

新型三相容错逆变器研究

贺虎成, 张玉峰, 王永宾, 周奇勋

(西安科技大学 电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 功率变换器中电力电子器件及其驱动电路是最易发生故障的薄弱环节, 为提高系统可靠性, 提出一种新型容错逆变器。通过在每个桥臂上串联快速熔断器, 实现短路故障转换为开路故障, 同时实现所在支路的故障隔离。通过在传统逆变器的直流环节添加辅助单元, 实现逆变器发生单上开关管开路故障、单下开关管开路故障和一个桥臂上下两开关管同时开路故障时的容错运行, 并且不降低系统性能。详细阐述该容错逆变器拓扑的工作原理和动作模式。对提出的新型容错逆变器驱动三相无刷直流电机进行仿真和实验, 结果验证了电路结构和理论分析的正确性与可行性。

关键词: 逆变器; 故障隔离; 脉冲宽度调制; 控制; 无刷直流电机; 容错

中图分类号: TM 464

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.05.014

0 引言

电机驱动系统是航空航天器、武器系统和潜器舰船等的执行部件或动力装置, 其可靠性直接关系到整个系统的安全运行和执行任务是否能够完成^[1-2]。为了保证这些系统的可靠性, 一般采用冗余设计技术, 特别是高可靠、高效率、长寿命的稀土永磁无刷直流电机(BLDCM)的冗余设计技术显得十分重要, 近年来已成为研究的热点^[3-6]。但是在电机驱动系统中, 功率变换器中的电力电子器件及其驱动电路是最易发生故障的薄弱环节, 其可靠性问题并没有得到有效的解决^[7]。

为改变这种状况, 国内外研究人员提出了逆变器容错技术, 使系统能自动补偿故障的影响以维护系统的稳定性和尽可能恢复系统故障前的性能, 从而保证系统的运行稳定可靠^[8]。文献[9-10]提出的冗余逆变器, 当某一桥臂发生故障时, 重构后的拓扑与正常逆变器相同, 但该拓扑用到了电流驱动型半控器件双向晶闸管。文献[11-14]用串联的两电容作为辅助桥臂, 构成了容错拓扑, 当某一桥臂出现故障后, 与该桥臂相连的双向晶闸管被触发导通, 电机由传统六开关逆变器驱动转变为四开关逆变器驱动, 可实现系统在逆变器故障下的不间断容错运行, 但容错重构后系统的性能有所降低。文献[15-16]提出的容错拓扑, 三相绕组中性点通过一个双向晶闸管与第四桥臂相连接, 当某一桥臂出现故障并被隔离后, 两相绕组和中性点由 3 个桥臂供电, 运行在两相三桥臂模式, 容错重构后系统的性能同样有所影响。

本文提出了一种新型容错逆变器, 弥补了上述提及的不足。其通过传统逆变器每个桥臂串联快速熔断器, 实现短路故障转换为开路故障, 同时实现所在支路的故障隔离。通过传统逆变器的直流环节添加辅助单元, 实现逆变器发生单上开关管开路故障、单下开关管开路故障和一个桥臂上下两开关管同时开路故障时的容错运行。通过容错逆变器驱动星形三相六状态工作的无刷直流电机负载, 使逆变器容错运行时带载能力不降低, 保障了系统的可靠运行。

1 工作原理分析

1.1 故障隔离

故障隔离是将诊断出的故障部分与其他正常部分进行分离的技术。逆变器的故障被成功诊断后, 必须采取措施进行隔离, 否则会影响其他正常部分的工作, 造成二次故障。系统主电路结构如图 1 所示, 对于图中所示的容错逆变器, 如果为单管或单桥臂开路故障, 禁止给故障单管或单桥臂输出驱动信号, 单管或桥臂开路故障便不会对重构逆变器产生影响; 如果为开关管短路故障, 将会烧毁开关管所在支路的快速熔断器, 使得该支路最终转化为开路故障状态, 实现故障的隔离, 避免或减小故障对整个系统的影响。

1.2 上管开路故障容错运行

由于短路故障最终转化为开路状态, 所以在此讨论开关管开路故障时的容错方案。无刷直流电机的 6 个状态完全独立可控^[17-18], 为简化分析过程, 以 ac 相通电的状态(假设电流从 a 相流入电机, c 相流出电机)来分析方案。

a. 上管调制, 下管恒通(HPWM_LON)。

HPWM_LON 调制方式时无刷直流电机工作在 V_{T1} 脉冲宽度调制(PWM)、 V_{T2} 恒通的状态时段。当无故障存在时, 在 V_{T1} PWM 导通时段, 加在无刷直流电机 ac 两端的电压等于电源电压 E ; 在 V_{T1} PWM 关

收稿日期: 2014-06-26; 修回日期: 2015-03-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277149, 51307137)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277149, 51307137)

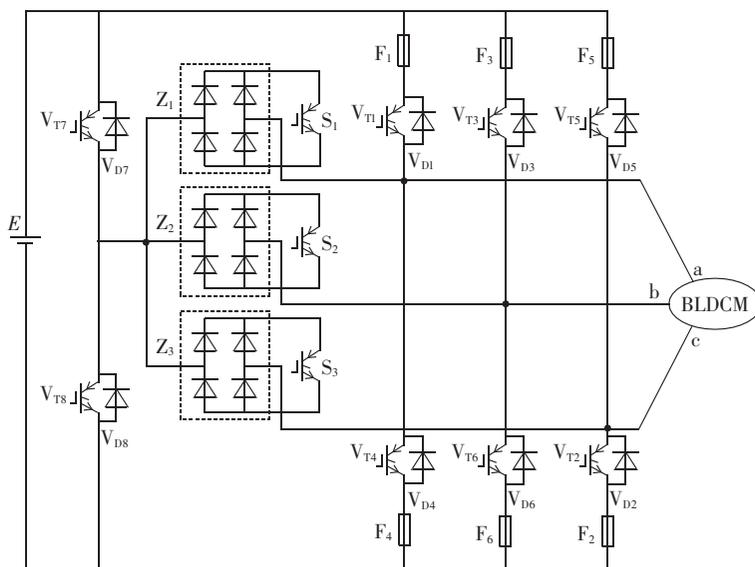


图 1 新型容错逆变器

Fig.1 Proposed fault-tolerant inverter

断时段, V_{T1} 截止, 则加在无刷直流电机 ac 两端的电压等于零。

当 V_{T1} 支路发生开路故障时, 禁止给故障支路 V_{T1} 输出驱动信号, 让 S_1 开关在 V_{T1} 和 V_{T2} 工作的 60° 区间一直导通, V_{T7} 按照 V_{T1} 的控制逻辑进行控制。当 V_{T7} 调制导通时, 电源 E 的正极经过 V_{T7} 、 Z_1 、 S_1 加到电机的 a 端, 电源 E 的负极经过 F_2 、 V_{T2} 加到电机的 c 端, 和 V_{T1} 无故障时一样, 无刷直流电机 ac 两端的电压等于电源电压 E 。当 V_{T7} 调制关断时, 负载电流通过 V_{D4} 形成续流回路, 和 V_{T1} 无故障时一样, 无刷直流电机 ac 两端的电压等于零。因此, 当 V_{T1} 所在支路发生开路故障时, 由于逆变器的容错运行, 无刷直流电机的输出性能并没有受到影响。

b. 上管恒通, 下管调制(HON_LPWM)。

HON_LPWM 调制方式时无刷直流电机工作在 V_{T2} PWM、 V_{T1} 恒通的状态时段。当无故障存在时, 在 V_{T2} PWM 导通时段, 加在无刷直流电机 ac 两端的电压等于电源电压 E ; 在 V_{T2} PWM 关断时段, V_{T2} 截止, 加在无刷直流电机 ac 两端的电压等于零。

当 V_{T1} 所在支路发生开路故障时, 禁止给故障支路 V_{T1} 输出驱动信号, 让 V_{T7} 和 S_1 开关在 V_{T1} 和 V_{T2} 工作的 60° 区间一直导通, V_{T2} 按照原来的控制逻辑进行控制。当 V_{T2} 调制导通时, 电源 E 的正极经过 V_{T7} 、 Z_1 、 S_1 加到电机的 a 端, 电源 E 的负极经过 F_2 、 V_{T2} 加到电机的 c 端, 和 V_{T1} 无故障时一样, 无刷直流电机 ac 两端的电压等于电源电压 E 。当 V_{T2} 调制关断时, 负载电流通过 V_{D5} 形成续流回路, 和 V_{T1} 无故障时一样, 无刷直流电机 ac 两端的电压等于零。因此, 当 V_{T1} 所在支路发生开路故障时, 由于逆变器的容错运行, 无刷直流电机的输出性能同样没有受到影响。

1.3 下管开路故障容错运行

为简化分析过程, 仍然以 ac 相通电的状态(电流从 a 相流入电机, c 相流出电机)来分析。

a. 上管调制, 下管恒通(HPWM_LON)。

当 V_{T2} 所在支路发生开路故障时, 禁止给故障支路 V_{T2} 输出驱动信号, 让 V_{T8} 和 S_3 开关在 V_{T1} 和 V_{T2} 工作的 60° 区间一直导通, V_{T1} 的控制逻辑不变。当 V_{T1} 调制导通时, 电源 E 的正极经过 F_1 、 V_{T1} 加到电机的 a 端, 电源 E 的负极经过 V_{T8} 、 Z_3 、 S_3 加到电机的 c 端, 和 V_{T2} 无故障时一样, 无刷直流电机 ac 两端的电压都等于电源电压 E 。当 V_{T1} 调制关断时, 负载电流通过 V_{D4} 形成续流回路, 和 V_{T2} 无故障时一样, 无刷直流电机 ac 两端的电压等于零。因此, 当 V_{T2} 所在支路发生开路故障时, 由于逆变器的容错运行, 无刷直流电机的输出性能并没有受到影响。

b. 上管恒通, 下管调制(HON_LPWM)。

HON_LPWM 调制方式时无刷直流电机工作在 V_{T2} PWM、 V_{T1} 恒通的状态时段。当 V_{T2} 所在支路发生开路故障时, 禁止给故障支路 V_{T2} 输出驱动信号, 让开关 S_3 在 V_{T1} 和 V_{T2} 工作的 60° 区间一直导通, V_{T8} 按照 V_{T2} 原来的控制逻辑进行控制。当 V_{T8} 调制导通时, 电源 E 的正极经过 F_1 、 V_{T1} 加到电机的 a 端, 电源 E 的负极经过 V_{T8} 、 Z_3 、 S_3 加到电机的 c 端, 和 V_{T2} 无故障时一样, 无刷直流电机 ac 两端的电压等于电源电压 E 。当 V_{T8} 调制关断时, 负载电流通过 V_{D5} 形成续流回路, 和 V_{T2} 无故障时一样, 无刷直流电机 ac 两端的电压等于零。因此, 当 V_{T2} 所在支路发生开路故障时, 由于逆变器的容错运行, 无刷直流电机的输出性能同样没有受到影响。

2 仿真和实验分析

为了验证拓扑的可行性和理论分析的结果,对提出的容错逆变器驱动无刷直流电机负载进行了仿

真和实验。仿真时无刷直流电机的额定电压 300 V,逆变器直流供电电压 300 V;实验时无刷直流电机的额定电压 24 V,逆变器直流供电电压 24 V。图 2 和图 3 为仿真波形,图 4 为实验波形,其中 i_a 、 i_b 、 i_c 为电

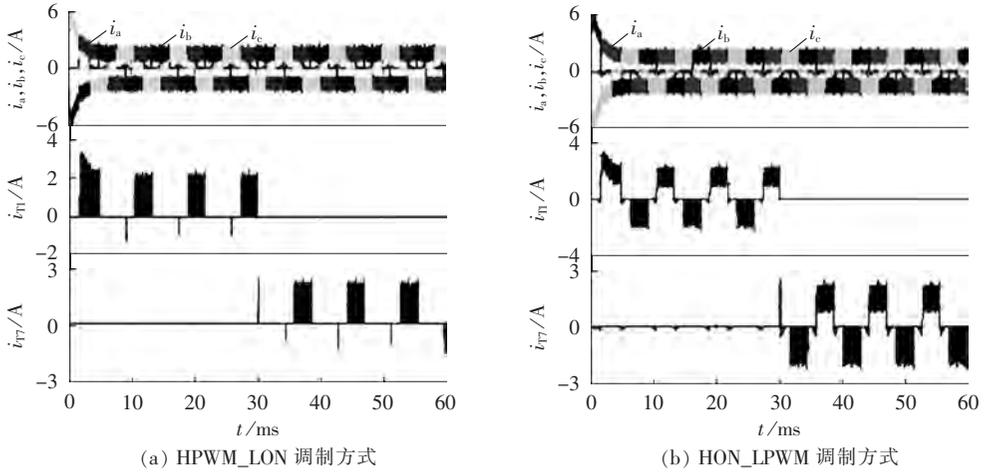


图 2 上管开路故障仿真波形

Fig.2 Simulation waveforms when upper switch open-circuit fault happens

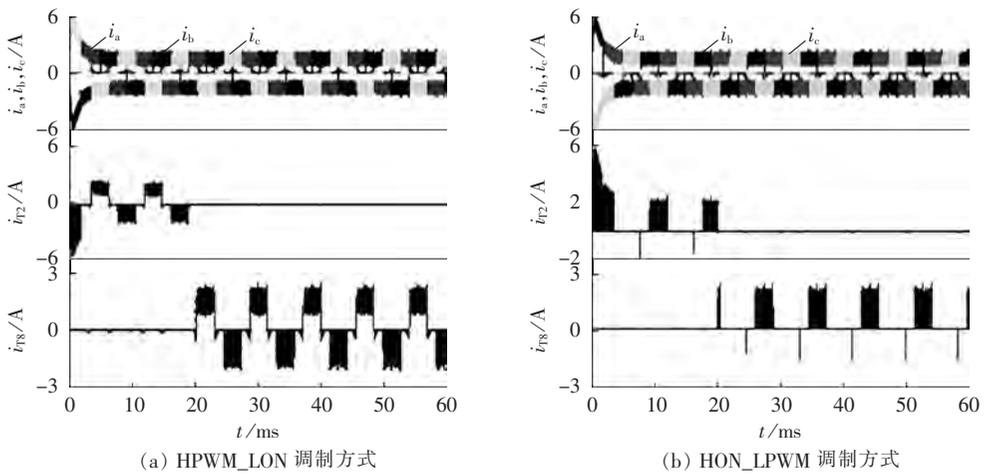


图 3 下管开路故障仿真波形

Fig.3 Simulation waveforms when lower switch open-circuit fault happens

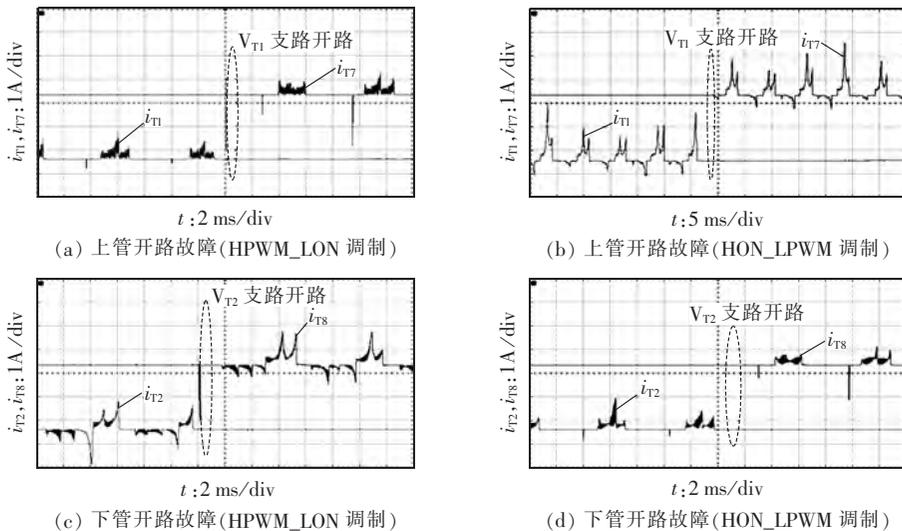


图 4 实验波形

Fig.4 Experimental waveforms

机三相电流, i_{Tx} 的正向电流表示流过开关管 V_{Tx} 的电流, 负向电流表示流过与开关管 V_{Tx} 反并联二极管 V_{Dx} 的电流。

图 2 为 V_{T1} 支路发生开路故障时的仿真波形。图 2(a) 为 HPWM_LON 调制方式, 此时 V_{T1} 在工作的 120° 区间处于 PWM 状态。由图可见, 当在 30 ms 发生 V_{T1} 支路开路故障时, 容错逆变器容错运行, 在 V_{T6} 或 V_{T2} 导通时段, 用 V_{T1} 控制信号控制 V_{T7} , PWM 导通时段, 电流流过 V_{T7} ; PWM 关断时段, 电流流过二极管 V_{D4} 。图 2(b) 为 HON_LPWM 调制方式, 此时 V_{T1} 在工作的 120° 区间保持恒通。由图 2 可见, 当在 30 ms 发生 V_{T1} 支路开路故障时, 容错逆变器容错运行, 在 V_{T6} 或 V_{T2} PWM 导通时段, 电流被容错到 V_{T7} ; 在 V_{T4} PWM 关断时段, 电流流过与 V_{T7} 反并联的二极管 V_{D7} 。仿真结果与 1.2 节分析的一致, 同时, 由图可见, 电机三相输出电流 i_a 、 i_b 、 i_c 在 V_{T1} 支路出现开路故障后没有变化, 因此, 电机的输出性能没有受到影响。

图 3 为 V_{T2} 支路发生开路故障时的仿真波形。图 3(a) 为 HPWM_LON 调制方式, 此时 V_{T2} 在工作的 120° 区间保持恒通。由图可见, 当在 20 ms 发生 V_{T2} 支路开路故障时, 容错逆变器容错运行, 在 V_{T1} 和 V_{T3} PWM 导通时段, 电流流过 V_{T8} ; 在 V_{T5} PWM 关断时段, 电流流过与 V_{T8} 反并联的二极管 V_{D8} 。图 3(b) 为 HON_LPWM 调制方式, 此时 V_{T2} 在工作的 120° 区间处于 PWM 状态。由图可见, 当在 20 ms 发生 V_{T2} 支路开路故障时, 容错逆变器容错运行, 停发 V_{T2} 控制信号, 在 V_{T1} 或 V_{T3} 保持导通时段, 用 V_{T2} 控制信号控制 V_{T8} , PWM 导通时段, 电流流过 V_{T8} , PWM 关断时, 电流流过二极管 V_{D5} 。仿真结果与 1.3 节分析的一致, 证明了理论分析的正确性。同样, 由图可见, 电机三相输出电流 i_a 、 i_b 、 i_c 在 V_{T2} 支路出现开路故障后没有变化, 因此, 电机的输出性能没有受到影响。

图 4(a) 和 (b) 为 V_{T1} 支路发生开路故障时的实验波形, 其中, 图 4(a) 为 HPWM_LON 调制方式, 图 4(b) 为 HON_LPWM 调制方式。由图可见, 在 V_{T1} 支路发生开路故障时, 逆变器容错运行, 无论 HPWM_LON 调制还是 HON_LPWM 调制, V_{T1} 支路电流都被容错到 V_{T7} 支路。图 4(c) 和 (d) 为 V_{T2} 支路发生开路故障时的实验波形, 其中, 图 4(c) 为 HPWM_LON 调制方式, 图 4(d) 为 HON_LPWM 调制方式。由图可见, 在 V_{T2} 支路发生开路故障时, 逆变器容错运行, 无论 HPWM_LON 调制还是 HON_LPWM 调制, V_{T2} 支路电流都被容错到 V_{T8} 支路。实验结果与理论分析及仿真结果可以相互支持, 证明了理论分析的正确性。

3 结论

本文提出了一种容错运行逆变电路, 并对电路的

容错过程进行了详细的理论分析。最后对新型容错逆变器进行了仿真和实验, 结果与理论分析有较好的一致性。该新型容错逆变电路具有以下优点:

- a. 可容错单上开关管开路故障、单下开关管开路故障和一个桥臂上下两开关管同时开路故障;
- b. 容错运行时系统的输出性能不降低;
- c. 附加电路简单, 容错控制算法简单;
- d. 提高了系统可靠性。

参考文献:

- [1] 胡文彪, 夏立, 向东阳, 等. 基于逆变器直流侧电流和融合算法的感应电机转子故障诊断方法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(8): 38-41.
HU Wenbiao, XIA Li, XIANG Dongyang, et al. Rotor fault diagnosis based on DC-side current and fusion algorithm for induction motors[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(8): 38-41.
- [2] 郝振洋, 胡育文, 黄文新. 电力作动器中永磁容错电机及其控制系统的发展[J]. 航空学报, 2008, 29(1): 149-158.
HAO Zhenyang, HU Yuwen, HUANG Wenxin. Development of fault-tolerant permanent magnet machine and its control system in electro-mechanical actuator[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2008, 29(1): 149-158.
- [3] 李吉晨, 周波, 薛峰. 基于无刷直流电机的风力机特性模拟[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(10): 17-21.
LI Jichen, ZHOU Bo, XUE Feng. Characteristic imitation of wind turbine based on BLDCM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 17-21.
- [4] 孟光伟, 李槐树. 无位置传感器双绕组永磁 BLDCM 起动控制系统[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(3): 40-45.
MENG Guangwei, LI Huaishu. Startup control system of sensorless permanent magnet BLDCM with dual windings[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(3): 40-45.
- [5] 马瑞卿, 刘卫国, 解恩. 双余度无刷电动机位置伺服系统仿真与试验[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(18): 98-103.
MA Ruiqing, LIU Weiguo, XIE En. Simulation and test of position servo system based on dual-redundancy BLDCM[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(18): 98-103.
- [6] 刘英培. 基于自抗扰控制 PMSM 电压空间矢量调制直接转矩控制方法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(11): 78-82.
LIU Yingpei. Space vector modulated direct torque control for PMSM based on ADRC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11): 78-82.
- [7] FUCHS F W. Some diagnosis methods for voltage source inverters in variable speed drives with induction machines a survey [C]//The 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Roanoke, VA, USA: IEEE, 2003: 1378-1385.
- [8] 赵克, 安群涛. 容错逆变器 PMSM 无位置传感器控制系统[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(4): 25-30.
ZHAO Ke, AN Quntao. Fault tolerant inverter permanent magnet synchronous motor position sensorless control system[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(4): 25-30.
- [9] BOLOGNANI S, ZORDAN M, ZIGLIOTTO M. Experimental fault-tolerant control of a PMSM drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(5): 1134-1141.
- [10] RIBEIRO R L A, JACOBINA C B, SILVA E R C, et al. Fault-

- tolerant voltage-fed PWM inverter ac motor drive systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(2): 439-446.
- [11] MENDES A M S, CARDOSO A J M. Fault-tolerant operating strategies applied to three phase induction motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(6): 1807-1817.
- [12] 孙丹, 贺益康, 何宗元. 基于容错逆变器的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 浙江大学学报:工学版, 2007, 41(7): 1101-1106.
SUN Dan, HE Yikang, HE Zongyuan. Fault tolerant inverter based direct torque control for permanent magnet synchronous motor [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007, 41(7): 1101-1106.
- [13] 安群涛, 孙醒涛, 赵克, 等. 容错三相四开关逆变器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(3): 14-20.
AN Quntao, SUN Xingtiao, ZHAO Ke, et al. Control strategy for fault-tolerant three-phase four-switch inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(3): 14-20.
- [14] 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.
- [15] CORREA M B R, JACOBINA C B, SILVA E R C, et al. An induction motor drive system with improved fault tolerance [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(3): 873-879.
- [16] BIANCHI N, BOLOGNANI S, ZIGLIOTTO M, et al. Innovative remedial strategies for inverter faults in IPM synchronous motor drives [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2003, 18(2): 306-314.
- [17] 贺虎成, 刘卫国, 解恩. 一种新型无刷直流电机谐振极软开关逆变器研究[J]. 电工技术学报, 2008, 23(12): 99-106.
HE Hucheng, LIU Weiguo, XIE En. A novel resonant pole inverter for brushless DC motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(12): 99-106.
- [18] 李文琢, 房建成, 李海涛. 基于 Buck 变换器调压的无刷直流电机功率变换器单管开路故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(15): 124-132.
LI Wenzhuo, FANG Jiancheng, LI Haitao. Single switch open-circuit fault diagnosis in brushless DC motor drivers with buck converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(15): 124-132.

作者简介:



贺虎成(1977—),男,甘肃渭源人,副教授,博士,主要从事电力电子技术、智能自动化装置、运动控制技术方面的研究(E-mail: hhch1@126.com)。

Fault-tolerant three-phase inverter

HE Hucheng, ZHANG Yufeng, WANG Yongbin, ZHOU Qixun

(School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Since the power electronic component and its driving circuit of power converter are the weak sections most likely to occur fault, a kind of fault-tolerant inverter is proposed to improve the system reliability, which has a series instant-fuse on each bridge arm to convert a short-circuit fault into an open-circuit fault for the branch fault isolation. An auxiliary unit is added to the DC section of traditional inverter to realize the fault-tolerant operation without system performance degrading for single bridge-arm mono-/dual-switch open-circuit fault. Its working principle and operating modes are described. Simulation and experiment are carried out for a three-phase brushless DC motor driven by the proposed inverter, which verifies the correctness and feasibility of the circuit structure and theoretical analysis.

Key words: electric inverters; fault isolation; pulse width modulation; control; brushless DC motor; fault tolerance