



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

(11) PI 1009867-4 B1



(22) Data do Depósito: 31/03/2010

(45) Data de Concessão: 09/07/2019

(54) Título: MÉTODO DE CONTROLAR UMA MÁQUINA ELÉTRICA, SISTEMA DE CONTROLE PARA UMA MÁQUINA ELÉTRICA E PRODUTO CONTENDO OS MESMOS

(51) Int.Cl.: H02P 29/00; H02P 6/00.

(30) Prioridade Unionista: 04/04/2009 GB 0905910.9.

(73) Titular(es): DYSON TECHNOLOGY LIMITED.

(72) Inventor(es): ANDREW CLOTHIER; TUNCAY CELIK.

(86) Pedido PCT: PCT GB2010050565 de 31/03/2010

(87) Publicação PCT: WO 2010/112929 de 07/10/2010

(85) Data do Início da Fase Nacional: 27/09/2011

(57) Resumo: CONTROLE DE UMA MÁQUINA ELÉTRICA Trata-se de um método de controle de uma máquina elétrica, o método compreendendo armazenar uma pluralidade de mapas de potência, cada mapa de potência compreendendo valores de controle para acionar a máquina elétrica em diferentes potências, e selecionar um mapa de potência em resposta a um sinal de entrada. Além disso, revela-se um sistema de controle para uma máquina elétrica, e um produto incorporando o sistema de controle e a máquina elétrica.

“MÉTODO DE CONTROLAR UMA MÁQUINA ELÉTRICA, SISTEMA DE CONTROLE PARA UMA MÁQUINA ELÉTRICA E PRODUTO CONTENDO OS MESMOS”

A presente invenção se refere ao controle de uma máquina elétrica.

O sistema de controle de uma máquina elétrica pode controlar a excitação de enrolamentos de fase em resposta a um sinal de demanda de velocidade ou um sinal de demanda de torque. Entretanto, pode ser vantajoso ajustar a potência da máquina elétrica em resposta a um sinal de entrada.

Em um primeiro aspecto, a presente invenção prove um método de controlar uma máquina elétrica, o método compreendendo: armazenar uma pluralidade de mapas de potência, cada mapa de potência compreendendo valores de controle para acionar a máquina elétrica em diferentes potências; e selecionar um mapa de potência em resposta a um sinal de entrada.

O sinal de entrada pode, portanto, ser utilizado para controlar a potência da máquina elétrica. O sinal de entrada pode incluir, pro exemplo, um sinal de identificação de fonte de alimentação. Consequentemente, um mapa de potência diferente pode ser selecionado para diferentes tipos de fontes de alimentação, e em particular fontes de alimentação de tensões diferentes. O sinal de entrada pode também incluir um sinal de modo de potência, que pode ser gerado por uma interface de usuário. Um usuário é então habilitado a controlar a potência de uma máquina elétrica através da interface de usuário. Por exemplo, um primeiro mapa de potência pode ser selecionado quando o sinal de modo de potência é logicamente baixo e um segundo mapa de potência pode ser selecionado quando o sinal de modo de potência é logicamente alto. Os primeiro e segundo mapas de potência então atingem diferentes potências para a máquina elétrica. Além disso, o sinal de entrada pode incluir um sinal acessório que é gerado sempre que um acessório drenar potência da fonte de alimentação. Uma vez que o acessório drena potência da fonte de alimentação, uma demanda de corrente excessiva na fonte de alimentação pode ser prevenida pela seleção de um mapa de potência particular em resposta ao sinal acessório. Em particular, um mapa de potência que entrega uma potência baixa para a máquina elétrica pode ser selecionado em resposta ao sinal acessório.

Cada mapa de potência preferivelmente compreende um primeiro valor de controle e um segundo valor de controle. O método então compreende sequencialmente excitar e girar em roda livre um enrolamento da máquina elétrica. O enrolamento é então excitado adiantado das passagens por zero da força contra-eletromotriz no enrolamento por um tempo de avanço que é definido pelo primeiro valor de controle, e o enrolamento é deixado em espera por um período de espera que é definido pelo segundo valor de controle. Os valores de controle então agem para controlar a excitação do enrolamento de modo a controlar a potência da máquina elétrica. Por exemplo, através da seleção de um primeiro valor de con-

trole que aumenta o tempo de avanço, uma corrente é levada para o enrolamento em um estágio anterior, e então a potência pode ser aumentada. Similarmente, por selecionar um segundo valor de controle que diminui o tempo de roda livre, uma corrente é levada ao enrolamento durante um período maior e assim a potência pode novamente ser aumentada.

5 Consequentemente, por selecionar um mapa de potência particular, a eficiência e a potência da máquina elétrica podem ser controladas.

Na região de força contra-eletromotriz em queda, um menor torque é alcançado por um dado nível de corrente. Consequentemente, por girar em roda livre o enrolamento dentro desta região, uma máquina elétrica mais eficiente pode ser implementada. Adicionalmente,
10 à medida que a força contra-eletromotriz diminui, picos de corrente podem surgir se a tensão de excitação exceder a força contra-eletromotriz em queda. Através da liberação do enrolamento dentro da região de força contra-eletromotriz em queda, picos de corrente podem ser evitados e assim uma forma de onda de corrente mais suave pode ser alcançada.

Cada mapa de potência preferivelmente compreende uma tabela de pesquisa armazenando um primeiro valor de controle e um segundo valores de controle para cada um da pluralidade de níveis de tensão. O método então compreende selecionar a partir do mapa de potência um primeiro valor de controle e um segundo valor de controle de acordo com uma tensão de excitação utilizada para excitar o enrolamento. Através de selecionar diferentes valores de controle em resposta ao nível da tensão de excitação, um melhor controle
20 sobre ambas a eficiência e a potência da máquina elétrica pode ser alcançado.

O método idealmente compreende periodicamente monitorar a tensão de excitação e selecionar do mapa de potência um primeiro valor de controle e um segundo valor de controle de acordo com a tensão monitorada. Consequentemente, a máquina elétrica é controlada em resposta a mudanças na tensão de excitação de modo que um desempenho particular possa ser mantido.
25

Preferivelmente, cada mapa de potência armazena valores de controle que aumentam o tempo de avanço e diminuem o tempo de roda livre com a diminuição da tensão de excitação. Consequentemente, a medida que a tensão de excitação diminui, corrente é levada para o enrolamento em um estágio anterior. Adicionalmente, a corrente é levada para o enrolamento durante um período mais longo. Consequentemente, apesar de uma perda na tensão de excitação, a mesma ou similar potência pode ser alcançada. De fato, cada mapa de potência preferivelmente armazena valores de controle que alcançam potências substancialmente constantes para a máquina elétrica durante uma faixa de tensões de excitação. Potências substancialmente constantes nesta instância devem ser entendidas como variações de potências não maiores que $\pm 5\%$.
35

Preferivelmente, cada mapa de potência armazena valores de controle que alcançam uma eficiência (isto é, a razão de potência de saída com a potência de entrada) de pelo

menos 75% para a máquina elétrica durante uma faixa de tensões de excitação.

A faixa de tensões de excitação pode se estender entre uma tensão mínima e uma tensão máxima, com a tensão mínima sendo menor que 80% da tensão máxima. Isto então representa uma faixa ampla de tensões sobre as quais potência constante e/ou boa eficiência podem ser alcançadas. Consequentemente, uma bateria pode ser utilizada como uma
5 fonte de excitação. Apesar de a bateria descarregar com o uso, potência constante e/ou boa eficiência podem ainda assim ser alcançadas.

Preferivelmente, o método compreende aplicar um valor de correção de velocidade para pelo menos um do primeiro valor de controle e do segundo valor de controle, o valor de
10 correção de velocidade variando com a velocidade da máquina elétrica. Como a velocidade da máquina elétrica varia, a força contra-eletromotriz induzida no enrolamento, e assim a potência da máquina elétrica, também varia. Através da correção de um ou ambos os valores de controle para velocidade, o efeito da velocidade na potência pode ser reduzido.

Vantajosamente, os valores de correção de velocidade varia com ambos a velocidade da máquina elétrica e um nível de tensão de excitação. Como já observado, através da
15 correção de um ou ambos os valores de controle para velocidade, o efeito da velocidade na potência pode ser reduzido. Entretanto, a correção ideal depende do nível da tensão de excitação. Em particular, uma maior correção é idealmente exigida para uma tensão de excitação menor. Por aplicar um valor de correção de velocidade que varia com a velocidade da
20 máquina elétrica e com o nível da tensão de excitação, um melhor controle sobre a potência pode ser alcançado.

O método preferivelmente compreende armazenar uma tabela de pesquisa de correção de velocidade para mapa de potência. Cada tabela de pesquisa de correção de velocidade então armazena idealmente um primeiro valor de correção de velocidade e um
25 segundo valor de correção de velocidade para cada uma de uma pluralidade de rotações e uma pluralidade níveis de tensão. O método então compreende selecionar a partir da tabela de pesquisa de correção de velocidade um primeiro valor de correção de velocidade e um segundo valor de correção de velocidade de acordo com a velocidade da máquina elétrica e o nível da tensão de excitação, aplicando o primeiro valor de correção de velocidade ao
30 primeiro valor de controle e aplicando o segundo valor de correção de velocidade ao segundo valor de controle. O uso de uma tabela de pesquisa para corrigir o valor de controle para a velocidade e a tensão de excitação então simplificam o controle da máquina elétrica.

Vantajosamente, a tabela de pesquisa de correção de velocidade armazena valores de correção de velocidade que aumentam o tempo de avanço e/ou diminuem o tempo de
35 roda livre com o aumento da velocidade. Consequentemente, a medida que a velocidade da máquina elétrica aumenta, e assim a força contra-eletromotriz no enrolamento aumenta, corrente é levada para o enrolamento em um estágio anterior. Adicionalmente, corrente é

levada para o enrolamento durante um período mais longo. Dessa forma, a mesma ou similar potência pode ser alcançada independentemente de mudanças na velocidade da máquina elétrica.

5 O método pode compreender excitar o enrolamento, monitorar um sinal indicativo da força contra-eletromotriz no enrolamento, continuar a excitar o enrolamento durante um tempo de afastamento em resposta à detecção de um pico do sinal, e repousar o enrolamento durante um período de roda livre. O tempo de afastamento é então proporcional ao primeiro valor de controle e o tempo de roda livre é proporcional ao segundo valor de controle. Isto então apresenta um método conveniente de excitar o enrolamento antes das passagens
10 por zero da força contra-eletromotriz.

Vantajosamente, cada meio ciclo elétrico compreende um período de acionamento único e um período de roda livre único. O enrolamento é então excitado durante o período de acionamento e colocado em repouso durante o período de roda livre. Em seguida ao período de roda livre, o enrolamento é comutado.

15 Em um segundo aspecto, a presente invenção prove um sistema de controle para uma máquina elétrica, o sistema de controle executando um método como descrito em qualquer um dos parágrafos precedentes.

O sistema de controle idealmente compreende um sensor de posição, como um sensor de efeito Hall, que envia um sinal indicativo de uma força contra-eletromotriz no enrolamento. O sistema de controle então utiliza a saída do sinal pelo sensor de posição para
20 controlar a excitação e o repouso do enrolamento.

O sistema de controle pode compreender um controlador de corrente para limitar a corrente no enrolamento durante a excitação. Isto então previne que correntes excessivas se formem no enrolamento, o que pode danificar os componentes do sistema de controle ou
25 desmagnetizar os ímãs da máquina elétrica.

O sistema de controle pode também compreender um inversor, um módulo acionador de gate e um controlador de acionamento. O controlador de acionamento então gera um ou mais sinais de controle para controlar a excitação do enrolamento, e o módulo acionador de gate, em resposta aos sinais de controle, controla as comutações do inversor.

30 Em um terceiro aspecto, a presente invenção prove um produto compreendendo um fonte de alimentação, uma máquina elétrica, e um sistema de controle como descrito em qualquer um dos parágrafos precedentes. O sistema de controle então excita o enrolamento utilizando a fonte de alimentação.

A fonte de alimentação pode enviar um sinal de identificação de fonte de alimentação que é único ao tipo de fonte de alimentação. O sinal de identificação de fonte de alimentação é então entregue ao sistema de controle, que em resposta seleciona o mapa de potência. O sinal de identificação de fonte de alimentação pode ter uma frequência que é única

ao tipo de fonte de alimentação. A fonte de alimentação pode ser uma bateria removível. Consequentemente, o produto pode ser utilizado com diferentes tipos de baterias tendo diferentes tensões.

5 O produto pode incluir um acessório que é ligado pela fonte de alimentação. O acessório então gera um sinal acessório quando ligado, e o sinal acessório é entregue ao sistema de controle, o qual em resposta, seleciona um mapa de potência apropriado.

O produto pode incluir uma interface de usuário tendo um comutador de seleção de modo de potência para comutar entre um modo de alta potência e um modo de baixa potência. O comutador de seleção de modo de potência gera um sinal de seleção de modo de
10 potência que é entregue ao sistema de controle.

O produto pode ser um aspirador de pó, que pode incluir um acessório na forma de uma escova motorizada. O sistema de controle pode então selecionar um mapa de potência diferente para alcançar uma potência diferente para o motor dependendo de se a escova está ligada ou não.

15 De modo de que apresente invenção possa ser mais facilmente entendida, uma concretização da invenção será descrita agora, a título de exemplo, com referência as desenhos acompanhantes, nas quais:

A Figura 1 é um diagrama de blocos de um produto de acordo com a presente invenção;

20 A Figura 2 é um diagrama de blocos do sistema de motor do produto da Figura 1;

A Figura 3 é um diagrama esquemático do sistema de motor;

A Figura 4 é um diagrama esquemático de um controlador de corrente do sistema de motor;

25 A Figura 5 ilustra formas de onda do sistema de motor durante um período de controle de corrente;

A Figura 6 ilustra formas de onda do sistema de motor enquanto opera em alta velocidade;

A Figura 7 é um gráfico do ângulo de avanço e do ângulo de roda livre em contraste com tensão de excitação; e

30 Figura 8 é um produto da presente invenção na forma de um aspirador de pó.

O produto 1 da Figura 1 compreende uma fonte de alimentação 2, uma interface do usuário 3, um acessório 4 e um sistema de motor 5.

A fonte de alimentação 2 compreende um módulo de bateria que fornece tensão CC tanto para o acessório 4 quanto para o sistema de motor 5. A fonte de alimentação 2 é removível do produto 1, de modo que o produto 1 possa ser usado com módulos de bateria
35 diferentes. Para os fins da presente descrição, a fonte de alimentação 2 é tanto um módulo de bateria de 4 células fornecendo uma alimentação CC de 16,4 V quanto um módulo de

bateria de 6 células fornecendo uma alimentação CC de 24,6 V. Além disso, para fornecer uma tensão de alimentação, a fonte de alimentação emite um sinal de identificação que é específico ao tipo do módulo de bateria. O sinal ID assume a forma de um sinal de onda quadrada que possui uma frequência que varia de acordo com o tipo do módulo de bateria.

5 No presente exemplo, o módulo de bateria de 4 células emite um sinal ID que possui frequência de 25 Hz (duração de pulso de 20 ms), enquanto que o módulo de bateria de 6 células emite um sinal ID com uma frequência de 50 Hz (duração de pulso de 10 ms). O sinal ID continua a ser emitido pela fonte de alimentação 2 até que o momento em que uma falha é detectada dentro da fonte de alimentação 2, por exemplo, baixa tensão ou sobretemperatura das células. Como descrito a seguir, o sinal ID é usado pelo sistema de motor 5 para identificar o tipo de fonte de alimentação 2 e para verificar periodicamente que se a fonte de alimentação 2 está funcionando corretamente.

A interface do usuário 3 compreende uma chave de alimentação 6 e um seletor de modo de potência 7. A chave de alimentação 6 é usada para ligar e desligar o produto 1. Em resposta ao fechamento da chave de alimentação 6, um circuito fechado é formado entre a fonte de alimentação 2 e cada um dentre o acessório 4 e o sistema de motor 5. O seletor de modo de potência 7 é usado para controlar se o sistema de motor 5 opera em modo de alta de potência ou em um modo de baixa potência. Quando o seletor de modo de potência 7 está fechado, um sinal de módulo de potência logicamente alto é emitido para o sistema de motor 5.

O acessório 4 é conectado de forma removível ao produto 1. Quando conectado ao produto 1 e o produto 1 é ligado, o acessório 4 extrai energia da fonte de alimentação 2 e emite um sinal acessório ao sistema de motor 5. Em vez de extrair energia continuamente sempre que o acessório 4 é conectado e o produto 1 é ligado, o acessório 4 pode incluir uma chave de alimentação (não ilustrada), por exemplo, formando parte da interface do usuário 3. O acessório 4 então extrai energia e emite o sinal acessório somente quando a chave de alimentação do acessório é fechada.

Referindo-se agora às Figuras 2 e 3, o sistema de motor 5 compreende um motor elétrico 8 e um sistema de controle 9.

30 O motor 8 compreende um rotor de ímã permanente bipolar 17 que gira em relação a um estator 18 em torno do qual o enrolamento de fase única 19 é envolvido. O estator 18 tem a forma de um “c”, o que permite que um fator de enchimento elevado seja conectado ao enrolamento 19. Assim sendo, é possível reduzir as perdas de cobre, com isso melhorando a eficiência do motor 8.

35 O sistema de controle 9 compreende um módulo de filtro 10, um inversor 11, um módulo acionador de porta 12, um sensor de corrente 14, um controlador 15 e um controlador de acionamento 16.

O módulo de filtro 10 liga a fonte de alimentação 2 do produto 1 ao inversor 11, e compreende um par de capacitores C1, C2 dispostos em paralelo. O módulo de filtro 10 atua de forma a reduzir a ondulação na tensão elétrica ligada ao inversor 11.

O inversor 11 compreende uma ponte completa de quatro chaves de alimentação Q1-Q4 que ligam a fonte de alimentação 2 ao enrolamento 19 do motor 8. Cada chave de ligação Q1-Q4 é um MOSFET, que oferece comutação rápida e eficiência satisfatória ao longo da faixa de tensão da fonte de alimentação 2. Outros tipos de chave de alimentação poderiam, no entanto, serem usados, tais como IGBTs ou BJTs, particularmente se a tensão elétrica da fonte de alimentação 2 exceder a tensão nominal XN dos MOSFETs. Cada uma das chaves Q1-Q4 inclui um diodo de retorno, os quais protegem cada chave dos picos de tensão elétrica da força contra-eletromotriz do motor 8 durante a comutação.

Quando um primeiro par de chaves Q1, Q4 é fechado, o enrolamento 19 é excitado em uma primeira direção (excitação da esquerda para a direita), fazendo com que a corrente seja conduzida em torno do enrolamento 19 em uma primeira direção. Quando um segundo par de chaves Q2, Q3 é fechado, o enrolamento 19 é excitado em uma direção oposta (excitação da direita para a esquerda), fazendo com que a corrente seja conduzida em torno do enrolamento 19 em uma direção oposta. Sendo assim, as chaves Q1-Q4 do inversor 11 podem ser controladas de modo a comutar a corrente no enrolamento 19.

Além de excitar o enrolamento 19, o inversor 11 pode ser controlado de modo a girar em roda livre o enrolamento 19. O giro em roda livre ocorre quando o enrolamento 19 é desconectado da tensão de excitação fornecida pela fonte de alimentação 2. Isso pode ocorrer pela abertura de todas as chaves Q1-Q4 do inversor 11. Contudo, a eficiência do sistema de motor 5 é melhorada se uma das chaves do lado alto Q1-Q3 ou das chaves do lado baixo Q2-Q4, estiverem fechadas durante o giro em roda livre. Mediante o fechamento ou das chaves do lado alto Q1, Q3 ou das chaves do lado baixo Q2, Q4, a corrente no enrolamento 19 é capaz de recircular através das chaves em vez dos diodos de retorno menos eficientes. Para os fins da presente descrição, o giro em roda livre é obtido pelo fechamento de ambas as chaves do lado baixo Q2, Q4. Contudo, deve-se compreender que o giro em roda livre poderia igualmente ser obtido pelo fechamento das chaves do lado alto Q1, Q3 ou pela abertura de todas as chaves Q1-Q4.

O módulo acionador de porta 12 aciona a abertura e o fechamento das Q1-Q4 do inversor 11 em resposta aos sinais de controle S1-S4 recebidos do controlador de acionamento 16. O módulo acionador de porta 12 compreende quatro acionadores de porta 20-23, cada acionador de porta acionando uma respectiva chave Q1-Q4 em resposta a um sinal de controle S1-S4 do controlador de acionamento 16. Os acionadores de porta 20, 22 responsáveis pelas chaves do lado alto Q1, Q3 são adicionalmente acionadas em resposta a um sinal de sobrecorrente recebido do controlador de corrente 15. Em resposta ao sinal de so-

brecorrente, os acionadores de porta 20, 22 abrem as chaves do lado alto Q1,Q3. O sinal de sobrecorrente prevalece sobre os sinais de controle S1,S3 do controlador de acionamento 16 de modo que as chaves do lado alto Q1, Q3 sejam abertas em resposta ao sinal de sobrecorrente, independente do estado dos sinais de controle S1, S3. Esse nível de controle pode ser alcançado por meio da provisão de uma porta NOR nos acionadores de portas do lado alto 20, 22.

A tabela 1 resume os estados permitidos das chaves Q1-Q4 em resposta aos sinais de controle S1-S4 do controlador de acionamento 16 e ao sinal de sobrecorrente do controlador de corrente 15. Devido ao fato de a porta NOR operar nas saídas dos acionadores de porta do lado alto 20, 22 as chaves do lado alto Q1, Q3 são fechadas pelos sinais de controle S1, S3 que são logicamente baixos.

Tabela 1

Sinal de Sobrecorrente	Sinais de controle				Chaves de Alimentação				Condição do Inversor
	S1	S2	S3	S4	Q1	Q2	Q3	Q4	
1	X	X	X	X	0	X	0	X	Chaves do Lado Alto Desligadas
0	0	0	1	1	1	0	0	1	Excitação da Esquerda para a Direita
0	1	1	0	0	0	1	1	0	Excitação da Direita para a Esquerda
0	1	1	1	1	0	1	0	1	Roda Livre
0	1	0	1	0	0	0	0	0	Todas as Chaves Desligadas

O sensor de posição 13 é um sensor de efeito Hall que emite um sinal que indica a posição angular do rotor de ímã permanente 17. O sinal é uma onda quadrada digital, com cada borda representando a posição angular na qual a polaridade do rotor se altera. A saída de sinal pelo sensor de posição 13 é distribuída ao controlador de sinal 16, que, em resposta, gera sinais de controle S1-S4 que controlam o inversor 11 e, assim, controlam a energia distribuída ao motor 8.

Durante a velocidade, o rotor de ímã permanente 17 induz uma força contra-eletromotriz no enrolamento 19 do motor 8. A polaridade da força contra-eletromotriz muda com a polaridade do rotor 17. Consequentemente, o sinal do sensor de posição fornece não apenas uma medida da posição elétrica do rotor 17, mas também uma medida da força contra-eletromotriz no enrolamento 19. Em condições ideais, o sensor de posição 13 é alinhado em relação ao rotor 17 de modo que as bordas do sinal do sensor de posição sejam síncronas, ou tenham uma diferença de fase predeterminada, com as passagens por zero da força contra-eletromotriz. Contudo, após a montagem do sistema de motor 5, há tolerâncias associadas ao alinhamento do sensor de posição 13 em relação ao motor 8. Isso, por sua vez, leva a uma diferença de fase entre as bordas do sinal do sensor de posição e as passagens por zero da força contra-eletromotriz. Como descrito em detalhes na seção intitulada 'Ajuste

Fino Pós-Montagem', essas tolerâncias são compensadas pelo uso de um desvio do sensor de posição que o controlador de acionamento 16 armazena e subsequentemente usa para corrigir o sinal do sensor de posição.

O sensor de corrente 14 compreende um resistor de sentido único R1 localizado no trilho negativo do inversor 11. A tensão elétrica através do sensor de corrente 14, portanto, fornece uma medida da corrente no enrolamento 19 quando conectado à fonte de alimentação 2. A tensão elétrica através do sensor de corrente 14 é transmitida para o controlador de corrente 15.

Referindo-se agora a Figura 4, o controlador de corrente 15 compreende uma entrada, uma saída, gerador de limite 24, um comparador 25 e um engate SR 26.

A saída do controlador de corrente 15 é acoplada à saída do sensor de corrente 14, e a saída do controlador de corrente 15 é acoplada à entrada de cada um dos acionadores de porta do lado alto 20, 22.

O gerador de limite 24 compreende uma entrada de tensão de referência, um módulo PWM 27, um dispositivo de memória não-volátil 28 e um filtro 29. O módulo PWM 27 emprega uma frequência fixa e um ciclo de atividade variável que é definido de acordo com o fator de escalonamento armazenado na memória do dispositivo 28. O módulo PWM 27 opera na tensão na entrada de referência para fornecer um sinal de tensão pulsado, que é então suavizado pelo filtro 29 para fornecer uma tensão limiar escalonado.

O comparador 25 compara a tensão elétrica na entrada do coletor de corrente 15 com a saída da tensão limiar pelo gerador de limite 24. Se a tensão da saída exceder a tensão limiar, o comparador 25 emite um sinal que estabelece o engate SR 26. Em resposta, o engate SR 26 gera um sinal de sobrecorrente na saída do controlador de corrente 15.

Como observado acima na Tabela 1, quando o sinal de sobrecorrente é emitido pelo controlador de corrente 15 (isto é, quando o sinal de sobrecorrente é logicamente alto), os acionadores de porta do lado alto 20, 22 abrem as chaves do lado alto Q1, Q3. Consequentemente, o controlador de corrente 15 desconecta o enrolamento 19 da tensão de excitação fornecida pela fonte de alimentação 2 quando a corrente no enrolamento 19 excede um valor limite. Como descrito em detalhes na seção intitulada 'Ajuste Fino Pós-Montagem', pelo emprego de uma tensão limiar que é escalonada de acordo com um fator de escalonamento, cada sistema de motor individual 5 pode passar por um ajuste fino de modo que o efeito das tolerâncias dos componentes sobre o limiar de corrente possa ser compensado.

O controlador de corrente 15 também emite uma interrupção de sobrecorrente ao controlador de acionamento 16. Na concretização ilustrada na Figura 4, a saída do comparador 25 é distribuída ao controlador de acionamento 16 como a interrupção de sobrecorrente. Entretanto, o sinal de sobrecorrente emitido pelo engate 26 poderia igualmente ser distribuído ao controlador de acionamento 16 como a interrupção de sobrecorrente. Em resposta

à interrupção de sobrecorrente, o controlador de acionamento 16 executa uma rotina de sobrecorrente. O controlador de acionamento 16 gera um sinal de controle S2 ou S4 que faz com que as chaves do lado baixo restante Q2 ou Q4 se fechem de modo que o enrolamento 19 gire em roda livre. O giro em roda livre continua por um tempo indeterminado, por exemplo, 100 μ s, durante o qual a corrente no enrolamento 19 sofre decaimento. Depois de decorrido o tempo predeterminado, o controlador de acionamento 16 comuta o sinal de controle S2 ou S4 de modo a abrir a chave do lado baixo recentemente fechada Q2 ou Q4 e emitir um sinal de reinicialização do engate ao controlador de corrente 15. O sinal de reinicialização do engate faz com que o engate 26 do controlador de corrente 15 reinicie, com isso tornando o sinal de sobrecorrente baixo. O inversor 11, assim, retorna à condição que existia antes de ter ocorrido o evento de sobrecorrente.

A Figura 5 ilustra as formas de onda da corrente de enrolamento, do sinal do sensor de posição, das chaves Q1-Q4, dos sinais de controle S1-S4, do sinal de sobrecorrente e do sinal de reinicialização do engate durante um semi-ciclo típico. Como pode ser visto, o estado das chaves Q1-Q4 é o mesmo antes e depois de cada evento de sobrecorrente.

A corrente no enrolamento 19 pode ser reduzida pelo controlador de corrente 15 muitas vezes durante um semi-ciclo elétrico. À medida que a velocidade do motor 8 aumenta, a força contra-eletromotriz induzida no enrolamento 19 aumenta. Consequentemente, o número de eventos de sobrecorrente diminui com a velocidade do motor. Com o tempo, a velocidade do motor 8 e, assim, a grandeza da força contra-eletromotriz, é tal que a corrente no enrolamento 19 não mais alcança o limiar durante cada semi-ciclo.

O controlador de corrente 15 garante que a corrente dentro do enrolamento 19 não exceda um limiar. Assim sendo, evita-se que correntes excessivas se acumulem no enrolamento 19, o que poderia consequentemente danificar as chaves Q1-Q4 do inversor 11 ou desmagnetizar o rotor 17.

O controlador de acionamento 16 compreende um processador 30, um dispositivo de memória não-volátil 31, seis entradas de sinal e cinco saídas de sinal.

O dispositivo de memória 31 armazena instruções de software para execução pelo processador 30. Em resposta à execução das instruções, o processador 30 controla a operação do sistema de motor 5. Em particular, o processador 30 gera sinais de controle S1-S4 que controlam as chaves Q1-Q4 do inversor 11 e, assim, aciona o motor 8. A operação específica do controlador de acionamento 16 é descrita mais detalhadamente a seguir. O dispositivo de memória 31 também armazena uma pluralidade de mapas de potência, uma pluralidade de mapas de correção de velocidade e uma pluralidade de desvios do sensor de posição.

As seis entradas de sinal são o sinal ID da fonte de alimentação, o sinal acessório, o sinal de modo de potência, o sinal do sensor de posição, a interrupção de sobrecorrente e

um sinal de nível de tensão.

O sinal de nível de tensão é derivado da linha da fonte de alimentação, escalonado por um divisor potencial R2, R3 e filtrado por um capacitor C3 para remover o ruído de comutação. O sinal de nível de tensão, assim, proporciona ao controlador de acionamento 16 uma medida de tensão de ligação fornecida pela fonte de alimentação 2. Devido à resistência interna da fonte de alimentação 2, a tensão de ligação é menor que a tensão do circuito aberto. Para o módulo de bateria de 6 células, a tensão de circuito aberto máxima é de 24,6 V, o que corresponde a uma tensão de ligação de 23,0 V. Para o módulo de bateria de 4 células, a tensão de circuito aberto máxima é de 16,4 V, o que corresponde a uma tensão de ligação de 14,8 V. Além desse limite superior, o controlador de acionamento 16 interrompe a operação quando a tensão de ligação cai abaixo de um limiar de subtensão. Para o módulo de bateria de 6 células, o limiar de subtensão da tensão de ligação é de 16,8 V, o que corresponde a uma tensão de circuito aberto de 19,0 V. Para o módulo de bateria de 4 células, o limiar de subtensão da tensão de ligação é de 11,2 V, o que corresponde a uma tensão de circuito aberto de 12,8 V. O controlador de corrente 16, portanto, opera ao longo de uma faixa de tensão de ligação de 16,8 a 23,0 V para a bateria de 6 células e 11,2 a 14,8 V para a bateria de 4 células.

Os cinco sinais de saída são os quatro sinais de controle S1-S4 e o sinal de reinicialização do engate. Os quatro sinais de controle S1-S4 são emitidos ao módulo acionador de porta 12, o qual, em resposta, controla a abertura e o fechamento das chaves Q1-Q4 do inversor 11. Mais especificamente, cada sinal de controle S1-S4 é emitido a um respectivo acionador de porta 20-23. O sinal de reinicialização do engate é emitido ao controlador de corrente 15.

O controlador de acionamento 16 gera os sinais de controle S1-S4 em resposta aos sinais recebidos nas entradas. Como explicado em mais detalhes abaixo, a sincronização dos sinais de controle S1-S4 é controlada de modo que o motor 8 seja acionado a uma potência de saída constante ao longo de uma faixa de velocidades. Além do mais, a potência de saída constante é mantida, independente das alterações na tensão de ligação da fonte de alimentação 2. Consequentemente, o motor 8 é acionado à potência de saída constante à medida que a fonte de alimentação 2 é descarregada.

Quando o controlador de acionamento 16 gera um sinal de controle, por exemplo, S1, para abrir uma chave particular Q1 do inversor 11, há um pequeno retardo entre a geração do sinal de controle S1 e a abertura física da chave Q1. Se o controlador de acionamento 16 gerasse simultaneamente um sinal de controle S2 para fechar a outra chave Q2 no mesmo braço do inversor 11, um curto potencialmente surgiria ao longo do braço do inversor 11. Esse curto, ou “disparo” como é geralmente chamado, danificaria as chaves Q1, Q2 nesse braço do inversor 11. Logo, de modo a evitar o disparo, o controlador de acionamento

16 emprega um tempo morto (por exemplo, 1 μ s) entre a geração dos sinais de controle para as chaves no mesmo braço do inversor 11. Deve-se, portanto, entender que, quando se faz referência no texto a seguir à excitação ou giro em roda livre do enrolamento 19, o controlador de acionamento 16 emprega um tempo morto entre os sinais de controle. O tempo morto é, de preferência, mantido o mais curto possível de modo a otimizar o desempenho do motor.

O controlador de corrente 15 e o controlador de acionamento 16 podem formar parte de um microcontrolador de um único componente. Um candidato adequado é o microcontrolador PIC16F690 comercializado pela Microchip Technology Inc. Esse microcontrolador tem um comparador interno 25, um engate 26, um módulo PWM 27, um dispositivo de memória não-volátil 28, 31 e um processador 30. O pino de saída do módulo PWM 27 é realimentado ao pino de entrada do comparador 25 por meio do filtro 29, que é externo ao microcontrolador. Adicionalmente, a saída do comparador 25 serve como uma interrupção de sobrecorrente interna, que é distribuída ao processador 30 do controlador de acionamento 16.

O controlador de corrente 15 e o controlador de acionamento 16 juntos oferecem uma forma de controle de corrente histerético. Particularmente, o controlador de corrente 15 gera um sinal de sobrecorrente engatado em resposta a um evento de sobrecorrente. O sinal de sobrecorrente faz com que o módulo acionador de porta 12 abra as chaves do lado alto Q1, Q3 do inversor 11 para, assim, desconectar o enrolamento 19 da tensão de ligação usada para excitação do enrolamento 19. O controlador de acionamento 16 então reiniciar o engate 26 depois de ter decorrido um período de tempo predeterminado, durante o qual a corrente no enrolamento 19 sofre decaimento.

O controle de corrente é obtido pela combinação de hardware e software. Particularmente, o hardware do controlador de corrente 15 monitora a corrente no enrolamento 19 e gera um sinal de sobrecorrente no caso em que a corrente excede um limiar. O software do controlador de acionamento 16 reinicia o hardware do controlador de corrente 15 depois de um período de tempo predeterminado.

Mediante o emprego do hardware para detectar um evento de sobrecorrente, o controle de sistema 9 responde com relativa rapidez a um evento de sobrecorrente. Isso é importante para garantir que o enrolamento 19 seja desconectado da tensão de ligação o quanto antes após um evento de sobrecorrente. Se, em vez disso, fosse empregado software para monitor um evento de sobrecorrente, haveria um retardo significativo entre o evento de sobrecorrente e a geração do sinal de sobrecorrente, tempo este durante o qual a corrente no enrolamento 19 pode subir a um nível que resulte em danos aos componentes ou desmagnetização do rotor.

Mediante o emprego do software para reiniciar o hardware do controlador de cor-

rente 15, o número de componentes de hardware necessários para controlar a corrente no enrolamento 19 pode ser reduzido. Adicionalmente, o software do controlador de acionamento 16 é capaz de controlar o período de tempo predeterminado ao longo do qual a corrente no enrolamento 19 sofre decaimento. Na presente concretização, o controlador de acionamento 16 reinicia o engate 26 do controlador de corrente 15 após ter decorrido um período de tempo fixado (100 μ s). Contudo, o controlador de acionamento 16 poderia igualmente reiniciar o engate 26 após um período de tempo que é ajustado de acordo com a velocidade do motor 8. Logo, o nível a que a corrente sofre decaimento com cada redução pode ser melhor controlada.

Mediante a redução da corrente por um período de tempo predeterminado, não é necessário monitorar a corrente no enrolamento 19 quando desconectado da tensão de ligação. Sendo assim, o controle de corrente pode ser obtido pelo uso de um resistor de sentido único. Isso não apenas reduz o custo dos componentes do sistema de controle 9, mas também a dissipação de energia pelo resistor de sentido único normalmente não é maior que 1% da energia de entrada.

A operação do sistema de motor 5, e em particular do controlador de acionamento 16, será descritos agora.

Modo de Inicialização

Quando a chave de alimentação 6 é fechada, a energia é distribuída pela fonte de alimentação 2 ao sistema de motor 5, fazendo com que o controlador de acionamento 16 seja iniciado. Na inicialização, o controlador de acionamento 16 sonda as entradas do sinal ID da fonte de alimentação, do sinal acessório e do sinal de modo de potência. Com base nesses três sinais, o controlador de acionamento 16 seleciona um mapa de potência armazenado na memória 31. Como explicado abaixo, cada mapa de potência armazena valores de controle para acionar o motor 8 a uma potência de saída diferente. Como pode ser visto na Tabela 2, o controlador de acionamento 16 armazena cinco mapas de potência diferentes. Se a fonte de alimentação 2 for um módulo de bateria de 4 células (isto é, se a frequência do sinal ID da fonte de alimentação for de 25 Hz), então o modo de alta potência não está disponível e o sinal de modo de potência é ignorado.

Tabela 2

Sinais de Entrada			Mapa de Potência
Fonte de Alimentação	Acessório	Modo de Potência	
50 Hz	Desligado	Alta	167 W
50 Hz	Ligado	Alta	136 W
50 Hz	Ligado ou Desligado	Baixa	96 W
25 Hz	Desligado	Ignorada	107 W
25 Hz	Ligado	Ignorada	83 W

O mapa de potência selecionando pelo controlador de acionamento 16 é subsequentemente usado pelo controlador de acionamento 16 para gerar os sinais de controle S1-

S4 quando opera no “Modo de Aceleração de Alta Velocidade” e no “Modo de Operação Normal”.

Enquanto o controlador de acionamento 16 está ligado, o controlador de acionamento 16 sonda periodicamente (por exemplo, a cada 8 ms) o sinal ID da fonte de alimentação, o sinal acessório e sinal de modo de potência. Se o sinal ID da fonte de alimentação for constantemente alto ou baixo, em vez de sincronizado, isso indica um problema na fonte de alimentação 2; o controlador de acionamento 16 então abre todas as chaves Q1-Q4 e termina. Se o sinal acessório ou o sinal de modo de potência mudar, o controlador de acionamento 16 seleciona um novo mapa de potência.

Na seleção do mapa de potência, o controlador de acionamento 16 entra no “Modo de Ressincronização”.

Modo de Ressincronização

O controlador de acionamento 16 determina a velocidade do motor 8 e seleciona o modo de operação de acordo com a velocidade determinada. A velocidade do motor 8 é obtida pela medição do intervalo de tempo entre duas bordas do sinal do sensor de posição, isto é, a duração do pulso. Se o controlador de acionamento 16 falhar ao detectar duas ou mais bordas dentro de um tempo predeterminado (por exemplo, 26 ms), a velocidade do motor 8 é considerada como não sendo maior que 1 krpm; o controlador de acionamento 16 então entra no “Modo Estacionário”. Caso contrário, o controlador de acionamento 16 espera até que uma borda adicional do sinal do sensor de posição seja detectada. O controlador de acionamento 16 então calcula a média do intervalo de tempo ao longo das três bordas para fornecer uma determinação mais precisa da velocidade do motor. Se o intervalo de tempo entre duas bordas for maior que 1875 μ s, a velocidade do motor 8 é determinada como estando entre 1 e 16 krpm; o controlador de acionamento 16 então entra no “Modo de Aceleração de Baixa Velocidade”. Se o intervalo de tempo estiver entre 500 e 1875 μ s, a velocidade do motor 8 é determinada como estando entre 16 e 60 krpm, e o controlador de acionamento 16 entra no “Modo de Aceleração de Alta Velocidade”. Caso contrário, a velocidade do motor 8 é determinada como sendo pelo menos 60 krpm e o controlador de acionamento 16 entra no “Modo de Operação Normal”. A Tabela 3 detalha os intervalos de tempo, as velocidades e os modos de operação.

Tabela 3

Intervalo (μ s)	Velocidade (krpm)	Modo
$t > 26000$	$\omega \leq 1$	Estacionário
$1875 < t \leq 26000$	$1 < \omega < 16$	Aceleração em Baixa Velocidade
$500 < t \leq 1875$	$16 \leq \omega < 60$	Aceleração em Alta Velocidade
$t \leq 500$	$\omega \geq 60$	Operação Normal

Modo Estacionário (velocidade ≤ 1 krpm)

O controlador de acionamento 16 excita o enrolamento 19 por um tempo predeterminado, por exemplo, 25 ms. Durante esse tempo, o controlador de acionamento 16 comuta

o enrolamento 19 (isto é, inverte a direção da excitação) em sincronia com as bordas do sinal do sensor de posição. O período inicial de excitação deve fazer o rotor 17 girar. Se, durante esse tempo predeterminado, as duas bordas do sinal do sensor de posição forem detectadas, o controlador de acionamento 16 entra no “Modo de Aceleração em Baixa Velocidade”. Caso contrário, o controlador de acionamento 16 abre todas as chaves Q1-Q4 e grava um erro “Falha ao Iniciar” na memória do dispositivo 31.

Modo de aceleração em Baixa Velocidade ($1 \text{ krpm} < \text{velocidade} < 16 \text{krpm}$)

O controlador de acionamento 16 excita o enrolamento 19 em sincronia com as bordas do sinal do sensor de posição. A excitação síncrona continua até que a velocidade do motor 8 atinja 16 krpm, como determinado pelo intervalo de tempo entre as bordas sucessivas, após o que o controlador de acionamento 16 entra no “Modo de Aceleração em Alta Velocidade”. Se o motor 8 falhar em atingir 16 krpm dentro de um tempo predeterminado, por exemplo, 2,5 s, o controlador de acionamento 16 abre todas as chaves Q1-Q4 e grava um erro “Velocidade Baixa” na memória do dispositivo 31.

Modo de aceleração em Alta Velocidade ($16 < \text{velocidade} < 60 \text{krpm}$)

Durante a aceleração em alta velocidade, o controlador de acionamento 16 sequencialmente excita e gira em roda livre o enrolamento 19. Mais particularmente, cada semiciclo elétrico compreende um único período de acionamento durante o qual o enrolamento 19 é excitado, seguido de um único período de giro em roda livre, durante o qual o enrolamento 19 é girado em roda livre. Durante o período de acionamento, a corrente no enrolamento 19 pode ser reduzida pelo controlador de corrente 15. Portanto, o enrolamento 19 pode, adicionalmente, ser girado em roda livre por intervalos curtos (por exemplo, 100 μs) dentro do período de acionamento. Entretanto, qualquer giro em roda livre que ocorra dentro do período de acionamento é diferente do que ocorre no período de roda livre. Após cada período de roda livre, o enrolamento 19 é comutado (isto é, a direção de excitação é invertida).

O controlador de acionamento 16 excita o enrolamento 19 antes das bordas do sinal do sensor de posição, e, assim, antes das passagens por zero da força contraeletromotriz no enrolamento 19. Além do mais, o controlador de acionamento 16 excita o enrolamento 19 antes das bordas do sinal do sensor de posição por um período de tempo que permanece fixo à medida que o motor 8 acelera de 16 krpm para 60 krpm. O controlador de acionamento 16 também gira em roda livre o enrolamento 19 por um período de tempo que permanece fixo à medida que o motor acelera de 16 krpm para 60 krpm.

Como descrito mais detalhadamente abaixo, cada mapa de potência (ver Tabela 2) compreende uma tabela de consulta de tempos de avanço e tempo de roda livre para uma pluralidade de níveis de tensão. Ao entrar no “Modo de Aceleração em Alta Velocidade” o controlador de acionamento 16 sonda o sinal do nível de tensão para obter a tensão de exci-

tação, isto é, a tensão de ligação fornecida pela fonte de alimentação 2. O controlador de acionamento 16 então seleciona, do mapa de potência, o tempo de avanço, T_{ADV} , e o tempo de roda livre, T_{FREE} , correspondendo à tensão de excitação. A título de exemplo, se o mapa de potência selecionado for de 167 W (ver Tabela 2) e o sinal do nível de tensão

5 indicar que a tensão de excitação é de 22,7 V, o controlador de acionamento 16 seleciona, do mapa de potência, um tempo de avanço de 34 μ s e o tempo de roda livre de 128 μ s (ver Tabela 4).

O enrolamento 19 é excitado e girado em roda livre da seguinte maneira. Ao detectar uma borda do sinal do sensor de posição, o controlador de acionamento 16 continua a

10 excitar o enrolamento 19 pelo período de tempo, T_{DRIVE_OFF} . T_{DRIVE_OFF} é calculado a partir do tempo de semiciclo, T_{HALF_CYCLE} , do tempo de avanço, T_{DAV} , e do tempo de roda livre, T_{FREE} :

$$T_{DRIVE_OFF} = T_{HALF_CYCLE} - T_{DAV} - T_{FREE}$$

O tempo de semiciclo, T_{HALF_CYCLE} , é o intervalo de tempo entre duas bodas

15 sucessivas do sinal do sensor de posição. O tempo de avanço, T_{DAV} , e o tempo de roda livre, T_{FREE} , são os tempos obtidos do mapa de potência.

Após o período T_{DRIVE_OFF} , o controlador de acionamento 16 gira em roda livre o enrolamento 19 durante o período T_{FREE} , após o que o controlador de acionamento 16 comuta o enrolamento 19. O resultado final é que o controlador de acionamento 16 excita o

20 enrolamento 19 antes da próxima borda do sinal do sensor de posição pelo tempo de avanço, T_{DAV} .

A Figura 6 ilustra as formas de onda da corrente do enrolamento, do sinal do sensor de posição, da tensão de excitação e dos sinais de controle S1-S4 ao longo de alguns semiciclos.

25 À medida que o motor 8 acelera, a força contra-eletromotriz 19 aumenta. Torna-se, portanto, cada vez mais difícil a passagem da corrente, e conseqüentemente, da energia para o enrolamento 19 do motor 8. Se o enrolamento 19 fosse excitado em sincronia com as bordas do sensor do sinal de posição, e, assim, em sincronia com as passagens por zero da força-contraeletromotriz, atingiria-se uma velocidade em que não seria mais possível condu-

30 zir mais energia ao enrolamento 19. Ao excitar o enrolamento 19 antes das bordas do sinal do sensor de posição, e, assim, antes das passagens por zero da força contra-eletromotriz, a corrente é conduzida ao enrolamento 19 no estágio anterior. Como resultado, mais energia é conduzida ao enrolamento 19.

À medida que a força contra-eletromotriz no enrolamento 19 aumenta com a velocidade do motor, o ângulo elétrico em que a excitação ocorre no avanço da força contra-

35 eletromotriz de preferência aumenta a velocidade do motor, isto é, o ângulo de avanço a 60 krpm é, de preferência, maior que a 16 krpm. Pela excitação do enrolamento 19 antes da

força contra-eletromotriz por um período de tempo fixo, T_{ADV} , o ângulo elétrico correspondente, A_{ADV} , aumenta com a velocidade do motor. Em particular, o ângulo de avanço, A_{ADV} , aumenta proporcionalmente com a velocidade do motor:

$$A_{ADV} = T_{ADV} * \omega / 60 * 360^\circ$$

5 onde ω é a velocidade do motor em rpm. Consequentemente, à medida que o motor 8 acelera, a corrente é conduzida ao enrolamento 19 em um estágio cada vez mais anterior. Como resultado, mais energia é conduzida ao enrolamento 19.

10 Ao empregar um tempo de avanço fixo, T_{ADV} , não há necessidade de o controlador de acionamento 16 realizar cálculos dinâmicos quanto a qual ângulo de avanço deve ser usado à medida que o motor 8 acelera. Isso, então, minimiza muito o número de instruções que precisam ser executadas pelo processador 30 do controlador de acionamento 16 e, assim, um processador 30 mais barato pode ser usado.

15 O controlador de acionamento 16 gira em roda livre o enrolamento 19 no momento em que a força contra-eletromotriz no enrolamento 19 está caindo. À medida que a força contra-eletromotriz 19 cai, obtém-se menor torque para um dado nível de corrente. Logo, mediante a velocidade em roda livre do enrolamento 19 dentro dessa região, um sistema de motor 5 mais eficiente pode ser obtido. Adicionalmente, a força contra-eletromotriz no enrolamento 19 pode exceder a da tensão de excitação. Consequentemente, à medida que a força contra-eletromotriz no enrolamento 19 cai, podem surgir picos de corrente caso a ten-
20 são de excitação repentinamente exceda a da força contra-eletromotriz em queda. Pela velocidade em roda livre do enrolamento 19 dentro da região de força contra-eletromotriz em queda, evitam-se picos de corrente e, assim, obtém-se uma forma de onda de corrente mais uniforme.

25 O controlador de acionamento 16 continua a excitar sequencialmente e girar em roda livre o enrolamento 19 da forma descrita acima até que a velocidade do motor 8 alcance 60 krpm. Durante esse tempo, os tempos de avanço e giro em roda livre, T_{ADV} e T_{FREE} , são fixos. Ao alcançar 60 krpm, o controlador de acionamento 16 entra no “Modo de Operação Normal”. Se o motor falhar em atingir 60 krpm dentro de um tempo predeterminado, por exemplo, 2,5 s, o controlador de acionamento 16 abre todas as chaves Q1-Q4 e grava um
30 erro “Velocidade Baixa” na memória do dispositivo.

Modo de Operação Normal (velocidade $\geq$ 60 krpm)

35 Como no “Modo de Aceleração em Alta Velocidade”, o controlador de acionamento 16 sequencialmente excita e gira em roda livre o enrolamento 19. Cada semiciclo elétrico, portanto, continua a compreender um período de acionamento único seguido de período de giro de roda livre único. Novamente, o enrolamento 19 é excitado antes das bordas do sinal do sensor de posição e, assim, antes das passagens por zero da força contra-eletromotriz. Entretanto, em contraste com o “Modo de Aceleração em Alta Velocidade”, no qual tempos

fixos são empregados para o tempo de avanço e para o tempo de roda livre, o controlador de acionamento 16 agora varia o tempo de avanço e o tempo de roda livre de modo a obter uma potência de saída constante.

O controlador de acionamento 16 excita o enrolamento 19 antes das bordas do sinal do sensor de posição por um ângulo elétrico, A_ADV, e gira em roda livre o enrolamento 19 ao longo do ângulo elétrico, A_FREE. O controlador de acionamento 16 varia tanto o ângulo de avanço, A_ADV, quanto o ângulo de roda livre, A_FREE, em resposta às alterações na tensão de excitação (isto é, a tensão de ligação da fonte de alimentação 2) e a velocidade do motor 8 de modo a obter uma potência de saída constante.

A fonte de alimentação 2 é um módulo de bateria e, portanto, a tensão de excitação diminui à medida que o módulo de bateria é descarregado com o uso. Se os ângulos elétricos nos quais o enrolamento 19 é excitado e girado em roda livre forem fixos, a potência de entrada, e, assim, a potência de saída do sistema de motor 5 diminuiriam à medida que a fonte de alimentação 2 se descarrega. Logo, a fim de manter uma potência de entrada constante, o controlador de acionamento 16 varia o ângulo de avanço, A_ADV, e o ângulo de roda livre, A_FREE, em resposta às alterações na tensão de excitação. Particularmente, o ângulo de avanço, A_ADV, aumenta e o ângulo de roda livre, A_FREE, diminui com a redução da tensão de excitação. Pelo aumento do ângulo de avanço, A_ADV, a corrente é acionada no enrolamento 19 em um estágio anterior. Pela diminuição do ângulo de roda livre, A_FREE, o enrolamento 19 é excitado por um longo período ao longo do semiciclo. O resultado final é que, em resposta a uma queda na tensão de excitação, mais corrente é conduzida ao enrolamento 19 ao longo do semiciclo e, assim, mantém-se a potência de saída constante.

A Figura 7 ilustra a variação no ângulo de avanço e no ângulo de giro em roda livre para uma potência de saída constante ao longo de uma faixa de tensão de 16,8 a 23,0 V. Como observado acima, essa faixa de tensão corresponde à tensão de ligação CC do módulo de bateria de 6 células. Abaixo de 16,8 V, é difícil conduzir corrente suficiente ao enrolamento 19 a fim de manter a potência de saída constante sem potencialmente desmagnetizar o rotor 17. Adicionalmente, a tensão do módulo de bateria de 6 células diminui bastante em torno de 16,8 V. Logo, caso a tensão de ligação CC caia para menos de 16,8 V, o controlador de acionamento 16 abre todas as chaves Q1-Q4 e termina. Um padrão similar é observado para o módulo de bateria de 4 células ao longo da faixa de operação de 11,2 a 14,8 V; Novamente, o controlador de acionamento abre todas as chaves Q1-Q4 e termina quando a tensão de ligação CC caia para menos de 11,2 V.

A variação no ângulo de avanço e no ângulo de roda livre é armazenada pelo controlador de acionamento 16 como um mapa de potência. Cada mapa de potência compreende uma tabela de consulta armazenando um tempo de avanço e um tempo de giro em

roda livre para cada um de uma pluralidades de níveis de tensão. Como descrito mais detalhadamente adiante, o controlador de acionamento 16 monitora o sinal de nível de tensão e seleciona, do mapa de potência, um tempo de avanço e um tempo de giro em roda livre correspondentes do mapa de potência. O controlador de acionamento 16 então usa os tempos de avanço e giro em roda livre obtidos do mapa de potência para controlar a excitação e o giro em roda livre do enrolamento 19. Portanto, a potência de saída constante é obtida para o sistema de motor 5, independente das alterações na tensão de excitação. A Tabela 4 ilustra uma seção do mapa de potência de 167 W.

Tabela 4

Tensão de Ligação CC (V)	Tempo de avanço (μ s)	Tempo de Giro em Roda Livre (μ s)	Ângulo de Avanço ($^{\circ}$)	Ângulo Giro em Roda Livre ($^{\circ}$)	Potência de Entrada (W)	Potência Saída (W)
16,8	91	51,2	54,1	30,4	189,4	166,5
16,9	90	52,8	53,5	31,4	189,9	167,0
17,0	89	56,0	52,3	33,3	189,7	166,9
17,1	88	57,6	51,1	34,2	189,5	166,8
:	:	:	:	:	:	:
22,7	34	128,0	20,2	76,0	187,5	166,8
22,8	33	128,0	19,6	76,0	187,3	167,5
22,9	32	129,6	19,0	77,0	187,6	166,9
23,0	31	129,6	18,4	77,0	187,3	166,6

Somente a parte esquerda da tabela é armazenada pelo controlador de acionamento 16 como o mapa de potência de 167 W. A parte direita foi incluída para os fins da presente descrição e não constitui parte do mapa de potência. Como pode ser visto na tabela, o mapa de potência de 167 W armazena tempos de avanço e tempos de giro em roda livre que distribuem uma potência de saída constante de 167 W. A tensão de ligação CC é amostrada a uma resolução de 0,1 V. O mapa de potência é, assim, razoavelmente pequeno, sem ser tão pequeno a ponto de afetar adversamente o desempenho o sistema de motor 5. Obviamente, dependendo do tamanho do dispositivo de memória 31 do controlador de acionamento 16, a resolução do mapa de potência pode ser aumentada ou diminuída.

Deve-se notar que o mapa de potência armazena tempos de avanço e tempos de giro em roda livre ao invés de ângulos de avanço e ângulos de giro em roda livre. O controlador de acionamento 16 usa temporizadores para gerar sinais de controle S1-S4 que excitam e giram em roda livre o enrolamento 19. Logo, mediante o armazenamento dos tempos de avanço e giro em roda livre em vez dos ângulos, as instruções executadas pelo controlador de acionamento 16 são simplificadas em grande medida. No entanto, o mapa de potência poderia alternativamente armazenar ângulos de avanço e ângulos de giro em roda livre, que o controlador de acionamento 16 então usa para controlar a excitação e o giro em roda livre do enrolamento 19.

Cada ângulo de avanço e giro em roda livre possui um tempo correspondente que

depende da velocidade do motor 8. Para cada mapa de potência, o controlador de acionamento 16 aciona o motor 8 dentro de uma faixa de velocidades de operação particular. Cada faixa de velocidades de operação tem uma velocidade nominal, que é usada para calcular os tempos de avanço e os tempos de giro em roda livre:

$$T_ADV = (A_ADV / 360^\circ) * 60/\omega_{nominal}$$

$$T_FREE = (A_FREE / 360^\circ) * 60/\omega_{nominal}$$

Onde $\omega_{nominal}$ é a velocidade nominal em rpm. A Tabela 5 lista as faixas de velocidades operacionais e as velocidades nominais para os vários mapas de potência.

Tabela 5

Mapa de Potência	Velocidade Mínima (krpm)	Velocidade Máxima (krpm)	Velocidade Nominal (krpm)
167 W	89,5	104,5	99
136 W	84,5	98,5	93.5
96 W	75	87,5	83
107 W	77,5	91	86
83 W	71,5	83,5	79

Cada mapa de potência armazena tempos de avanço e tempos de giro em roda livre para o motor 8 girando à velocidade nominal. Então, por exemplo, o enrolamento o mapa de potência de 167 W armazena tempos de avanço e giro em roda livre que alcançam potência de saída constante quando o motor 8 está girando a uma velocidade de 99 krpm. Quando o motor 8 gira a velocidades acima ou abaixo da velocidade nominal, o controlador de acionamento 16 aplica um valor de correção de velocidade a cada um dentro o tempo de avanço e o tempo de giro em roda livre, como descrito a seguir em mais detalhes.

Conforme mencionado acima na seção “Inicialização”, o controlador de acionamento 16 armazena cinco mapas de potência e seleciona um dos mapas de potência de acordo com a condição do sinal ID da fonte de alimentação, do sinal acessório e do sinal de modo de potência. A potência de saída do motor 8 é, assim, determinada pelo tipo de fonte de alimentação 2 que é conectada ao produto 1, quer o acessório 4 esteja conectado e ligado ou não, e baseado em se o usuário selecionou um modo de alta potência ou um modo de baixa potência.

Como pode ser visto na Tabela 2, um mapa de potência diferente é selecionado de acordo com se um módulo de bateria de 6 células ou um módulo de bateria de 4 células está conectado ao produto 1. Uma vez que o módulo de bateria de 4 células tem uma capacidade de carga inferior, o produto 1 teria um tempo de funcionamento menor se o mesmo mapa de potência fosse selecionado tanto para os módulos de bateria de 6 células como de 4 células. Mediante a seleção do mapa de potência que distribui potência de saída inferior, um tempo de funcionamento similar para o módulo de bateria de 4 células pode ser obtido à custa da potência de saída.

Quando o módulo de bateria de 6 células é conectado ao produto 1, o usuário é ca-

paz de controlar a potência de saída do motor 8 por meio do seletor de potência 7. Como se pode observar na Tabela 2, um mapa de potência distribuindo uma potência de saída de 96 W é selecionado em resposta a um sinal de modo de potência que é logicamente baixo, isto é, quando o usuário seleciona o modo de potência baixa. Um mapa de tensão superior distribuindo ou 167 W (com o acessório desligado) ou 136 W (com o acessório ligado) é então selecionado em resposta a um sinal de modo de potência que é logicamente alto, isto é, quando o usuário seleciona um modo de alta potência.

Uma vez que o acessório 4 extrai energia da fonte de alimentação 2, a fonte de alimentação 2 irá descarregar mais rapidamente se o mesmo mapa de potência for selecionado. Além disso, pode-se extrair corrente excessiva da fonte de alimentação 2 a fim de alimentar tanto o acessório 4 quanto o motor 8. Sendo assim, em resposta ao sinal acessório, o controlador de acionamento 16 seleciona um mapa de potência que distribui potência de saída inferior, vide a Tabela 2. Consequentemente, a fonte de alimentação 2 é protegida da extração de corrente excessiva e um tempo de operação similar para o produto 1 pode ser obtido à custa da potência de saída.

Os mapas de potência, portanto, oferecem um meio conveniente para controlar a potência de saída do sistema de motor 5 em resposta a um ou mais sinais de entrada.

Como observado acima, cada mapa de potência armazena tempos de avanço e tempos de roda livre que atingem potência de saída constante quando o motor 8 opera a uma velocidade nominal. No entanto, à medida que a velocidade do motor 8 varia, a força contra-eletromotriz no enrolamento 19 também varia. Consequentemente, se os ângulos nos quais o enrolamento 19 é excitado e girado em roda livre forem fixos, a potência de saída do motor 8 variaria com a velocidade do motor. Em particular, a potência de saída do motor 8 diminuiria à medida que aumenta a velocidade do motor. A fim de manter a potência de saída constante ao longo de cada faixa de velocidade operacional, o controlador de acionamento 16 varia o ângulo de avanço e o ângulo de roda livre em resposta às alterações na velocidade do motor 8.

O controlador de acionamento 16 aplica um valor de correção de velocidade a cada um do ângulo de avanço e do ângulo de roda livre. À medida que aumenta a velocidade do motor, a força contra-eletromotriz 19 aumenta. Consequentemente, a fim de manter a potência de saída constante, aplica-se um valor de correção de velocidade ao ângulo de avanço, o que aumenta o ângulo de avanço. Além disso, um valor de correção de velocidade é aplicado ao ângulo de roda livre, o que diminui o ângulo de roda livre. Portanto, a corrente é conduzida ao enrolamento 19 em um estágio anterior e durante um período maior para cada semiciclo. Como resultado, pode-se alcançar a potência de saída constante, apesar do aumento na força contra-eletromotriz.

Os valores de correção de velocidade que são aplicados ao ângulo de avanço e ao

ângulo de roda livre dependem não somente da velocidade do motor 8, mas também do nível da tensão de excitação, isto é, a tensão de ligação CC fornecida pela fonte de alimentação de energia 2. À medida que diminui a tensão de excitação, um valor de correção de velocidade específico tem um efeito útil menor sobre a potência de saída do motor 8. Logo, a fim de manter a potência de saída constante, os valores de correções de velocidade aumentam de grandeza com a redução da tensão de excitação.

Para cada mapa de potência, o controlador de acionamento 16 armazena dois mapas de correção de velocidade: um mapa de correção de velocidade de avanço e um mapa de correção de velocidade de roda livre. Cada mapa de correção de velocidade compreende uma tabela de consulta que armazena um valor de correção de velocidade para cada um dentre uma pluralidade de velocidades e uma pluralidade de níveis de tensão. Uma vez que o mapa de potência armazena tempos de avanço e tempos de roda livre, os valores de correção de velocidade são expressos como tempos. No entanto, caso cada mapa de potência alternativamente armazene ângulos de avanço e ângulos de roda livre, os mapas de correção de velocidade armazenam então valores de correção de velocidade expressos como ângulos. As Tabelas 6 e 7 listam, respectivamente, o mapa de correção de velocidade de avanço e o mapa de correção de velocidade de roda livre para o mapa de potência de 167 W.

Tabela 6

Velocidade (rpm)	Tensão de Ligação CC (V)							
	16,8	17,6	18,4	19,2	20,0	20,8	21,6	22,2
89500	-8,2	-6,9	-5,7	-4,7	-4,5	-4,1	-3,8	-3,5
90361	-7,4	-6,1	-5,1	-4,2	-3,9	-3,7	-3,5	-3,3
91241	-6,5	-5,4	-4,4	-3,7	-3,5	-3,3	-3,1	-2,8
99000	0	0	0	0	0	0	0	0
102180	2,1	1,7	1,4	1,2	1,1	1,2	1,1	1,0
103305	3,0	2,4	2,0	1,6	1,6	1,6	1,5	1,4
104500	3,9	3,2	2,6	2,1	2,0	2,0	1,9	1,7

Tabela 7

Velocidade (rpm)	Tensão de Ligação CC (V)							
	16,8	17,6	18,4	19,2	20,0	20,8	21,6	22,2
89500	24,9	23,8	10,9	5,4	3,4	2,0	0,6	0,6
90361	22,1	21,2	7,7	4,9	3,0	1,8	0,6	0,3
91241	19,4	18,1	5,1	4,3	2,7	1,6	0,5	0,3
99000	0	0	0	0	0	0	0	0
102180	-6,6	-7,0	-5,7	-1,2	-1,0	-0,6	-0,2	-0,4
103305	-9,4	-8,8	-7,1	-2,1	-1,3	-0,8	-0,3	-0,1
104500	-12,2	-11,5	-8,1	-2,6	-1,6	-0,9	-0,3	-0,1

Pode-se perceber, a partir dos mapas de correção de velocidade, que, à medida que a velocidade do motor aumenta, o tempo de avanço é corrigido por uma quantidade que

aumenta o tempo de avanço, e o tempo de roda livre é corrigido por uma quantidade que diminui o tempo de roda livre. Além disso, à medida que a tensão de excitação diminui, a quantidade pela qual o tempo de avanço e o tempo de roda livre são corrigidos aumenta. Uma vez que cada mapa de potência armazena um tempo de avanço e um tempo de roda livre para uma velocidade nominal, os valores de correção de velocidade na velocidade nominal são zero.

Ao selecionar valores dos mapas de correção de velocidade e de potência, o controlador de acionamento 16 arredonda para baixo a tensão de excitação e a velocidade do motor 8 para a entrada mais próxima na tabela de consulta.

O controlador de acionamento 16 aciona o enrolamento 19 de maneira similar à descrita acima para o "Modo de Aceleração em Alta Velocidade". Em particular, ao detectar uma borda do sinal do sensor de posição, o controlador de acionamento 16 continua a excitar o enrolamento 19 durante o período de tempo T_DRIVE_OFF :

$$T_DRIVE_OFF = T_HALF_CYCLE - T_ADV - T_FREE$$

Novamente, o tempo de semiciclo, T_HALF_CYCLE , é o intervalo de tempo entre duas bordas sucessivas do sinal do sensor de posição. Após o período T_DRIVE_OFF , o controlador de acionamento 16 gira em roda livre o enrolamento 19 durante o período T_FREE , após o que o controlador de acionamento 16 comuta o enrolamento 19. O resultado final é que o controlador de acionamento 16 excita o enrolamento 19 antes da próxima borda do sinal do sensor de posição pelo tempo de avanço, T_ADV .

Novamente, a Figura 6 ilustra as formas de onda da corrente de enrolamento, do sinal do sensor de posição, da tensão de excitação e dos sinais de controle S1-S4 após alguns semiciclos.

O controlador de acionamento 16 monitora periodicamente (por exemplo, a cada semiciclo) o sinal de nível de tensão para obter a tensão de excitação. O tempo de avanço, T_ADV , e o tempo de roda livre, T_FREE , são então obtidos selecionando-se, do mapa de potência relevante, o tempo de avanço e o tempo de roda livre correspondendo à tensão de excitação. Os tempos selecionados do mapa de potência são então corrigidos pelos valores de correção de velocidade selecionados dos mapas de correção de velocidade. Então, por exemplo, se a tensão de excitação fornecida pela fonte de alimentação for de 17,0 V (como determinado pelo sinal de nível de tensão) e a velocidade do motor for de 103 krpm (conforme determinado pelo tempo de semiciclo), o controlador de acionamento 16 seleciona um tempo de avanço de 89 μ s e um tempo de roda livre de 56 μ s a partir do mapa de potência de 167 W (Tabela 4). O controlador de acionamento 16, então, corrige o tempo de avanço por 2,09 μ s, conforme determinado pelo mapa de correção de velocidade de avanço (Tabela 6), e corrige o tempo de roda livre em -6,64 μ s, conforme determinado pelo mapa de correção de velocidade de roda livre (Tabela 7). Consequentemente, o controlador de aciona-

mento 16 usa um tempo de avanço, T_{DAV} , de 91,09 μs , e um tempo de roda livre, T_{FREE} , de 49,36 μs .

O controlador de acionamento 16, portanto, aciona o motor 8 a uma potência de saída constante ao longo de uma faixa de tensões de excitação e velocidades do motor. Logo, 5 obtém-se uma potência de saída constante à medida que a fonte de alimentação 2 é descarregada, e o motor 8 suporta cargas diferentes.

O uso de tabelas de consulta armazenando tempos de avanço e de tempo livre, bem como os valores de correção de velocidade, simplifica bastante os cálculos realizados pelo processador 30 do controlador de acionamento 16. Consequentemente, pode-se usar 10 um processador 30 relativamente barato para gerar o sinal de controle S1-S4 que excita e gira em roda livre o enrolamento 19.

Erro do Sensor de Posição

Ruídos eletromagnéticos podem fazer com que o sensor de posição 13 gere bordas falsas. Caso sejam detectadas pelo controlador de acionamento 16, essas bordas falsas 15 fariam o controlador de acionamento 16 excitar o enrolamento 19 em tempos incorretos. Esse efeito não apenas afetaria adversamente o desempenho do sistema do motor 5, mas também pode resultar em corrente excessiva no enrolamento 19 que poderia potencialmente danificar as chaves Q2, Q4 ou desmagnetizar o rotor 17. O controlador de acionamento 16, portanto, emprega medidas para minimizar a possibilidade de detectar bordas falsas. As 20 medidas específicas empregadas dependem do modo de operação.

Ao operar no “Modo de Aceleração em Baixa Velocidade”, o controlador de acionamento 16 excita o enrolamento 19 em sincronia com as bordas do sinal do sensor de posição. Após a comutação, o controlador de acionamento 16 ignora o sinal do sensor de posição por um tempo predeterminado, por exemplo, 250 μs . Logo, quaisquer bordas falsas 25 que caíam dentro deste período são ignoradas.

Ao operar no “Modo de Aceleração em Alta Velocidade” e no “Modo de Operação Normal”, o controlador de acionamento 16 emprega uma janela do sensor de posição. Quaisquer bordas do sinal do sensor de posição que sejam geradas fora desta janela são ignoradas pelo controlador de acionamento 16. Se nenhuma borda for detectada dentro da 30 janela do sensor de posição, o controlador de acionamento 16 abre todas as chaves por um tempo predeterminado (por exemplo, 50 ms) e entra no “Modo de Ressincronização”.

Uma vez que o enrolamento 19 é excitado antes das bordas do sinal do sensor de posição, espera-se que cada borda do sinal ocorra em um tempo T_{ADV} após a excitação. A janela do sensor de posição, portanto, inicia na excitação e tem um comprimento maior do 35 que o tempo de avanço, T_{ADV} . De preferência, a janela do sensor de posição tem um comprimento que corresponde à soma do tempo de avanço, T_{ADV} , e um quarto do tempo de semiciclo, T_{HALF_CYCLE} . Isso, então, proporciona uma janela suficientemente estreita

em que se pode detectar de maneira confiável a próxima borda do sinal do sensor de posição. Evidentemente, a janela do sensor de posição pode ser maior ou menor. No entanto, à medida que a janela de posição diminui de tamanho, o risco de perder uma borda autêntica do sinal aumenta, principalmente se houver desequilíbrio significativo no ciclo de atividade do sinal do sensor de posição (ver abaixo). À medida que a janela de posição aumenta, o risco de detectar uma borda falsa aumenta. Logo, o sensor de posição, de preferência, não é maior do que a soma do tempo de avanço e metade do tempo de semiciclo.

Além de gerar bordas falsas, o ciclo de atividade do sinal do sensor de posição pode não ser equilibrado. Se o tempo de semiciclo for determinado a partir do intervalo entre um único par de bordas sucessivas (isto é, um único pulso) do sinal do sensor de posição, qualquer desequilíbrio no ciclo de atividade irá resultar em um tempo de semiciclo incorreto. Uma vez que o tempo de semiciclo é usado não somente para controlar o momento em que o enrolamento 19 é excitado, mas também para aplicar os valores de correção de velocidade, qualquer erro no tempo de semiciclo pode afetar adversamente o desempenho do sistema do motor 5. Logo, a fim de reduzir o erro no tempo de semiciclo, o controlador de acionamento 16 obtém o tempo de semiciclo mediante o cálculo da média do intervalo entre as bordas sucessivas para uma pluralidade de pulsos do sinal do sensor de posição. Por exemplo, o controlador de acionamento 16 pode obter o tempo de semiciclo mediante o cálculo da média do intervalo entre as bordas sucessivas para os quatro pulsos anteriores do sinal do sensor de posição. Mediante o cálculo da média do intervalo entre as bordas sucessivas para uma pluralidade de pulsos, qualquer variação no tempo de semiciclo é reduzida significativamente.

Além disso, o controlador de acionamento 16 excita o enrolamento 19 em resposta às bordas de subida ou às bordas de descida, mas não a ambas, do sinal do sensor de posição. O controlador de acionamento 16, então, calcula os tempos de acionamento para ambas as metades de cada ciclo elétrico em resposta a uma única borda, isto é, de subida ou descida, mas não ambas. Em particular, o controlador de acionamento 16 calcula o tempo de desvio de acionamento para o primeiro semiciclo, T_DRIVE_OFF , da maneira descrita acima, isto é, usando o tempo de semiciclo, o tempo de avanço e o tempo de giro em roda livre. O tempo de desvio de acionamento para o segundo semiciclo, $T_DRIVE_OFF_2$, é então obtido mediante a adição do tempo de semiciclo ao tempo de desvio de acionamento do primeiro semiciclo:

$$T_DRIVE_OFF_1 = T_HALF_CYCLE - T_ADV - T_FREE$$

$$T_DRIVE_OFF_2 = T_DRIVE_OFF_1 + T_HALF_CYCLE$$

Uma vez que o controlador de acionamento 16 atua em resposta apenas a uma única borda, o controlador de acionamento 16 é menos sensível a qualquer desequilíbrio no ciclo de atividade do sinal do sensor de posição. Logo, o desempenho do sistema do motor

5 não é afetado adversamente pelo desequilíbrio do ciclo de atividade.

Ajuste Fino Pós-Montagem

Após a montagem do sistema de motor 5, há tolerâncias que podem afetar adversamente o desempenho do sistema de motor 5. Consequentemente, após a montagem, o sistema de motor 5 é submetido ao ajuste fino.

O controlador de corrente 15 assegura que a corrente dentro do enrolamento 19 não exceda um limiar. Isso, então, impede a desmagnetização do rotor 17 e protege as chaves Q1-Q4 do inversor 11. No entanto, várias tolerâncias de componentes afetam o nível de corrente em que o controlador de corrente 15 gera o sinal de sobrecorrente. Por exemplo, o sensor de corrente 14 tem uma tolerância na resistência do resistor de sentido R1, e, portanto, a tensão distribuída à entrada do controlador de corrente 15 tem uma variação. Além disso, há uma tolerância no nível de tensão da tensão de referência usada pelo controlador de corrente 15. Além disso, há uma tolerância na tensão de desvio de entrada do comparador 25 e na corrente de fuga de entrada. No todo, a pilha de tolerância no limiar de corrente pode chegar a $\pm 20\%$. Essa tolerância é muito grande para assegurar que o motor 8 opere de maneira eficiente sem potencialmente desmagnetizar o rotor 17 ou danificar as chaves Q1-Q4 do inversor 11. Logo, após a montagem do sistema de controle 9, o controlador de corrente 15 recebe ajuste fino para retificar as tolerâncias dos componentes.

A saída do inversor 11 é conectada a uma carga indutiva que se assemelha ao motor 8. Um sensor de corrente externo mede com precisão a corrente através da carga indutiva. O módulo PWM 27 é carregado com um ciclo de atividade relativamente baixo, e a carga indutiva é excitada. À medida que aumenta a corrente na carga indutiva, o controlador de corrente 15 gera o sinal de sobrecorrente para reduzir a corrente. Uma vez que o módulo PWM 27 é carregado com um ciclo de atividade relativamente baixo, a corrente é reduzida em um nível abaixo do limiar de corrente ideal. O sensor de corrente externo mede precisamente o nível de corrente em que o sinal de sobrecorrente foi gerado. O ciclo de atividade do módulo PWM 27 é então aumentado e o processo é repetido. Por fim, o controlador de corrente 15 gera o sinal de sobrecorrente em um limiar de corrente ideal. Nesse momento, o valor do ciclo de atividade é gravado no dispositivo de memória 28 do controlador de corrente 15 como um fator de escalonamento.

O controlador de corrente 15, portanto, passa por ajuste fino de modo que um sinal de sobrecorrente seja gerado sempre que a corrente no enrolamento 19 exceder um limiar bem definido, independente das tolerâncias dos componentes. Mediante o emprego de um sensor de corrente externo preciso e de uma resolução fina para o ciclo de atividade do PWM, o limiar em que o sinal de sobrecorrente é gerado pode ser controlado precisamente. Sendo assim, obtém-se controle rígido sobre a corrente no enrolamento 19 sem a necessidade de componentes caros e de alta tolerância. De fato, o uso de um módulo PWM 27

constitui um meio simples e eficaz para a geração de uma tensão limiar.

Após a montagem do sistema de motor 5, há uma tolerância associada ao alinhamento do sensor de posição 13 em relação ao motor 8. Essa tolerância resulta em uma diferença de fase entre a posição detectada do rotor 17, como fornecida pelo sinal do sensor de posição, e a posição real do rotor 17. Isso, por sua vez, se traduz em uma diferença de fase entre as bordas do sinal do sensor de posição e as passagens por zero da força contra-eletromotriz no enrolamento 19. Após a montagem do motor 8, o motor 8 é acionado a uma velocidade de 49,5 krpm. Essa velocidade corresponde à metade da velocidade nominal (isto é, 99 krpm) para o mapa de potência de 167 W. A energia para o motor 8 é então interrompida e a força contra-eletromotriz no enrolamento 19 é medida e comparada com as bordas do sinal do sensor de posição. A diferença de tempo entre as bordas do sinal do sensor de posição e as passagens por zero da força contra-eletromotriz fornece uma medida da diferença de fase a 49,5 krpm. A diferença de tempo a 49,5 krpm é então escalonada para a velocidade nominal de mapa de potência e armazenada no dispositivo de memória 30 do controlador de acionamento 16 como um desvio de sensor de posição, T_POS_OFFSET. Então, por exemplo, a diferença de tempo a 49,5 krpm é duplicada para fornecer o desvio do sensor de posição para o mapa de potência de 167 W, enquanto que a diferença de tempo é multiplicada por 79,0/49,5 para fornecer o desvio do sensor de posição para o mapa de potência de 83 W. O controlador de acionamento 16, portanto, armazena um desvio do sensor de posição para cada mapa de potência. Além do mais, o desvio do sensor de posição corresponde a uma diferença de tempo entre as bordas do sinal do sensor de posição, e as passagens por zero da força contra-eletromotriz quando o motor 8 opera à velocidade nominal para o mapa de potência correspondente (vide a Tabela 5).

Ao operar no “Modo de Operação Normal”, o controlador de acionamento 16 usa o desvio do sensor de posição, T_POS_OFFSET, para corrigir o tempo de desvio de acionamento, T_DRIVE_OFF:

$$T_DRIVE_OFF = T_HALF_CYCLE - T_ADV - T_FREE - T_POS_OFFSET$$

Consequentemente, a excitação do enrolamento 19 é melhor sincronizada com a posição do rotor 17, e, portanto, com a força contra-eletromotriz, resultando em um sistema de motor 5 mais poderoso e eficiente.

A diferença de fase entre as bordas do sinal do sensor de posição e as passagens por zero da força contra-eletromotriz, quando expressa como um intervalo de tempo, diminui com a velocidade do motor 8. Então, de preferência, o controlador de acionamento 16 corrige o tempo de desvio de acionamento por uma quantidade que varia com a velocidade do motor 8. No entanto, mediante o uso de um tempo fixo para o desvio do sensor de posição, os cálculos realizados pelo controlador de acionamento 16 são simplificados consideravelmente. Em particular, o controlador de acionamento 16 não precisa calcular qual correção

de tempo deve ser aplicada com base na velocidade do motor 8. Como resultado, o número de instruções executadas pelo controlador de acionamento 16 é reduzido, e, portanto, pode-se empregar um processador 30 relativamente simples e barato. O resultado disso é que o sistema de motor 5 é otimizado para a velocidade nominal de cada mapa de potência.

5 Ao operar em outros modos além do “Modo de Operação Normal”, a velocidade do motor é suficiente baixa, logo, é improvável que qualquer diferença de fase entre as bordas do sinal do sensor de posição e as passagens por zero da força contra-eletromotriz tenha impacto significativo sobre o desempenho do sistema de motor 5. Além disso, o tempo gasto pelo sistema de motor 5 nos modos de aceleração é relativamente curto. Sendo assim, ape-
10 sar da correção simplificada, o desempenho do sistema de motor 5 não é afetado adversamente.

 A faixa de velocidades de operação para cada mapa de potência é relativamente estreita em comparação com a faixa de velocidade completa do sistema de motor 5. Em particular, a faixa de velocidades operacionais (velocidade mínima à velocidade máxima da
15 Tabela 5) para cada mapa de potência não é maior do que 20% da faixa de velocidades completa (zero à velocidade máxima). Consequentemente, a discrepância entre o desvio do sensor de posição e a diferença de fase em cada extremidade da faixa operacional é relativamente pequena, e, portanto, atinge-se um desempenho relativamente satisfatório ao longo de toda a faixa operacional usando o desvio do sensor de posição de tempo fixo.

20 Mediante o emprego de um desvio do sensor de posição para corrigir o desalinhamento do sensor de posição, é possível obter a sincronização precisa entre as bordas do sinal do sensor de posição e as passagens por zero da força contra-eletromotriz para um rotor relativamente pequeno, por exemplo, com um diâmetro de 10 nm ou inferior. Logo, pode-se realizar um sistema de motor compacto de alta velocidade 5.

25 Após a fabricação e a montagem do sistema de motor 5, há tolerâncias na indutância e na força contra-eletromotriz do motor 8. Por exemplo, as tolerâncias na geometria dos pólos do estator 18 e no entreferro influenciam a indutância do enrolamento 19, ao passo que as tolerâncias nas propriedades magnéticas do rotor 17, bem como a geometria do entreferro, influenciam a força contra-eletromotriz no enrolamento 19. A indutância e a força
30 contra-eletromotriz do motor 8 pode variar em até $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$. Consequentemente, a potência de saída dos diferentes sistemas de motor 5 podem variar, embora o mesmo sistema de controle 9 seja usado para acionar o motor 8.

 Após a montagem do sistema de motor 5, os mapas de potência empregados pelo controlador de acionamento 16 são ajustados finamente de modo que a mesma potência de
35 saída, ou similar, seja alcançada para cada sistema de motor 5, independente das tolerâncias na indutância e na força contra-eletromotriz. O sistema de motor 5 é ajustamento finalmente por um sistema de ajuste fino externo que armazena uma pluralidade de mapas de

potência. Cada mapa de potência armazenado pelo sistema de ajuste fino compreende tempos de avanço e tempos de giro em roda livre que acionam um motor nominal (isto é, que possui uma indutância nominal e força contra-eletromotriz nominal) a uma potência de saída diferente. O sistema de ajuste fino armazena cada um dos mapas de potência listados na Tabela 2, isto é, os mapas de potência que acionam o motor nominal em 83 W, 96 W, 107 W, 136 W e 167 W. Para cada um desses mapas de potência de base, o sistema de ajuste fino adicionalmente armazena mapas de potência que acionam o motor nominal a uma potência de saída nominal e a uma potência de saída inferior. Cada mapa de base e os respectivos mapas de potência adicionais acionam o motor nominal em níveis distintos de potência de energia que são separados por uma quantidade predeterminada. Para os fins da presente descrição, partiremos do pressuposto de que, para cada mapa de base, o sistema de ajuste fino armazena um único mapa de potência alto que aciona o motor a uma potência de saída maior e um único mapa de potência inferior que aciona o motor a uma saída inferior. Além do mais, o mapa de alta potência, o mapa de potência de base e o mapa de potência baixa são separados por 4 W. Consequentemente, para o mapa de potência de base de 167 W, o sistema de ajuste fino adicionalmente armazena um mapa de potência de 163 W, e um mapa de potência de 171 W. Para o mapa de potência de 136 W, o sistema de ajuste fino adicionalmente armazena mapas de potência de 132 W e 140 W, e assim por diante.

O sistema de motor 5 recebe ajuste fino mediante o carregamento de mapas de potência de base no dispositivo de memória 30 do controlador de acionamento 16. O sistema de motor 5 é então acionado com o mapa de potência de 167 W usando uma fonte de alimentação de 17 V CC. A potência de entrada do sistema de motor 5 é então medida. A potência de entrada para o mapa de potência de 167 W deve ser em torno de 190 W para uma tensão de ligação CC de 17 V, vide a Tabela 4. Se a energia de entrada medida for menor do que 188 W, o controlador de acionamento 16 é carregado com o conjunto de mapas de alta potência. Como resultado, o sistema de motor 5 é acionado a uma potência superior (4 W a mais de potência) de modo a compensar a diferença de potência. Inversamente, se a potência de entrada medida for maior do que 192 W, o controlador de acionamento 16 é carregado com o conjunto de mapas de baixa potência. Como resultado, o sistema de motor 5 é acionado a uma potência inferior (4 W a menos de potência) de modo a compensar a diferença de potência. Logo, um conjunto diferente de mapas de potência é carregado no controlador de acionamento 16 de modo a compensar quaisquer diferenças na potência de entrada do sistema de motor 5. Como resultado, a mesma potência de saída, ou similar, pode ser obtida para diferentes motores 8 com diferentes indutâncias e forças contra-eletromotrizes.

Mediante o emprego de uma pluralidade de mapas de potência que são separados

por 4 W, a potência do sistema de motor 5 pode ser ajustada finamente para dentro de ± 2 W. Será, evidentemente, apreciado que a separação dos mapas de potência pode ser diminuída de modo a obter menor tolerância na potência do sistema de motor 5.

5 O processo de ajuste fino tem o benefício particular de que não há a necessidade de medir a indutância ou a força contra-eletromotriz do motor 8. Além do mais, mediante a medição da potência do sistema de motor 5 à medida que é acionado e então consequentemente compensado, o processo de ajuste fino também é capaz de compensar a reação do induzido.

10 Enquanto que o sistema de ajuste fino mede a potência de entrada do sistema de motor 5, a potência de saída pode alternativamente ser medida. No entanto, geralmente é mais fácil medir a potência de entrada do sistema de motor 5.

Em vez de carregar o conjunto de mapas específico, acionar o motor 8 e medir a potência do motor 8, o sistema de motor 5 pode ser finamente ajustado por meio da medição de um parâmetro diferente do motor 8. O parâmetro medido é então comparado com o
15 de um motor nominal e, com base na comparação, um da pluralidade de mapas de potência armazenados pelo sistema de ajuste fino é carregado no controlador de acionamento 16. Por exemplo, a força contra-eletromotriz do motor 8 pode ser medida e comparada com um valor de força contra-eletromotriz nominal (isto é, a força contra-eletromotriz para o motor nominal). Se a força contra-eletromotriz medida corresponder á força contra-eletromotriz
20 nominal, os mapas de potência de base são carregados no controlador de acionamento 16. Senão, um conjunto diferente de mapas de potência é carregado no controlador de acionamento 16, que leva em conta a diferença na força contra-eletromotriz. Logo, é possível obter uma potência de saída e um desempenho mais constante para diferentes motores, independente da tolerância na força contra-eletromotriz. Como observado acima, a força contra-
25 eletromotriz é medida enquanto se obtém o desvio do sensor de posição. Logo, a força contra-eletromotriz do motor 8 pode ser medida sem a necessidade de nenhum processo adicional.

Mediante o controle do ângulo de avanço e do ângulo de roda livre em resposta às alterações tanto na tensão de excitação quanto na velocidade, o sistema de controle 9 é
30 capaz de acionar o motor 8 a uma potência de saída constante ao longo de uma faixa de tensões de excitação e velocidades do motor. No presente contexto, deve-se entender a potência de saída constante como uma variação na potência de saída do motor 8 de não mais do que $\pm 5\%$.

O sistema de controle 9 aciona o motor 8 não apenas a uma potência de saída
35 constante, mas também a uma eficiência relativamente alta (isto é, a razão de potência de saída para potência de entrada). Mediante o controle do ângulo de avanço e do ângulo de roda livre em resposta às alterações tanto na tensão de excitação quanto na velocidade, é

possível alcançar uma eficiência de pelo menos 75% ao longo da faixa de tensões de excitação e velocidades do motor. De fato, para os mapas de potência listados na Tabela 2, é possível alcançar uma eficiência de pelo menos 80%. Por exemplo, como pode ser visto nas figuras para potência de entrada e saída listadas na Tabela 4, é possível obter uma eficiência em torno de 88% com os ângulos de avanço e giro em roda livre do mapa de potência de 167 W.

A faixa de tensões de excitação ao longo da qual se obtém potência de saída constante e/ou alta eficiência é relativamente ampla. Para o módulo de bateria de 6 células, a faixa de tensão de excitação é de 16,8 a 23,0 V, enquanto que para o módulo de baterias de 4 células, a faixa de tensão de excitação é de 11,2 a 14,8. Para ambas as faixas de tensão, a tensão mínima é menor do que 80% da tensão máxima. Isso representa uma faixa relativamente grande ao longo da qual se obtém potência de saída constante e/ou alta eficiência. Logo, o sistema de controle 9 é especialmente adequado para uso no acionamento de um motor de um produto alimentado à bateria, em que a tensão de excitação varia à medida que a bateria descarrega.

Embora cada faixa de velocidades de operação seja relativamente estreita em comparação com a faixa de velocidades completa, cada faixa de velocidades de operação, contudo, abarca pelo menos 10 krpm (Tabela 5). Além do mais, a velocidade mínima para cada faixa de velocidades de operação é maior do que 60 krpm, ao passo que a velocidade máxima para cada faixa de velocidades de operação é maior do que 80 krpm. De fato, para o mapa de potência de 167 W, a velocidade máxima da faixa de velocidades de operação é maior do que 100 krpm. Acima dessa espécie de faixa de velocidades, surgiriam grandes diferenças na potência de saída sem o controle oferecido pelo sistema de controle. Além do mais, a eficiência nessas velocidades relativamente altas geralmente seria insatisfatória sem o controle fornecido pelo sistema de controle.

Com o sistema de controle 9, um motor de ímã permanente de fase única 8 pode ser acionado a velocidades relativamente altas, e em particular, a velocidades superiores a 60 krpm. Além do mais, atingem-se velocidades altas a uma eficiência relativamente alta. De fato, como se pode observar na Tabela 4, é possível atingir velocidades superiores a 100 krpm para uma potência de entrada menor do que 200 W. Logo, é possível atingir altas velocidades com uma eficiência relativamente alta sem a necessidade de enrolamentos de fase adicionais, o que aumentaria o custo e o tamanho do motor.

O sistema de controle 9 emprega três modos de operação diferentes que, coletivamente, atingem o desempenho uniforme e eficiente do motor 8.

Quando opera no “Modo de Aceleração em Baixa Velocidade”, o enrolamento 19 é excitado em sincronia com as passagens por zero da força contra-eletromotriz no enrolamento 19. A essas velocidades relativamente baixas, a força contra-eletromotriz no enrola-

mento 19 é relativamente pequena e não impacta na capacidade de conduzir corrente, e, portanto, energia, ao enrolamento 19. No entanto, ao excitar o enrolamento 19 em sincronia com a força contra-eletromotriz, o controle necessário para acionar o motor 8 pode ser mantido relativamente simples.

5 Enquanto opera no “Modo de Aceleração em Alta Velocidade”, a grandeza da força contra-eletromotriz começa a influenciar a capacidade de conduzir corrente ao enrolamento 19. Ao excitar a corrente 19 antes da força contra-eletromotriz, a corrente é conduzida ao enrolamento em um estágio anterior. Consequentemente, mais energia é conduzida ao motor 8. Mediante a excitação do enrolamento 19 antes da força contra-eletromotriz por um
10 período de tempo fixo, o enrolamento 19 é excitado anteriormente à força contra-eletromotriz por um ângulo que aumenta com a velocidade do rotor. Consequentemente, à medida que o motor 8 acelera, a corrente é acionada ao enrolamento 19 em um estágio cada vez mais anterior, e, dessa forma, mais energia é conduzida ao enrolamento 19. Além disso, mediante o emprego de um tempo de avanço fixo, o controle necessário para acionar
15 o motor 8 é relativamente simples.

Enquanto opera no “Modo de Operação Normal”, a grandeza da força contra-eletromotriz afeta consideravelmente a capacidade de conduzir corrente ao enrolamento 19. Como no “Modo de Aceleração em Alta Velocidade”, o enrolamento 19 é excitado antes da força contra-eletromotriz de modo que a corrente seja acionada ao enrolamento 19 em um
20 estágio anterior. Contudo, as alterações na velocidade do motor 8 influenciam a grandeza da força contra-eletromotriz, e, portanto, a potência de saída do motor 8. Logo, mediante a variação do tempo de avanço em resposta às alterações na velocidade, a potência de saída do motor 8 pode ser melhor controlada. Em particular, o tempo de avanço pode ser aumentado com o aumento da velocidade do motor. O aumento na força contra-eletromotriz é então
25 compensado pela corrente sendo conduzida ao enrolamento 19 em um estágio anterior. Como resultado, pode-se obter a mesma potência de saída, ou similar, independente das alterações na velocidade.

O sistema de controle 9, portanto, emprega diferentes modos de operação que atuam para acelerar o motor 8 de maneira uniforme e eficiente até a velocidade de operação, e
30 então acionar o motor 8 a uma potência de saída constante.

Na concretização descrita acima, cada mapa de potência armazena um tempo de avanço para cada uma dentre uma pluralidade de tensões. No entanto, em vez de armazenar os tempos de avanço, cada mapa de potência pode, em vez disso, armazenar a soma do tempo de avanço e do tempo de giro em roda livre. Isso, então, simplifica o cálculo do
35 tempo de desvio de acionamento, T_DRIVE_OFF, que é diretamente proporcional à soma do tempo de avanço e do tempo de giro em roda livre obtidos do mapa de potência. Como alternativa, uma vez que o tempo de semiciclo, T_HALF_CYCLE, em cada velocidade nomi-

nal, é conhecido (por exemplo, 303,03 μ s a 99 krpm, 320,86 μ s a 93,5 krpm, e assim por diante), cada mapa de potência pode, no lugar disso, armazenar um tempo de desvio de acionamento, em vez de um tempo de avanço, para cada um da pluralidade de níveis de tensão. Isso, então, simplifica os cálculos realizados pelo controlador de acionamento 16.

5 Além do mais, como observado acima, em vez de armazenar tempos de avanço e tempos de giro em roda livre, o mapa de potência poderia, como alternativa, armazenar ângulos de avanço e ângulos de giro em roda livre. Logo, em um sentido mais geral, cada mapa de potência armazena um primeiro valor de controle e um segundo valor de controle para cada um de uma pluralidade de níveis de tensão. O primeiro valor de controle é então proporcio-
10 nal a um ângulo de avanço e é usado para controlar o ângulo ou momento em que o enrolamento 19 é excitado. O segundo valor de controle é então proporcional a um ângulo de giro em roda livre e controla o ângulo ou tempo durante o qual o enrolamento 19 é girado em roda livre. O controlador de acionamento 16, então, excita o enrolamento 19 antes da passagem por zero da força contra-eletromotriz em um tempo definido pelo primeiro valor de
15 controle, e gira em roda livre o enrolamento 19 por um tempo definido pelo segundo valor de controle. Os mapas de correção de velocidade, então, armazenam valores de correção de velocidade apropriados para corrigir o primeiro valor de controle e o segundo valor de controle. Em particular, o mapa de correção de velocidade de avanço armazena valores de correção de velocidade que são aplicados ao primeiro valor de controle, e o mapa de correção
20 de velocidade de giro em roda livre armazena valores de correção de velocidade que são aplicados ao segundo valor de controle.

Na concretização descrita acima, cada mapa de potência armazena valores de controle que têm sua velocidade corrigida usando os valores de correção armazenados em um mapa de correção de velocidade. O armazenamento dos valores de correção tem o benefí-
25 cio de reduzir os requisitos gerais de memória. Em particular, cada valor de correção é menor do que um valor de controle correspondente. Contudo, em vez de armazenar um mapa de potência e dois mapas de correção de velocidade para cada nível de potência de saída, o controlador de acionamento 16 poderia, como alternativa, armazenar dois mapas mestres, cada um armazenando um valor de controle para cada uma de uma pluralidade de velocidades de excitação.
30

Na concretização descrita acima, tanto o tempo de avanço quanto o tempo de giro em roda livre têm sua velocidade corrigida. No entanto, a potência de saída constante ao longo de cada faixa de velocidades de operação poderia ser igualmente alcançada fixando-se um dentre o tempo de avanço e o tempo de giro em roda livre e variando o outro. Uma
35 vez que o enrolamento 19 é girado em roda livre durante um período de queda da força contra-eletromotriz, a potência de saída do sistema de motor 5 é mais sensível a alterações no tempo de avanço. Logo, dos dois, o tempo de giro em roda livre é preferencialmente manti-

do fixo e o tempo de avanço tem sua velocidade corrigida. Mediante a fixação do tempo de giro em roda livre, os cálculos realizados pelo controlador de acionamento 16 são adicionalmente simplificados. Além disso, o mapa de correção de velocidade de giro em roda livre pode ser omitido para cada mapa de potência, reduzindo assim os requisitos de memória do controlador de acionamento 16. Embora o tempo de giro em roda livre possa ser fixo para diferentes velocidades, o ângulo de giro em roda livre correspondente não é. Isso ocorre porque o ângulo elétrico para um período de tempo fixo varia com a velocidade do motor 8.

Cada mapa de potência armazena valores de controle que são calculados com base em uma velocidade nominal para o motor 8. Os valores de correção de velocidade são então aplicados aos valores de controle caso a velocidade do motor divirja da velocidade nominal. Além do mais, o desvio do sensor de posição para cada mapa de potência corresponde a uma diferença de tempo entre as bordas do sinal do sensor de posição, e as passagens por zero da força contra-eletromotriz quando o motor 8 opera à velocidade nominal. Logo, o sistema de controle 9 é otimizado para operação à velocidade nominal dentro de cada faixa de velocidades de operação. A velocidade nominal pode, portanto, ser escolhida de modo a otimizar o desempenho do produto 1. Por exemplo, a velocidade nominal pode corresponder a uma velocidade à qual o motor 8 opera predominantemente. Como alternativa, ou em adição, a velocidade nominal pode corresponder a uma velocidade em que se atinge o pico de desempenho para o produto 1. Por exemplo, como ilustra a Figura 8, o produto 1 pode ser um aspirador de pó para o qual ocorrem picos de airwatts em uma velocidade específica dentro de cada faixa de velocidades de operação. A velocidade nominal para cada mapa de potência, então, corresponde à velocidade à qual o pico de airwatts é atingido.

Os tempos de avanço, tempos de giro em roda livre e valores de correção de velocidade específicos listados nas Tabelas 4 a 7 são apresentados apenas a título de exemplo. Os valores de controle e valores de controle de velocidade específicos necessários para atingir a potência de saída constante dependerão das características específicas do motor 8. Os ângulos de avanço e giro em roda livre para um motor específico são obtidos da simulação que gera o melhor desempenho (por exemplo, melhor eficiência) para o motor à potência de saída desejada dentro das restrições do sistema de controle. Dentro da simulação, podem ser colocadas restrições sobre o comportamento do ângulo de avanço e do ângulo de giro em roda livre. Por exemplo, o ângulo de avanço pode ter seu aumento restringido e o ângulo de giro em roda livre pode ter sua diminuição restringida com a redução da tensão de excitação e/ou com o aumento da velocidade do motor.

Embora tenha sido referência à variação tanto do ângulo de avanço quanto do ângulo de giro em roda livre em resposta às alterações na tensão de excitação e na velocidade do motor, vantagens consideráveis podem ser obtidas, contudo, com a variação de apenas

um do ângulo de avanço ou do ângulo de giro em roda livre. Em particular, como já foi observado, mediante o giro em roda livre do enrolamento 19 dentro da região da força contra-eletromotriz em queda, é possível obter um sistema de motor 5 mais eficiente. Além do mais, mediante a variação do ângulo de giro em roda livre em resposta às alterações na
 5 tensão e/ou na velocidade, é possível obter melhor controle tanto da eficiência como da potência de saída do sistema de motor, independente de qualquer controle do ângulo de avanço.

Como mostra a Figura 8, o produto 1 pode assumir a forma de um aspirador de pó, em particular, um aspirador de pó portátil, tendo um acessório 4 na forma de uma barra de
 10 escovas motorizada. A potência de saída do sistema de motor 5, e, portanto, a potência de sucção do aspirador de pó então variarão de acordo com se a barra de escovas está ou não conectada ao aspirador de pó e/ou ligada. Além disso, a chave seletora de modo de potência 7 pode ser usada pelo usuário para selecionar um modo de alta potência quando uma sucção maior é necessária. Uma vez que o sistema de motor 5 mantém uma potência de
 15 saída constante ao longo de cada faixa de velocidades de operação, o aspirador de pó é capaz de manter uma sucção constante ao longo de uma faixa de cargas. Além do mais, uma vez que o sistema de motor 5 mantém a potência de saída constante em resposta às alterações na tensão de excitação, o aspirador de pó é capaz de manter a sucção constante em resposta às alterações na tensão da fonte de alimentação 2. Em particular, quando a
 20 fonte de alimentação 2 é um módulo de bateria, o aspirador de pó é capaz de manter a sucção constante à medida que o módulo de bateria descarrega.

Embora a fonte de alimentação 2 da concretização descrita acima seja uma alimentação CC, e em particular um módulo de bateria CC, a fonte de alimentação 2 poderia igualmente compreender uma alimentação CA, um retificador e um filtro para fornecer uma
 25 tensão CC. Além do mais, embora cada um dentre o motor 8 e o inversor 11 da concretização descrita acima compreenda uma única fase, o motor 8 e o inversor 11 podem compreender fases adicionais. O controlador de acionamento 16 então aciona cada fase da maneira descrita acima. Em particular, cada fase é excitada em sincronia com as passagens por zero da força contra-eletromotriz durante o “Modo de Aceleração em Baixo Velocidade”, e
 30 cada fase é sequencialmente excitada e girada em roda livre durante o “Modo de Aceleração em Alta Velocidade” e o “Modo de Operação Normal”. O sensor de posição 13 descrito acima é um sensor de efeito Hall. No entanto, sensores de posição alternativos capazes de gerar um sinal que indica a posição do rotor 17, e, portanto, as passagens por zero da força contra-eletromotriz no enrolamento 19, poderiam igualmente ser empregados, tal como um
 35 sensor óptico.

Até o momento, foi feita referência a um sistema de controle 9 que controla a operação de um motor 8. No entanto, o sistema de controle 9 poderia igualmente ser usado pa-

ra controlar a operação de um gerador ou outra máquina elétrica.

REIVINDICAÇÕES

1. Método de controlar uma máquina elétrica (8), **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

- armazenar uma pluralidade de mapas de potência, cada mapa de potência com-
- 5 prendendo valores de controle para acionar a máquina elétrica (8) em diferentes potências;
- selecionar um mapa de potência em resposta a um sinal de entrada; e
- excitar um enrolamento (19) da máquina elétrica em períodos definidos pelos valores de controle do mapa de potência selecionado.

2. Método, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que

10 cada mapa de potência compreende um primeiro valor de controle e um segundo valor de controle, e o método compreendendo sequencialmente excitar e deixar em repouso o enrolamento (19) da máquina elétrica (8), em que o enrolamento (19) é excitado antes das passagens por zero da força contra-eletromotriz no enrolamento (19) por um tempo de avanço definido pelo primeiro valor de controle, e o enrolamento (19) é deixado em repouso durante

15 um período de roda livre definido pelo segundo valor de controle.

3. Método, de acordo com a reivindicação 2, **CARACTERIZADO** pelo fato de que cada mapa de potência compreende uma tabela de pesquisa armazenando um primeiro valor de controle e um segundo valor de controle para cada um de uma pluralidade de níveis de tensão, e o método compreendendo selecionar a partir de um mapa de potência um

20 primeiro valor de controle e um segundo valor de controle de acordo com uma tensão de excitação.

4. Método, de acordo com a reivindicação 3, **CARACTERIZADO** pelo fato de que cada mapa de potência armazena valores de controle que aumentam o tempo de avanço e diminuem o tempo de roda livre com a diminuição da tensão de excitação.

25 5. Método, de acordo com as reivindicações 3 ou 4, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o método compreende monitorar periodicamente a tensão de excitação e selecionar do mapa de potência um primeiro valor de controle e um segundo valor de controle de acordo com a tensão monitorada.

6. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 5,

30 **CARACTERIZADO** pelo fato de que cada mapa de potência armazena valores de controle para acionar a máquina elétrica (8) em potência constante sobre uma faixa de tensões de excitação.

7. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 6,

CARACTERIZADO pelo fato de que cada mapa de potência armazena valores de controle

35 para acionar a máquina elétrica (8) em uma eficiência de pelo menos 75% sobre uma faixa de tensões de excitação.

8. Método, de acordo com as reivindicações 6 ou 7, **CARACTERIZADO** pelo fato

de que a faixa de tensões de excitação se estende entre uma tensão mínima e uma tensão máxima, e o nível de tensão mínima é menor que 80% da tensão máxima.

9. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 8, **CARACTERIZADO** pelo fato de que cada mapa de potência armazena valores de controle para acionar a máquina elétrica (8) sobre diferentes faixas de velocidade operacional.

10. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 2 a 9, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende aplicar um valor de correção de velocidade para pelo menos um dentre o primeiro valor de controle e o segundo valor de controle, o valor de correção de velocidade variando com a velocidade da máquina elétrica (8).

11. Método, de acordo com a reivindicação 10, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o valor de correção de velocidade varia com a velocidade da máquina elétrica (8) e com um nível de tensão de excitação.

12. Método, de acordo com a reivindicação 11, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende armazenar uma tabela de pesquisa de correção de velocidade para cada mapa de potência, e a tabela de pesquisa de correção de velocidade armazena um primeiro valor de correção de velocidade e um segundo valor de correção de velocidade para cada um de uma pluralidade de velocidades e uma pluralidade de níveis de tensão, e o método compreende selecionar, a partir da tabela de pesquisa de correção de velocidade, um primeiro valor de correção de velocidade e um segundo valor de correção de velocidade de acordo com a velocidade da máquina elétrica (8) e com o nível da tensão de excitação, aplicar o primeiro valor de correção de velocidade ao primeiro valor de controle e aplicar o segundo valor de correção de velocidade ao segundo valor de controle.

13. Método, de acordo com a reivindicação 12, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a tabela de pesquisa de correção de velocidade armazena valores de correção de velocidade de que aumentam o tempo de avanço e diminuem o tempo de roda livre com o aumento da velocidade.

14. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 13, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o sinal de entrada é pelo menos um dentre um sinal de identificação de fonte de alimentação que identifica um tipo de fonte de alimentação (2) fornecendo uma tensão de excitação, um sinal acessório que é gerado quando um acessório (4) drena potência de uma fonte de alimentação (2) fornecendo uma tensão de excitação, e um sinal de seleção de modo de potência gerado por usuário.

15. Método, de acordo com a reivindicação 14, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o método compreende selecionar um mapa de potência para acionar a máquina elétrica (8) em uma potência inferior em resposta ao sinal acessório.

16. Sistema de controle (9) para uma máquina elétrica (8), **CARACTERIZADO** pelo fato de que o sistema de controle (9) executa o método conforme definido em qualquer uma

das reivindicações 1 a 15.

17. Produto (1), **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende uma fonte de alimentação (2), uma máquina elétrica (8), e um sistema de controle (9) conforme definido na reivindicação 16.

5 18. Produto, de acordo com a reivindicação 17, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a fonte de alimentação (2) envia um sinal de identificação de fonte de alimentação que identifica o tipo de fonte de alimentação.

10 19. Produto, de acordo com a reivindicação 18, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o sinal de identificação de fonte de alimentação tem uma frequência que é única ao tipo de fonte de alimentação.

20. Produto, de acordo com qualquer uma das reivindicações 17 a 19, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende um acessório (4) que é alimentado pela fonte de alimentação (2), o acessório (4) gera um sinal acessório quando ligado, e o sinal acessório é entregue ao sistema de controle (9).

15 21. Produto, de acordo com qualquer uma das reivindicações 17 a 20, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o produto (1) compreende uma interface de usuário (3) tendo um comutador de seleção de modo de potência (7) para comutar entre um modo de potência alta e um modo de potência baixa, e o comutador de seleção de modo de potência (7) gera um sinal de seleção de modo de potência que é entregue ao sistema de controle (9).

20 22. Produto, de acordo com qualquer uma das reivindicações 17 a 21, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o produto (1) é um aspirador de pó.

25 23. Produto, de acordo com a reivindicação 22, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o aspirador de pó (1) compreende um acessório (4) na forma de uma escova motorizada e o sistema de controle (9) seleciona diferentes mapas de potência para acionar a máquina elétrica (8) em diferentes potências quando a escova motorizada é ligada e desligada.

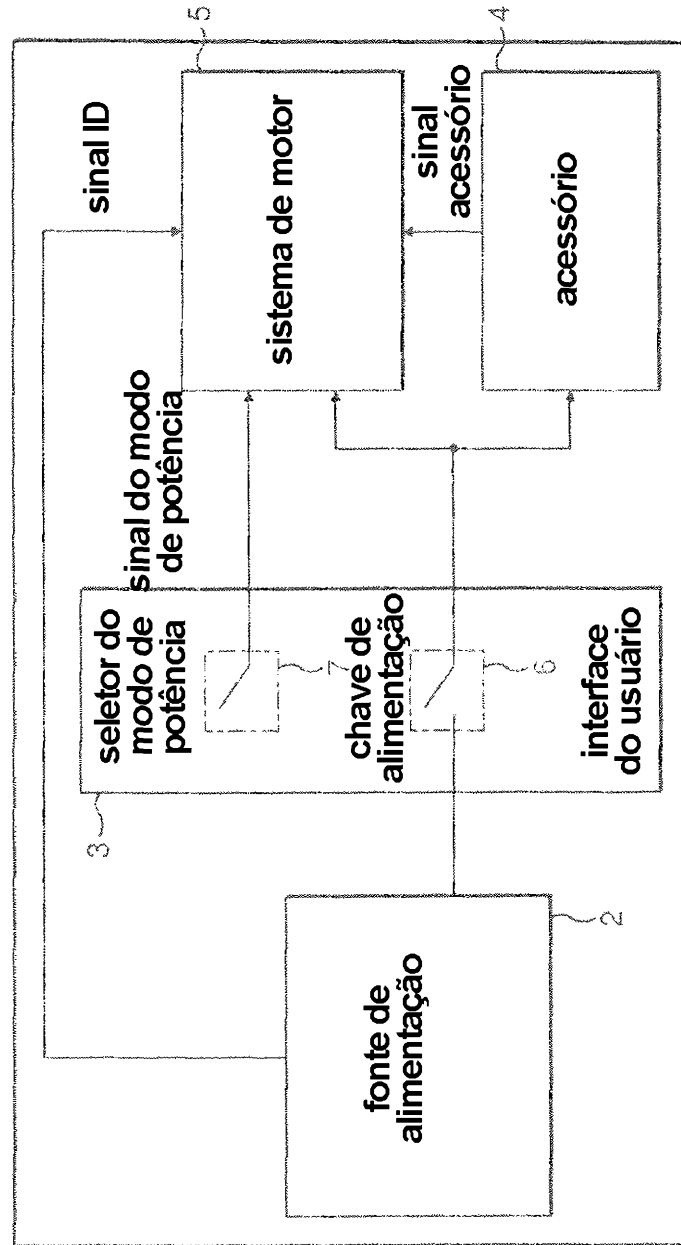


FIG. 1



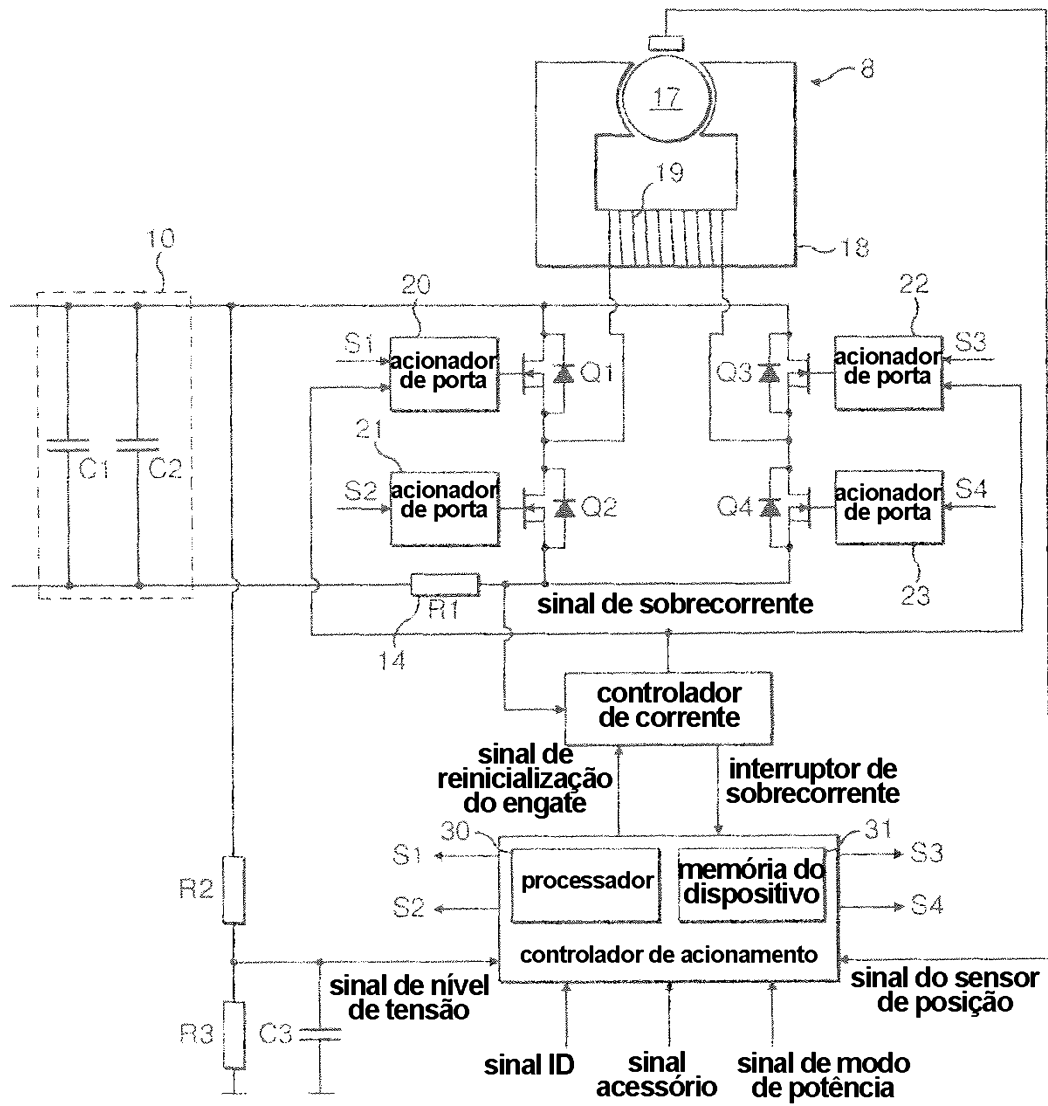


FIG. 3

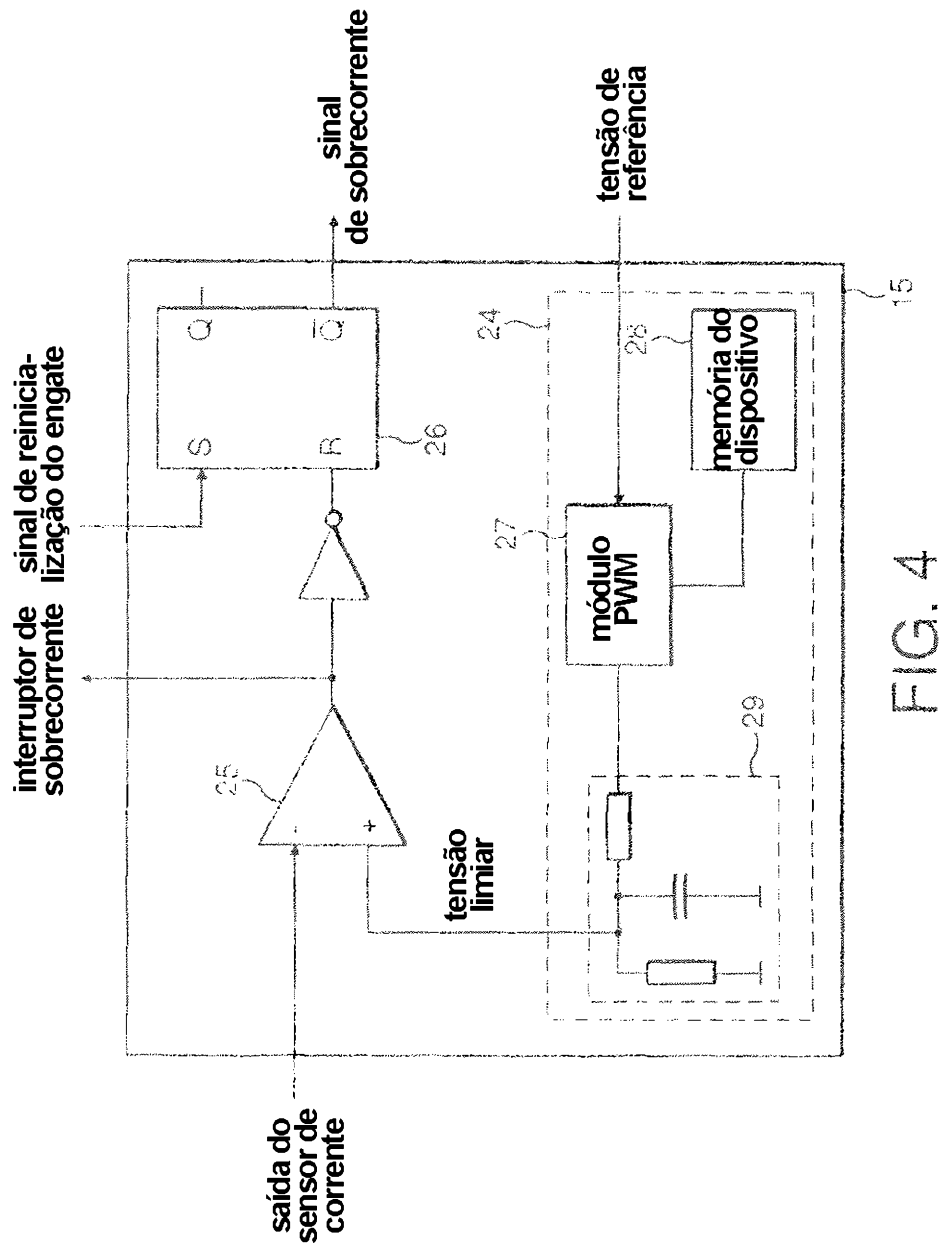


FIG. 4

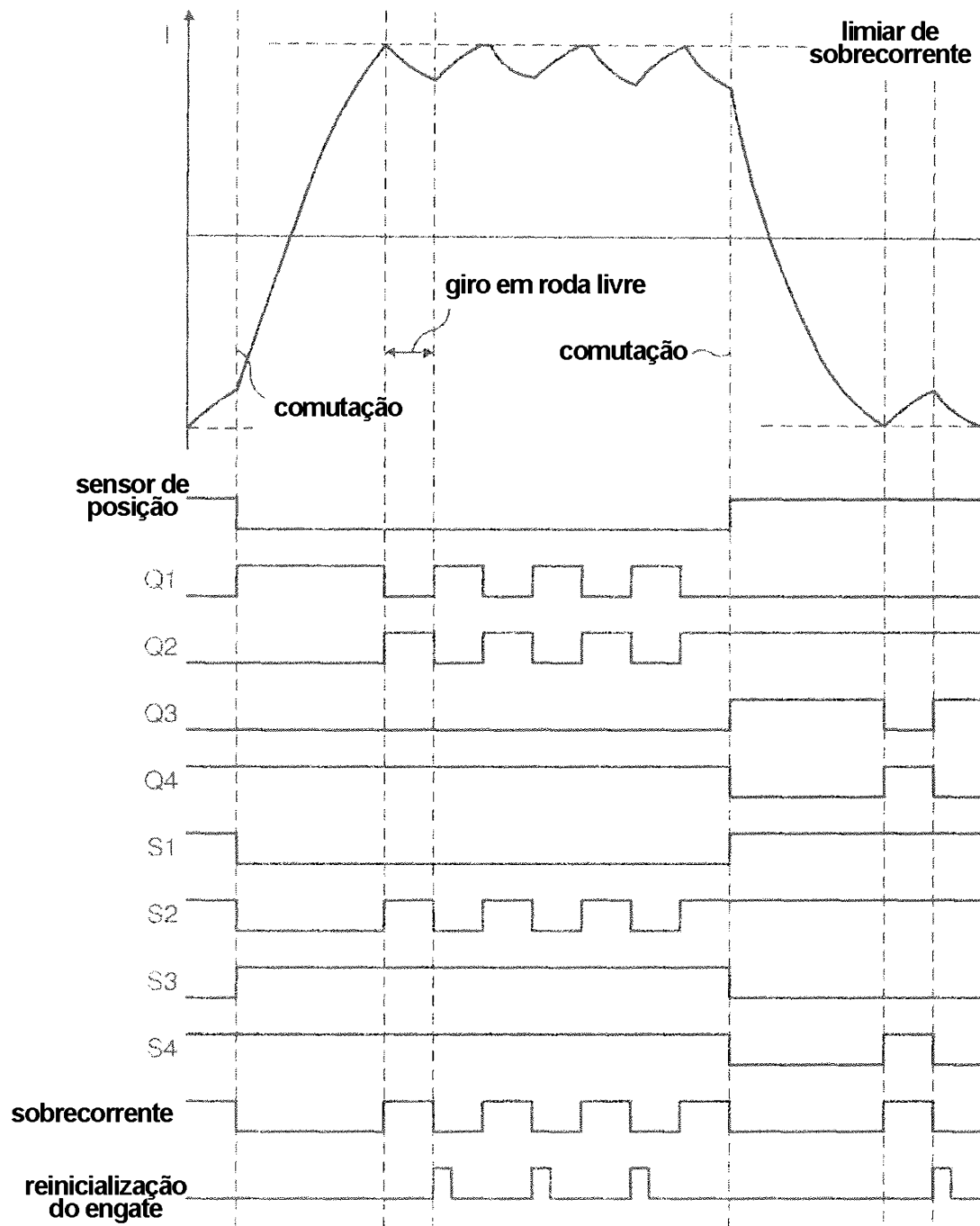


FIG. 5

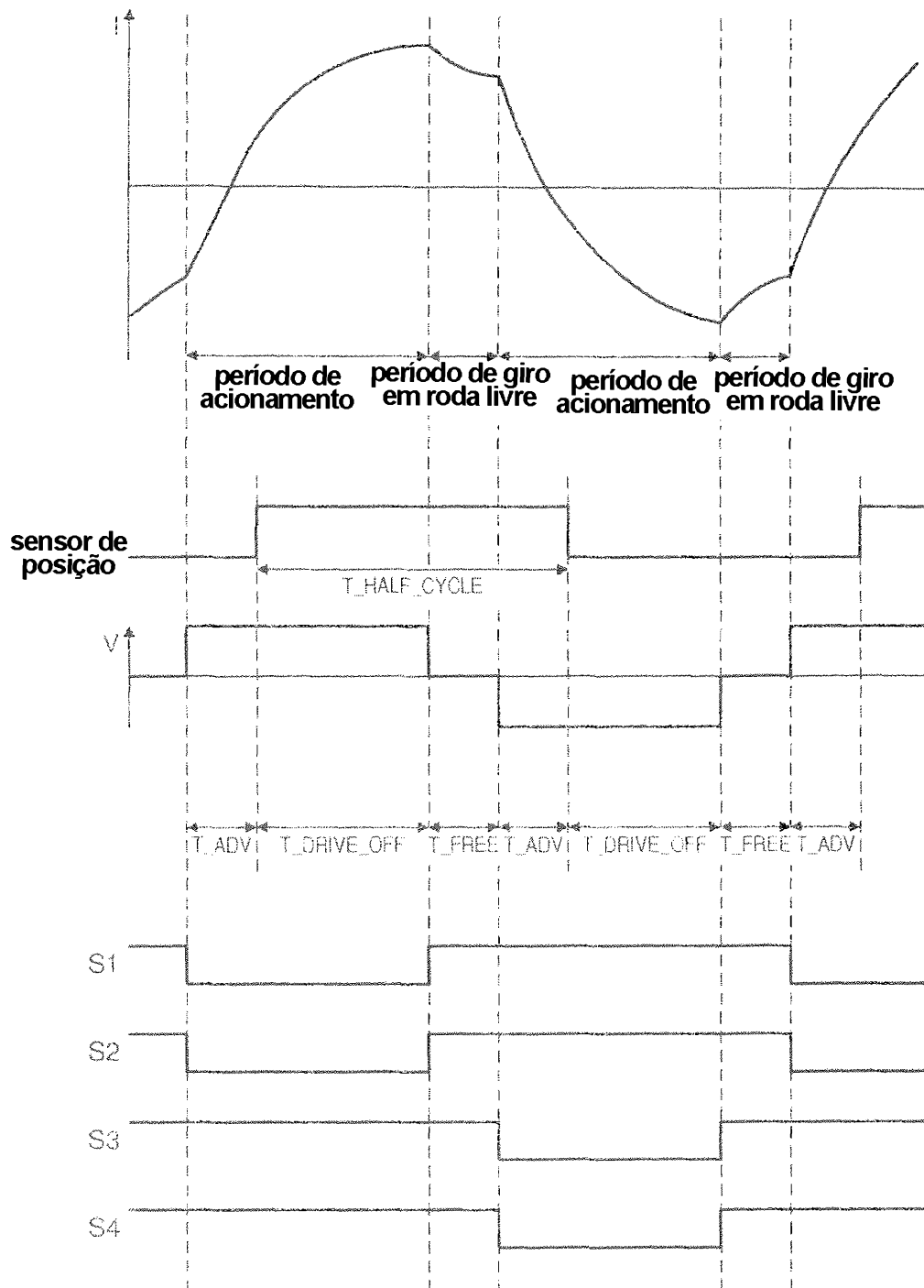


FIG. 6

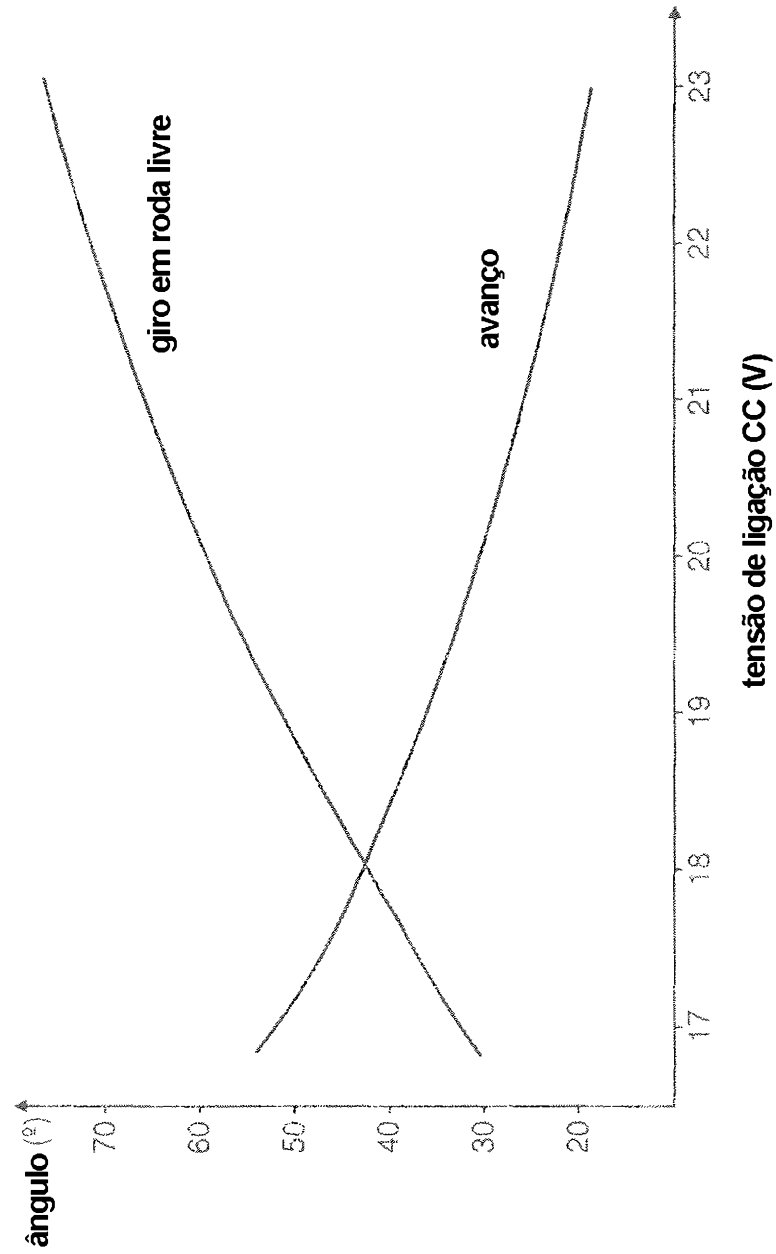


FIG. 7

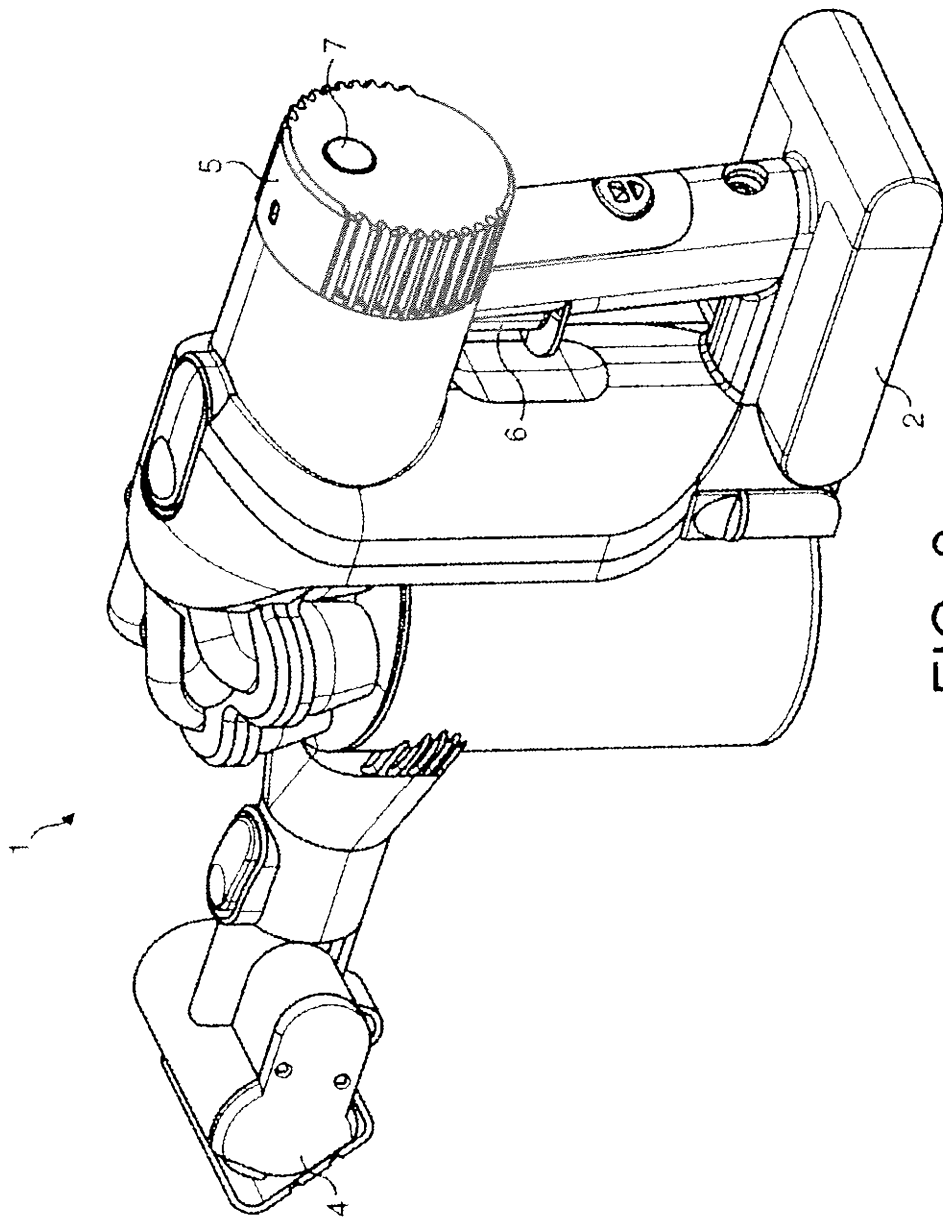


FIG. 8