

双凸极电机全桥变换器单相开路故障容错方案

魏佳丹, 周 波

(航空电源航空科技重点实验室(南京航空航天大学), 江苏省 南京市 210016)

Project on Single Phase Open-circuit Fault Tolerance of Doubly Salient Electro-magnet Motor Driven by Full-bridge Converter

WEI Jia-dan, ZHOU Bo

(Aero-Power Science-Technology Center(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics),
Nanjing 210016, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: Inverter is the weakest part of the motor drives, when the drive operates in unbalanced conditions under faults, it would cause serious problems. In order to improve drive's reliability, the fault tolerance is proposed and being realized following key steps such as fault detection, fault identification and fault isolation. The paper first analyzes the open phase faults of doubly salient electro-magnet motor (DSEM) drives, and classifies the various fault states. The proposed fault tolerance system provides compensation to maintain the performance of the drives for open-circuit faults in power inverter. The drive system after fault identification is reconstructed by the four-switch three-phase topology. The fault tolerance system quickly recovers the control performance after short detecting time. Experiments confirm the feasibility of the proposed fault tolerance system.

KEY WORDS: motor drives; fault detection; fault identification; fault tolerance; doubly salient electro-magnet motor

摘要: 电机驱动系统中变换器是最薄弱、故障出现率最高的环节, 故障后电机运行在非平衡状态, 长时间工作将导致电机损坏, 使整个系统丧失工作能力。因此对驱动系统变换器故障的检测、诊断是提高系统可靠性, 实现容错运行的关键。该文对电励磁双凸极电机驱动系统的全桥变换器单相故障进行了分析, 对各种故障状态进行了分类; 通过将故障桥臂切除, 重构系统变换器, 使驱动系统能够故障后容错运行, 并能够维持系统的输出特性。实验验证了该容错方案能够实现驱动系统从故障状态到容错运行的平滑、可靠切换, 有效提高了系统的可靠性。

关键词: 电机驱动系统; 故障检测; 故障诊断; 故障容错; 电励磁双凸极电机

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2007CB210302); 航空支撑科技基金(H0324-032); 江苏省高技术项目(BG2004009)。

The National Basic Research Program of China (973 Program)(2007CB210302).

0 引言

电机驱动系统中变换器功率器件和其控制、驱动电路是最易发生故障的薄弱环节^[1-6], 变换器故障将导致驱动系统电机工作在不平衡的工作状态, 长期下去将导致电机的损坏。而且现代电机驱动系统越来越广泛应用于军用、航空航天、工业自动化等对可靠性要求的领域, 对驱动系统中电机本体、控制系统除了完善保护措施外, 一些要求系统连续工作的场合, 如舰船舵机控制、飞机燃料传输及刹车控制等, 驱动系统出现故障后, 还必须要求维持驱动系统部分功能或保证重要部件能够继续运行^[7-8]。因此对电机驱动系统提出了故障后容错的要求^[9]。

容错指驱动系统在故障后仍能获得满意的驱动特性。电励磁双凸极电机驱动系统作为无刷直流驱动系统, 输出转矩脉动一直是制约其广泛应用的主要原因^[10-12], 尤其对结构类似开关磁阻电机的双凸极驱动系统, 转矩脉动、噪音是其最大缺点, 通过电机设计、控制方法优化能够改进其不足。但驱动系统变换器出现最常见的单相故障之后, 电机运行在不平衡状态时, 即故障相出现不规则电流, 将导致输出转矩产生无法抑制的转矩缺口, 扩大驱动系统输出转矩脉动, 恶化驱动系统输出特性。对驱动特性要求较高的场合, 必须对系统实现容错控制。

有关变换器故障分析, 国内、外研究主要集中在开关磁阻电机^[13]、无刷直流电机^[14]、异步电机^[15]驱动系统中, 尚未有文献报道双凸极电机驱动系统中的变换器故障容错分析。

容错控制在实际电机驱动系统中要求系统的软、硬件能够完成 3 个方面的任务^[16-17]: ①故障状

态的检测、辨别；②故障的诊断；③故障的恢复。本文分析了电励磁双凸极电机的单相故障状态，采用电机电流及电压检测方法，辨别变换器的故障种类，诊断故障发生位置，通过将故障发生相的桥臂切除，在线改变控制方法，引入四管三相变换器^[18-21]实现故障变换器的重构。实验验证表明电励磁双凸极电机在普通全桥变换器单相故障后，该方法能够使其平滑切换到四管三相变换器，并恢复系统驱动特性，维持输出转矩平稳，实现故障后的容错运行。

1 全桥变换器单相故障分析

基于全桥变换器的电励磁双凸极电机驱动系统如图 1 所示。变换器单相故障种类主要存在 4 种情况，其中单管故障以下管故障为例，如图 2 所示。

当变换器中存在单管短路情况时，如图 2(b)所示，随着电机旋转过程中导通逻辑的切换，将在某导通区间由于该故障桥臂的上管导通，形成如图 2(d)所示的单桥臂短路，导致母线严重过流，控制系统将通过保护措施封锁变换器驱动信号，同时开启能

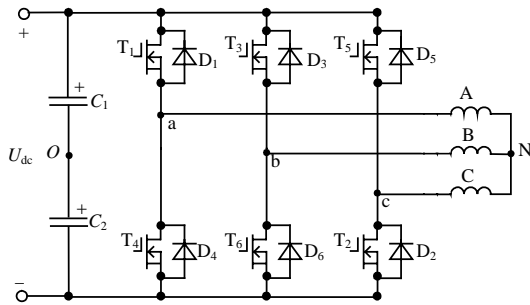


图 1 基于全桥变换器的电励磁双凸极电机驱动系统
Fig. 1 DSEM drive system based on full bridge converter

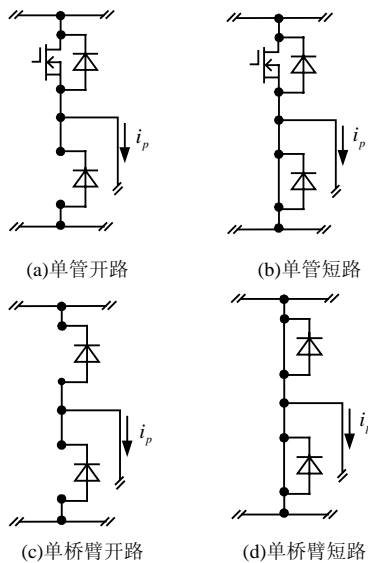


图 2 变换器单相故障
Fig. 2 Single phase faults of the converter

量泄放回路，制动电机。因此对变换器中单相出现恶劣的短路故障时，系统将通过保护措施来制动电机，防止故障范围的扩大，此类故障无法实现系统容错。因此本文对基于全桥变换器的单相桥臂故障分析主要考虑单相开路故障。

2 全桥变换器单相开路故障种类检测与诊断

2.1 单相开路故障分类

全桥变换器单相开路故障表现最为明显的就是故障相电流的变化，电励磁双凸极电机相绕组磁链及相电流波形如图 3 所示，采用三相三状态换流模式。

全桥变换器单相开路故障根据单管、单桥臂分类共有 9 类故障状态，不同故障状态对三相电流影响不同，可以通过系统相电流的状态逻辑判别故障类型。电机正向旋转时，相电流波形如图 3 所示。将图 3 一个周期的相电流分成 3 种状态，每状态占用 1/3 周期，该状态中三相电流是否正常工作可用逻辑值表示，若正常工作以 1 表示，否则用 0 表示。正常时，一个周期相电流状态逻辑值为 111。

在变换器出现故障时，影响每个状态逻辑值的功率管是不同的， T_1 、 T_2 管影响状态 1， T_3 、 T_4 管影响状态 2， T_5 、 T_6 管对状态 3 有影响。

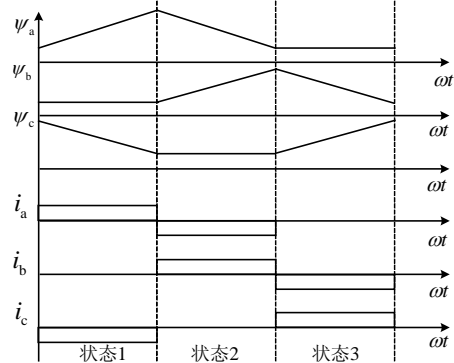


图 3 相绕组磁链与电流波形
Fig. 3 Flux and current waveform

2.2 单管开路故障检测与诊断

全桥变换器单管开路故障总共有 6 种，影响每个状态的 2 个功率管任一管开路故障时都将使该状态的相电流逻辑值为 0。 T_1 或 T_2 任一管出现开路故障后，都将导致该状态 1 中 A 相正电流、C 相负电流同时为零，而状态 2、状态 3 中相电流没有影响，因此出现 T_1 或 T_2 故障后，系统相电流状态逻辑为 011。6 种单管开路故障后系统相电流状态逻辑如表 1 所示。其中， T_1 或 T_2 管开路故障，系统相电流状态逻辑相同，仅通过检测电机相电流无法判别故障

发生位置，因此本文提出一种通过检测母线分裂式电容中点—相绕组端点之间电压差的方法来辨别故障发生管。

表1 单管开路故障后系统相电流状态逻辑

Tab. 1 System current state logic after single switch open-circuit

故障种类	故障源	系统相电流状态逻辑
单管开路故障	T ₁	011
	T ₂	011
	T ₃	101
	T ₄	101
	T ₅	110
	T ₆	110

以T₁或T₂管开路故障为例，检测如图1中所示U_{oa}。当T₁管开路故障时，三状态导通回路如图4所示。状态1中，T₂管开通：

$$U_{oa} = U_{dc} / 2 - U_a - U_c \quad (1)$$

式中：U_{dc}为母线电压；U_a、U_b、U_c为三相绕组的反电势。

状态2中，T₃、T₄管导通：

$$U_{oa} = U_{dc} / 2 \quad (2)$$

状态3中，T₅、T₆管导通：

$$U_{oa} = U_{dc} / 2 - U_N \quad (3)$$

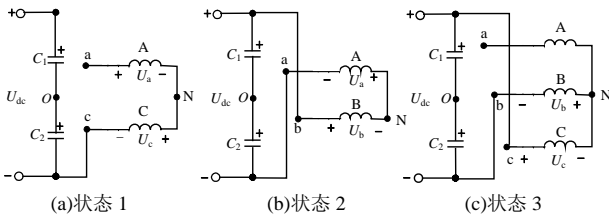


图4 T₁开路故障后的三状态导通回路

Fig. 4 Conductions of three states after T₁ opened

而T₂管开路故障时，三状态导通回路如图5所示。

状态1中，T₁管开通：

$$U_{oa} = -U_{dc} / 2 \quad (4)$$

状态2中，T₃、T₄导通：

$$U_{oa} = U_{dc} / 2 \quad (5)$$

状态3中，T₅、T₆导通：

$$U_{oa} = U_{dc} / 2 - U_N \quad (6)$$

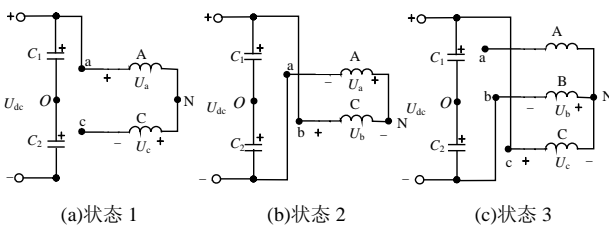


图5 T₂管开路故障后三状态导通回路

Fig. 5 Conductions of three states after T₂ opened

根据式(1)~(6)，出现T₁或T₂单管故障后U_{oa}电压波形如图6所示。通过状态1中U_{oa}极性即可辨别出哪管发生开路故障。因此对变换器单管开路故障时，可以通过系统相电流状态逻辑确定故障发生在哪两管，如T₁或T₂管，再通过U_{oa}在状态1的电压极性即可判别出故障发生位置。T₃、T₄管或T₅、T₆管故障通过类似的方式诊断。

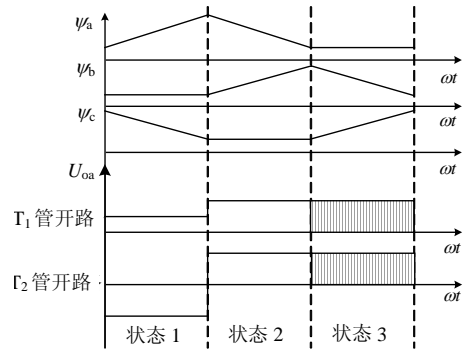


图6 单管开路故障时U_{oa}波形

Fig. 6 U_{oa} waveforms after single switch open-circuit

2.3 单桥臂开路故障检测与诊断

全桥变换器单桥臂开路故障只有3种，根据图3电励磁双凸极电机换流模式，以A相桥臂开路故障为例，状态1中由于T₁管开路，则A相正电流、C相负电流均为零，则该状态逻辑值为0；状态2中由于T₄管开路，A相负电流、B相正电流也均为零，此状态逻辑值也为0；状态3中T₅、T₆管正常工作，该状态逻辑值为1；因此A相桥臂开路故障后，系统相电流状态逻辑为001。与此类似，B、C相桥臂故障也可以通过系统相电流状态逻辑判别，如表2所示，相比较表1，系统单桥臂开路故障通过状态逻辑即可辨别故障发生相。

表2 单桥臂开路后系统相电流状态逻辑

Tab. 2 System current state logic after single phase-leg open-circuit

故障种类	故障源	系统状态逻辑
单桥臂开路故障	A相T ₁ 、T ₄	001
	B相T ₃ 、T ₆	100
	C相T ₅ 、T ₂	010

3 单相开路故障容错方法

3.1 故障变换器重构

在图1所示基于全桥变换器的电励磁双凸极电机系统中添加3个双向开关S₁、S₂、S₃，构成图7所示的具有单桥臂开路故障时容错特性的拓扑。

在检测单相出现开路故障时，判断故障发生位置后，通过双向开关将故障相切换到分裂式电容中

点，如 C 相桥臂发生开路故障，S3 切换后形成四管三相变换器，如图 8 所示。

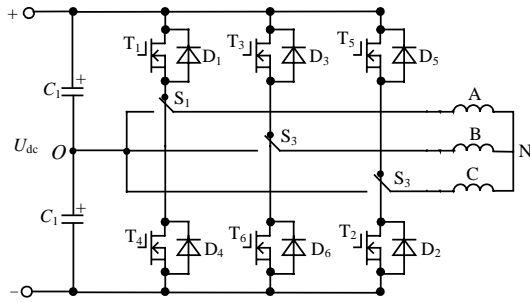


图 7 电励磁双凸极电容量错型变换器拓扑
Fig. 7 Tolerant converter topology of DSEM

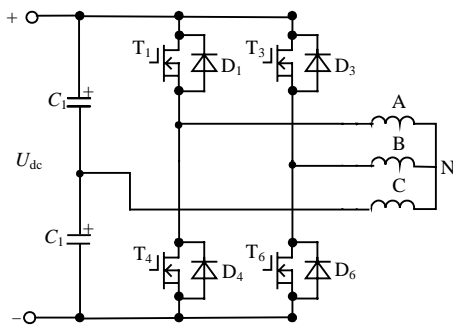


图 8 容错型四管三相变换器电励磁双凸极电机系统
Fig. 8 Tolerant four-switch three-phase converter of DSEM

3.2 电励磁双凸极电机四管三相控制方案

根据电励磁双凸极电机三相三状态导通模式，推导四管三相变换器的导通模式，如表 3 所示。

表 3 基于四管三相变换器的电励磁双凸极电机换流模式
Tab. 3 Commutation mode of DSEM based on four-switch three-phase converter

状态	工作相	变换器工作器件
1	A+C-	T ₁
2	B+A-	T ₃ 、T ₄
3	C+B-	T ₆

状态 1 或 3 中加在电机两相绕组的电压只有 $U_{dc}/2$ ，如在工作状态 1，T₁管导通时，有：

$$\frac{1}{2}U_{dc} = (L_a + L_c) \frac{di_a}{dt} + i_a \frac{d(L_a + L_c)}{dt} + i_f \frac{d(L_{af} - L_{cf})}{dt} \quad (7)$$

其中，基于分段线性电感模型时， L_a 、 L_c 分别为状态 1 中导通 A 相、C 相绕组自感， L_{af} 、 L_{cf} 分别为 A 相绕组、C 相绕组与励磁绕组的互感。该区间 L_a+L_c 为常数， $d(L_{af}-L_{cf})/dt$ 也为恒定值，设 $d(L_{af}-L_{cf})/dt=k$ ， k 为常数，则 A 相正半周电流变化率为 $di_a/dt=(U_{dc}/2-ki_f)/(L_a+L_c)$ 。

状态 3 与状态 1 类似， $L_a+L_c=L_c+L_b$ ，则 C 相绕组正半周电流变化率与状态 1 的 A 相正半周电流变

化率相同。

在状态 2 中，加在工作两相绕组两端的电压为 U_{dc} ，则

$$U_{dc} = (L_a + L_b) \frac{di_b}{dt} + i_b \frac{d(L_a + L_b)}{dt} + i_f \frac{d(L_{bf} - L_{af})}{dt} \quad (8)$$

且由于 $i_a = -i_b$ 解得 A 相负半周电流变化率的大小为 $di_a/dt = (U_{dc}/2-ki_f)/(L_a+L_b)$ 。

可见 A 相电流负半周变化率明显大于正半周，并且在状态 2 时，由于 C 相绕组直接连接在分裂式电容中点 O，为防止在该状态由于 O 点与电机中点 N 点之间的电位差，引起 C 相电流的变化，对 B 相正电流、A 相负电流必须通过直接控制，使其幅值相同。才能在电机三相绕组星形连接时 $i_a+i_b+i_c=0$ 的条件下，使该状态 C 相绕组无电流，以保证三相电流对称，使电机在四管三相变换器驱动下各状态出力均衡，并与全桥变换器驱动下特性相同，保证全桥变换器单相开路后切换到四管三相状态的平稳。

3.3 故障容错的实现

本系统在全桥变换器出现单相开路故障后，主控 DSP 通过 AD 采样获取系统相电流状态逻辑，并检测分裂式电容中点—相绕组端点间的电压极性，判断系统故障状态种类与发生的桥臂，通过 I/O 口输出信号控制故障相的双向开关，切除故障桥臂，将系统重构为容错型的四管三相变换器，并输出故障信号；CPLD 内部根据故障信号，在线将系统换相逻辑从普通全桥三相变换器的三相三状态换流模式切换到对应相的四管三相变换器换相逻辑，对应的电流控制方法也从全桥变换器的斩上管控制转为四管三相变换器的直接电流控制^[16]。从而实现系统故障后平滑切换到容错状态，并维持系统的输出特性。

4 系统实验结果

电机参数：6/4 极电励磁双凸极电机；额定功率 200 W；额定电压 28 V；额定转速 4 000 r/min。

本系统通过外部措施模拟变换器单相开路故障，系统由相电流状态逻辑与分裂式电容中点—相绕组端点间的电压极性判别故障发生位置，输出故障低电平信号，并控制双向开关，使系统从出现单相故障的全桥变换器重构成四管三相变换器拓扑。

图 9、10 为 T₁、T₂管开路后 U_{oa} 与 A 相电流波形，A 相电流在 T₁ 或 T₂ 开路故障后波形一样；不同管故障时 U_{oa} 在状态 1 中的极性不同。因此根据 U_{oa} 在状

态1的正负逻辑,即可判别故障管位置,B、C两相类似通过电容中点与相绕组端点之间的电位即可判别单管开路故障发生位置。

图11为全桥变换器故障后重构成四管三相变换器过程中三相电流、转速变化波形与故障输出信号,可见系统故障出现之后(低电平),电励磁双凸极电机驱动系统从全桥变换器重构成四管三相变换器的过程中,相电流幅值、变化规律均没有发生改变,转速几乎不变,能够很平滑地实现故障之后的

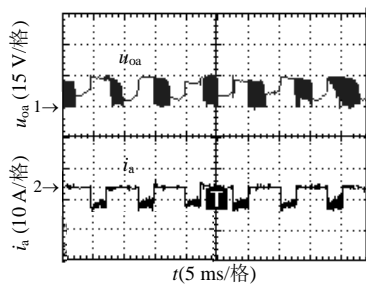


图9 T₁管开路, U_{0a}与A相电流波形
Fig. 9 Waveforms of U_{0a} and i_a after switch T₁ opened

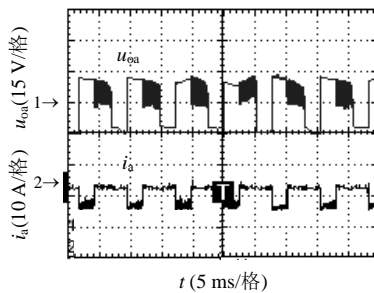
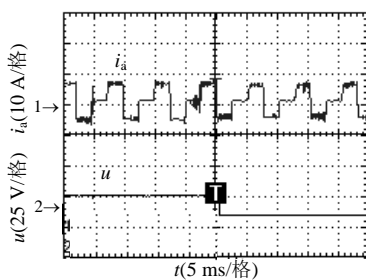
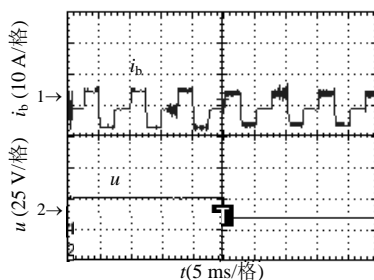


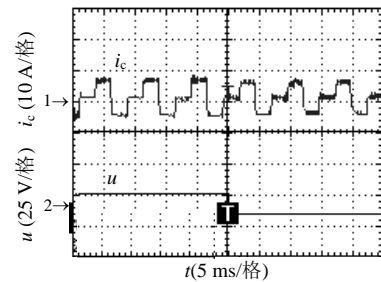
图10 T₂管开路, U_{0a}与A相电流波形
Fig. 10 Waveforms of U_{0a} and i_a after switch T₂ opened



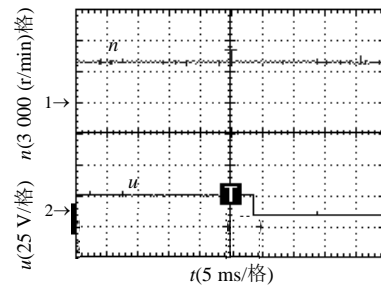
(a) A相电流与故障信号



(b) B相电流与故障信号



(c) C相电流与故障信号



(d) 转速响应与故障信号

图11 A、B、C三相电流、转速变化波形
Fig. 11 Current waveform and respond speed waveform of phase A, B and C

重构运行,维持系统输出特性,实现系统的容错性与高可靠性。

5 结论

(1) 通过系统相电流状态逻辑与分裂式电容中点-相绕组端点间的电压极性辨别相结合的方式,诊断电励磁双凸极电机全桥变换器的单相开路故障。

(2) 将四管三相变换器应用于电励磁双凸极电机驱动系统中,给出导通规律和相电流控制方法,并分析了相电流的变化规律。

(3) 将四管三相变换器作为电励磁双凸极电机全桥变换器单桥臂中单管开路、单桥臂开路故障后的重构拓扑,通过外部模拟故障验证了全桥变换器到四管三相变换器切换过程中相电流的平滑变化,保证了系统故障发生后重构拓扑过程中维持系统输出特性,实现了系统的容错运行。

参考文献

[1] Gopalakrishnan S, Omekanda A M, Iquesne B. Classification and remediation of electrical faults in the switched reluctance drive [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(2): 479-486.
 [2] Kastha D, Bose B K. Investigation of fault modes of voltage-fed inverter system for induction motor drive[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30(4): 1028-1038.
 [3] 赵争鸣, 闵勇. 电机-控制集成系统的高故障容限研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 21-25.

- Zhao Zhengming, Min Yong. High fault tolerance for AC motors intergrated with control system[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3): 21-25(in Chinese).
- [4] 张波. 电力电子学亟待解决的若干基础问题探讨[J]. 电工技术学报, 2006, 21(3): 24-35.
- Zhang Bo. Discussion on several fundamental problems necessary to be solved in power electronics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(3): 24-35(in Chinese).
- [5] 肖岚, 李睿. 逆变器并联系统功率管开路故障诊断研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 99-104.
- Xiao Lan, Li Rui. Research on the open-circuit fault diagnosis of transistor in inverter paralleling system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(4): 99-104(in Chinese).
- [6] 崔博文, 任章. 基于傅里叶变缓和神经网络的逆变器故障检测与诊断[J]. 电工技术学报, 2006, 21(7): 37-43(in Chinese).
- Cui Bowen, Ren Zhang. Fault detection and isolation of inverter based on FFT and neural network[J]. Transcations of China Electrotechnical Society, 2006, 21(7): 37-43.
- [7] Welchko B A, Lipo T A, Jahns T M, et al. Fault Tolerant three-phase ac motor drive topologies: a comparison of features, cost, and limitations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(4): 1108-1116.
- [8] Spee R, Lipo T. Remedial strategies for brushless dc drive faults [J]. IEEE Transations on Industry Application, 1990, 26(2): 259-266.
- [9] 张兰红, 胡育文, 黄文新. 采用瞬时转矩控制策略的异步发电机电系统的容错研究[J]. 航空学报, 2005, 26(5): 567-573.
- Zhang Lanhong, Hu Yuwen, Huang Wenxin. Tolerant research of the induction generation system based on ITC strategy[J]. ACTA Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2005, 26(5): 567-573(in Chinese).
- [10] 周波, 相蓉, 王川云, 等. 电磁式双凸极电机电磁特性的理论分析 [J]. 航空学报, 2003, 24(4): 355-359.
- Zhou Bo, Xiang Rong, Wang Chuanyun, et al. Theoretical analysis on the electro-magnetic characteristics for doubly salient electro-magnetic machines[J]. ACTA Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2003, 24(4): 355-359(in Chinese)
- [11] Liao Y F, Liang F, Lipo T A. A novel permanent magnet motor with doubly salient structure[J]. IEEE Trans. on Industry Application, 1995, 31(5): 1069-1078.
- [12] 李永斌, 龚宇, 江建中. 双凸极永磁电机斜极转子设计和绕组换流模式研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(7): 40-75.
- Li Yongbin, Gong Yu, Jiang Jianzhong. Study of the skewed-rotor design and a novel commutating mode for doubly salient permanent-magnet machine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(7): 40-75(in Chinese).
- [13] Kim Yuen-chung, Yoon Yong-Ho, Kuk Byoung-Lee, et al. Control algorithm for 4-switch converter of 3-Phase SRM[C]. 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, Jeju, Korea, 2006.
- [14] B Park young-Gun, Kim Tae-Sung, Ryu Ji-Su, et al. Fault tolerant strategies for bldc motor drives under switch faults[C]. The 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, Tampa, 2006.
- [15] Kenneth Scot Smith, Li Ra, Jim Penman. Real-time detection of intermittent misfiring in a voltage-fed pwm inverter induction-motor drive[J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 1997, 44(4): 468-476.
- [16] 张兰红, 胡育文, 黄文新. 容错型四开关三相变换器异步发电系统的直接转矩控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 140-145.
- Zhang Lanhong, Hu Yuwen, Huang Wenxin. Research on direct torque control of tolerant type four-switch three-phase converter induction generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18): 140-145(in Chinese).
- [17] Ricardo Lúcio de Araujo Ribeiro, Cursino Brandão Jacobina, Edison Roberto Cabral da Silva, et al. Fault detection of open-switch damage in voltage-fed pwm motor drive systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(2): 587-593.
- [18] Kim Yuenchung, Yoon YongHo, Lee ByoungKuk, et al. Control algorithm for 4-switch converter of 3-phase SRM[C]. 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, Jeju, Korea, 2006.
- [19] Klima J. Analytical investigation of an induction motor drive under inverter fault mode operations[J]. IEE Proceedings Electrical Power Application, 2003, 150(3): 255-262.
- [20] 符强, 林辉, 贺博. 四开关三相无刷直流电机的直接电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 149-153.
- Fu Qiang, Lin Hui, He Bo. A novel direct current control of four-switch three-phase brushless DC motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(4): 149-153(in Chinese).
- [21] 符强, 林辉, 贺博, 等. 无电流传感器的四开关三相无刷直流电机驱动控制新策略[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(17): 148-153.
- Fu Qiang, Lin Hui, He Bo, et al. A novel control scheme of four-switch three-phase brushless DC motor without current sensor[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(17): 148-153(in Chinese).



魏佳丹

收稿日期: 2007-12-27.

作者简介:

魏佳丹(1981—), 男, 博士研究生, 专业方向
电力电子与电力传动, weijiadan@nuaa.edu.cn;

周波(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 研
究方向为航空电源系统、电机及其控制与功率变换
技术。

(责任编辑 王剑乔)