

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200067

UPS 系统中电压型逆变器开路故障诊断研究

李江伟¹, 石瑞才¹, 王愚¹, 李绍坚¹, 杨鹏¹, 鲍海波²

(1. 广西电网有限责任公司南宁供电局, 广西 南宁 530229;
2. 广西电网有限责任公司南宁宾阳供电局, 广西 南宁 530229)

摘要: 逆变器开路故障是不间断电源(Uninterruptible Power Supply, UPS)系统中一种常见故障, 它会降低电能质量, 甚至会引起其他部件的潜在二次故障。研究有效的逆变器故障诊断技术对提高 UPS 系统的可靠性具有重要意义。因此, 采用基于绝对归一化的 Park 矢量法实现逆变器开路故障诊断。利用相电流的平均值与相电流绝对值的平均值的归一化量诊断和定位单个或两个开关管开路故障。利用相电流绝对值的平均值与 Park 矢量模的归一化量诊断同一桥臂的两个开关管开路故障, 该方法可以有效地实现开路故障检测和故障定位。最后基于 Matlab/Simulink 对提出的故障诊断方法进行验证, 仿真结果表明了所提出故障诊断方法的有效性。

关键词: UPS 系统; 开路故障; 故障诊断

Open-circuit fault diagnosis of a voltage-source inverter in a UPS system

LI Jiangwei¹, SHI Ruicai¹, WANG Yu¹, LI Shaojian¹, YANG Peng¹, BAO Haibo²

(1. Nanning Power Supply Bureau, Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530229, China;
2. Binyang Power Supply Bureau, Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530229, China)

Abstract: The open-circuit fault in an inverter is a common fault in an Uninterruptible Power Supply (UPS) system. It can reduce power quality and even cause potential secondary faults in other components. It is of great significance to study effective fault diagnosis technology of inverters to help improve the reliability of a UPS system. Therefore, the Park vector method based on absolute normalization is used for open-circuit fault detection of the inverter. The normalized value between the average value of phase current and the average value of the absolute value of phase current is used to diagnose and locate an open-circuit fault of a single or two switches. The normalized value between the average value of the absolute value of phase current and the Park vector module is used to diagnose the open-circuit fault of two switches of the same bridge arm. This method can effectively realize fault detection and fault location. Finally, the proposed fault diagnosis method is verified using Matlab/Simulink. The simulation results show the effectiveness of the proposed fault diagnosis method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507002) and Science and Technology Project of Guangxi Power Grid Co., Ltd. (No. GXKJXM20180433).

Key words: UPS; open circuit fault; fault diagnosis

0 引言

不间断电源(Uninterruptible Power Supply, UPS)系统通常被置于市电网和用电负载之间, 其目的是改善对负载的供电质量, 并在市电故障时保证负载设备的正常运行^[1-4]。UPS 的核心环节是逆变器, 其设计的好坏直接影响着 UPS 电源供电质量, 由于

电力电子器件的工作环境和自身能量变换的特殊性, 逆变器是 UPS 系统中易故障的薄弱环节。因此, 研究逆变器故障诊断技术对提高 UPS 系统的可靠性具有重要意义^[5-6]。

逆变器常见的故障是功率开关管的短路和开路^[6-11]。短路故障因存在时间极短(通常在 μs 以内)而难以被诊断, 但是也可通过在逆变器电路中植入快速熔丝, 这样可以将功率管的短路故障转变为开路故障, 利用开路诊断方法加以处理。因此, 对于逆变器的故障诊断主要是对功率开关管的开路故

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51507002); 广西电网有限责任公司科技项目资助(GXKJXM20180433)

障诊断^[11-15]。目前针对逆变器的开路故障诊断提出的策略大多数是针对永磁电动机和感应电机的驱动电路部分^[16-22], 针对 UPS 系统的逆变器开路故障诊断技术研究却相对较少。对于电压型逆变器, 文献[23]利用三相电流经 Clark 变换后的电流矢量在空间中的轨迹和斜率定位发生开路故障的逆变器开关管。但这种方法在开路和空载时受测量误差和噪声的影响, 诊断效果并不理想。文献[24]中对于感应电机的开环 V/F 系统, 提出利用平均电流 Park 矢量的模值与阈值比较判断是否发生故障, Park 矢量由对三相电流在一个周期内的平均值进行 Clark 变换得到的。再通过矢量的相角定位故障开关管。文献[25]中利用对相电流平均值与三相电流进行离散傅里叶变换基波系数的几何平均值相比得到归一化直流量进行开路故障诊断和定位。文献[26]对文献[25]进行改进, 并应用到闭环控制策略的系统中, 其采用与文献[25]中相同的算法但对故障定位的使用较为简单的定位逻辑。文献[27]针对文献[25]中系统噪声和暂态过程表现欠佳的问题, 利用相电流的绝对值的周期平均绝对值进行计算。文献[28]中利用平均电流矢量的模式识别来判断开环 V/F 系统中的逆变器的开路故障, 在大功率中将平均电流适量的模与阈值比较, 以判断是否发生故障; 小功率时将平均矢量的两个分量输入到三层径向基神经网络, 输出为故障发生的概率密度, 以此诊断故障。但这种方法的阈值选择较为困难。文献[29]中利用电流参考矢量与电流测量矢量的偏差来诊断逆变器的开关管的开路故障, 这种方法能够减少负载对诊断方法的影响, 但诊断时间需要大约两个基波周期。

本文在现有研究的基础上, 采用基于绝对归一化 Park 矢量方法对逆变器的开路故障进行检测, 利用相电流的平均值与相电流绝对值的平均值的归一化量诊断和定位单个或两个开关管开路故障, 利用相电流绝对值的平均值与 Park 矢量模的归一化量诊断同一桥臂的两个开关管开路故障, 该方法既能识别单开关管和双开关管故障, 又能防止误报警。

1 诊断策略

逆变器的拓扑结构如图 1 所示: 主要包括六个 IGBT 开关管, 逆变器的直流侧接电源, 逆变器的交流侧接负载。施加不同的门极信号, 控制每只开关管的导通和关断时间, 确保逆变器能够输出交流电。

对于逆变器, 常见的开路故障是单开关管故障和双开关管故障。如果逆变器故障是单开关管开路时, 故障开关管所在支路输出的电流波形有半个周

期的幅值变为零。如果逆变器故障是由于同一支路的两个开关管开路造成的, 则故障期间该支路输出的电流波形幅值为零。考虑到逆变器三相电流的这些特性, 电流平均值可以用于检测和定位发生开路故障的开关管。开路故障诊断和定位原理如图 2 所示。

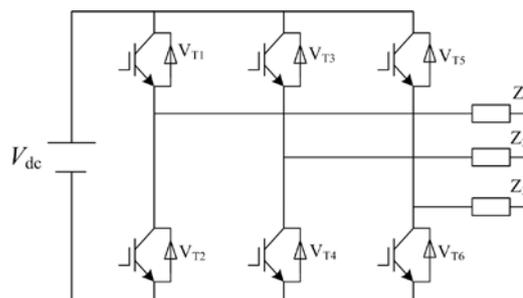


图 1 逆变器的拓扑结构图

Fig. 1 Topology of inverter

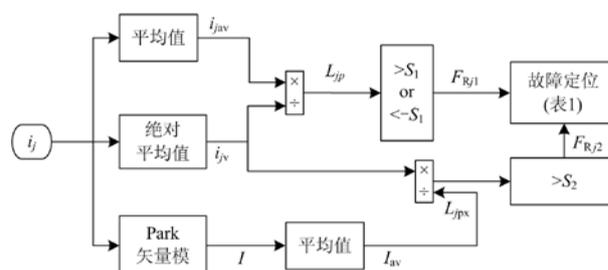


图 2 开路故障诊断的原理流程图

Fig. 2 Flow chart of open circuit fault diagnosis

这种方法的主要思想在于判断一相电流的归一化平均值的正负属性。如前所述, 当逆变器的故障是由于某一开关管的开路造成时, 则故障开关管所在的支路相电流波形的一半周期幅值为零。

一般地, Park 矢量中 i_α 和 i_β 计算如下

$$\begin{cases} i_\alpha = \frac{2}{3}i_a - \frac{1}{3}i_b - \frac{1}{3}i_c \\ i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_b - i_c) \end{cases} \quad (1)$$

式中, i_a 、 i_b 和 i_c 是相电流。

Park 的矢量模量定义为

$$I = \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \quad (2)$$

另外, 每相电流的平均值为

$$i_{jav} = \frac{1}{N} \sum_{n=k-N+1}^k i_{j(n)} \quad (3)$$

式中, j 分别表示 A、B、C 相; i_{jav} 表示 j 相电流在一段时间内的平均值; k 表示采样瞬间; n 表示每个周期的采样数。

每相电流的绝对值的平均值为

$$i_{jv} = \frac{1}{N} \sum_{n=k-N+1}^k |i_{j(n)}| \quad (4)$$

在正常稳定运行状态下,每相的电流平均值 i_{jav} 为零,而电流的绝对值的平均值 i_{jv} 则远大于零。在 j 相的一个开关管发生开路的故障状态下, i_{jv} 的值减小, i_{jav} 的值不再为零,因此定义故障定位变量为

$$L_{jp} = \frac{i_{jav}}{i_{jv}} \quad (5)$$

在正常状态下 L_{jp} 的值为零。当一条支路中的一个开关管发生开路时,发生故障的支路所在的相电流缺失一半的波形,只触发出半个周期^[25]。因此相电流的平均值和绝对值的平均值相等或互为相反数,即故障定位变量 L_{jp} 的值为 1 或 -1。

定义故障标志 F_{Rj1} 以识别故障开关管。

$$F_{Rj1} = \begin{cases} -1, L_{jp} \geq S_1 \\ 0, -S_1 < L_{jp} < S_1 \\ 1, L_{jp} \leq -S_1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: F_{Rj1} 表示逆变器中各支路中单个开关的故障情况; S_1 为设定阈值,设置为 0.7。当 F_{Rj1} 值为 0 时,表明 j 相的支路未发生故障;当 F_{Rj1} 的值为 1 时,表明 j 相所在的支路的上部开关管发生故障;当 F_{Rj1} 的值为 -1 时,表明 j 相所在的支路的下部开关管发生故障。

考虑某一相的两个开关管开路,此时故障支路相电流 i_j 的值接近于零,其平均值 i_{jav} 接近于零,故障定位变量 L_{jp} 不足以定位这种故障类型的开关管。考虑到在支路未发生开路故障时其相电流绝对平均值明显大于零,只有在发生一相支路开路故障时,其值才接近于零。因此,可以利用电流的绝对值的平均值 i_{jv} 来诊断和定位这种类型的开关管开路故障。此外,为了克服负载依赖性,平均值 I_{av} 可用作归一化参数。定义了故障定位变量 L_{jpx} 来识别这种类型的故障。

$$L_{jpx} = \frac{i_{jv}}{I_{av}} \quad (7)$$

式中, I_{av} 是 Park 矢量模的平均值。

当支路发生开路故障时 L_{jpx} 的值为 0。通过对不同条件下的绝对归一化电流平均值的分析,确定了阈值 S_2 值的大小,验证了 0.2 较为合适。在这里,用以下方程式定义故障标志 F_{Rj2} 以识别发生这种类型的两个开关管故障。

$$F_{Rj2} = \begin{cases} 1, L_{jpx} \leq S_2 \\ 0, L_{jpx} > S_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中: j 分别表示 A 相、B 相或 C 相; F_{Rj2} 为故障标志。当逆变器的一个支路两个开关管同时开路时,故障标志 F_{Rj2} 等于 1,故障标志 F_{Rj2} 等于 0 表示没有发生一个支路两个开关管同时故障。根据式(6)和式(8),通过理论计算可形成故障定位表表 1。

表 1 故障定位表

Table 1 Fault location table

故障开关	F_{Ra1}	F_{Rb1}	F_{Rc1}	F_{Ra2}	F_{Rb2}	F_{Rc2}
VT ₁	1	0	0	0	0	0
VT ₂	-1	0	0	0	0	0
VT ₃	0	1	0	0	0	0
VT ₄	0	-1	0	0	0	0
VT ₅	0	0	1	0	0	0
VT ₆	0	0	-1	0	0	0
VT ₁ VT ₂	0	0	0	1	0	0
VT ₃ VT ₄	0	0	0	0	1	0
VT ₅ VT ₆	0	0	0	0	0	1
VT ₁ VT ₃	1	1	-1	0	0	0
VT ₁ VT ₄	1	-1	0	0	0	0
VT ₁ VT ₅	1	-1	1	0	0	0
VT ₁ VT ₆	1	0	-1	0	0	0
VT ₂ VT ₃	-1	1	0	0	0	0
VT ₂ VT ₄	-1	-1	1	0	0	0
VT ₂ VT ₅	-1	0	1	0	0	0
VT ₂ VT ₆	-1	1	-1	0	0	0
VT ₃ VT ₅	1	-1	-1	0	0	0
VT ₃ VT ₆	0	1	-1	0	0	0
VT ₄ VT ₅	0	-1	1	0	0	0
VT ₄ VT ₆	1	-1	-1	0	0	0

2 仿真结果

本文将通过在 Matlab/Simulink 仿真环境下,建立 UPS 系统的模型来验证提出的故障诊断方法的有效性。其中,相关参数如表 2 所示。

表 2 电路的主要参数

Table 2 Main parameters of circuit

直流电压	400 V
滞环宽度	0.1
参考电流	10 A
负载电感	8 mH
负载电阻	3 Ω

在仿真中设置三种故障类型:单开关管故障、单相开路故障(同一支路的两个开关管开路)、双开关管故障(不同两支路各有一个开关管开路)。

2.1 单开关故障

通过设置开关管 VT_1 在 0.1 s 时发生开路故障, 即 $t=0.1$ s 时移除 VT_1 的驱动信号。单开关管故障时的仿真结果如图 3 和 4 所示, 当 $t=0.1$ s 发生故障后, i_a 波形缺失正半周期。从图中可以看出故障定位变量 L_{ap} 的值接近 -1, 因此开关管 VT_1 被诊断出发生开路故障。

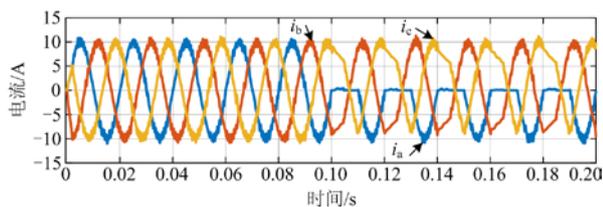


图 3 单开关管开路故障的电流波形

Fig. 3 Current waveforms of single-switch open-circuit fault

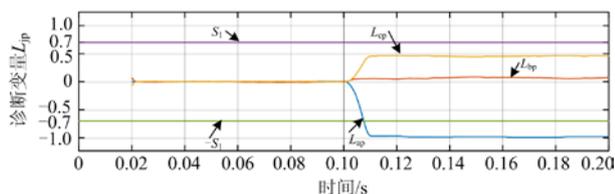


图 4 单开关管开路故障的仿真结果

Fig. 4 Simulation results of single switch open circuit fault

2.2 单相开路故障

开关管 VT_1 和 VT_2 的驱动信号在 $t=0.1$ s 时被移除, 即该时刻发生单管开路故障。故障发生时, 相电流、故障定位变量的波形如图 5 和 6 所示。在这种情况下, i_a 的值一直为零。故障定位变量 L_{ap} 的值迅速下降, 并最终接近与 0。因此开关管 VT_1 和

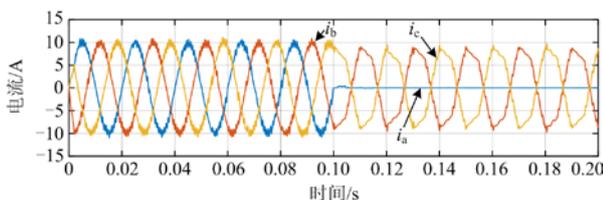


图 5 单相发生开路的电流波形

Fig. 5 Current waveforms of single-phase open circuit

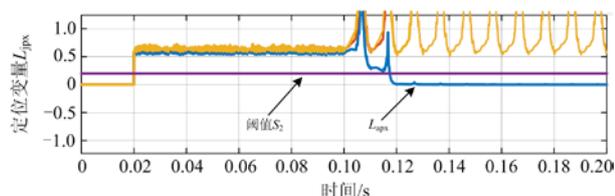


图 6 单相发生开路的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of single-phase open circuit

VT_2 被诊断出发生开路故障。

2.3 双管开路故障

选择两支路的 VT_1 和 VT_4 作为目标管, 当 $t=0.1$ s 的时候移除 VT_1 和 VT_4 的驱动信号。故障发生后, 相电流、故障定位变量的波形如图 7 和 8 所示。由图可知, 当 $t=0.1$ s, i_a 缺失下半个周期, i_b 缺失上半个周期, 相应地, A 相和 B 相的电流平均值不再为零, 故障定位变量 L_{ap} 接近于 -1, L_{bp} 接近于 1。因此, 开关管 VT_1 和 VT_4 被诊断出发生开路故障。

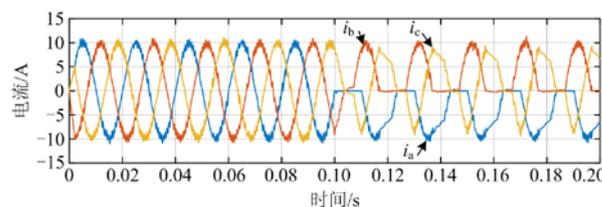


图 7 两开关管故障时电流波形

Fig. 7 Current waveforms in case of switch failure

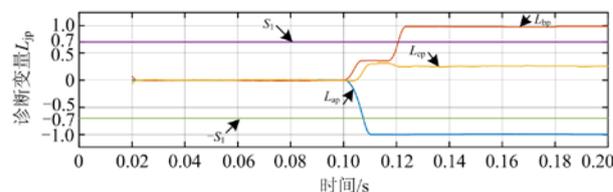


图 8 两开关管故障时的仿真结果

Fig. 8 Simulation results of two switch faults

综上所述, 无论是逆变器发生哪种开路故障类型, 利用本文的方法都可以有效地实现开路故障诊断和定位。

3 结论

本文采用了一种基于归一化相电流的逆变器开路故障诊断技术。通过 Matlab/Simulink 对这种方法的可靠性和实用性进行了仿真研究。仿真结果验证了这种方法能够有效地检测出任意桥臂上开关管的开路故障。

参考文献

- [1] 王林兵, 何湘宁. UPS 的分类、关键技术分析与发展动态预测[J]. 电工技术杂志, 2003(10): 21-24.
WANG Linbing, HE Xiangning. Classification, key technology analysis and development trend of UPS[J]. Electrical Engineering, 2003(10): 21-24.
- [2] 张劲松, 周永鹏, 黄锦恩, 等. 基于 DSP 的全数字化单相在线式 UPS 的设计[J]. 电力电子技术, 2001(3): 56-58.

- ZHANG Jinsong, ZHOU Yongpeng, HUANG Jin'en, et al. Design of full digital single-phase on-line UPS based on DSP[J]. Power Electronics, 2001(3): 56-58.
- [3] 于玮, 徐德鸿, 周朝阳. 并联UPS系统均流控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 63-67.
YU Wei, XU Dehong, ZHOU Chaoyang. Control strategy of paralleled UPS system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21): 63-67.
- [4] 王钢, 丁茂生, 李晓华, 等. UPS供电系统可靠性与经济性综合研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 73-77.
WANG Gang, DING Maosheng, LI Xiaohua, et al. Comprehensive study of uninterrupted power supply system's reliability and economy[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 73-77.
- [5] XIA Y, GOU B, XU Y. A new ensemble-based classifier for IGBT open-circuit fault diagnosis in three-phase PWM converter[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(4): 364-372. DOI: 10.1186/s41601-018-0109-x.
- [6] 汤清泉, 颜世超, 卢松升, 等. 三电平逆变器的功率管开路故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 26-32.
TANG Qingquan, YAN Shichao, LU Songsheng, et al. Open-circuit fault diagnosis of transistor in three-level inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 28(21): 26-32.
- [7] 赵兴勇, 贺天云, 陈浩宇, 等. 多功能逆变器在微电网储能系统中的应用[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(1): 36-43.
ZHAO Xingyong, HE Tianyun, CHEN Haoyu, et al. Application of multifunctional inverter in energy storage system of micro-grid[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(1): 36-43.
- [8] 沈渭程, 刘丽娟, 董开松, 等. 光伏并网NPC三电平逆变器调制算法研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(6): 69-75.
SHEN Weicheng, LIU Lijuan, DONG Kaisong, et al. Research on modulation algorithm of NPC three level inverter for photovoltaic grid connection[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(6): 69-75.
- [9] 赫亚庆, 王维庆, 王海云, 等. 光伏逆变器改进控制策略的稳定性研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(8): 60-66.
HE Yaqing, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Research on stability of the improved control strategy for photovoltaic inverters[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(8): 60-66.
- [10] 汪玉凤, 张影, 李爽, 等. 多电平级联H桥逆变器3N+1冗余容错策略的研究[J]. 高压电器, 2018, 54(2): 208-212.
WANG Yufeng, ZHANG Ying, LI Shuang, et al. Research on 3N+1 redundancy fault-tolerance strategy of multilevel cascaded H-bridge inverter[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(2): 208-212.
- [11] LU B, SANTOSH K S. A literature review of IGBT fault diagnostic and protection methods for power inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(5): 1770-1777.
- [12] 董润楠, 刘石, 梁庚, 等. 基于模型预测控制的微电网逆变器控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 12-20.
DONG Runnan, LIU Shi, LIANG Geng, et al. Research on control method of special inverter in micro-grid based on model predictive control[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 12-20.
- [13] 李国华, 李文悍. 基于差分进化算法的逆变器SHEPWM方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 32-38.
LI Guohua, LI Wenhan. Research on the SHEPWM technique applied to inverter based on differential evolution algorithms[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 32-38.
- [14] 黎燕, 史向月, 向鹏. 带容错逆变器的孤岛微网系统及其稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 82-91.
LI Yan, SHI Xiangyue, XIANG Peng. Stability analysis of islanded microgrid with the fault-tolerant inverter[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 82-91.
- [15] 杭俊, 张建忠, 程明, 等. 基于线电压误差的永磁直驱风电系统变流器开路故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 2933-2943.
HANG Jun, ZHANG Jianzhong, CHENG Ming, et al. Fault diagnosis of open-circuit faults in converters of direct-driven permanent magnet wind power generation systems based on line voltage errors[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 2933-2943.

- [16] FREIRE N M A, ESTIMA J O, CARDOSO A J M. Open-circuit fault diagnosis in PMSG drives for wind turbine applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(9): 3957-3967.
- [17] ZHANG J, ZHAO J, ZHOU D, et al. High-performance fault diagnosis in PWM voltage-source inverters for vector-controlled induction motor drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 6087-6099.
- [18] DIALLO D, BENBOUZID M E H, HAMAD D, et al. Fault detection and diagnosis in an induction machine drive—a pattern recognition approach based on Concordia stator mean current vector[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(3): 512-519.
- [19] DE ARIIBEIRO R L, JACOBINA C B, DA SILVA E R C, 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.
- [20] ESTIMA J O, CARDOSO A J M. A new algorithm for real-time multiple open-circuit fault diagnosis in voltage-fed PWM motor drives by the reference current errors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8): 3496-3505.
- [21] FREIRE N M A, ESTIMA J O, CARDOSO A J M. A voltage-based approach for open-circuit fault diagnosis in voltage-fed SVM motor drives without extra hardware[C] // International Conference on Electrical Machines, September 2-5, 2012, Marseille, France: 2378-2383.
- [22] FREIRE N M A, ESTIMA J O, CARDOSO A J M. A voltage-based approach without extra hardware for open-circuit fault diagnosis in closed-loop PWM AC regenerative drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(9): 4960-4970.
- [23] PEUGET R, COURTINE S, ROGNON J P. Fault detection and isolation on a PWM inverter by knowledge-based model[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(6): 1318-1326.
- [24] MENDES A M S, CARDOSO A J M. Voltage source inverter fault diagnosis in variable speed AC drives by the average current Park's vector approach[C] // Proceedings of the IEE International Electric Machines and Drives Conference, May 9-12, 1999, Seattle, WA, USA: 704-706.
- [25] ABRAMIK S, SLESZYNSKI W, NIEZNANSKI J, et al. A diagnostic method for on-line fault detection and localization in VSI-fed AC drives[C] // Proceedings of the 10th European Conference on Power Electronics and Applications, January 2003, Toulouse, France.
- [26] ROTHENHAGEN K, FUCHS F W. Performance of diagnosis methods for IGBT open circuit faults in voltage source active rectifiers[C] // Proceedings of the 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004: 4348-4354.
- [27] SLESZYNSKI W, NIEZNANSKI J, CICHOWSKI A. Open-transistor fault diagnostics in voltage-source inverters by analyzing the load currents[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(11): 4681-4688.
- [28] DIALLO D, BENBOUZID M E H, HAMAD D, et al. Fault detection and diagnosis in an induction machine drive—a pattern recognition approach based on Concordia stator mean current vector[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(3): 512-519.
- [29] SLESZYNSKI W, NIEZNANSKI J, CICHOWSKI A. Open-transistor fault diagnostics in voltage-source inverters by analyzing the load currents[J] IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(11): 4681-4688.

收稿日期: 2020-01-15; 修回日期: 2020-02-28

作者简介:

李江伟(1987—), 男, 通信作者, 本科, 工程师, 主要研究方向为配电运行与检修; E-mail: 123650427@qq.com

石瑞才(1982—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为配电运行与检修; E-mail: shirc5672@nng.gx.csg.cn

王 愚(1975—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电气工程。E-mail: 87975020@qq.com

(编辑 葛艳娜)