaveamento são acionados com a utilização de um trem de pulsos CC. Quando uma tensão é repentinamente aplicada a partir do conversor de energia através de uma carga indutiva, a corrente através da carga eleva quase linearmente com o tempo. Quando a tensão é então desligada, a corrente através da carga não cai imediatamente a zero, mas diminui aproximadamente linearmente com o tempo, já que o campo magnético do indutor sofre colapso e a corrente flui em um diodo independente. Assim, os pulsos de tensão de entrada aplicada através da carga pelo conversor de energia parecem com uma forma de onda da corrente dentada. A variação na corrente de entrada é tipicamente conhecida como a ondulação da corrente.

A ondulação da corrente é geralmente indesejável porque desperdiça energia no indutor e pode causar pulsações indesejadas na carga. A ondulação da corrente produz uma indesejável EMI (interferência eletromagnética) e vibrações mecânicas e gera perdas por harmônicos no

motor. A corrente de harmônicos percorre através dos condutores de estator e rotor e ocasiona perdas de cobre por harmônicos e o fluxo harmônico confina-se à superfície dos núcleos e cria perdas de núcleo por harmônicos no dente do estator e rotor. Quanto mais alta a ondulação da corrente, mais baixa a
 5 qualidade da forma de onda da corrente de uma máquina de indução.

A ondulação da corrente deve-se primariamente aos harmônicos contidos na forma de onda de tensão PWM. Para uma dada tensão do barramento CC, a ondulação da corrente é principalmente dependente da frequência de chaveamento do conversor de energia e da indutância de
 10 dispersão ou intransiente da máquina. A equação 1 representa o fator de ondulação da corrente da máquina como uma razão da corrente de fase fundamental de pico da máquina.

$$k_{\text{ripple ondulação}} = \frac{1}{I_{\text{max}}} \frac{V_{\text{DC}} T_s}{4L_{\sigma}} \quad \text{Eq. 1.}$$

I_{max} é a corrente de fase fundamental de pico (A), VDC é a tensão do barramento CC (V), T_s é o período de chaveamento (s), e L_{σ} é a indutância
 15 transiente da máquina (H).

Se a indutância de dispersão de uma fase da máquina de indução for proporcionalmente ampla, a ondulação da corrente será comumente baixa apesar da frequência de chaveamento dos dispositivos de chaveamento no conversor de energia. Assim, quanto maior a indutância de dispersão de uma
 20 máquina de indução, mais proximamente a forma de onda da corrente de saída vai se parecer com uma forma de onda ideal. Conseqüentemente, as máquinas de indução são tipicamente projetadas para ter uma indutância de dispersão alta o suficiente para manter uma ondulação da corrente baixa.

Entretanto, projetar uma máquina para ter uma indutância de
 25 dispersão alta tem inúmeras desvantagens, incluindo uma eficiência de máquina reduzida e uma capacidade de enfraquecimento de fluxo de máquina

reduzida. Além disso, um aumento de indutância de dispersão injeta harmônicos via afundamento de linha no sistema de energia.

Para inúmeras aplicações, a indutância de dispersão associada à fase particular é baixa de forma proporcional. Esta indutância de dispersão
5 baixa significa que, para a mesma frequência de portadora, a ondulação da corrente será muito mais alta. A alta ondulação da corrente injeta potencialmente uma quantidade de ruídos inaceitável para dentro do motor. Se a ondulação da corrente for alta o suficiente, isto pode fazer com que a emissão opere fora das características específicas da mesma. No caso de um
10 motor elétrico, por exemplo, o aumento da ondulação da corrente resulta na diminuição do controle sobre o torque e a velocidade do motor. Onde a ondulação da corrente for alta o suficiente, o motor poderá falhar de modo geral por não operar dentro da faixa de corrente própria do mesmo.

Uma capacidade de enfraquecimento de fluxo estendida é uma
15 característica importante para uma máquina de indução que for utilizada, por exemplo, em uma aplicação de tração, onde é desejável operar o motor de indução e acionamento acima de uma ampla faixa de velocidade com uma energia de saída constante ou próxima de constante para velocidades acima do ponto de esquina da máquina de indução. A operação em velocidade do
20 motor abaixo do ponto de esquina é frequentemente referido como operação na região “torque constante”, enquanto a operação acima do ponto de esquina da máquina de indução é frequentemente referida como operação em um modo de operação de “energia constante”. Em geral, um projeto de máquina de indução de baixa indutância de dispersão permite o modo de operação de
25 “energia constante” acima de uma faixa de velocidades em excesso de 3 vezes a velocidade base da máquina de indução.

Seria, portanto, desejável projetar uma máquina de indução que mantenha uma forma de onda da corrente de qualidade e que opere com uma

baixa indutância de dispersão para aumentar a eficiência da máquina e estender a capacidade de enfraquecimento de fluxo da máquina.

BREVE DESCRIÇÃO DA INVENÇÃO

Em conformidade com um aspecto da invenção, um sistema de acionamento elétrico inclui uma máquina de indução e um conversor de energia eletricamente acoplado à máquina de indução para acionar a máquina de indução. Sendo que o conversor de energia compreende uma pluralidade de dispositivos de chaveamento de carboneto de silício (SiC). O sistema de acionamento elétrico ainda inclui um controlador que é eletricamente acoplado ao conversor de energia e que é programado para transmitir sinais de chaveamento para a pluralidade de dispositivos de chaveamento de SiC em uma dada frequência de chaveamento de tal forma que uma ondulação da corrente entre picos é menor do que aproximadamente cinco por cento.

Em conformidade com um outro aspecto da invenção, um método de manufatura de um sistema de acionamento elétrico inclui as etapas de fornecer uma máquina de indução que tem uma dada indutância de dispersão e fornecer um conversor de energia de SiC que tem uma pluralidade de dispositivos de chaveamento de SiC, em que o conversor de energia de SiC é acoplável a uma fonte de energia. O método também inclui a etapa de fornecer um controlador que é programado para transmitir sinais de chaveamento para a pluralidade de dispositivos de chaveamento de SiC em uma faixa que minimiza uma ondulação da corrente capaz de ser gerada devido à devida indutância de dispersão da máquina de indução. Além disso, o método inclui a etapa de acoplar o conversor de energia de SiC à máquina de indução para acionar a máquina de indução e ao controlador.

Em conformidade com um outro aspecto da invenção, um sistema de acionamento de veículo inclui um conversor de energia eletricamente acoplado a um motor de indução para acionar o motor de indução. O conversor

de energia inclui uma pluralidade de dispositivos de chaveamento de SiC, e o motor de indução é projetado para ter uma dada indutância de dispersão. O sistema de acionamento de veículo ainda inclui um controlador programado para enviar sinais de chaveamento para a pluralidade de dispositivos de chaveamento de SiC para fazer com que os dispositivos de chaveamento de SiC cambiem em uma faixa que minimize a ondulação da corrente gerada devido à dada indutância de dispersão do motor de indução.

Vários outros atributos e vantagens serão feitos aparentes a partir da descrição detalhada e dos desenhos.

10

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

Os desenhos ilustram realizações presentemente contempladas para levar a cabo a invenção.

Nos desenhos:

A FIGURA 1 ilustra um sistema de acionamento de máquina de indução convencional.

A FIGURA 2 ilustra sistema de acionamento de máquina de indução de alta eficiência de baixa indutância, de acordo com uma realização da invenção.

DESCRIÇÃO DETALHADA

20

A FIGURA 1 ilustra um sistema de acionamento de máquina de indução trifásica convencional 10. O sistema 10 inclui uma ligação de CC 12 que fornece uma tensão de entrada CC que é convertida ou invertida para uma forma de onda CA que provê energia para a máquina de indução CA 14. Um capacitor de filtro de entrada 16 é acoplado através da ligação de CC 12 para filtrar a tensão VCC na ligação de CC 12. Um conversor de energia 18 recebe a tensão de entrada da ligação de CC 12 quando a energia flui a partir da ligação de CC 12 para a máquina de indução CA 14. Esta direção de fluxo de energia frequentemente refere-se à operação em um modo de “motoração”. Quando a

direção do fluxo de energia é a partir da máquina de indução 14 para o conversor de energia 18, a tensão de entrada para o conversor de energia 18 é CA a partir a máquina de indução 14, enquanto que a emissão do conversor de energia 18 é uma tensão em CC na ligação de CC 12. A operação com fluxo de energia a partir da máquina de indução CA 14 para o conversor de energia 18 frequentemente refere-se à operação em um modo de frenagem regenerativo que é útil, por exemplo, em um veículo onde é desejável segurar um dado valor de velocidade em um grau em declive, ou enquanto desacelera o veículo.

O conversor de energia 18 é um típico inversor trifásico que tem dois dispositivos de chaveamento conectados em série por perna de fase. Por exemplo, os dispositivos 20 e 22 formam uma primeira perna de fase, os dispositivos 24 e 26 formam uma segunda perna de fase e os dispositivos 28 e 30 formam uma terceira perna de fase. Os dispositivos 20-30 são dispositivos de chaveamento semicondutores de silício convencionais, tal como, por exemplo, os dispositivos do tipo IGBT de silício, MOSFET, transistor de energia Darlington bipolar de silício, GTO, SCR ou IGCT que têm uma frequência de chaveamento de não mais do que 15-20 kHz, dependendo da potência nominal da máquina de indução 14. Os diodos 32, 34, 36, 38, 40, 42 são acoplados em relacionamento antiparalelo através dos respectivos dispositivos de chaveamento de silício 20-30.

A FIGURA 2 ilustra um sistema de acionamento de máquina de indução 44 em conformidade com uma realização da invenção. O sistema de acionamento 44 inclui uma ligação de CC 46 que tem uma tensão de fonte CC VS 48. O sistema de acionamento 44 também inclui uma fonte de energia 50 que fornece tensão de fonte CC VS 48. Em uma realização, a fonte de energia 50 inclui uma fonte CA 54 e um retificador 52 configurado para converter uma tensão de fonte CA 54 para a ligação de CC ou a tensão de fonte VS. Em outra realização, a fonte de energia 50 inclui uma fonte de energia CC 54, tal como

uma bateria, uma célula de combustível ou um volante com um conversor eletrônico de energia. Em ainda outra realização, a fonte de energia 50 inclui uma fonte de energia CC 54, tal como uma bateria, uma célula de combustível, um ultracapacitor ou um volante com controle eletrônico de energia associado
5 acoplado a um conversor de tensão CC para CC bidirecional 52 que amplifica a tensão de fonte para a ligação de CC ou a tensão de fonte V_s . A ligação de CC 46 abastece um conversor ou inversor de energia 58 com uma tensão de saída CC VCC 56, a qual aciona uma máquina de indução 60. Um capacitor de filtro de entrada 62 é ilustrado entre um trilho CC positivo 64 e um trilho CC negativo
10 66 e serve para fornecer uma função de filtro para as correntes de alta frequência da fonte de energia 50 para garantir a qualidade da energia entre os trilhos positivo e negativo 64, 66.

A máquina de indução 60 inclui uma montagem de rotor 70 e estator 68. De acordo com várias realizações da invenção, a máquina de indução 60 pode ser uma máquina assíncrona que tem um rotor gaiola de
15 esquilo ou rotor de anéis de contato, como exemplos, cada um dos quais pode operar como um motor ou gerador.

O conversor de energia 58 recebe a tensão de saída CC VCC 56 da ligação de CC 46 e converte a tensão de saída CC para fornecer uma forma
20 adequada de energia CA para acionar a máquina de indução 60. De acordo com uma realização, conversor de energia 58 é um inversor CC para CA trifásico que tem uma pluralidade de dispositivos de chaveamento 72, 74, 76, 78, 80, 82. Cada dispositivo de chaveamento 72-82 inclui um MOSFET de carboneto de silício (SiC) 84, 86, 88, 90, 92, 94 e um diodo antiparalelo
25 associado 96, 98, 100, 102, 104, 106. De acordo com uma realização, os MOSFETs de SiC 84-94 são MOSFETs de SiC manufacturados por General Electric Company que têm uma frequência de chaveamento em excesso de 50 kHz.

O SiC é uma substância cristalina que tem propriedades materiais que fazem do mesmo uma alternativa atraente ao silício para alta tensão e aplicações de alta potência. Por exemplo, o SiC tem uma grande banda proibida que fornece uma corrente de dispersão muito baixa, a qual facilita a
5 operação em temperatura elevada. Na realidade, dispositivos semicondutores manufaturados sobre um substrato de SiC podem resistir a temperaturas em excesso de 200 graus C. O SiC também tem um alto campo de ruptura que é de cerca de dez vezes o de silício e uma condutibilidade térmica que é de cerca de três vezes o de silício, o que permite densidades de energia maiores a
10 serem acomodadas com circuitos de SiC. Além disso, a alta mobilidade eletrônica do SiC habilita o chaveamento de alta velocidade, com alguns circuitos de SiC capazes de atingir, pelo menos, dez vezes os ganhos de desempenho de chaveamento sobre dispositivos de chaveamento de silício comparáveis. Assim, o SiC tem sido considerado como um material vantajoso
15 para utilização na manufatura dos dispositivos semicondutores de energia da próxima geração. Tais dispositivos de SiC incluem, por exemplo, diodos Schottky, tiristores, e MOSFETs. Porque os MOSFETs de SiC podem ser manufaturados para serem menores do que os MOSFETs de silício convencionais, os MOSFETs de SiC podem ser empacotados em um ambiente
20 automotivo e podem ser operados em temperaturas mais altas.

Movendo-se da esquerda para a direita na FIGURA 2, os dispositivos de chaveamento 72, 74 são associados à primeira fase de saída 108, os dispositivos de chaveamento 76, 78 são associados à segunda fase de saída 110, e os dispositivos de chaveamento 80, 82 são associados à terceira
25 fase de saída 112. Embora um conversor de energia trifásico e uma máquina de indução trifásica sejam ilustrados na FIGURA 2, uma pessoa versada na técnica entenderá que realizações da presente invenção são igualmente aplicáveis a um monofásico ou outras realizações multifásicas. Por exemplo,

realizações alternativas incluem configurações com a variação do número de fases, por exemplo, fase n , onde $n = 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9$ ou número maior, onde cada fase do conversor de energia inclui uma pluralidade de dispositivos de chaveamento semelhantes aos dispositivos 84, 86, cada um com diodos antiparalelos associados semelhantes aos diodos 96, 98. Uma pessoa versada na técnica reconhecerá que, em tais realizações alternativas, a máquina de indução 60 incluirá inúmeros enrolamentos de fase que correspondem ao número de fases do conversor de energia 58. Como exemplo, uma realização alternativa pode incluir um conversor de energia de 5 fases acoplado a uma máquina de indução que tem 5 enrolamentos de fase.

Um controlador 114 acoplado aos MOSFETs de SiC 84-94 via as linhas respectivas 116 é configurado para controlar independentemente o chaveamento dos MOSFETs de SiC 84-94. Em uma realização, o controlador 114 é um controlador de PWM e é programado para gerar um sinal de PWM para controlar os MOSFETs de SiC 84-94. Uma pessoa versada na técnica reconhecerá que as técnicas de controle alternativo são igualmente aplicáveis a realizações da invenção.

A alta frequência de chaveamento dos MOSFETs de SiC 84-94 permite que a máquina de indução 60 seja projetada com uma baixa indutância de dispersão sem ter que causar preocupação sobre o efeito negativo de ondulação da corrente na qualidade da forma de onda da corrente. Ou seja, a máquina de indução 60 pode ter uma baixa indutância de dispersão enquanto mantém uma forma de onda de boa qualidade. Em uma realização, a ondulação da corrente entre picos é menor do que aproximadamente 5%. Mediante a diminuição da indutância de dispersão da máquina de indução 60, a tensão para a máquina de indução 60 aumenta, dessa maneira aumenta significativamente a eficiência da máquina de indução 60. Além disso, a diminuição da indutância de dispersão da máquina de indução 60 estende a

capacidade de enfraquecimento de fluxo da mesma, portanto, permite que uma extensão da faixa de velocidade onde o sistema de acionamento 44 pode ser controlado em um modo de operação de “energia constante”. Refere-se frequentemente à faixa de velocidade de energia constante como uma razão da
5 velocidade máxima para operação em “energia constante” *versus* a velocidade básica de uma máquina de indução onde o torque pode ser segurado em um valor constante ou máximo.

Portanto, de acordo com uma realização da invenção, um sistema de acionamento elétrico inclui uma máquina de indução e um conversor de
10 energia eletricamente acoplado à máquina de indução para acionar a máquina de indução. Sendo que o conversor de energia compreende uma pluralidade de dispositivos de chaveamento de carboneto de silício (SiC). O sistema de acionamento elétrico ainda inclui um controlador que é eletricamente acoplado ao conversor de energia e que é programado para transmitir sinais de
15 chaveamento para a pluralidade de dispositivos de chaveamento de SiC em uma dada frequência de chaveamento de tal forma que uma ondulação da corrente entre picos é menor do que aproximadamente cinco por cento.

De acordo com uma outra realização da invenção, um método de manufaturar um sistema de acionamento elétrico inclui as etapas de fornecer
20 uma máquina de indução que tem uma dada indutância de dispersão e fornecer um conversor de energia de SiC que tem uma pluralidade de dispositivos de chaveamento de SiC, em que o conversor de energia de SiC é acoplável à fonte de energia. O método também inclui a etapa de fornecer um controlador que é programado para transmitir sinais de chaveamento para a
25 pluralidade de dispositivos de chaveamento de SiC em uma faixa que minimiza uma ondulação da corrente capaz de ser gerada devido à dada indutância de dispersão da máquina de indução. Além disso, o método inclui a etapa de acoplar o conversor de energia de SiC à máquina de indução para acionar a

máquina de indução e ao controlador.

De acordo com ainda uma outra realização da invenção, um sistema de acionamento de veículo inclui um conversor de energia eletricamente acoplado a um motor de indução para acionar o motor de indução. O conversor de energia inclui uma pluralidade de dispositivos de chaveamento de SiC, e o motor de indução é projetado para ter uma dada indutância de dispersão. O sistema de acionamento de veículo ainda inclui um controlador programado para enviar sinais de chaveamento para a pluralidade de dispositivos de chaveamento de SiC para fazer com que os dispositivos de chaveamento de SiC cambiem em uma faixa que minimize a ondulação da corrente gerada devido à dada indutância de dispersão do motor de indução.

Esta descrição por escrito utiliza-se de exemplos para revelar a invenção, incluindo o melhor modo, e também para habilitar qualquer pessoa versada na técnica a pôr a invenção em prática, incluindo fazer e utilizar quaisquer dispositivos ou sistemas e executar quaisquer métodos incorporados. O escopo patenteável da invenção é definido pelas reivindicações e pode incluir outros exemplos que ocorram àqueles versados na técnica. Tais outros exemplos destinam-se a estar dentro do escopo das reivindicações se eles tiverem elementos estruturais que não difiram da linguagem literal das reivindicações ou se eles incluírem elementos estruturais equivalentes com diferenças insubstanciais das linguagens literais das reivindicações.

REIVINDICAÇÕES

1. SISTEMA DE ACIONAMENTO ELÉTRICO, que compreende:

uma máquina de indução (60);

5 um conversor de energia (58) eletricamente acoplado à máquina de indução (60) para acionar a máquina de indução (60), sendo que o conversor de energia (58) compreende uma pluralidade de dispositivos de chaveamento (72-82) de carboneto de silício (SiC); e

10 um controlador (114) eletricamente acoplado ao conversor de energia (58) e programado para transmitir sinais de chaveamento para a pluralidade de dispositivos de chaveamento (72-82) de SiC em uma dada frequência de chaveamento de modo que uma ondulação da corrente entre picos é menor do que aproximadamente cinco por cento.

2. SISTEMA DE ACIONAMENTO ELÉTRICO, de acordo com a reivindicação 1, em que a pluralidade de dispositivos de chaveamento (72-82) de SiC compreende uma pluralidade de transistores de efeito de campo de semicondutor de óxido metálico (MOSFETs) de SiC (84-94).

3. SISTEMA DE ACIONAMENTO ELÉTRICO, de acordo com a reivindicação 1, em que a pluralidade de dispositivos de chaveamento de SiC (72-82) são capazes de comutar em uma frequência de, pelo menos, 50 kHz.

4. SISTEMA DE ACIONAMENTO ELÉTRICO, de acordo com a reivindicação 1, em que o conversor de energia (58) compreende, ainda, uma pluralidade de diodos (96-106) conectados em uma disposição antiparalela com a pluralidade de MOSFETs de SiC (84-94).

5. SISTEMA DE ACIONAMENTO ELÉTRICO, de acordo com a reivindicação 1, em que o conversor de energia (58) é um conversor de energia trifásico.

6. SISTEMA DE ACIONAMENTO ELÉTRICO, de acordo com a reivindicação 1, em que o conversor de energia (58) é um conversor de energia multifásico que compreende fases N, em que N é um dentre 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9.

5 7. SISTEMA DE ACIONAMENTO ELÉTRICO, de acordo com a reivindicação 6, em que a máquina de indução (60) compreende enrolamentos de fase N.

8. SISTEMA DE ACIONAMENTO ELÉTRICO, de acordo com a reivindicação 1, em que o conversor de energia (58) é um conversor de
10 energia monofásico.

9. SISTEMA DE ACIONAMENTO ELÉTRICO, de acordo com a reivindicação 1, em que o controlador (114) é um controlador modulado por largura de pulso (PWM) programado para gerar um sinal PWM para controlar a pluralidade de dispositivos de chaveamento (72-82) de SiC.

15 10. SISTEMA DE ACIONAMENTO ELÉTRICO, de acordo com a reivindicação 1, que compreende, ainda, uma fonte de tensão (50) que compreende pelo menos um dentre uma bateria, um ultracapacitor, e um volante.

10

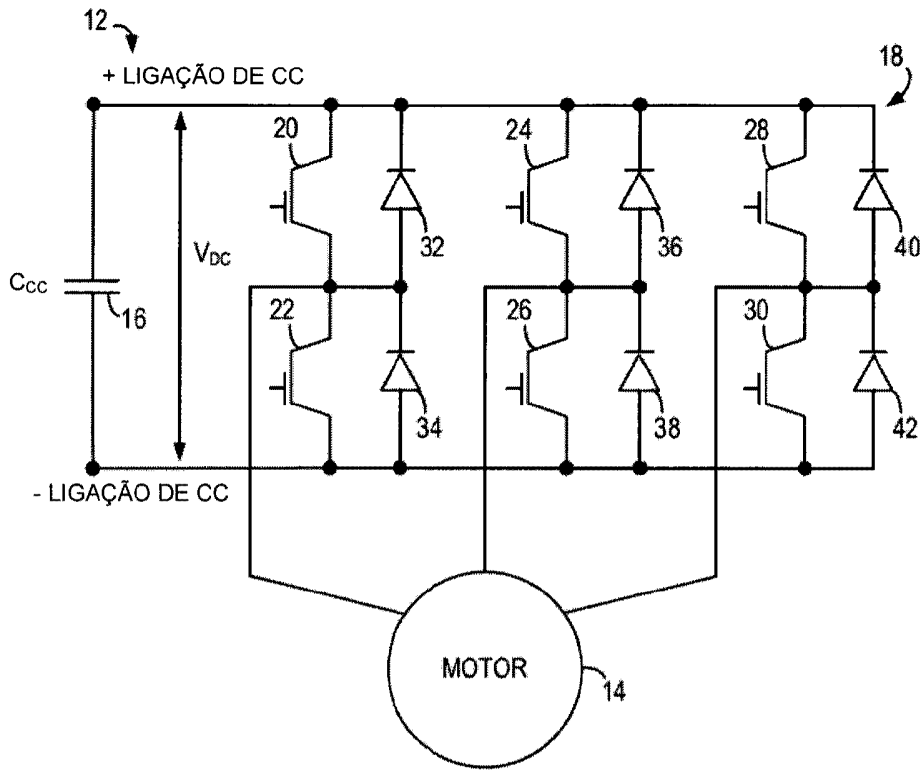


Fig. 1
(ARTE ANTERIOR)

RESUMO**“SISTEMA DE ACIONAMENTO ELÉTRICO”**

Trata-se de um sistema de acionamento elétrico que inclui uma máquina de indução (60) e um conversor de energia (58) eletricamente acoplado à máquina de indução (60) para acionar a máquina de indução (60). o
5 conversor de energia (58) compreende uma pluralidade de dispositivos de chaveamento de carboneto de silício (SiC) (72-82). O sistema de acionamento elétrico ainda inclui um controlador (114) que é eletricamente acoplado ao conversor de energia (58) e que é programado para transmitir sinais de
10 chaveamento para a pluralidade de dispositivos de chaveamento de SiC (72-82) em uma dada frequência de chaveamento de tal forma que uma ondulação da corrente entre picos é menor do que aproximadamente cinco por cento.