

Esse trabalho apresenta o desenvolvimento de uma estratégia de controle tolerante a falhas de abertura de fase para motores BLDC com minimização da corrente RMS das fases saudáveis. Além disso, é proposto também um algoritmo capaz de detectar e identificar falhas. Após o diagnóstico de uma falha de fase aberta, o controle *six-step* 120° é alterado para um acionamento de apenas dois *steps* em 180°. O controle na condição de falha multiplica a corrente de referência do controlador por uma onda trapezoidal unitária em sincronismo com as tensões induzidas entre as fases saudáveis para melhorar a eficiência e impõe na malha de velocidade uma banda passante menor para que esta influencie apenas na amplitude da corrente e não em seu formato. Os resultados apresentados mostram que a técnica de controle possibilita uma corrente RMS aproximadamente 35% menor do que o acionamento usual sem técnicas de minimização de corrente.

Orientador: Dr. José de Oliveira

Coorientador: Dr. Tiago Jackson May Dezuo

JOINVILLE, 2017

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CONTROLE PARA MOTORES BLDC SOB FALTA DE FASE COM REDUÇÃO DE CORRENTE

CESAR DA SILVA LIBERATO

JOINVILLE, 2017

CESAR DA SILVA LIBERATO

**CONTROLE PARA MOTORES BLDC SOB FALTA DE FASE COM REDUÇÃO
DE CORRENTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. José de Oliveira.

Coorientador: Dr. Tiago Jackson May Dezuo.

JOINVILLE – SC
2017

Ficha catalográfica elaborada pelo(a) autor(a), com
auxílio do programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CCT/UDESC

Liberato, Cesar da Silva
CONTROLE PARA MOTORES BLDC SOB FALTA DE FASE COM
REDUÇÃO DE CORRENTE / Cesar da Silva Liberato. -
Joinville , 2017.
98 p.

Orientador: José de Oliveira
Co-orientador: Tiago Jackson May Dezuo
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado
de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas,
Programa de Pós-Graduação -- Selezione --, Joinville,
2017.

1. Controle tolerante a falhas. 2. Motores BLDC.
3. Falta de fase. I. de Oliveira, José. II. Jackson
May Dezuo , Tiago. , .III. Universidade do Estado
de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas,
Programa de Pós-Graduação -- Selezione --. IV. Título.

Controle para Motores BLDC sob Falta de Fase com Redução de Corrente

por

Cesar da Silva Liberato

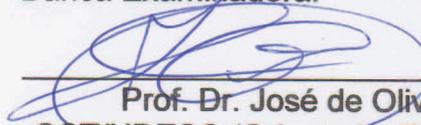
Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Área de concentração em "Sistemas Eletroeletrônicos"
e aprovada em sua forma final pelo

CURSO DE MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA.

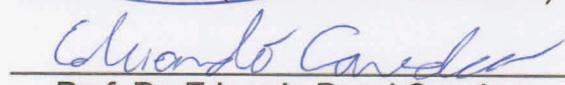
Banca Examinadora:



Prof. Dr. José de Oliveira
CCT/UDESC (Orientador/Presidente)

video conferência

Prof. Dr. Antonio da Silva Silveira
UFPA



Prof. Dr. Eduardo Bonci Cavalca
CCT/UDESC

Joinville, SC, 15 de dezembro de 2017.

Dedico este trabalho à minha mãe, aos meus irmãos, à minha amada companheira Camila e a todos os colegas e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente a Deus, por estar sempre ao meu lado.

Minha mãe e meus irmãos, os quais foram e são a minha maior referência e base para o que eu sou hoje, também não podem faltar nos meus agradecimentos, pois sem eles eu não estaria documentando agora esse trabalho.

Agradecimento especial à minha amiga, companheira, namorada Camila por fazer meus dias mais felizes, transformando essa jornada menos dolorosa e mais alegre.

Aos amigos e colegas do Grupo de Controle de Sistemas (GCS) pela companhia e pela troca de conhecimentos realizados durante a escrita deste trabalho.

Ao meu orientador, Professor Dr. José de Oliveira, pelo apoio, pela troca de conhecimento e pela amizade.

Ao meu coorientador, Professor Dr. Tiago May Dezuo, pelas ideias, correções e discussões referente ao trabalho.

À FAPESC, pela manutenção da bolsa de mestrado.

À UDESC, pela estrutura disponibilizada pela Universidade.

“Eu já reparei que até as pessoas que dizem que tudo é pre-determinado, e que não podemos fazer nada para mudar isso, olham antes de atravessar a rua...” (Stephen Hawking)

RESUMO

Esse trabalho apresenta o desenvolvimento de uma estratégia de controle tolerante a falhas de abertura de fase para motores BLDC com minimização da corrente RMS das fases saudáveis. Além disso, é proposto também um algoritmo capaz de detectar e identificar falhas. Após o diagnóstico de uma falha de fase aberta, o controle *six-step* 120° é alterado para um acionamento de apenas dois *steps* em 180° . O controle na condição de falha multiplica a corrente de referência do controlador por uma onda trapezoidal unitária em sincronismo com as tensões induzidas entre as fases saudáveis para melhorar a eficiência e impõe na malha de velocidade uma banda passante menor para que esta influencie apenas na amplitude da corrente e não em seu formato. Os resultados apresentados mostram que a técnica de controle possibilita uma corrente RMS aproximadamente 35% menor do que o acionamento usual sem técnicas de minimização de corrente.

Palavras-chave: Controle tolerante a falhas, Motores BLDC, Falta de fase.

ABSTRACT

This paper presents the development of a tolerant control to open-phase faults for BLDC motors with a technique to minimize the RMS current value of the healthy phases. Moreover, an algorithm capable of detecting and identifying faults is also proposed. After the open-circuit fault diagnosis, the 120° six-step driver is altered to a 180° two-steps driver. Operating under fault condition, the control multiplies the reference current by an unitary trapezoidal wave in synchronism with the voltages induced between the healthy phases to improve efficiency and have a lower passband in the speed control loop so that it influences only the amplitude (not the shape) of the reference of the current. The results show that the control technique allows a RMS current approximately 35% lower than with the usual driving method.

Key-words: Fault-tolerant control, BLDC motor, Open-phase.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tensão induzida em motores do tipo BLDC.	33
Figura 2 - Motores Síncronos de Ímãs Permanentes (MSIP) com rotor interno e rotor externo.	34
Figura 3 - Circuito elétrico equivalente de um motor BLDC trifásico equilibrado.	36
Figura 4 - Acionamento <i>six-step</i> de 120° em motores BLDC.	38
Figura 5 - Acionamento <i>six-step</i> de 180° em motores BLDC.	39
Figura 6 - Formas de onda das tensões trapezoidais, correntes, torque e corrente observada pelo controlador.	40
Figura 7 - Malha de controle em cascata de velocidade e torque/corrente utilizada.	42
Figura 8 - Circuito elétrico equivalente de um motor BLDC trifásico sob falta da fase C.	45
Figura 9 - Formas de onda de tensões trapezoidais, correntes, torque e corrente observada pelo controlador quando operado sob falta de fase.	46
Figura 10 - Formas de onda de tensões trapezoidais, correntes, torque e corrente observada pelo controlador quando operado sob falta de fase com técnica de acionamento em 180°	47
Figura 11 - Simulação de uma falha com as principais componentes da detecção.	50
Figura 12 - Inversor utilizado para detecção do retorno de fase.	51
Figura 13 - Diagrama de Bode da FTLA da malha de corrente.	53
Figura 14 - Diagrama de Bode da FTLA da malha de velocidade.	54
Figura 15 - Simulação numérica motor BLDC operando sem falta de fase: a) Velocidade; b) Tensão de fase E_{ab} ; c) Correntes I_a , I_b e I_c	55
Figura 16 - Simulação numérica com técnica de acionamento em 180° em condição de falta de fase C: a) Velocidade; b) Tensão induzida de fase E_{ab} ; c) Correntes de fase I_a , I_b e I_c	56
Figura 17 - Malha de controle em cascata de velocidade e corrente proposto.	58

Figura 18 - Simulação numérica com técnica de acionamento em 180° e com formato de corrente trapezoidal pré-definido em condição de falta de fase C: a) Velocidade; b) Tensão induzida de fase E _{ab} ; c) Correntes de fase I _a , I _b e I _c	58
Figura 19 - Controlador proposto sob variações na carga e na referência de velocidade: a) Velocidade; b) Correntes de fase I _a , I _b e I _c	59
Figura 20 - Formato trapezoidal dinâmico utilizado para gerar a referência de corrente no motor BLDC em condições de falta de fase.	61
Figura 21 - Simulação numérica com técnica de acionamento em 180° e com formato de corrente trapezoidal dinâmica em condição de falta de fase C: a) Velocidade; b) Tensão induzida de fase E _{ab} ; c) Correntes de fase I _a , I _b e I _c	62
Figura 22 - Simulação com técnica de acionamento em 180° e com formato de corrente trapezoidal dinâmica em diferentes pontos de operação.	63
Figura 23 - Arduino DUE.....	65
Figura 24 - Interface do usuário para controle de motor BLDC.	68
Figura 25 - Placa para integração entre Arduino e Inversor de Frequência.	69
Figura 26 - Curva estimada de Torque/Potência por velocidade do motor BLDC utilizado.	72
Figura 27 - Bancada de testes (Motor e gerador BLDC).	73
Figura 28 - Circuito de carga para testes.....	73
Figura 29 - Detecção e tratamento na falta de fase na velocidade de 100RPM.	74
Figura 30 - Detecção e tratamento de falta de fase na velocidade de 100RPM.	75
Figura 31 - Detecção do retorno da fase B na velocidade de 100RPM.	76
Figura 32 - Acionamento motor BLDC em condições normais na velocidade de 100RPM (WT500).....	79
Figura 33 - Acionamento do motor BLDC em condições normais na velocidade de 100RPM (interface <i>LabVIEW</i>).....	79
Figura 34 - Acionamento do motor BLDC em falta de fase e sem técnica de minimização de corrente na velocidade de 100RPM (WT500).	80

Figura 35 - Acionamento do motor BLDC em falta e sem técnica de minimização de corrente na velocidade de 100RPM (interface <i>LabVIEW</i>).	80
Figura 36 – Acionamento do motor BLDC em falta de fase e com técnica de minimização de corrente na velocidade de 100RPM (WT500).....	81
Figura 37 - Acionamento do motor BLDC em falta de fase e com técnica de minimização de corrente na velocidade de 100RPM (interface <i>LabVIEW</i>).....	81
Figura 38 - Acionamento motor BLDC em falta e com técnica de minimização de corrente dinâmica na velocidade de 100RPM (WT500).....	82
Figura 39 - Acionamento do motor BLDC em falta de fase e com técnica de minimização de corrente dinâmica na velocidade de 100RPM (interface <i>LabVIEW</i>).	82
Figura 40 - Acionamento do motor BLDC em condições normais na velocidade de 500RPM (interface <i>LabVIEW</i>).	85
Figura 41 - Acionamento do motor BLDC em falta de fase e sem técnica de minimização de corrente na velocidade de 500RPM (interface <i>LabVIEW</i>).....	85
Figura 42 - Acionamento motor BLDC em falta de fase e com técnica de minimização de corrente na velocidade de 500RPM (interface <i>LabVIEW</i>).	86
Figura 43 - Acionamento do motor BLDC em falta de fase e com técnica de minimização de corrente dinâmica na velocidade de 500RPM (interface <i>LabVIEW</i>).	86
Figura 44 - Teste comparativo de temperatura entre as técnicas propostas.	88
Figura 45 - Partida de um motor com falta de fase (interface <i>LabVIEW</i>).	90
Figura 46 - Degrau de carga (de 40% para 60% do torque máximo) em um motor com falta de fase (interface <i>LabVIEW</i>).	90
Figura 47 - Degrau de referência na velocidade de 250RPM para 500RPM com torque de aproximadamente 40% do torque máximo.	91
Figura 48 - Teste de torque máximo no motor BLDC com e sem falta de fase.	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Correntes de fase com <i>six-step</i> em 120° de condução.	43
Tabela 2 - Algoritmo de detecção de falta de fase.....	49
Tabela 3 - Dados obtidos na caracterização do motor presente no laboratório.	52
Tabela 4 - Algoritmo para o cálculo do ângulo do trapézio dinâmico.	61
Tabela 5 - Dados obtidos na caracterização do motor presente no laboratório.	66
Tabela 6 - Quadro comparativo entre as técnicas propostas na velocidade de 100RPM.	78
Tabela 7 - Quadro comparativo entre as técnicas propostas na velocidade de 250RPM.	83
Tabela 8 - Quadro comparativo entre as técnicas propostas na velocidade de 500RPM.	84
Tabela 9 - Quadro comparativo entre as técnicas propostas na velocidade de 1000RPM.	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	<i>Amperes.</i>
CC	Corrente Contínua.
d	<i>Duty-Cycle.</i>
BEMF	<i>Back Electromotive Force.</i>
BLDC	<i>Brushless Direct Current electric motor.</i>
FTLA	Função de Transferência de Laço Aberto
MSIP	Motores Síncronos de Ímãs Permanentes.
RMS	<i>Root mean square.</i>
RPM	<i>Revolutions Per Minutes.</i>
s	Segundos.

LISTA DE SÍMBOLOS

B	Coeficiente de atrito viscoso do motor.
$C1$	Controlador de velocidade.
$C2$	Controlador de corrente.
E_a	Tensão induzida na fase A .
E_b	Tensão induzida na fase B .
E_c	Tensão induzida na fase C .
E_{ab}	Tensão induzida de linha entre as fases A e B .
I_a	Corrente elétrica na fase A .
I_b	Corrente elétrica na fase B .
I_c	Corrente elétrica na fase C .
I_{med}	Corrente observada pelo controlador de corrente.
I_{ref}	Corrente de referência do controlador de corrente.
K	Constante de fluxo.
J	Momento de inércia do motor.
L	Matriz de indutâncias do motor.
$L1$	Controlador de velocidade com banda reduzida – Lento.
M	Matriz de indutâncias mutuas do motor.
P	Número de polos do motor.
P_a	Potência na fase A .
P_b	Potência na fase B .
P_{TOTAL}	Potência total do motor.
T_e	Torque elétrico fornecido pelo motor.
$T_{analise}$	Tempo necessário para detectar uma falta de fase.
T_{falha}	Tempo que a corrente permanece inferior a 5% de I_{ref} .
T_l	Torque de carga.
V_a	Tensão aplicada no terminal do motor na fase A .
V_b	Tensão aplicada no terminal do motor na fase B .
V_c	Tensão aplicada no terminal do motor na fase C .
ω	Velocidade angular.
ω_{med}	Velocidade angular medida pelo controlador de velocidade.

ω_{ref} Referência de velocidade angular para o controlador de velocidade.

$\Delta_{velocidade}$ Delta de variação de velocidade.

Δ_{temp} Delta de variação de temperatura.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	OBJETIVOS	30
1.2	MATERIAIS E MÉTODOS	30
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	32
2	MOTORES BLDC.....	33
2.1	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES BLDC	33
2.2	MODELAGEM DO MOTOR BLDC	35
2.3	ACIONAMENTO DE MOTORES BLDC	36
2.3.1	Acionamento <i>six-step</i> 120°	37
2.3.2	Acionamento <i>six-step</i> 180°	38
2.4	MÁXIMA EFICIÊNCIA DE OPERAÇÃO	39
2.5	CONTROLE EM CASCATA EM MOTORES BLDC	42
2.6	APLICAÇÕES CRÍTICAS DE MOTORES BLDC	43
3	ACIONAMENTO DE MOTORES BLDC COM FALTA DE FASE	45
3.1	MODELO DO BLDC EM FALTA DE FASE	45
3.1.1	Máxima potência em falta de fase.....	48
3.2	DETECÇÃO DE FALTA	49
3.3	DETECÇÃO DO RETORNO DE FASE	50
3.4	ANÁLISE DO CONTROLE EM CONDIÇÕES DE FALTA DE FASE	51
3.5	CONTROLADOR PROPOSTO	57
3.6	TÉCNICA PARA MINIMIZAR A ONDULAÇÃO DE VELOCIDADE.....	60
4	PLATAFORMA PARA ACIONAMENTO DO MOTOR BLDC	65
4.1	ARDUINO <i>DUE</i>	65
4.2	INTERFACE <i>LabVIEW</i>	67

4.3	PLATAFORMA FINAL	68
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	71
5.1	MOTOR E BANCADA DE TESTES	72
5.2	DETECÇÃO DE FALTA DE FASE.....	74
5.3	DETECÇÃO DO RETORNO DE FASE.....	75
5.4	ACIONAMENTO EM FALTA DE FASE	76
5.4.1	Acionamento em 100RPM	76
5.4.2	Acionamento em 250RPM	83
5.4.3	Acionamento em 500RPM	83
5.4.4	Acionamento em 1000RPM	87
5.5	TESTE DE TEMPERATURA.....	88
5.6	CONTROLE EM FALTA DE FASE	89
5.6.1	Partida em falta de fase.....	89
5.6.2	Degrau de carga em falta de fase.....	89
5.6.3	Degrau de referência em falta de fase.....	91
5.7	TORQUE MÁXIMO APLICADO AO MOTOR COM E SEM FALTA	92
6	CONCLUSÕES GERAIS.....	93
6.1	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	94
	REFERÊNCIAS	97

1 INTRODUÇÃO

Os motores síncronos com ímãs permanentes (MSIP) estão presentes em um amplo espectro de aplicações domésticas, industriais e militares, especialmente devido ao seu acionamento eficiente e também pelo satisfatório desempenho alcançado ao solucionar o problema de ondulação no torque e na velocidade através de técnicas apropriadas de comutação (CARLSON, LAJOIE-MAZENC e FAGUNDES, 1992) (BERTOLUZZO, BUJA, *et al.*, 2012).

Os MSIP sem escovas com tensão induzida (*Back Electromotive Force* - BEMF) trapezoidal, comumente chamados de motores BLDC (*Brushless Direct Current*), podem ser encontrados em aplicações robóticas, aeroespaciais, veículos elétricos, processos de manufatura, acionamento de servo motores, dentre outras aplicações onde se requer alta propulsão e rendimento graças à maior densidade de potência e torque por ampere que podem ser alcançados nesses motores (EL-REFAIE, 2013).

O emprego de sistemas de acionamento robustos e confiáveis nos motores BLDC em muitas dessas aplicações é primordial. Por exemplo, possibilitando a aterrissagem de um drone de forma segura em uma situação de emergência (falha de uma fase), um sistema de controle tolerante pode evitar grandes perdas materiais e reduzir também o risco de acidentes (FARHAD, 2011). Entre as possíveis falhas em motores BLDC é possível citar: fase em aberto; fase em curto; irregularidades no entreferro; problema na excentricidade do motor; rolamentos; dentre outras (NEETHU e SREELEKHA, 2014). As falhas de fase aberta representam aproximadamente de 30% a 35% das situações que prejudicam o funcionamento normal do motor e são causadas normalmente por defeito nos conectores do motor, falha nos transistores do inversor, rompimento do cabo, dentre outros motivos (NEETHU e SREELEKHA, 2014). Em tal situação o motor passa a operar apenas com duas fases, afinal não é possível fluir corrente na fase em aberto. Diante do exposto, há grande motivação para o desenvolvimento de soluções com o objetivo em tornar o BLDC tolerante a falhas de circuito aberto de modo a manter a operação em níveis seguros por tempo suficiente para o desligamento da carga sem danos.

Para o desenvolvimento de um controle tolerante a falhas durante o acionamento de motor BLDC, são necessárias: (i) a detecção e identificação (diagnóstico completo) da falha e (ii) estratégias de acionamento para reparação completa ou parcial do sistema (MIRAFZAL, 2014). Recentemente, um dos enfoques de pesquisa na área de tolerância a

falhas em motores tem sido a implementação de redundâncias (e.g. inversores com braços extras) (FANG, LI, *et al.*, 2015). Entretanto, tais técnicas trazem desvantagens, como a complexidade do projeto, alto custo de manutenção e implementação, elevado volume, dentre outras.

Um desafio presente no controle tolerante de motores BLDC trifásicos sem redundância é que, operando com apenas duas fases, tem-se torque e velocidade altamente oscilatórios devido à ausência de fluxo/torque na posição elétrica do enrolamento em falta. Além disso, a ausência de uma das fases causa uma redução de um terço na potência de saída quando operado em malha aberta (JHA e GARLAPATI, 2014). Para compensar a perda de um terço do torque durante a falha, um controle tradicional em cascata tende a impor uma referência muito alta na malha de corrente para compensar a ausência de fluxo/torque na posição elétrica da fase em aberto, aumentando o valor RMS da corrente do motor. Isso ocasiona uma maior deterioração das bobinas saudáveis ou até mesmo ultrapassa os limites de corrente de projeto do motor.

~~1.1 OBJETIVOS~~

~~O objetivo geral desse trabalho é apresentar uma técnica de acionamento que mantém a operação segura de motores BLDC sob falta de fase para complementar o trabalho apresentado por JHA e GARLAPATI (2014). Como contribuição principal, o método resulta em redução das correntes RMS nas fases saudáveis e não requer redundâncias estruturais, tendo fácil implementação via *software* e baixo custo computacional. A ideia principal é impor um formato de corrente trapezoidal sincronizado com a BEMF das fases saudáveis do motor, fazendo com que o controlador não aplique corrente no motor nas posições elétricas onde não há fluxo e, conseqüentemente, onde não é possível produzir torque.~~

~~1.2 MATERIAIS E MÉTODOS~~

~~Para verificação dos controladores propostos no trabalho, é realizado uma ampla investigação nas técnicas apresentadas através de simulações numéricas e, em seguida, validação das simulações através de experimentos em bancada de testes.~~