

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

(21) **PI 1100750-8 A2**



(22) Data de Depósito: 24/01/2011
(43) Data da Publicação: 02/10/2012
(RPI 2178)

(51) *Int.Cl.:*
H02P 21/00

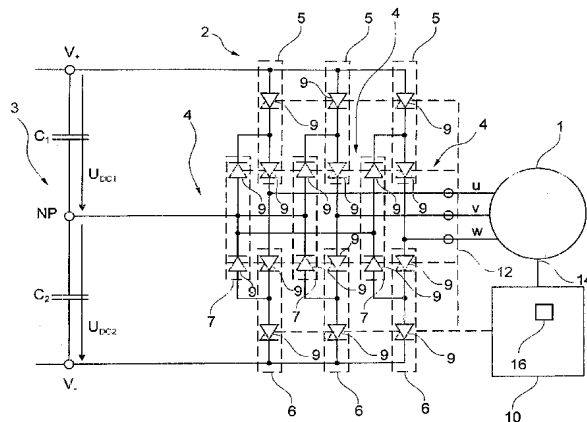
(54) **Título:** CONTROLADOR PARA UMA MÁQUINA ELÉTRICA DE ROTAÇÃO

(30) **Prioridade Unionista:** 22/01/2010 EP 10 151370.3

(73) **Titular(es):** ABB Research LTD.

(72) **Inventor(es):** Tobias Geyer

(57) **Resumo:** CONTROLADOR PARA UMA MÁQUINA ELÉTRICA DE ROTAÇÃO. A fim de minimizar as perdas de comutação em uma máquina elétrica de rotação, descreve-se um método de controle iterativo que calcula os estados de comutação ótimos antecipadamente.



Relatório Descritivo da Patente de Invenção para "**CONTROLADOR PARA UMA MÁQUINA ELÉTRICA DE ROTAÇÃO**".

Campo da Invenção

A presente invenção refere-se ao campo de métodos de operação para máquinas elétricas de rotação. Em particular, a invenção se refere a um método para a operação de uma máquina elétrica de rotação, um controlador para um conversor elétrico, um sistema de motor, um programa de computador e um meio legível por computador.

Fundamentos da Invenção

O controle direto de torque (DTC) consiste em um método para o controle do torque e do fluxo eletromagnético em motores e máquinas eletromagnéticas de rotação, em particular, na faixa de média voltagem. Um exemplo típico de tal controlador pode ser encontrado, por exemplo, no acionamento ACS 6000 junto a ABB. Durante os últimos 10 anos, o DTC tem demonstrado um alto grau de confiabilidade, robustez e desempenho.

No entanto, as perdas de comutação que são produzidas devido aos semicondutores que são comutados pelo controlador e que representam uma grande proporção ou até a maioria das perdas totais do acionamento, podem ser consideráveis no caso do DTC. Portanto, as formas de reduzir estas perdas de comutação são procuradas. Sabe-se que tal redução nas perdas de comutação podem ser alcançadas por meio do chamado controle direto de torque de modelo preditivo (MPDTC), o qual pode ter como base um modelo (matemático) do acionamento. Os documentos sob os nºs. US 7.256.561 e EP 1 670 135 descrevem tal método.

Em adição à minimização das perdas de comutação do conversor, o DTC e MPDTC também podem ser dirigidos à manutenção das três variáveis de saída da máquina elétrica de rotação, ou seja, o torque eletromagnético, a variável do fluxo do estator e o(s) potencial(is) de ponto neutro ou potencial(is) de ponto médio, dentro de limites predeterminados (histerese).

O MPDTC tem como base um algoritmo de controle que pode incluir um modelo matemático, o qual é compatível com o conversor a ser

comutado e com a máquina ou motor conectado ao mesmo. Neste caso, em particular, as sequências de comutação permissíveis do conversor sobre um horizonte de comutação específico são relacionadas e o torque, fluxo do estator e trajetórias de potencial de ponto médio de circuito intermediário correspondentes são calculados com o uso de um modelo interno do conversor e da máquina. Também existem conversores com mais do que um ponto neutro. Também existem conversores que têm outras variáveis que precisam ser reguladas, sob determinadas circunstâncias. Neste caso, estas trajetórias são extrapoladas até que um limite das respectivas variáveis de saída seja alcançado. As sequências de comutação permissíveis são avaliadas com o uso de um critério de qualidade predeterminado. Este critério de qualidade mapeia, por exemplo, as perdas de comutação ou a frequência de comutação do conversor. Em uma última etapa, é determinada uma sequência de comutação ótima que minimiza este critério de qualidade, isto é, fornece, por exemplo, perdas de comutação mínimas ou uma frequência de comutação mínima. As etapas simplesmente mencionadas são geralmente implantadas em qualquer ciclo de controle e, da sequência de comutação ótima, somente a primeira etapa (isto é, o primeiro estado de transição de comutação ou estado de comutação) é usada para o controle dos semicondutores de energia do conversor.

Sumário da Invenção

Uma redução nas perdas de comutação pode ocasionar uma diminuição significativa nos custos operacionais do acionamento. Adicionalmente, tal redução nas perdas de comutação pode resultar em um sistema mais robusto e confiável e pode estender o campo de aplicação do DTC, desde que as perdas de comutação reduzidas tornem possível operar o mesmo equipamento em uma potência maior.

O objetivo da invenção consiste em fornecer acionamentos elétricos com custos operacionais reduzidos e potência aumentada.

Este objetivo é alcançado por meio do assunto das reivindicações independentes. As modalidades adicionais da invenção são dadas nas reivindicações dependentes.

Um primeiro aspecto da invenção se refere a um método para a operação de uma máquina elétrica de rotação.

De acordo com uma modalidade da invenção, a máquina elétrica de rotação é suprida com corrente elétrica por meio de um conversor a partir de um circuito de tensão DC através de ao menos uma fase. O conversor é projetado para comutar a ao menos uma fase para ao menos dois níveis de tensão.

A máquina elétrica de rotação pode consistir em um motor elétrico ou um acionamento elétrico, a qual pode compreender o motor elétrico e o conversor. A máquina elétrica de rotação pode compreender o conversor e/ou um controlador. Em geral, uma máquina elétrica de rotação tem três fases (corrente trifásica). No entanto, também é possível que somente uma fase ou uma pluralidade de fases seja fornecida.

De acordo com uma modalidade da invenção, o método compreende as seguintes etapas: gerar as sequências de comutação, em que cada sequência de comutação compreende uma série de transições de comutação do conversor com uma primeira transição de comutação; avaliar cada uma das sequências de comutação com um valor de qualidade; selecionar a sequência de comutação com um valor de qualidade mínimo; acionar os elementos de comutação do conversor com a primeira transição de comutação da sequência de comutação selecionada conforme a transição de comutação selecionada, com o resultado em que ao menos uma fase é comutada a um nível de tensão que corresponde à transição de comutação.

Neste caso, uma transição de comutação pode ser definida através de estados de comutação dos elementos de comutação do conversor ou através de uma combinação de estados de comutação dos estados de comutação individuais. Por exemplo, uma transição de comutação compreende uma combinação de estado de comutação de elementos de comutação do conversor. Os elementos de comutação do conversor podem consistir em semicondutores de energia, por exemplo, tiristores, IGCTs ou IGBTs.

Uma sequência de comutação pode consistir, por exemplo, em

um vetor $U = [u(k), u(k+1), \dots, u(k+N-1)]$, em que as transições de comutação são definidas por meio da combinação de estado de comutação u . O u contém, para cada elemento de comutação a ser controlado, um elemento de estado de comutação que descreve o estado de comutação, isto é, 1, 0 ou -1, por exemplo. Isto pode consistir nas posições de comutação.

De acordo com uma modalidade da invenção, as sequências de comutação são geradas conforme exposto a seguir: (a) uma sequência de comutação relativamente longa é gerada a partir de uma sequência de comutação relativamente curta, em que ao menos uma transição de comutação possível é fixada à sequência de comutação relativamente curta, a fim de gerar a sequência de comutação relativamente longa; (b) as variáveis de saída da máquina elétrica, do conversor e/ou do acionamento são calculadas para a sequência de comutação relativamente longa com base nas transições de comutação na sequência de comutação relativamente longa; (c) a sequência de comutação relativamente longa é rejeitada se as variáveis de saída calculadas (ou ao menos uma variável de saída) não estiverem dentro dos limites predefinidos e/ou as variáveis de saída calculadas se movem para longe de um limite predefinido à medida que o tempo aumenta.

A sequência de comutação curta tem, por exemplo, o comprimento m e a sequência de comutação relativamente longa tem, por exemplo, o comprimento n , onde $n \geq m+1$. Se a sequência de comutação conter os elementos de intermissão, a sequência de comutação relativamente longa pode consistir em mais do que uma etapa mais longa do que a sequência de comutação curta. No entanto, o caso onde $n=m+1$ também é possível.

De acordo com uma modalidade da invenção, uma primeira sequência de comutação ou sequência de comutação de partida (com um comprimento 0) é inicializada com uma transição de comutação pré-selecionada. Neste caso, a primeira sequência de comutação consiste na sequência de comutação relativamente longa para qual as etapas (b) e (c) são implantadas.

De acordo com uma modalidade da invenção, as sequências de comutação adicionais, as quais são, em particular, mais longas do que n ,

são geradas para a sequência de comutação relativamente longa não-rejeitada de acordo com as etapas (a) a (c).

Em outras palavras, uma árvore de transições de comutação é gerada iterativamente, em que cada sequência de comutação pode ser determinada pela trajetória a partir da raiz da árvore a uma folha da árvore. As variáveis de saída a serem calculadas podem consistir, neste caso, no torque ou no fluxo da máquina elétrica de rotação ou no(s) potencial(is) de ponto médio do circuito intermediário CC no conversor ou de outro modo a(s) voltagem(ns) através de capacitâncias ou a corrente ou correntes através de bobinas do conversor. As variáveis de saída podem consistir em variáveis dependentes de tempo e são calculadas por um intervalo que começa no momento presente e alcança o futuro por um determinado tempo.

Isto é, no caso de uma máquina elétrica de rotação ou um acionamento, as perdas de comutação podem ser minimizadas com um método de controle iterativo, o qual calcula os estados de comutação ou sequências de comutação ótimas antecipadamente.

De acordo com uma modalidade da invenção, o método compreende: gerar uma sequência de comutação permissível (relativamente longa) a partir de uma sequência de comutação relativamente curta permissível mediante a fixação de transições de comutação à sequência de comutação curta por meio de um algoritmo iterativo ou recorrente. O algoritmo pode ser inicializado com uma sequência de comutação com um comprimento 0 a partir de uma transição de comutação pré-selecionada (ou a transição de comutação que é atualmente aplicada no conversor). A permissibilidade da sequência de comutação relativamente longa pode ser implantada mediante a simulação ou aproximação de ao menos uma variável de saída, a qual necessita obedecer as regras mencionadas acima, por exemplo.

Esta determinação ótima iterativa das sequências de comutação é geralmente executada por ciclo de comutação do conversor.

O algoritmo ou o método pode ser sequencialmente processado, isto é, em vez de primeiro gerar as sequências de comutação e, então, gerar as trajetórias associadas das variáveis de saída, as sequências de comuta-

ção são construídas de maneira gradual em virtude das transições de comutação permissíveis que são ramificadas ou fixadas.

Uma pilha pode ser usada para este propósito, por exemplo. Uma pilha pode consistir, neste caso, em uma memória, no qual pode ser colocado um objeto (neste caso, uma sequência de comutação) sobre a pilha por meio de uma função (inserção "Push") e o objeto superior que se encontra sobre a pilha de objeto pode ser recuperado por meio de uma função adicional (remoção "Pop"). O algoritmo pode ser implantado com uma função recorrente em conjunto com uma pilha.

De acordo com uma modalidade da invenção, o método de MPDTC ou o algoritmo de MPDTC pode ter como base um modelo de pilha Last-in-First-Out (último a entrar, primeiro a sair). O algoritmo se inicia com a etapa do momento presente k . Então, o algoritmo investiga iterativamente a árvore de sequências de comutação permissíveis de agora para frente. Com cada etapa intermediária, todas as sequências de comutação precisam ter trajetórias das variáveis de saída que são permissíveis. As sequências de comutação permissíveis também podem ser mencionadas como sequências candidatas ou sequências de comutação candidatas. As sequências de comutação permissíveis podem consistir em sequências de comutação cujas variáveis de saída estão dentro de seus limites correspondentes ou ponto na direção correta ou chegam próximo a um limite. Os dois últimos casos se referem ao fato de que uma variável de saída não está necessariamente dentro dos limites permissíveis, mas o grau ao qual os limites são rompidos diminui com cada etapa de tempo dentro do horizonte.

Uma sequência de comutação candidata, isto é, uma sequência de comutação não rejeitada, resulta em trajetórias de variáveis de saída que satisfazem as regras correspondentes da etapa (c) em qualquer etapa de tempo. Deste modo, é possível assegurar que os limites predeterminados são mantidos em qualquer tempo, durante a operação de estado estacionário da máquina elétrica de rotação. Como resultado desta medição, o THD (Total Harmonic Distortion – distorção harmônica total) de torque da máquina elétrica de rotação pode ser reduzido.

É possível que uma combinação das regras ou condições simplesmente mencionadas se aplique às variáveis de saída. Por exemplo, uma sequência de comutação pode ser permissível se o torque e o potencial de ponto médio estiverem dentro de seus limites predefinidos e os pontos de

5 fluxo do estator na direção correta.

A complexidade de computação do método MPDTC está diretamente relacionada ao número de transições de comutação permissíveis que são predeterminadas pela topologia do conversor (primeiramente pelo número de níveis de voltagem que o conversor pode gerar) e o comprimento do

10 horizonte de comutação ou do horizonte de predição da sequência de comutação. Neste caso, um horizonte de predição pode ser definido como o comprimento de uma sequência de comutação, isto é, o número de etapas de tempo que é exigido para o processamento da sequência de comutação.

Os longos horizontes de comutação aumentam o desempenho de MPDTC substancialmente em virtude de reduzirem as perdas de comutação e/ou a distorção harmônica total (THD) da corrente ou do torque. No entanto, também podem resultar em uma carga de computação considerável desde que o número de sequências de comutação possíveis possa explodir de maneira combinatória. Portanto, até agora, tem sido possível somente

15 implantar e executar o MPDTC em hardware, se o algoritmo tiver sido restrito a horizontes de comutação muito curtos, tais como aqueles com um comprimento de 1 ou 2, por exemplo. A presente invenção torna possível reduzir a carga de computação para MPDTC com longos horizontes de comutação.

20

De acordo com uma modalidade da invenção, o valor de qualidade tem como base as perdas de comutação do conversor a serem esperadas ou a frequência de comutação do conversor a ser esperada no caso da respectiva sequência de comutação. A regra geral consiste no fato de que quanto menor o valor de qualidade, menores são as perdas de comutação.

25

Uma pluralidade de transições de comutação gera um grande número de operações de comutação dos elementos de comutação do conversor, cujo resultado consiste no aumento da frequência de comutação dos

30

elementos de comutação. No entanto, tal alta frequência de comutação gera perdas de calor (como uma consequência das perdas de comutação), em particular, nos comutadores de semicondutor de energia como elementos de comutação, cujo resultado consiste no fato de que os comutadores de semicondutor de energia podem envelhecer, serem danificados ou até serem destruídos mais rapidamente. Em geral, as perdas de comutação do conversor também podem ser indiretamente estimadas através da frequência de comutação.

10 Também é possível que a função de qualidade, isto é, a função com a qual o valor de qualidade de uma sequência de comutação é calculado, consista em uma função das etapas de tempo da sequência de comutação (isto é, o comprimento da sequência de comutação) e o número total de transições de comutação.

15 De acordo com uma modalidade da invenção, a função de qualidade consiste em uma função da soma das perdas de comutação que são produzidas pelas transições de comutação individuais e o comprimento do horizonte de comutação e/ou o horizonte de predição e/ou o comprimento da sequência de comutação. As perdas de comutação podem ser calculadas com base nas correntes do estator da máquina elétrica de rotação e/ou do
20 conversor, sendo que estas correntes consistem em uma função do estator e fluxos do rotor. Se o controlador tiver um modelo matemático interno para a máquina elétrica de rotação e/ou conversor, estes fluxos ou as correntes do estator podem consistir em um componente principal deste modelo. De acordo com esta modalidade, pode ser possível reduzir as perdas de comutação
25 marcadamente (por até 22%) em comparação com a simples função de qualidade que tem como base a frequência de comutação. Estes cálculos podem ser executados "fora de linha" e os resultados armazenados em uma tabela de consulta podem ser usados pelo método durante a operação da máquina.

30 De acordo com uma modalidade da invenção, as sequências de comutação na série de transições de comutação contêm elementos de intermissão, em que um elemento de intermissão define uma intermissão de

comutação após uma transição de comutação. As perdas de comutação podem ser adicionalmente reduzidas por intermissões entre as transições de comutação.

De acordo com uma modalidade da invenção, a intermissão de comutação é determinada por meio do cálculo de variáveis de saída. Neste caso, o cálculo de variáveis de saída poder ter como base um modelo matemático da máquina elétrica de rotação, do conversor e/ou do acionamento ou em uma aproximação. Em geral, as variáveis de saída deveriam oscilar dentro de seus limites durante a intermissão de comutação ou cumprir com as regras mencionadas acima.

Um modelo de acionamento matemático do conversor e da máquina elétrica de rotação pode ser usado a fim de calcular o número de etapas no qual a primeira trajetória de uma variável de saída (por exemplo, torque, fluxo ou potencial de ponto médio) encontra ou chega próximo a um dos limites predefinidos. Isto pode aumentar a precisão das predições e, portanto, o desempenho do controle do método (por exemplo, em relação às perdas de comutação e ao torque).

De acordo com uma modalidade da invenção, o método compreende adicionalmente: gerar uma sequência de comutação que compreende as transições de comutação e elementos de intermissão com base em um horizonte de comutação generalizado, o qual define a ordem em que as transições de comutação e os elementos de intermissão são unidos na sequência de comutação.

Os elementos de intermissão se destinam a terem o resultado em que a comutação ocorre o menos possível, a fim de manter as perdas de comutação tão baixas quanto possível. **Portanto, são introduzidas as intermissões de comutação com um comprimento tão longo quanto possível.** O comprimento das intermissões de comutação pode ser determinado pelo método e pode ser orientado pelo fato de que as variáveis de saída do acionamento obedecem as regras predefinidas mencionadas acima.

Um horizonte de comutação generalizado pode ser usado para estabelecer as sequências de comutação. O horizonte de comutação gene-

realizado pode compreender uma pluralidade de elementos de comutação (os quais definem que uma transição de comutação pode ficar na posição correspondente na sequência de comutação). O horizonte de comutação generalizado pode compreender os elementos de intermissão entre, em frente de e depois dos elementos de comutação. A fim de descrever isto, uma nota com "S" e "E" ou "e" é usada (os elementos de intermissão também podem ser interpretados como elementos de extrapolação ou elementos de expansão). Um exemplo de um horizonte de comutação generalizado consiste em "SSESE". As perdas de comutação podem ser reduzidas por até 20%, em comparação com um simples horizonte de comutação com um comprimento de dois que utiliza um horizonte de comutação generalizado.

Além disso, um horizonte de comutação generalizado pode começar com um elemento de intermissão "e", o qual fica no início da sequência de comutação para uma intermissão de espera opcional. Esta intermissão de espera pode ser determinada de maneira semelhante às intermissões de espera relacionadas ao elemento de intermissão "E". Como consequência disto, o horizonte de predição pode ser marcadamente estendido, com o resultado em que uma predição mais precisa pode ser feita. Como consequência disto, as perdas de comutação são geralmente reduzidas.

O horizonte de comutação generalizado com seu limite superior com base no número das transições de comutação e etapas de espera pode ser considerado como uma alternativa para um simples horizonte de predição fixo com um número fixo de etapas de tempo. O horizonte de comutação generalizado pode resultar em um comprimento temporariamente variável das sequências de comutação e, portanto, nos horizontes de predição de diferentes comprimentos.

De acordo com uma modalidade da invenção, durante o cálculo de variáveis de saída, é determinado o tempo no qual uma trajetória de uma variável de saída alcança um limite inferior ou superior predefinido no futuro.

De acordo com uma modalidade da invenção, a determinação do tempo é analiticamente executada, com o uso de um método de otimização para a determinação de zeros, mediante a aproximação de funções tri-

gonométricas por série de Taylor e/ou mediante a aproximação de funções trigonométricas por funções polinomiais por partes.

De acordo com uma modalidade da invenção, a resistência de fluxo do estator entra no cálculo ao se determinar o tempo.

5 De acordo com uma modalidade da invenção, o cálculo de trajetórias de valores de saída é com base em um modelo matemático da máquina de rotação ou acionamento e uma interpolação. Ao contrário da extrapolação, a interpolação tem a vantagem em que os pontos finais da trajetória correspondem melhor à realidade do que o caso da extrapolação.

10 De acordo com uma modalidade da invenção, as variáveis de saída são interpoladas em um intervalo de tempo que compreende um número predeterminado de, por exemplo, ao menos 10 etapas de tempo diferentes.

15 De acordo com uma modalidade da invenção, as variáveis de saída com o modelo matemático são calculadas no intervalo ou nos limites do mesmo por ao menos três momentos.

De acordo com uma modalidade da invenção, a interpolação é executada com um polinômio quadrático.

20 De acordo com uma modalidade da invenção, o método compreende adicionalmente: calcular um valor de qualidade para a sequência de comutação (em particular, não rejeitada) com um comprimento n durante a iteração.

25 De acordo com uma modalidade da invenção, o método compreende, adicionalmente: calcular um limite inferior para os valores de qualidade com base nos valores de qualidade pré-calculados de sequências de comutação completas.

30 De acordo com uma modalidade da invenção, o método compreende, adicionalmente: rejeitar as sequências de comutação cujo valor de qualidade excede o limite inferior para os valores de qualidade ou cujo valor de qualidade é maior do que o limite inferior para os valores de qualidade.

De acordo com uma modalidade da invenção, o método compreende, adicionalmente: calcular o valor de qualidade com o uso de um li-

mite superior para um comprimento máximo esperado de uma sequência de comutação ou seu horizonte de predição.

De acordo com uma modalidade da invenção, primeiro, isto é, no início ou antes da recorrência, o valor de qualidade de uma sequência de comutação promissora é calculado. Uma sequência de comutação promissora pode consistir, neste caso, em uma sequência de comutação que já tenha sido fornecida com um bom valor de qualidade antes do método de iteração ou para qual um bom valor de qualidade já tem sido calculado antes do método de iteração.

De acordo com uma modalidade da invenção, a sequência de comutação promissora é com base em uma sequência de comutação ótima de um ciclo de controle anterior.

De acordo com uma modalidade da invenção, a sequência de comutação promissora é com base em uma sequência de comutação ótima, a qual tem sido calculada conforme um presente horizonte de comutação em uma etapa de otimização anterior com um horizonte de comutação relativamente curto.

De acordo com uma modalidade da invenção, um método de dois estágios pode ser usado para este propósito. Primeiramente (em uma primeira etapa), o problema de otimização é resolvido com um curto horizonte de comutação, por exemplo, "eSE", por exemplo, com o método ou algoritmo descrito acima e abaixo. Então, em uma segunda etapa, um longo horizonte de comutação que é mais longo do que o curto horizonte de comutação é usado, por exemplo, "eSSESE". O método descrito acima e abaixo é, neste caso, executado, por exemplo, até o tempo de computação disponível tiver decorrido. Para a segunda etapa, a solução a partir da primeira etapa é usada como um valor de partida (algoritmo de partida quente "warm start"; vide também adicionalmente abaixo).

O primeiro problema pode ser resolvido de maneira relativamente rápida e uma solução comparativamente boa (sequência de comutação) pode ser calculada. Esta solução assegura que um estado de comutação que é comutável, isto é, segue as restrições de comutação do conversor, por

exemplo, e o qual assegura que as variáveis de saída não se movam para longe a partir dos limites definidos (se tornem instáveis) e produz um desempenho aceitável (perdas de comutação relativamente baixas, etc.) seja enviado para o conversor. Pode ser assegurado que o pequeno problema
5 pode ser resolvido dentro do tempo de computação disponível. Em geral, na segunda etapa, é encontrada uma melhor solução que pode ser enviada para o conversor.

De acordo com uma modalidade da invenção, é determinada uma sequência de comutação a ser investigada com o mais alto nível de
10 prioridade, em que, durante a próxima iteração (isto é, durante a próxima etapa de iteração ou na mesma etapa de iteração), a sequência de comutação com o nível mais alto de prioridade é investigada.

De acordo com uma modalidade da invenção, as sequências de comutação a serem investigadas são classificadas de acordo com sua prioriza-
15 ção.

De acordo com uma modalidade da invenção, a priorização é executada com o uso de ao menos uma dentre as seguintes regras: as sequências de comutação para as quais há uma maior probabilidade das ditas sequências de comutação resultarem em um baixo valor de qualidade são
20 priorizadas; as sequências de comutação para as quais há uma maior probabilidade das ditas sequências de comutação manterem as variáveis de saída dentro dos limites predefinidos e/ou as variáveis de saída chegarem próximo ao limite predefinido, à medida que o tempo aumenta, são prioriza-
25 das; as sequências de comutação que têm uma transição de comutação para as quais há uma maior probabilidade da dita transição de comutação resultar em uma sequência de comutação permissível ou de outra forma em uma sequência de comutação com uma alta qualidade são priorizadas; as sequências de comutação para as quais, com base em uma estimacão, se
30 espera que as ditas sequências de comutação conduzirão a longas intermissões de comutação, sem quaisquer transições de comutação, são prioriza-
das; as sequências de comutação (incompletas) são priorizadas com o uso de seus valores de qualidade; as sequências de comutação são priorizadas

com o uso de seu comprimento.

De acordo com uma modalidade da invenção, o método compreende, adicionalmente: terminar a geração das sequências de comutação, se todas as sequências de comutação até um comprimento predeterminado
5 tiverem sido geradas. O comprimento predeterminado pode consistir, neste caso, no comprimento do horizonte de comutação ou um horizonte de predição predeterminado.

De acordo com uma modalidade da invenção, o método compreende, adicionalmente: terminar a geração das sequências de comutação
10 se um limite superior para o número de sequências de comutação geradas tiver sido alcançado ou o tempo de computação disponível tiver decorrido.

De acordo com uma modalidade da invenção, o método compreende, adicionalmente: terminar a geração das sequências de comutação se tiver sido determinada uma sequência de comutação cujo valor de qualidade excede um limite inferior para os valores de qualidade por menos que
15 uma porcentagem definida, por exemplo, 5%. Em outras palavras, também é possível que o MPDTC sub ótimo seja executado, no qual não a sequência de comutação ótima, mas uma boa sequência de comutação é determinada. A motivação para a execução de MPDTC sub ótimo resulta a partir do seguinte:
20

Os longos horizontes de comutação resultam em excelente desempenho. Em uma busca de ramificação e limite (branch and bound) (a qual será descrita em mais detalhes adicionais abaixo), até com limites estritos, no entanto, a solução ótima ou a solução que está próxima ao ótimo é
25 encontrada de maneira muito rápida durante uma busca de árvore. Entretanto, uma grande proporção do tempo de computação é usada para confirmar que o ótimo tem sido realmente encontrado.

Portanto, sabe-se que se o algoritmo é interrompido antes de tal confirmação ou de outra forma o certificado tiver sido encontrado (isto é, não
30 há nó não testado com um valor de qualidade que é menor do que o presente valor de qualidade mínimo), o ótimo já tem sido provavelmente encontrado.

No método de MPDTC, somente a primeira posição de comutação ou a primeira transição de comutação a partir da sequência de comutação é usada no acionamento ou conversor do mesmo. Portanto, somente o primeiro elemento da sequência de comutação precisa ser ótimo, mas não necessariamente o restante da sequência de comutação.

Adicionalmente, uma boa sequência de comutação candidata com um curto horizonte de comutação pode ser rapidamente encontrada. Esta sequência de comutação curta pode ser usada para iniciar uma busca de árvore em uma árvore com um longo horizonte de comutação por meio de um algoritmo de "partida quente", descrito em mais detalhes adicionais abaixo.

A título de resumo, pode ser melhor, em vez de utilizar curtos horizontes de comutação e assegurar que a solução ótima é encontrada em todas as circunstâncias, utilizar longos horizontes de comutação (possivelmente generalizados) e aceitar as soluções sub-ótimas sob determinadas circunstâncias que, no entanto, sob determinadas circunstâncias, resultam em um método de MPDTC que pode ter melhor desempenho.

Um aspecto adicional da invenção se refere a um controlador para um conversor elétrico que é projetado para implantar o método conforme descrito acima e abaixo.

Um aspecto adicional da invenção se refere a um conversor, por exemplo, com um controlador que é projetado para implantar o método conforme descrito acima e abaixo.

Por exemplo, o conversor é conectado em sua entrada a uma tensão CC. Em sua saída (uma pluralidade de ou três fases, corrente trifásica), o conversor gera uma tensão CA. Os elementos de comutação (por exemplo, tiristores, IGCTs ou IGBTs) que são comutados pelo controlador podem ser usados para este propósito. Neste caso, as tensões podem ser a partir de aproximadamente 100V a 200 kV. Isto é, o conversor pode consistir em um conversor de baixa tensão, média tensão e alta tensão. As correntes comutadas pelo conversor podem ser de até 10.000 A.

Em particular, o método ou algoritmo de controle MPDTC pode

ser usado para qualquer conversor de múltiplos pontos.

Um aspecto adicional da invenção se refere a um sistema de motor que compreende uma máquina elétrica de rotação e um conversor elétrico com um controlador que é projetado para fornecer corrente para a máquina elétrica de rotação e para implantar o método conforme descrito acima e abaixo.

Um aspecto adicional da invenção se refere a um programa de computador que, se implantado em um processador, inicia o processador para implantar as etapas do método conforme descrito acima e abaixo.

O programa de computador ou o algoritmo de controle MPDTC pode ser implantado em qualquer hardware de computação desejado que compreende DSPs e FPGAs, por exemplo.

Um aspecto adicional da invenção se refere a um meio legível por computador no qual o programa de computador é armazenado.

Neste caso, um meio legível por computador pode consistir em um disco, uma unidade de disco rígido, um dispositivo de armazenamento USB, uma RAM, uma ROM, um CD, um DVD ou uma EPROM. Um meio legível por computador também pode consistir em uma rede de comunicações de dados, tal como Internet, por exemplo, que torna possível transferir por download um código de programa.

A título de resumo, as seguintes vantagens podem ser fornecidas pelas modalidades descritas: as modalidades do método tornam possíveis horizontes de comutação muito longos que compreendem uma pluralidade de transições de comutação que pode ser conectada pelos elementos de intermissão. Os primeiros experimentos mostram que, com uma combinação de modalidades do método, as perdas de comutação podem ser reduzidas por até 60%, enquanto que a distorção harmônica total (THD) do torque pode ser ao mesmo tempo aperfeiçoada por aproximadamente 20%. Estes experimentos têm sido conduzidos em um chamado conversor de média tensão de três pontos trifásico, o qual aciona uma máquina de indução. Em comparação ao simples algoritmo MPDTC com um simples horizonte de comutação de somente duas etapas, as perdas de comutação foram

reduzidas por até 40%, enquanto que o THD do torque foi mantida constante.

As modalidades são usadas para descrever as possíveis formas de evitar a geração e investigação de sequências de comutação quando as ditas sequências de comutação são sub ótimas. Como consequência disto, o tempo de computação médio pode ser marcadamente reduzido. Adicionalmente, os critérios de interrupção podem ser determinados, com os quais é possível assegurar que uma boa solução é encontrada para uma sequência de comutação. Como consequência disto, o tempo de computação máximo é limitado.

Em geral, as modalidades descrevem técnicas para modificar e aperfeiçoar um algoritmo MPDTC de tal modo que se torne eficiente, a partir de um ponto de vista técnico, para a conversão, desta forma, de um método com longos horizontes de comutação para hardware de computação agora disponível. Os resultados de simulação mostram que a complexidade de computação no pior cenário possível pode ser reduzida por uma ou duas ordens de magnitude, enquanto que o desempenho de controle (primeiramente em relação às perdas de comutação e THD) permanece substancialmente não-influenciado pela mesma.

O texto que se segue descreve as modalidades exemplificadoras da invenção em detalhes, com referência às figuras em anexo.

Breve Descrição das Figuras

Afigura 1 mostra um circuito de conversor trifásico para a comutação de três níveis de tensão, de acordo com uma modalidade da invenção.

Afigura 2a mostra as trajetórias de torque, de acordo com uma modalidade da invenção.

Afigura 2b mostra as trajetórias do fluxo do estator, de acordo com uma modalidade da invenção.

Afigura 2c mostra as sequências de comutação, de acordo com uma modalidade da invenção.

Afigura 3 mostra uma árvore de busca, de acordo com uma mo-

dalidade da invenção.

Afigura 4 mostra um fluxograma para um método de MPDTC, de acordo com uma modalidade da invenção.

5 Afigura 5 mostra uma possibilidade, de acordo com uma modalidade da invenção, para o cálculo das trajetórias das variáveis de saída.

Afigura 6 mostra um fluxograma para o cálculo de pontos de interseção das trajetórias com os limites, de acordo com uma modalidade da invenção.

10 Afigura 7 mostra uma trajetória de uma variável de saída, de acordo com uma modalidade da invenção.

Afigura 8 mostra um fluxograma para a determinação de um ponto de interseção de uma trajetória com um limite, de acordo com uma modalidade da invenção.

15 Afigura 9 mostra um desenvolvimento de valores de qualidade, de acordo com uma modalidade da invenção.

Afigura 10 mostra um detalhe de um fluxograma para um método MPDTC, de acordo com uma modalidade da invenção.

Afigura 11 mostra um histograma com o número de nós por nível de uma árvore de busca, de acordo com uma modalidade da invenção.

20 Afigura 12 mostra o perfil da presente qualidade durante o cálculo de qualidade, de acordo com uma modalidade da invenção.

Os símbolos de referência usados nas figuras e o significado dos mesmos são determinados, na forma resumida, na lista de símbolos de referência. Em princípio, as partes idênticas ou similares têm sido fornecidas com os mesmos símbolos de referência.

25

Descrição detalhada das modalidades exemplificadoras

Afigura 1 mostra um circuito de conversor trifásico 2 para um conversor 2 para a comutação de três níveis de voltagem, em que uma máquina elétrica de rotação 1 é conectada a um circuito de voltagem DC 3 do
30 circuito de conversor 2 através de duas fases u, v, w. Em geral, a máquina elétrica de rotação 1 pode ser conectada a um circuito de conversor 2 para a comutação de m níveis de voltagem, onde $m \geq 2$. Conforme mostrado nafi-

gura 1, o circuito de tensão DC 3 é formado por um capacitor C1 e por um segundo capacitor C2, o qual é conectado em série com o primeiro capacitor C1. O circuito de tensão DC 3 tem um primeiro terminal principal V+ no primeiro capacitor C1, um segundo terminal principal V- no segundo capacitor C2 e um sub terminal NP (um ponto central do circuito intermediário) formado pelos dois capacitores C1, C2 conectados em série. Adicionalmente, o circuito de conversor 2 compreende um sistema de sub conversor 4 que é fornecido para cada fase u, v, w e é formado, em cada caso, por um primeiro grupo de comutação ou elemento de comutação 5, por um segundo grupo de comutação ou elemento de comutação 6 e por um terceiro grupo de comutação ou elemento de comutação 7, em que cada grupo de comutação 5, 6, 7 é formado por dois comutadores de semicondutor de energia 9 conectados em série. Adicionalmente, em cada sistema de subconversor4, o primeiro grupo de comutação 5 é conectado ao primeiro terminal principal V+ e o segundo grupo de comutação 6 é conectado ao segundo terminal principal V-. Além disso, o primeiro grupo de comutação 5 é conectado em série com o segundo grupo de comutação 6, em que a junção entre o primeiro grupo de comutação 5 e o segundo grupo de comutação 6 forma uma fase terminal. O terceiro grupo de comutação 7, o qual é na forma de um grupo de comutação de fixação, é conectado ao primeiro grupo de comutação 5, em particular, à junção entre os dois comutadores de semicondutor de energia conectados em série 9 no primeiro grupo de comutação 5. Além disso, o terceiro grupo de comutação 7 é conectado ao segundo grupo de comutação 6, em particular, à junção entre os dois comutadores de semicondutor de energia conectados em série no segundo grupo de comutação 6. Adicionalmente, o terceiro grupo de comutação 7, em particular, a junção entre os dois comutadores de semicondutor de energia conectados em série no terceiro grupo de comutação 7, é conectado ao sub-terminal NP.

Os comutadores de semicondutor de energia 9 no primeiro e segundo grupo de comutação 5, 6 são na forma de comutadores de semicondutor de energia bidirecionais dirigíveis, em que os comutadores de semicondutor de energia no terceiro grupo de comutação 7 são na forma de co-

mutadores de semicondutor de energia unidirecionais não dirigíveis 9. No entanto, também é concebível que os comutadores de semicondutor de energia no terceiro grupo de comutação 7 também sejam na forma de comutadores de semicondutor de energia bidirecionais dirigíveis 9. Os comutadores de semicondutor de energia 9 consistem em tiristores, IGCTs ou IGBTs, por exemplo.

Afigura 1 mostra um controlador 10 do conversor 2 ou do sistema de acionamento* (sistema de motor) que compreende o conversor 2 e a máquina elétrica 1. O controlador 10 pode acionar os semicondutores de energia 9 e, portanto, os grupos de comutação ou elementos de comutação 5, 6, 7 através de linhas de controle 12 e comutar os ditos comutadores de semicondutor de energia e grupos de comutação ou elementos de comutação. Adicionalmente, pode ser possível que o controlador receba sinais de medição a partir da máquina elétrica 1 através de uma linha de medição opcional 14. O controlador 10 pode, então, determinar as variáveis de saída da máquina elétrica de rotação 1 através destes sinais de medição. Os algoritmos e métodos descritos podem ser na forma de módulos de programa em um processador 16 do controlador 10.

De acordo com o método, as fases u, v, w do circuito de conversor 2, o qual pode consistir geralmente em um circuito de conversor 2 para a comutação de m níveis de voltagem, são conectadas em cada ciclo de controle do controlador 10 ao circuito de voltagem DC 3 após uma transição de comutação selecionada de estados de comutação dos comutadores de semicondutor de energia 9 do circuito de conversor 2.

Afigura 2c mostra três sequências de comutação candidatas 20, 22, 24. As figuras 2a e 2b mostram as trajetórias de torque 26, 28, 30 e as trajetórias do fluxo do estator 32, 34, 36 que estão associadas às ditas sequências de comutação candidatas, entre os respectivos limites inferior e superior das ditas trajetórias. O eixo geométrico de tempo é indicado por meio das etapas de tempo diferentes ou de amostra nos três gráficos, em que o intervalo de amostra, isto é, o tempo entre k e k+1, por exemplo, pode consistir em $t_s=25 \mu s$. O presente tempo de amostra consiste, neste caso,

em k .

Afigura 2c mostra as sequências de comutação 20, 24, 26 que têm sido geradas com um horizonte de comutação, o qual tem os elementos “SSESE” e não são mais permissíveis para a comutação nas etapas de tempo k e $k+1$ e expansão subsequente das trajetórias das variáveis de saída até uma ou mais trajetórias. Por exemplo, isto pode ocorrer na etapa de tempo $k+j$ (por exemplo, $k+5$ no caso da sequência de comutação 20). O terceiro evento de comutação ocorre, então, neste momento e é seguido por uma etapa de expansão adicional.

Afigura 3 mostra um exemplo de uma árvore de busca 38 que tem sido gerada com o auxílio de um algoritmo MPDTC iterativo com o horizonte de comutação expandido “SSESE”. A árvore de busca 38 tem nós de comutação 40 (que correspondem aos elementos de comutação do horizonte), nos quais a ramificação a todas as transições de comutação permissíveis é executada, e nós de intermissão 42 (que correspondem aos elementos de intermissão do horizonte) que expandem as trajetórias das variáveis de saída até que um limite seja alcançado.

A árvore de busca 38 também tem nós rejeitados 43, os quais pertencem às sequências de comutação que têm sido rejeitadas e que são denotadas por um T invertido. O eixo geométrico de tempo discreto é mostrado do lado esquerdo e se estende a partir de k ao $k+N$, onde N é o comprimento do horizonte da sequência de comutação mais longa.

Afigura 4 mostra um fluxograma para um algoritmo MPDTC iterativo que pode ter gerado a árvore de busca 38, por exemplo. Na etapa de tempo k , o algoritmo MPDTC calcula a sequência de comutação $U = [u(k), u(k+1), \dots, u(k+N-1)]$ de acordo com o seguinte procedimento:

Inicializar, na etapa S10, os nós raiz da árvore com o presente vetor de estado do acionamento $x(k)$, a posição de comutação anterior $u(k-1)$ e o horizonte de comutação (generalizado). Posicionar os nós raiz em uma pilha.

O vetor de estado $x(k)$ pode conter, por exemplo, os componentes de corrente de rotor e estator da máquina ou os componentes de fluxo de

rotor e estator da máquina, ou uma combinação dos mesmos. Adicionalmente, o vetor de estado $x(k)$ pode conter estados do conversor, tais como o potencial de voltagem no(s) ponto(s) central(is) do circuito intermediário, por exemplo.

5 Na etapa S12, tomar o nó superior com um horizonte de comutação que não está vazio a partir da pilha.

Na etapa S14, ler o primeiro elemento do horizonte de comutação. Para “S”, ramificar em todas as transições de comutação permissíveis. Neste caso, as transições de comutação permissíveis consistem nas transi-
10 ções de comutação que são permissíveis para a topologia do conversor, isto é, que não podem danificar o conversor ou submeter o conversor a uma carga demasiada. As transições de comutação permissíveis podem ser armazenadas em uma tabela de consulta e calculadas “fora de linha”.

Para “E”, expandir, na etapa S14, as trajetórias das variáveis de
15 saída por meio de extrapolação, interpolação e/ou com o uso do modelo de acionamento interno. Neste caso, o vetor de estado $x(k)$ pode ser usado e pode ser atualizado com as variáveis de saída calculadas.

Na etapa S16, rejeitar as sequências de comutação que não consistem em candidatas e manter somente as sequências de comutação
20 que são candidatas. Por exemplo, as sequências de comutação não são candidatas se uma ou mais variáveis de saída tiverem deixado seus limites após uma transição de comutação.

Na etapa S18, colocar as sequências de comutação candidatas na pilha e ir para a etapa S12, se houverem ainda nós na pilha. Se não exis-
25 tir mais quaisquer nós sobre a pilha que compreende os horizontes de comutação que não estão vazios, parar o cálculo. O resultados destes cálculos consistem nas sequências de comutação candidatas $U_i(k)=[u_i(k), \dots, u_i(k+n_i-1)]$ com um comprimento variável, onde i é a partir de 1 e I é um ajuste de índice.

30 Na etapa S20, calcular o valor de qualidade associado para cada sequência de comutação candidata i em I . Se a frequência de comutação for destinada a ser minimizada, levar em consideração $c_i = s_i/n_i$, por exemplo, o

qual chega próximo à frequência de comutação média, onde $s_i = \sum_{j=k}^{k+n_i-1} |u_{ij} - u_{i(j-1)}|$ é o número total de transições de comutação na sequência de comutação $U_i(k)$ e n_i é o comprimento de sequência de comutação correspondente.

5 Se, na etapa S20, o valor de qualidade for calculado por meio das perdas de comutação, a função de qualidade $c_i = E_i/n_i$ é usada, onde E_i consiste nas perdas de comutação. A fim de calcular as perdas de comutação, pode ser que as correntes de fase que consistem em combinações lineares dos componentes de fluxo precisem ser calculadas.

10 Na etapa S22, selecionar a sequência de comutação ótima $U^* = U_i(k)$ com o valor de qualidade mínimo, onde $i = \arg \min c_i$.

Na etapa S24, aplicar a primeira transição de comutação $u(k) = u^*$ da sequência de comutação ótima U^* aos elementos de comutação do conversor e implantar os métodos justamente descritos na etapa de tempo seguinte $k+1$ (isto é, no ciclo de controle seguinte).

15

O algoritmo é construído de tal modo que cada sequência de comutação candidata produza trajetórias de variável de saída que são permissíveis. Isto tenta assegurar que os limites das variáveis de saída sejam respeitados em qualquer momento durante a operação de estado estacionário. Adicionalmente, o algoritmo é implantado iterativamente, isto é, em vez de primeiro relacionar as sequências de comutação e, então, calcular as associadas trajetórias de variável de saída, as sequências de comutação são construídas de maneira gradual mediante a ramificação nas transições de comutação permissíveis 40. Uma vantagem disto consiste no fato de que o horizonte de comutação pode ser facilmente expandido, com o resultado em que uma pluralidade de transições de comutação 40 e uma pluralidade de nós de intermissão 42 podem ser levadas em consideração. Adicionalmente, as técnicas de busca de árvore podem ser aplicadas a fim de reduzir a carga de computação.

20

25

30 Com referência à figura 3, o algoritmo começa com o nó raiz e continua através da árvore de busca 38 com os nós 40, os quais, por sua vez, representam um nó raiz para uma sub-árvore na qual cada nó represen-

ta uma transição de comutação permissível, e os nós de intermissão 42, os quais correspondem às etapas de expansão e têm somente um nó secundário. A profundidade da árvore 38 consiste no número de transições de comutação disponíveis mais o número de etapas de intermissão por nó de intermissão 42 dentro do horizonte de comutação. O algoritmo relaciona todas as

5 sequências de comutação permissíveis que são sequências de comutação candidatas e calcula suas trajetórias de variável de saída correspondentes e seus valores de qualidade. Deste modo, todos os nós na árvore de busca 40 que pertencem às sequências de comutação candidatas são visitados.

10 O algoritmo justamente descrito pode ser modificado a fim de aumentar a eficiência da computação, com o resultado em que os horizontes de comutação relativamente longos podem ser calculados em hardware que está disponível hoje em dia. Isto pode ser alcançado, por exemplo, por meio das seguintes técnicas:

15 - Métodos rápidos e precisos para expandir o torque, o fluxo do estator e as trajetórias de potencial de ponto médio (circuito intermediário) para uma determinada combinação de estado de comutação, até que uma das trajetórias encontre um limite de histerese associado (ou um limite predefinido geral). O objetivo aqui consiste em reduzir o tempo de computação

20 médio.

- Técnicas de otimização personalizada a fim de reduzir o número de nós visitados na árvore de busca. O objetivo aqui consiste em reduzir o tempo de computação médio.

25 - MPDTC sub ótimo, no qual o número máximo de etapas de iteração (ou tempo) é limitado, mas assegura-se que seja encontrada uma solução permissível (transição de comutação) que pode ser sub ótima, no entanto. Este conceito restringe o tempo máximo de computação, o qual pode ser principalmente importante para a implantação do algoritmo.

30 Com referência às figuras 5 e 6, serão dados agora os detalhes em relação a como, na etapa S14, as trajetórias das variáveis de saída ou o tempo quando uma trajetória cruza um limite podem ser determinadas por meio de interpolação, extrapolação ou outras aproximações.

Em vez de extrapolações possivelmente imprecisas e simulações que exigem muito tempo de computação, as quais utilizam em modelo de acionamento, o número de etapas de tempo para o qual uma determinada combinação de estado de comutação pode ser aplicada até que uma

5 dentre as variáveis de saída (torque, fluxo do estator e potencial(is) de ponto médio) alcance um limite pode ser analiticamente previsto, em que os simples métodos de otimização para encontrar zeros podem ser usados.

Afigura 5 mostra um vetor de fluxo do estator ψ_s e um vetor de fluxo do rotor ψ_r no plano α/β . O vetor de fluxo do estator ψ_s é movido por

10 um vetor de tensão v , o qual consiste em uma função da combinação de estado de comutação u . O vetor de fluxo do estator ψ_s se destina, neste caso, a permanecer dentro de um limite de histerese interno 44 e um limite de histerese externo 46.

Sem levar em consideração a resistência do estator, uma trajetória do fluxo do estator que começa no tempo 0 pode ser aproximada por uma

15 simples relação da forma

$$\psi_s(t) = \psi_s(0) + tv,$$

em que o vetor de fluxo do estator ψ_s é determinado em α/β , v é o vetor de tensão em α/β , t é o tempo contínuo e os fatores de escala têm

20 sido omitidos.

Elevando ao quadro esta relação e equacionando-a com o limite de histerese interno 44 (o raio do círculo interno) resulta em um polinômio de segunda ordem no momento t . Dependendo da posição do vetor de fluxo do estator ψ_s em relação aos limites de histerese 44, 46 e à direção do vetor de

25 tensão v , este polinômio tem nenhuma, uma ou duas soluções que podem ser facilmente calculadas. O mesmo se aplica para uma relação análoga para os pontos de interseção com o limite de histerese externo 46, a qual permite nenhuma ou duas soluções.

O tempo t após o qual o fluxo do estator ψ_s cruza um limite de

30 histerese 44, 46 é determinado pelo menor tempo não negativo t , o qual é calculado conforme descrito acima. Este tempo pode ser usado para determinar a unidade de tempo discreto ou a etapa de tempo k que está mais

próxima ao tempo t .

Até a resistência do fluxo do estator quase indiferente pode ser levada em consideração para o cálculo simplesmente descrito em diferentes formas:

5 - Mediante a rotação do vetor de voltagem v através de um ângulo correspondente na direção da origem do plano α/β .

- Mediante o uso da equação de fluxo do estator do modelo de máquina. Ao começar no tempo 0, especialmente, o fluxo do estator ψ_s pode ser calculado após um curto intervalo de tempo para o determinado vetor de voltagem v em α/β , com o uso do modelo de máquina (somente as duas primeiras equações são exigidas para este propósito). Com base nisto, o comprimento e a orientação do vetor de voltagem v podem ser corrigidos a fim de levar em consideração a resistência do estator.

15 Estas correções podem ser calculadas, por exemplo, "fora de linha", para todos os vetores de voltagem v e para todos os ajustes de torque e velocidade antes da implantação do algoritmo. Esta informação pode ser armazenada, por exemplo, em uma tabela de consulta a qual o algoritmo pode ganhar acesso.

A trajetória do torque ou a interseção do mesmo com seus limites também pode ser determinada desta forma. O torque consiste no produto cruzado entre o fluxo do estator ψ_s e o fluxo do rotor ψ_r . Presumindo que o comprimento do vetor de fluxo do rotor ψ_r é constante dentro do horizonte de predição e que a rotação do vetor de fluxo do rotor ψ_r ocorre em uma velocidade constante, o desenvolvimento do fluxo do estator simplesmente descrito pode ser inserido na equação de torque. Uma simplificação da equação resulta em um desenvolvimento de torque conforme uma função dos componentes de fluxo no tempo 0 e as expressões $t \sin(wr)$ e $t \cos(wr)$, onde wr é a velocidade de rotação do fluxo do rotor ψ_r .

25 Equacionando a equação de torque com o limite de torque superior e inferior e determinando o tempo mínimo não negativo proporciona o tempo após o qual o primeiro limite é alcançado ou cruzado. A equação de torque pode ser resolvida de diferentes formas. Por exemplo, os cálculos

simplesmente descritos podem ser analiticamente executados.

Outra possível forma de resolver a equação de torque consiste na aproximação das expressões $t \sin(wrt)$ e $t \cos(wrt)$ por meio de uma série de Taylor sobre o tempo $t=0$ ou $t>0$. Adicionalmente, a iteração pode ser executada através de t ou t pode ser ajustado com base nas informações já existentes relacionadas a onde o próximo contato com um limite é esperado.

Além disso, é possível aproximar as expressões $t \sin(wrt)$ e $t \cos(wrt)$ por meio de uma função de polinômio por parte e resolver a equação de torque em cada intervalo de aproximação.

Outra possível forma de resolver a equação de torque consiste no uso de um algoritmo para a determinação de zeros, por exemplo, método de Newton, o método secante e/ou o método de regra falsi. Este algoritmo pode ser interrompido assim que o tempo t tiver sido determinado, no qual a trajetória do fluxo do estator cruza um de seus limites.

Este algoritmo será descrito em relação à figura 6:

Na etapa S100, encontrar o próximo torque máximo ou mínimo para $t>0$ com o uso de um algoritmo para a determinação de zeros mediante a equação do derivado com 0.

Na etapa S102, decidir se o máximo ou mínimo está dentro dos limites para o torque. Se este for o caso, continuar com a etapa S100. Se este não for o caso, continuar com a etapa S103.

Na etapa S103, determinar o limite que está sendo cruzado, isto é, o limite de torque superior ou inferior e calcular o tempo no qual o limite é alcançado com o uso de um algoritmo para a determinação de zeros.

O tempo no qual o potencial de ponto médio alcança um de seus limites pode ser calculado por meio de cada uma das formas simplesmente descritas. Isto compreende a extrapolação ou uma solução analítica similar à solução descrita acima para a equação de torque.

Ao contrário do método simplesmente descrito para a determinação de maneira analítica das trajetórias de variáveis de saída e dos tempos quando estas trajetórias cruzam o limite inferior ou superior, o seguinte texto propõe um método que é com base no modelo de acionamento (possi-

velmente matemático) com o uso de um intervalo de amostragem ordinário e interpolação quadrática. Esta abordagem é descrita com referência às figuras 7 e 8.

Afigura 7 mostra uma trajetória 48 de uma variável de saída que tem sido representada sobre o eixo geométrico de tempo k e tem sido calculada para os valores nas etapas de tempo ordinários $T_s = d \cdot t_s$. Aqui, t_s é o intervalo de amostragem do controlador, isto é, o intervalo de tempo mais curto ou a etapa de tempo que o controlador pode tomar amostra, por exemplo, 25 μs ou de outra forma o intervalo de um ciclo de controle. Um intervalo de amostragem ordinário $T_s = d \cdot t_s$ pode ser selecionado em virtude de que d é ajustado para 10, por exemplo. Um intervalo de amostragem ordinário consiste, portanto, em um múltiplo do intervalo de amostragem do controlador.

Conforme pode ser observado a partir da figura, a trajetória 48 ocorre entre $k=0$ e $k=27$ dentro dos limites de histerese inferior e superior 44, 46 e cruza o limite de histerese inferior aproximadamente em $k=27$.

O algoritmo descrito abaixo com referência à figura 8, para a determinação de um ponto de interseção 50 entre a trajetória 48 e um dos limites 44, 46, é com base no fato de que o modelo de acionamento de tempo discreto armazenado no controlador utiliza o intervalo de amostragem ordinário T_s , e não o intervalo de amostragem do controlador, conforme a etapa de discretização.

Na etapa S200, começar em $k=0$ e calcular ou simular a variável de saída em $k=d$ e $k=2d$ com o uso do modelo de acionamento.

Na etapa S202, derivar uma aproximação quadrática da respectiva variável de saída trajetória 48 com base nas pontos em $k=0$, d e $2d$ para cada variável de saída. Com base na curvatura da aproximação quadrática e em se os pontos em $k=0$, d e $2d$ estão dentro de, acima ou abaixo dos limites de histerese 44, 46, identificar qual limite consiste em um candidato para ser cruzado pela variável de saída trajetória.

Na etapa S204, calcular o ponto de interseção da aproximação quadrática com o limite identificado com o candidato. Se houver um ponto de

interseção, calcular o tempo da interseção de maneira analítica. Se o tempo for entre $k=0$ e $k=2d$, interromper o algoritmo. Tomar o tempo mínimo determinado de todas as variáveis de saída para as quais o cálculo tem sido executado como o tempo a ser determinado. Se nenhuma das variáveis de saída cruza um limite dentro de $k=0$ e $k=2d$, mover um intervalo de amostragem ordinário T_s no futuro e calcular as variáveis de saída na etapa de tempo $k=3d$. Repetir a etapa S202, mas deslocadas através de d .

Ao começar a partir da situação mostrada na figura 7, o algoritmo irá prosseguir conforme exposto a seguir: em uma primeira etapa, na qual o intervalo 52 é considerado com base nos pontos $k=1, d$ e $2d$, o ponto de interseção com o limite de histerese superior é investigado, mas nenhum ponto de interseção é encontrado. Em uma segunda etapa, se o intervalo 54 for considerado com base nos pontos $k=d, 2d$ e $3d$, o ponto de interseção 50 com o limite de histerese inferior 44 é determinado e o tempo $k=27$ é determinado.

d pode ser selecionado de tal modo que o comprimento de um intervalo (isto é, $2d$) é na região do número médio de etapas de tempo de expansão, isto é, o comprimento médio de intermissões de comutação. Esta informação também pode ser calculada “fora de linha” por meio de simulações e armazenada em uma tabela de consulta.

Em vez de determinar as variáveis de saída nas etapas de tempo 0, d e $2d$ e utilizar a interpolação quadrática, as variáveis de saída podem ser calculadas nos tempos 0 e $2d$ e os derivados das mesmas podem ser calculados nas etapas de tempo 0 e $2d$ e estes podem ser usados para a interpolação quadrática.

Em adição ou como uma alternativa, as interpolações linear ou cúbica com base nos valores das variáveis de saída também podem ser usadas em determinado número adequado de etapas de tempo. Estas etapas de tempo não precisam ser distribuídas uniformemente ou separadas de maneira uniforme. Em particular, uma etapa de tempo pode ser disposta onde se espera que a trajetória irá cruzar um limite.

Em vez de determinar e classificar (ou priorizar) todas as se-

quências de comutação permissíveis ou sequências de comutação candidatas, o número de sequências de comutação que são destinada a serem investigadas também pode ser limitado ou reduzido, a fim de reduzir o tempo de computação médio.

5 Afigura 9 mostra o desenvolvimento de valores de qualidade sobre o comprimento de variável do horizonte de comutação generalizado "eSSESE". No gráfico nafigura 9, o tempo é representado nas etapas de tempo em direção á direita e a qualidade é representada em direção ao topo. O desenvolvimento tem surgido durante a implantação de um chamado algoritmo de busca "branch and bound" (ramificação e limite), o qual será descrito em mais detalhes posteriormente. As sequências de comutação completas 58 têm sido completamente investigadas e as sequências de comutação incompletas 60 não têm sido completamente investigadas e têm sido abandonadas. As sequências de comutação 62 não têm sido ainda completamente investigadas. Conforme é evidente a partir dafigura, a sequência de comutação ótima neste tempo tem, neste caso, um comprimento de 39 etapas de tempo e um valor de qualidade de aproximadamente 0,01.

20 Pode ser deduzido a partir dafigura que os valores de qualidade não aumentam de maneira monótona se as sequências de comutação foram expandidas. Entretanto, uma estimação da qualidade de sequências de comutação incompletas pode ser executada com o auxílio dos seguintes cálculos.

25 Uma sequência de comutação completa consiste, neste caso, em uma sequência de comutação que tem todos os elementos do horizonte de comutação generalizado. Em contrapartida, uma sequência de comutação incompleta consiste em uma sequência de comutação que é formada somente por elementos fixados a uma sequência de comutação completa. Isto é, uma sequência de comutação incompleta tem geralmente menos elementos do que um horizonte de comutação generalizado.

30 O valor de qualidade Q de uma sequência de comutação completa pode, neste caso, ser calculado conforme exposto a seguir: o valor de qualidade associado a uma sequência de comutação consiste na soma das

perdas de comutação de todas as transições de comutação dividida pelo comprimento total da sequência de comutação n , isto é, $c = \text{sum}(E_{\text{loss}})/n$. Desde que um horizonte de comutação possa conter as transições de comutação e os elementos de intermissão que podem ser de duração variável, n pode ter um comprimento de variável.

O valor de qualidade mínimo c^* neste tempo consiste no menor valor de qualidade c que tem sido encontrado dentro de uma série do algoritmo para uma sequência de comutação completa.

O limite inferior dos valores de qualidade c_{lb} das sequências de comutação incompletas pode ser calculado conforme exposto a seguir: desde que o valor de qualidade c seja tipicamente a soma das perdas de comutação sobre todas as transições de comutação na sequência de comutação dividida pelo comprimento total da sequência de comutação, os valores de qualidade não precisam necessariamente aumentar de maneira monótona à medida que o comprimento de uma sequência de comutação aumenta. A fim de seja capaz de utilizar as chamadas técnicas de ramificação e limite, um limite inferior para os valores de qualidade c_{lb} é introduzido e isto se aplica às sequências de comutação incompletas: $c_{lb} = \text{sum}(E_{\text{loss}})/N_{\text{max}}$, onde N_{max} é um limite superior para o comprimento máximo da sequência de comutação. Neste caso, $c \geq c_{lb}$ é válido.

Também é possível que o comprimento máximo esperado das sequências de comutação N_{max} seja atualizado durante a execução do algoritmo. O algoritmo de busca é mais eficiente se N_{max} consistir em um estreito limite superior do comprimento máximo da sequência de comutação.

Durante a busca de árvore, N_{max} pode ser atualizado em muitas formas. Algumas abordagens para isto são mencionados abaixo e estas também podem ser combinadas:

N_{max} pode ser determinado por meio de simulação fora de linha para cada ponto de operação e para cada horizonte de comutação predefinido e armazenado em uma tabela de consulta.

N_{max} pode ser transferido a partir do ciclo de controle anterior para o próximo ciclo de controle. Durante a busca de árvore, N_{max} pode ser

aumentado se for encontrada uma sequência de comutação que tem um horizonte de comutação maior. Aqui também é possível que $N_{\max}$ seja graduado a partir do ciclo de controle anterior por um valor fixo, por exemplo, por 0,9.

5 Também é possível que o valor de partida de $N_{\max}$ para um ciclo de controle seja o máximo ou a média de $N_{\max}$ sobre um número específico de ciclos de controle anteriores.

Em geral, pode ser necessário que as sequências de comutação (incompletas) que têm sido rejeitadas anteriormente, durante a busca de árvore, sejam levadas em consideração novamente se $N_{\max}$ for aumentado e, possivelmente, que c_{lb} seja atualizado.

Adicionalmente, as relaxações e aproximações podem ser usadas para calcular um limite inferior c_{lb} .

Afigura 10 ilustra um detalhe de um algoritmo que é similar ao algoritmo mostrado nafigura 4. No entanto, a etapa S20 a partir dafigura 4 tem sido substituída pela etapa S300 e a etapa S301 tem sido introduzida, uma ramificação a partir de etapa S18 não conduz mais para a etapa S12, mas para a etapa S301. A ordem das etapas S300, S301, S12, S14 e S16 também pode, neste caso, ser diferente da ilustrada nafigura 10. Na etapa S300, as sequências de comutação são rejeitadas durante a recorrência ou iteração. Na etapa S301, as sequências de comutação não-rejeitadas são classificadas e/ou priorizadas. Na etapa S12, uma sequência de comutação com o nível de prioridade mais alto é, então, selecionada. Em princípio, a função de qualidade pode ser avaliada na etapa S300 e as sequências de comutação podem ser rejeitadas sempre que c for maior do que c_{lb} para as ditas sequências de comutação. Também é possível que a priorização e classificação, isto é, em relação a sequência de comutação que é destinada a ser levada em consideração, sejam executadas durante a execução antes da etapa S12.

30 O algoritmo pode ser modificado em várias formas:

Algoritmo "branch and bound" (ramificação e limite) personalizado: calcular as sequências de comutação e as trajetórias de variável de saída.

da associadas (S14) e os valores de qualidade (S300) iterativamente se a árvore for atravessada a partir do nó raiz às folhas. Em cada etapa de iteração (S300), calcular um limite inferior c_{lb} para o valor de qualidade da presente sequência de comutação (possivelmente incompleta). Se o limite inferior c_{lb} excede a qualidade mínima c^* (a melhor sequência de comutação completa que tem sido determinada até agora), as sequências de comutação incompletas não são levadas em consideração e rejeitadas.

Algoritmo “depth-first search” (busca em profundidade): começar com a sequência de comutação mais promissora (por exemplo, sempre pelas sequências de comutação incompleta que tem as mesmas transições de comutação que a sequência de comutação mais promissora que é priorizada na etapa S301) e calcular as trajetórias de variável de saída associadas e seu valor de qualidade. O objetivo consiste em encontrar uma sequência de comutação (completa) que chegue próximo à sequência de comutação ótima e tenha um valor de qualidade menor de maneira correspondente, imediatamente no início da busca de árvore.

Algoritmo de “warm start” (partida quente): as sequências de comutação mais promissoras podem ser determinadas (ao menos parcialmente) antes do algoritmo ser executado, por exemplo, a partir de:

- a sequência de comutação ótima do ciclo de controle anterior que tem sido deslocada através de uma etapa de tempo,
- a sequência de comutação ótima que tem sido determinada para uma etapa de otimização anterior que foi implantada com um horizonte de comutação mais curto. (desde que tal sequência de comutação seja incompleta, isto possibilita que uma “partida quente” parcial e uma ramificação a partir do final da sequência de comutação incompleta seja exigida a fim de se obter uma sequência de comutação completa).

- Também é possível determinar a primeira posição de comutação de uma sequência de comutação por meio do método de análise geométrica descrito adicionalmente abaixo.

Algoritmos de heurística de ramificação: em sua forma básica, o algoritmo se ramifica sobre todas as transições de comutação permissíveis e

no processo seleciona o nó mais superior sobre a pilha. A fim de reduzir adicionalmente o número de iterações, as transições de comutação mais promissoras (nós) são primeiro investigadas e as transições de comutação para as mesmas classificadas de maneira correspondente. A classificação ou priorização na etapa S301 pode ser executada mediante a introdução de heurística de ramificação, a qual compreende, por exemplo:

A priorização é executada com o uso da probabilidade com a qual uma sequência de comutação conduz a uma boa sequência de comutação e/ou permissível. A probabilidade pode ser determinada para a transição de comutação a ser investigada a partir de uma tabela de consulta que tem sido anteriormente calculada "fora de linha", ou esta pode ser determinada "conectada": para cada ponto de operação e cada setor (vetor de voltagem) no plano α/β , a probabilidade de cada transição de comutação (vetor de voltagem) é determinada mediante a simulação da operação de estado estacionário. A fim de reduzir a exigência de armazenamento, o problema é transferido para o setor zero e a distribuição de probabilidade é determinada para o setor zero. As posições de comutação ou sequências de comutação são, então, classificadas de acordo com a redução de probabilidade e a ramificação é executada primeiro para as sequências de comutação ou posições de comutação que têm a maior probabilidade. A largura típica de um setor é de 15, 30, 45 ou 60. Em outras palavras, o problema é mapeado em um espaço de baixa dimensão com o uso de propriedades de simetria do sistema de 3 fases. Para este espaço, a probabilidade com a qual cada estado de comutação ou transição de comutação individual é usado pode ser calculada "fora de linha" por meio de simulações.

Como uma alternativa ou adicionalmente, as transições de comutação e as sequências de comutação também podem ser classificadas com base em uma análise geométrica. As posições de comutação que mantêm um torque constante se encontram em uma linha paralela ao fluxo do rotor, enquanto que as posições de comutação que mantêm a magnitude do fluxo do estator constante se encontram em uma linha perpendicular ao fluxo do estator. Com base nestas considerações, podem ser determinadas as

posições de comutação diferentes que aumentam ou diminuem o torque e/ou aumentam ou diminuem o fluxo do estator. Independente se o torque está próximo ao limite inferior ou superior e, portanto, precisa ser reduzido ou aumentado, as posições de comutação que atendem estes critérios podem ser selecionadas e priorizadas. O mesmo cálculo também pode ser executado para o fluxo do estator e os potenciais de ponto médio ou o potencial de ponto médio. O conceito aqui consiste em calcular uma voltagem ideal que iria gerar um torque constante e um fluxo constante. Esta voltagem ideal somente pode ser alcançada por meio da comutação infinitamente rápida, isto é, somente no valor de limite. A voltagem ideal pode ser transferida para estados de comutação ideais que não são geralmente integrais e, portanto, não comutáveis, mas são reais, tais como $[0,9; -0,8; 0,1]$, por exemplo. No entanto, comutável consiste somente em $[1; -1; 0]$, por exemplo. A voltagem ideal ou o estado de comutação ideal ou a transição de comutação pode consistir em um bom valor de partida cuja proximidade, por exemplo, $[1; -1; 0]$ estão localizados os estados de comutação ou as transições de comutação. Adicionalmente, os estados de comutação ou transições de comutação que têm um efeito desejado sobre o conversor e a máquina, isto é, aumentam o torque, por exemplo, podem ser determinados com base na voltagem ideal.

O que tem sido simplesmente mencionado pode ser executado para as chamadas transições de comutação ou posições de comutação relaxadas, isto é, os estados de comutação reais. Uma vez que as posições de comutação relaxadas desejadas têm sido determinadas, as posições de comutação diferentes nas proximidades das posições de comutação relaxadas também podem ser consideradas primeiro.

A fim de classificar e/ou priorizar as sequências de comutação (S301), também pode ser seguido um procedimento em que o nó com o melhor valor de qualidade até o presente momento dentro do ciclo de controle é investigado em seguida (c ou c_k).

Uma possibilidade adicional para a priorização das sequências de comutação na etapa S301 é descrita em relação às figuras 11 e 12.

Afigura 11 mostra um histograma com uma série de nós por nível da árvore de busca para o horizonte de comutação generalizado “eSSE-SE”. No histograma, o número de nós é ilustrado em direção ao topo e a profundidade da árvore de busca ou os níveis são ilustrado em direção á direita.

5 Conforme pode ser observado a partir do gráfico, a profundidade da árvore de busca também pode ser denotada pelas ações restantes a serem executadas a partir do horizonte de comutação generalizado (por exemplo, “ESE”).

A priorização dos nós na árvore de busca e as sequências de comutação pode ocorrer de tal modo que o histograma seja formado em

10 uma forma específica. Isto torna possível adaptar a distribuição de nós que não têm sido investigados ou as sequências de comutação incompletas na árvore de busca. Em vez de sempre seleccionar o nó com o menor valor de qualidade (o qual é usualmente em um nível superior, isto é, do lado esquerdo no histograma, da árvore de busca), pode ser vantajoso calcular rapidamente as sequências de comutação completas a fim de se obter de maneira

15 rápida os valores de qualidade ótimos inferiores (bons limites) e, portanto, também direccionar o foco para os níveis inferiores da árvore de busca.

Com referência àfigura 11, a linha 66, neste caso, representa o histograma desejado e a linha 64 representa o presente histograma que tem

20 sido produzido pelo algoritmo que tem sido parcialmente implantado. Neste exemplo, um nó do segundo nível (no qual as ações “SESE” ainda precisam ser implantadas) é seleccionado. Em particular, neste caso, o nó no segundo nível com o menor valor de qualidade pode ser tornado.

Isto pode ser alcançado mediante as seguintes modificações ao

25 algoritmo mostrado nafigura 10:

Na etapa S301, determinar, adicionalmente, o número de nós para cada nível da árvore de busca. Isto conduz ao histograma nafigura 11, por exemplo. Decidir sob a forma desejada do histograma, por exemplo, uma

30 função exponencial da profundidade da árvore de busca. Esta forma também já pode ser predefinida.

Na etapa S301, seleccionar o nível que viola a forma de histograma mais desejada. Para este nível, seleccionar a sequência de comutação

(incompleta) com o menor valor de qualidade, por exemplo, e priorizar a mesma.

Uma grande proporção das modalidades descritas acima contribui para uma redução no tempo de computação médio. No entanto, pode ser igualmente importante limitar o tempo máximo de computação.

Isto pode ser alcançado em virtude do fato de que o número máximo de etapas de computação ou do tempo de computação é limitado, que as soluções sub ótimas para o problema de MPDTC são permitidas, mas é possível assegurar que uma boa sequência de comutação (candidata) seja sempre encontrada.

Conforme descrito acima, uma sequência de comutação candidata resulta em trajetórias de variáveis de saída que são permissíveis, isto é, estão dentro de determinados limites ou apontam na direção correta.

Afigura 12 mostra o desenvolvimento de valores de qualidade (neste caso, com base nas perdas de comutação) ilustrado através do número de iterações durante uma busca de árvore. No gráfico, o número de iterações é representado em direção à direita e as perdas de comutação em quilowatts são representadas em direção ao topo.

É evidente a partir do gráfico que o valor de qualidade ótimo é rapidamente encontrado, neste caso, após aproximadamente 25% do número total de iterações. A maioria das iterações (neste caso, 75%) é somente usada para confirmar a otimização da solução. O primeiro elemento ótimo da sequência de comutação, isto é, a próxima transição de comutação ótima, é encontrado até previamente (dentro de menos do que 25% do número total de iterações).

Portanto, pode ser conveniente implantar um método de MPDTC sub-ótimo. A fim de implantar um algoritmo ou método MPDTC sub-ótimo, podem ser feitas as seguintes modificações aos algoritmos MPDTC anteriormente descritos.

Na etapa S18 a partir das figuras 4 e 10, pode ser usada uma condição de saída adicional ou alternativa para terminar a recorrência:

- Um limite superior para o número de sequências de comutação

ou nós que são investigados e/ou um limite superior para o tempo de computação colocado à disposição é introduzido. O algoritmo é interrompido se este número ou este tempo for excedido. A sequência de comutação ótima determinada até a saída é usada como a solução (sub ótima).

5 - Como uma alternativa para isto, o algoritmo de otimização pode ser executado até que ocorra uma interrupção que interrompa a busca de árvore. Uma interrupção pode interromper a busca de árvore em qualquer momento. Isto torna possível evitar o tempo ocioso do processador e, ao contrário, utilizar este tempo com o aperfeiçoamento da solução ótima neste momento.

10 - Também é possível interromper o algoritmo se uma garantia para a proximidade à otimização for alcançada. Neste caso, é determinada uma margem de otimização aceitável que pode consistir, por exemplo, em 2% em relação à função de qualidade. A busca de árvore é interrompida quando tiver sido determinada uma sequência de comutação completa que se encontra dentro de 2% do melhor c_{lb} , onde c_{lb} representa a barreira inferior para a qualidade de sequências de comutação incompletas.

15 Adicionalmente, é possível assegurar que seja sempre encontrada uma boa sequência de comutação que é permissível, cujo primeiro estado de comutação ou transição de comutação é permissível, que assegura a resposta estável do acionamento (isto é, as trajetórias de variável de saída do mesmo oscilam dentro dos limites ou se aproximam destes limites) e/ou que assegura um bom desempenho da máquina e do conversor (a qualidade prevista é pequena). Isto pode ser alcançado em uma variedade de maneiras:

25 - Um algoritmo de partida quente "Warm start" combinado com um algoritmo de busca em profundidade "Depht-first", conforme é descrito acima, por exemplo, cumpre as pré-condições de encontrar uma solução (sequência de comutação) sobre todo o horizonte de comutação que está próximo à sequência de comutação ótima rapidamente.

30 - Também é possível implantar o algoritmo com dois horizontes de comutação de diferentes comprimentos durante um ciclo de controle. Em

um estágio preliminar, o algoritmo de comutação com um curto horizonte de comutação é implantado e uma sequência de comutação sub ótima ou ótima para este curto horizonte de comutação é calculado. Esta sequência de comutação pode ser, então, usada para executar o estágio principal do método de otimização por meio do algoritmo de "partida quente", por exemplo.

Adicionalmente, conforme já tem sido descrito, a área de busca pode ser reduzida mediante a remoção de transições de comutação não-promissoras (nós) a partir da árvore de busca. Isto pode ser executado, por exemplo, com base em uma análise geométrica, conforme descrito acima.

Deve-se compreender que as diversas modalidades descritas acima dos métodos e algoritmos podem ser combinadas umas com as outras, mesmo se isto não for explicitamente mencionado.

Os métodos e algoritmos podem ser implantados como módulos de software programados. No entanto, a possibilidade dos métodos e algoritmos serem mapeados ao menos parcialmente por meio de hardware não é descartada.

Deve ser mencionado também que "compreender" não descarta quaisquer outros elementos ou etapas que "um" não descarta um número maior. Além disso, deve-se observar que as características ou etapas que têm sido descritas com referência a uma das modalidades exemplificadoras acima também podem ser usadas em combinação com outras características ou etapas a partir de outras modalidades exemplificadoras descritas acima. Os símbolos de referência nas reivindicações não deveriam ser considerados como qualquer forma de restrição.

LISTAGEM DE REFERÊNCIA

- 1 máquina elétrica de rotação
- 2 circuito de conversor para a comutação de três níveis de voltagem
- 3 circuito de voltagem DC
- 4 sistema de sub conversor
- 5, 6, 7 primeiro, segundo e terceiro grupo de comutação, elemento de comutação

	9	semicondutor de energia
	10	controlador
	12	linha de controle
	14	linha de sinal de medição
5	16	processador
	20, 22, 24	sequências de comutação candidatas
	26, 28, 30	trajetórias de torque
	32, 34, 36	trajetórias do fluxo do estator
	38	árvore de busca
10	40	nó de comutação
	42	nó de intermissão
	43	nó rejeitado
	ψ_s	vetor de fluxo do estator
	ψ_r	vetor de fluxo do rotor
15	v	vetor de voltagem
	44	limite de histerese interno/inferior
	46	limite de histerese externo/superior
	48	trajetória
	t_s	menor intervalo de amostragem
20	T_s	intervalo de amostragem ordinário
	50	ponto de interseção
	52, 54	intervalo
	58, 60, 62	valores de qualidade de sequências de comutação
	64, 66	número de nós a serem investigados ou investigado
25		

REIVINDICAÇÕES

1. Método para a operação de uma máquina elétrica de rotação (1), em que a máquina elétrica de rotação é suprida com corrente elétrica por um conversor (2) a partir de um circuito de voltagem CC através de ao menos uma fase (u, v, w), e o conversor é projetado para comutar a ao menos uma fase para ao menos dois níveis de voltagem,
- 5 o método que compreende as seguintes etapas:
- gerar sequências de comutação, em que cada sequência de comutação compreende uma série de transições de comutação do conversor com uma primeira transição de comutação;
- 10 avaliar cada uma das sequências de comutação com um valor de qualidade (S20);
- selecionar a sequência de comutação com um valor de qualidade mínimo (S22);
- 15 acionar os elementos de comutação do conversor com a primeira transição de comutação da sequência de comutação selecionada como a transição de comutação selecionada, com o resultado em que ao menos uma fase é comutada para um nível de voltagem que corresponde à transição de comutação;
- 20 em que as sequências de comutação são geradas conforme exposto a seguir:
- (a) uma sequência de comutação relativamente longa é gerada a partir de uma sequência de comutação relativamente curta, em que ao menos uma transição de comutação possível é fixada à sequência de comutação relativamente curta (S14), e uma primeira sequência de comutação com uma transição de comutação pré-selecionada é inicializada (S10);
- 25 (b) as variáveis de saída da máquina elétrica são calculadas para a sequência de comutação relativamente longa com base nas transições de comutação da sequência de comutação relativamente longa (S14);
- 30 (c) a sequência de comutação relativamente longa é rejeitada se as variáveis de saída calculadas não estiverem dentro dos limites predefinidos e/ou as variáveis de saída calculadas se tornarem removidas a partir de

um limite predefinido à medida que o tempo aumenta (S16);

as sequências de comutação adicionais são geradas iterativamente a partir de a sequência de comutação não rejeitada de acordo com as etapas (a) a (c) (S12 a S18).

5 2. Método, de acordo com a reivindicação 1, em que o valor de qualidade é com base nas perdas de comutação do conversor a serem esperadas ou na frequência de comutação do conversor a ser esperada no caso da respectiva sequência de comutação.

10 3. Método, de acordo com a reivindicação 1 ou 2, em que as sequências de comutação contêm elementos de intermissão na série de transições de comutação, em que um elemento de intermissão define uma intermissão de comutação após uma transição de comutação;

em que a intermissão de comutação é determinada pelo cálculo de variáveis de saída;

15 em que o cálculo de variáveis de saída é com base em um modelo matemático da máquina elétrica de rotação ou em uma aproximação.

4. Método, de acordo com a reivindicação 3, que compreende, adicionalmente:

20 gerar uma sequência de comutação que compreende as transições de comutação e os elementos de intermissão com base em um horizonte de comutação generalizado, o qual define a ordem na qual as transições de comutação e os elementos de intermissão são unidos na sequência de comutação.

25 5. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, em que, durante o cálculo de variáveis de saída, é determinado o tempo no qual a trajetória de uma variável de saída alcança um limite inferior ou superior e predefinido no futuro.

30 6. Método, de acordo com a reivindicação 5, em que a determinação do tempo é executada de maneira analítica, com o uso de um método de otimização para a determinação de zeros, mediante a aproximação de funções trigonométricas por série de Taylor e/ou mediante a aproximação de funções trigonométricas por funções de polinômio por partes.

7. Método, de acordo com a reivindicação 5 ou 6, em que a resistência de fluxo do estator entra no cálculo ao determinar o tempo.

8. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores,

5 em que o cálculo de trajetórias das variáveis de saída é com base em um modelo matemático da máquina de rotação e em uma interpolação,

em que as variáveis de saída são interpoladas em um intervalo de tempo que inclui um predeterminado número de etapas de tempo diferentes,

em que no intervalo, as variáveis de saída são calculadas com o modelo matemático para ao menos três momentos.

9. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, que compreende, adicionalmente:

15 calcular um valor de qualidade para a sequência de comutação do comprimento n durante a iteração.

10. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, que compreende, adicionalmente:

20 calcular um limite inferior para os valores de qualidade com base em valores de qualidade anteriormente calculados de sequências de comutação completas;

rejeitar as sequências de comutação cujo valor de qualidade excede o limite inferior para valores de qualidade.

25 11. Método, de acordo com a reivindicação 10, que compreende, adicionalmente:

calcular o valor de qualidade com o uso de um limite superior para um comprimento máximo esperado de uma sequência de comutação.

12. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores,

30 em que primeiro é calculado o valor de qualidade de uma sequência de comutação promissora;

em que a sequência de comutação promissora é com base em

ao menos um dentre as seguintes:

uma sequência de comutação ótima de um ciclo de controle anterior,

- 5 uma etapa de otimização anterior com um horizonte de comutação relativamente curto como um presente horizonte de comutação.

13. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores,

- 10 em que uma sequência de comutação a ser investigadas com o nível de prioridade mais alto é determinada,

em que, durante a próxima iteração, a sequência de comutação com o nível de prioridade mais alto é investigada.

14. Método, de acordo com a reivindicação 13,

- 15 em que a priorização é executada com o uso de ao menos uma dentre as seguintes regras:

as sequências de comutação, para as quais há uma maior probabilidade das ditas sequências de comutação resultarem em um baixo valor de qualidade, são priorizadas;

- 20 as sequências de comutação, para as quais há uma maior probabilidade das ditas sequências de comutação manterem as variáveis de saída dentro dos limites predefinidos e/ou as variáveis de saída chegarem próximo ao limite predefinido à medida que o tempo aumenta, são priorizadas;

- 25 as sequências de comutação para as quais, com base em uma estimação, se espera que as ditas sequências de comutação irão conduzir a longas intermissões de comutação sem quaisquer transições de comutação, são priorizadas;

as sequências de comutação são priorizadas com o uso de seus valores de qualidade;

- 30 as sequências de comutação são priorizadas com o uso de seu comprimento.

15. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações an-

teriores, que compreende, adicionalmente:

terminar a geração das sequências de comutação se todas as sequências de comutação até um comprimento predeterminado tiverem sido geradas.

5 16. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, que compreende, adicionalmente:

terminar a geração das sequências de comutação se um limite superior para o número de sequências de comutação geradas tiver sido alcançado ou o tempo de computação disponível tiver decorrido.

10 17. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, que compreende, adicionalmente:

terminar a geração das sequências de comutação se tiver sido determinada uma sequência de comutação cujo valor de qualidade excede um limite inferior para os valores de qualidade por menos do que uma por-
15 centagem definida.

18. Controlador (10) para um conversor elétrico (2), o qual é projetado para implantar o método como definido em qualquer uma das reivindicações 1 a 17.

19. Sistema de motor, que compreende:
20 uma máquina elétrica de rotação (1);
um conversor elétrico (2) com um controlador (10) como definido na reivindicação 18, o qual é projetado para suprir corrente para a máquina elétrica de rotação (1).

20. Programa de computador que, se for implantado em um processador (16), instrui o processador para implantar as etapas do método como definido em qualquer uma das reivindicações 1 a 17.

21. Meio legível por computador, no qual um programa de computador é armazenado, que, se for implantado em um processador (16), instrui o processador para implantar as etapas do método como definido em.
30 qualquer uma das reivindicações 1 a 17.

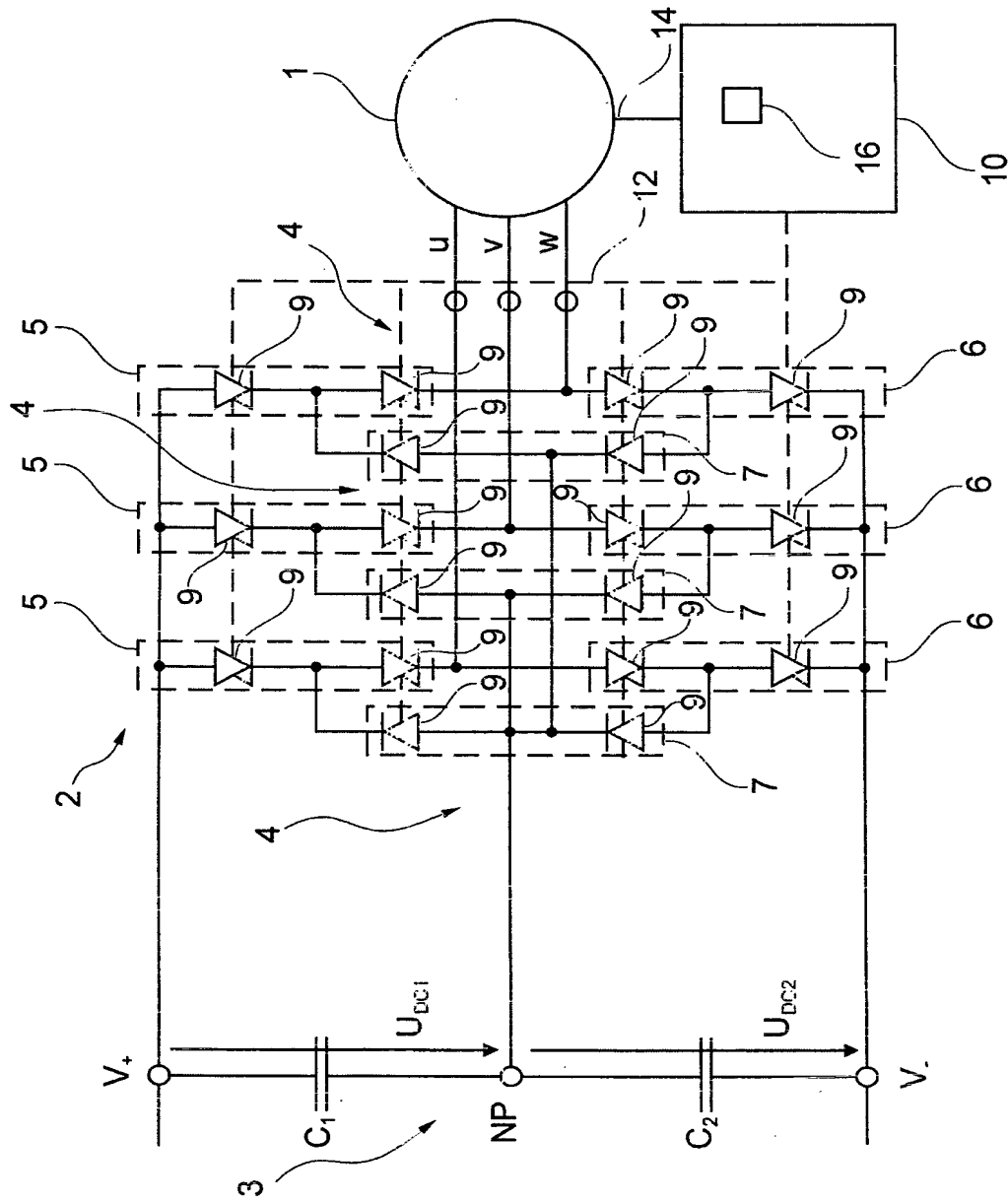


Fig. 1

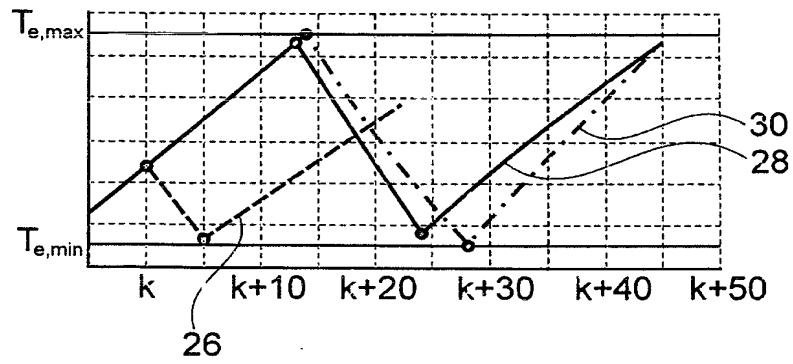


Fig. 2a

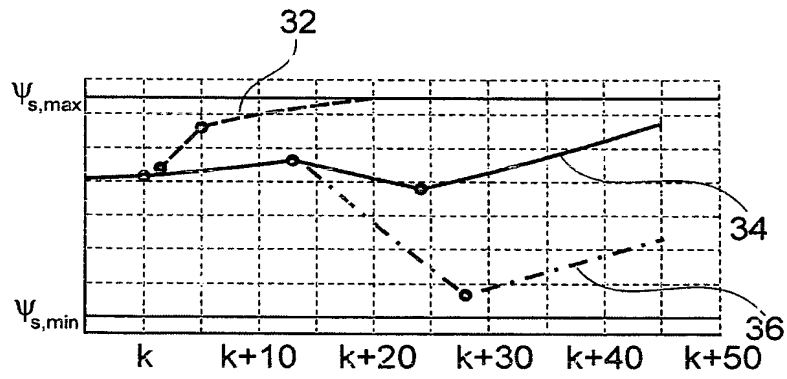


Fig. 2b

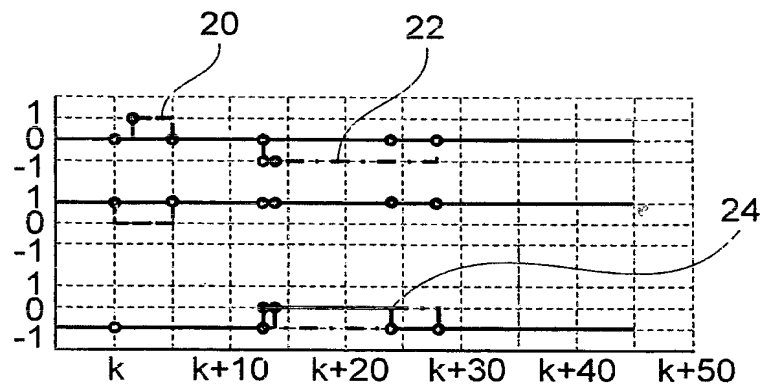


Fig. 2c

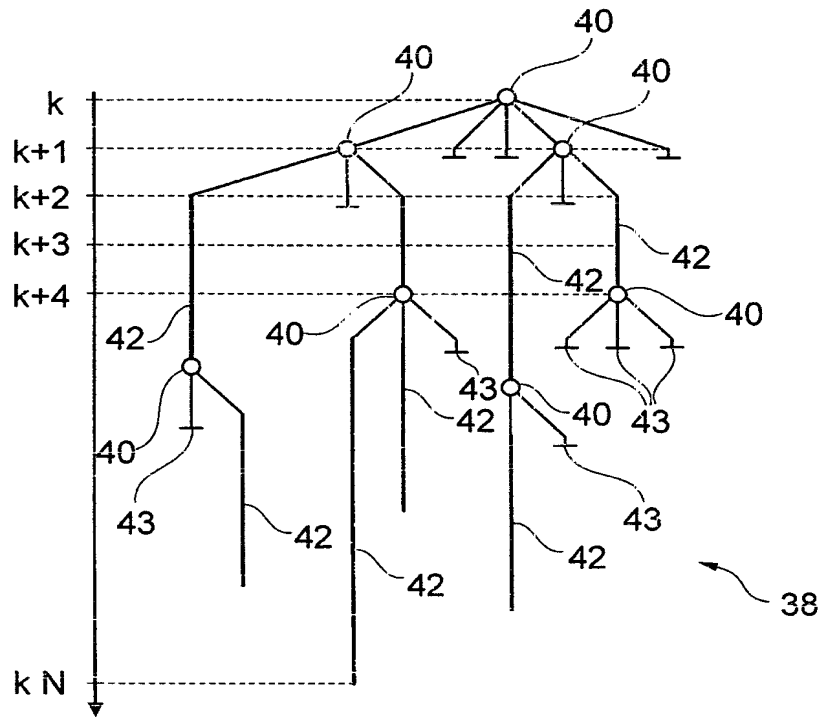


Fig. 3

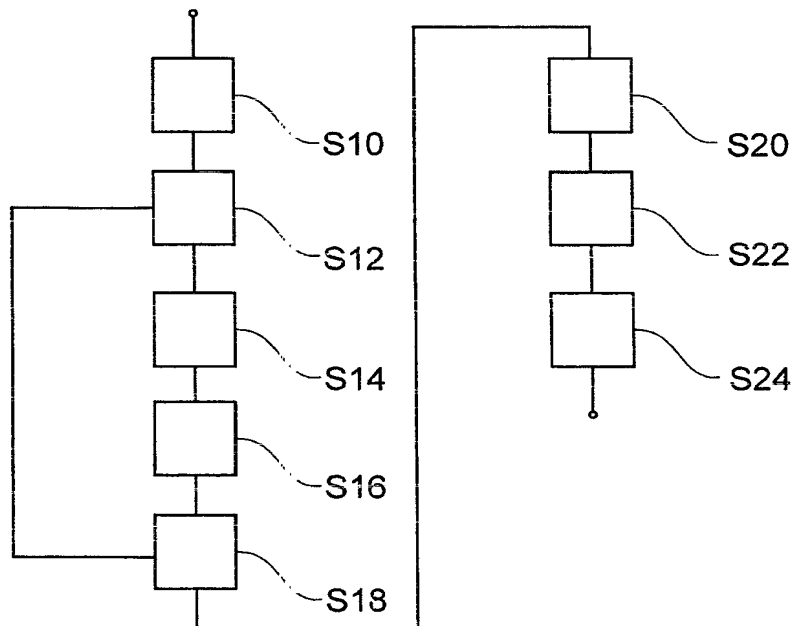


Fig. 4

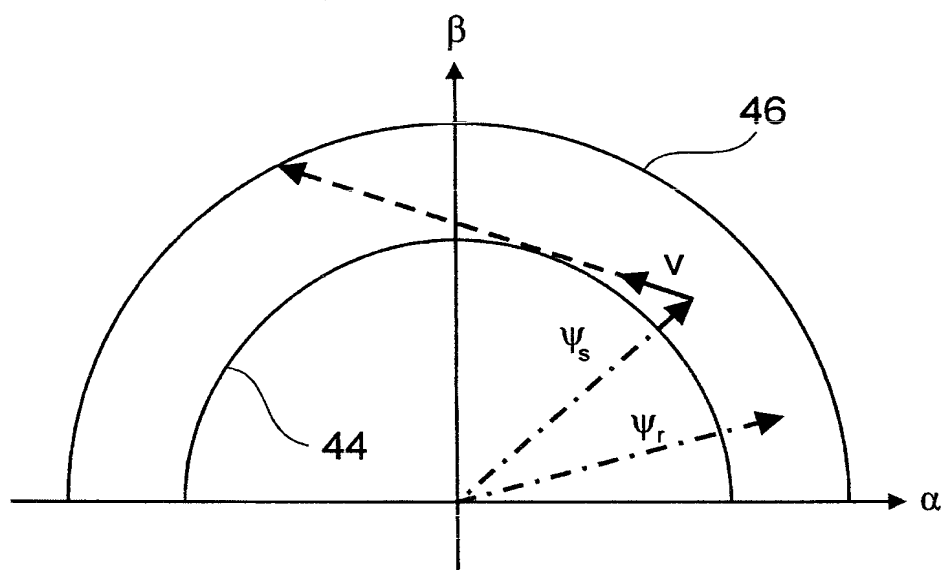


Fig. 5

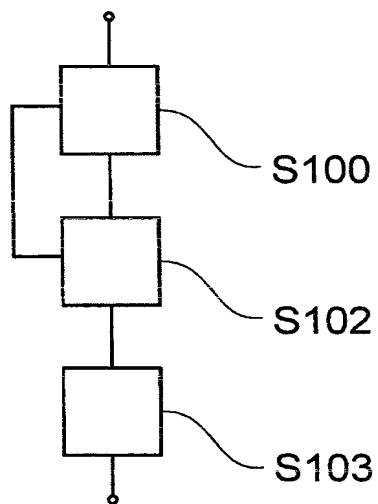


Fig. 6

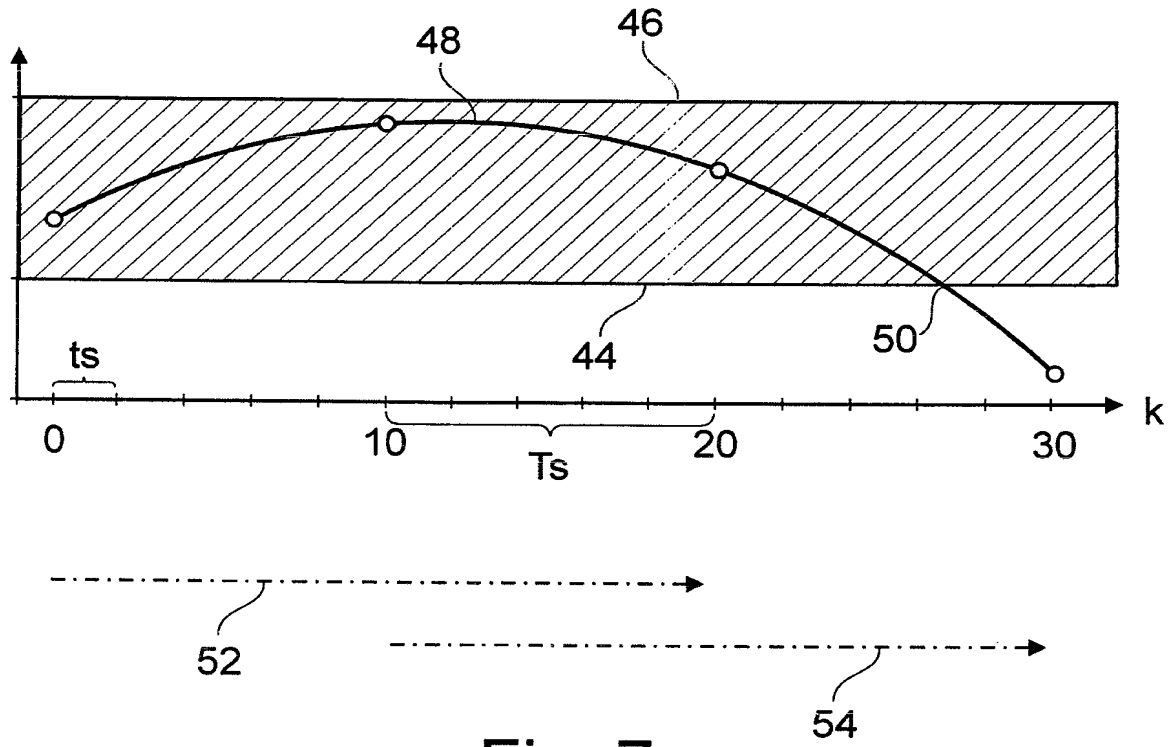


Fig. 7

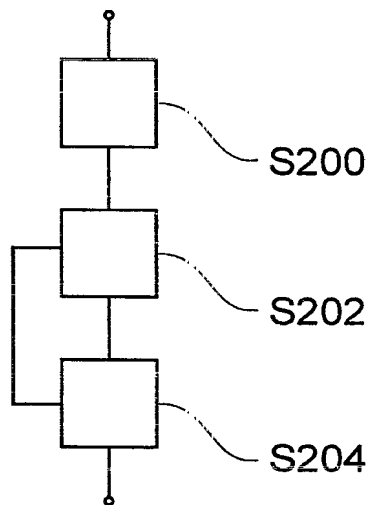


Fig. 8

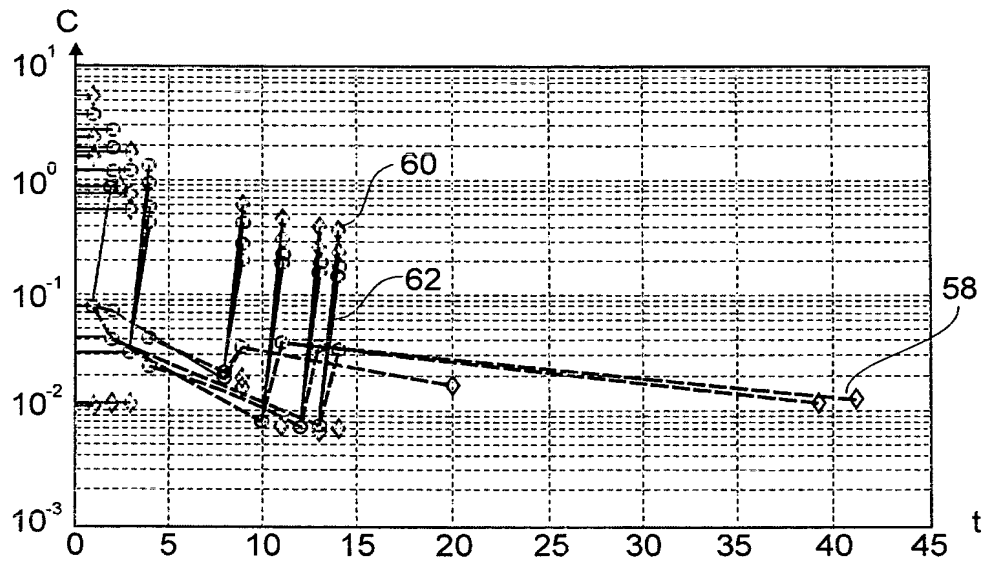


Fig. 9

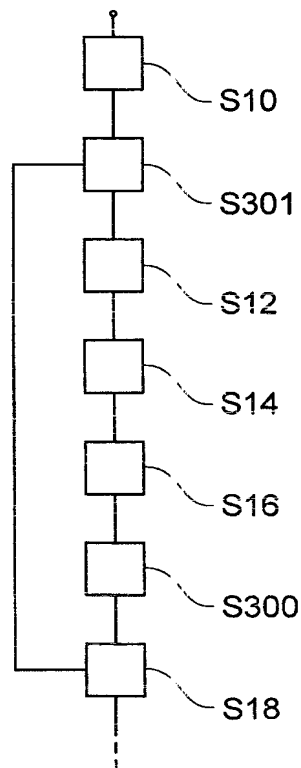


Fig. 10

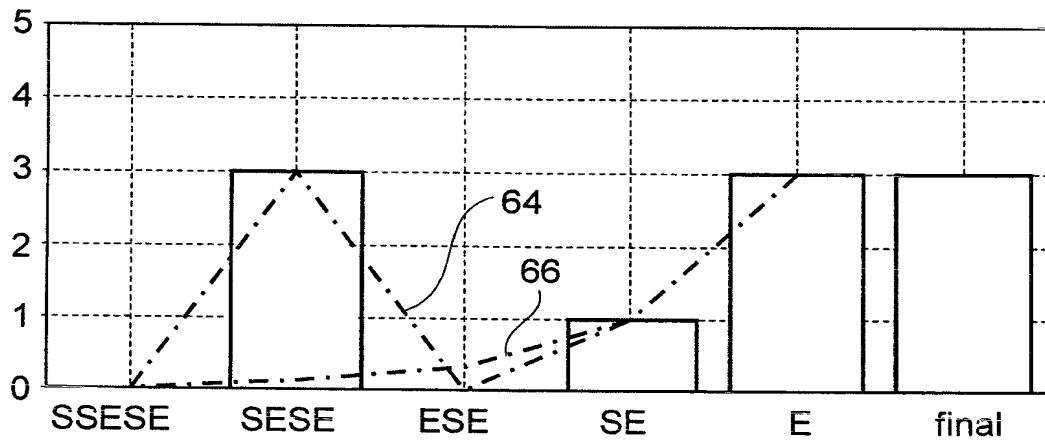


Fig. 11

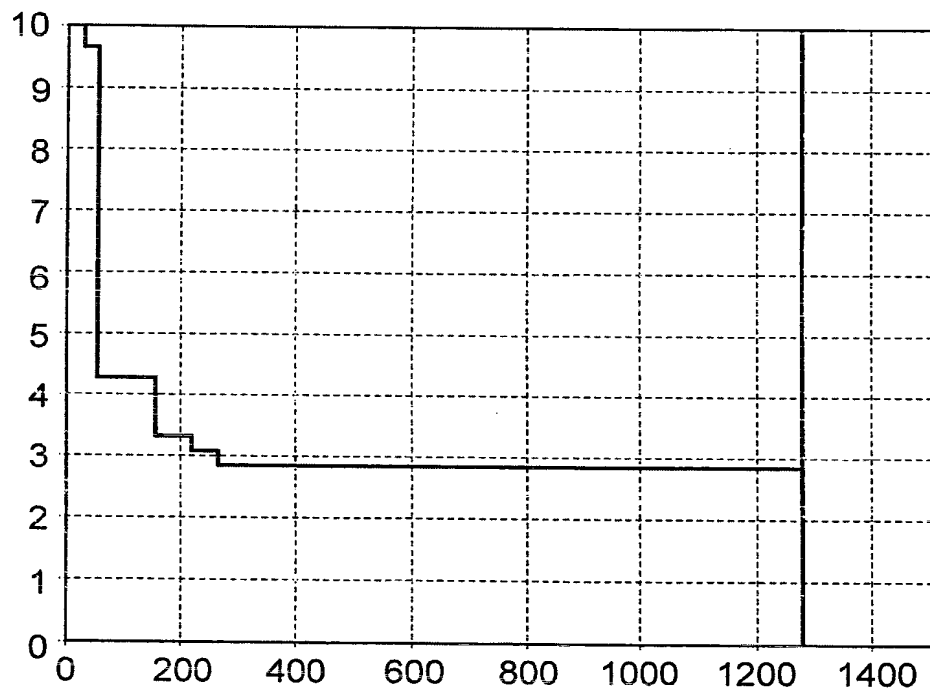


Fig. 12

RESUMO

Patente de Invenção: "**CONTROLADOR PARA UMA MÁQUINA ELÉTRICA DE ROTAÇÃO**".

- 5 A fim de minimizar as perdas de comutação em uma máquina elétrica de rotação, descreve-se um método de controle iterativo que calcula os estados de comutação ótimos antecipadamente.