

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.09.008

基于小波包分析和 Elman 神经网络的 军用电源智能故障诊断

柯 炎¹, 樊 波¹, 谢一静¹, 吕 伟²

(1. 空军工程大学 防空反导学院, 西安 710051; 2. 中国人民解放军 93126 部队, 北京 100000)

摘要: 军用电源作为地空导弹系统的供电设备, 其可靠运转关系到地空导弹系统作战效能的发挥。为实现地空导弹电源逆变器的故障诊断与容错运行, 将小波包分解与 Elman 神经网络结合进行故障特征提取及故障辨识, 并应用于地空导弹静变电源的故障诊断。在准确诊断出故障的基础上, 利用故障隔离切换电路, 隔离故障桥臂, 投入备用桥臂, 保证静变电源继续正常运行。故障诊断和故障重构仿真的效果验证了该方法的有效性。

关键词: 三相逆变器; 故障诊断; 故障重构; 小波包; Elman 神经网络

中图分类号: TM933

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2019)09-066-07

Fault diagnosis of military power based on wavelet packet analysis and elman neural network

KE Yan¹, FAN Bo¹, XIE Yijing¹, LYU Wei²

(1. College of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, P. R. China;

2. Troops 73021 of People's Liberation Army, Beijing 10000, P. R. China)

Abstract: The reliable operation of power supply is very important to the operational effectiveness of surface-to-air missile weapon system. In order to realize fault diagnosis and fault tolerant operation of surface-to-air missile power supply inverter, the wavelet packet analysis and Elman neural network were introduced. Wavelet packet analysis combined with Elman neural network were applied to the power failure diagnosis of missile power supply system for the fault feature extraction and fault identification. On the basis of accurate fault diagnosis, fault isolation circuit is used to isolate fault components. The backup bridge arm is put into use to replace fault components so that the system can continue to operate normally. The results of the fault diagnosis and fault reconfiguration simulation verify the effectiveness of the method.

Keywords: three-phase inverter; fault diagnosis; fault reconfiguration; wavelet packet; Elman neural network

电源系统可靠、高质量的电能供应是地空导弹武器系统发挥作战效能的基础。地空导弹武器系统主要采用移动电源车供电。某移动电站配备的静止变频电源, 可以不启动柴油发电机组, 将市电变换后为武器系统提供所需的电能, 以达到降低运行费用, 减少发电机组损耗的目的。

静止变频电源主要由三相桥式整流电路、三相 DC/AC 逆变器以及滤波和控制电路等组成。其中三相 DC/AC 逆变器是静变电源实现电能转换的核心部分。逆变器中的功率半导体元器件及其控制电路是最易

收稿日期: 2019-05-23

作者简介: 柯炎(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事储能电源变流器故障诊断研究, (E-mail) kyle1688@foxmail.com。

通讯作者: 樊波, 男, 副教授, 主要从事电力电子与电力传动研究, (E-mail) fanbozoo@163.com。

发生故障的薄弱环节,其可靠性问题一直没有得到充分解决。实际研究^[1]也发现电压源逆变器中功率开关器件的故障率远高于其他器件。因此逆变器是静变电源故障诊断的重点和难点。

军用电源对供电的可靠性、持续性有着极高的要求,提高逆变器的可靠性显得尤为重要。在逆变器中采用容错技术,设置故障隔离装置以及软硬件的冗余设计^[2-3]是提高逆变器系统可靠性的主要途径之一。在实际应用中快速准确地判断逆变器的工作状态,确定故障位置,对于故障后逆变器功率器件采取保护措施以及后续的容错驱动具有重要意义。在准确判断出故障的基础上,如何实现故障的隔离及容错驱动,使系统能够容错运行是值得研究的问题。

目前,逆变电路的智能故障诊断理论研究较多,很多理论趋于完善,其相关技术可以分为3种基本类型:基于解析模型的方法、专家系统法^[4]和基于信号处理的方法。基于解析模型的方法需要对系统建立精确的数学模型,诊断准确性易受模型准确性、系统参数及噪声的影响。专家系统法存在不能从新的经验数据中学习、较依赖于专家的经验知识、庞大知识库维护复杂等缺陷。基于信号处理的诊断方法通过小波变换、电流 Park 矢量变换和频谱分析等信号处理方法对系统的幅值、频率等信息进行处理、分析提取故障特征,结合神经网络^[5-6]、支持向量机^[7]、模糊网络^[8]、聚类算法^[9]等智能方法识别故障类型。这种方法不需要对系统建立数学模型,灵活度高,需要诊断的电路参数发生变化只需重新训练即可,且易于通过计算机实现。小波包分析是一种精细的信号处理工具,能够自动适应信号的特点,聚焦到信号的任意细节,而且特别适于处理非稳定信号,能够有效地从信号中提取信息。Elman 神经网络具有适应时变过程的能力,比前馈型神经网络,更适于在线辨识。

目前,逆变器故障诊断方法研究较多,而故障诊断与保护相结合的研究对于实际应用更有价值。文中采用小波包分析法对采样信号进行分解,计算信号能量谱作为故障特征,结合 Elman 神经网络动态辨识能力,对三相 DC/AC 逆变器进行故障诊断。在准确地诊断出故障类型和位置的基础上,把故障部件隔离、将备用桥臂切换到电路中,使系统继续正常运行。通过建立故障诊断系统对故障诊断和故障保护过程进行仿真,分析结果证明了方法的有效性。

1 小波包和 Elman 神经网络

1.1 小波包分解及故障特征提取

经典的傅里叶变换是一种频域方法,该方法将信号在整个时间域内积分,把信号在频域展开为不同频率的正弦波之和,但是由于不含有时域相关信息,无法得知傅里叶谱中的某一频率到底在何时产生的,且只适用于对平稳信号的分析^[10-11]。而实际应用中大多数信号是非稳定的。小波分析兼具时域和频域分析能力,并且具有可变的时频分辨率,很适合用于分析正常信号中突变的信号并展示其成分。小波包分析能够同时对信号的高频和低频部分进行分解,克服了小波分解高频段频率分辨率较差和低频段时间分辨率较差的问题。

当逆变电路出现故障后,电路中信号频率成分的分布通常会发生变化,与正常信号相比表现为一些频率成分的加强或减弱。正常信号与故障信号的频带的谱值差异,表征故障位置和类型信息。因此,可用小波包分解细分信号的频带,提取各频带的能量作为特征用于故障诊断。

对信号进行 j 层小波包分解,共可得到 2^j 个子频带。第 i 个子频带对应的能量为

$$E_i = \sum_{k=1}^N |d_{j,k}^n|^2, i = 1, 2, \dots, 2^j, \quad (1)$$

式中: $d_{j,k}^n$ 表示第 j 层第 n 个节点 $S(j, n)$ 所对应的第 k 个数, $n = 0, 1, \dots, 2^j - 1$ 。为便于神经网络的处理,对信号各频带内的能量值进行归一化处理,构成的故障特征向量,称为信号的小波包能量谱,为

$$\vec{E} = [E_1, E_1, \dots, E_{2^j}] / \sum_{n=1}^{2^j} E_n. \quad (2)$$

为了使信号的能量谱较好地表达信号的特点,区分出不同故障,需要选取合适的小波包基函数。目前主要通过比较不同小波包基函数处理信号的结果与理论结果的误差来选取合适的小波包基函数。Daubechies 函数是世界著名小波分析学者 Daubechies 设计出来的离散正交小波,简称为 db N , N 为小波的阶数。可用

于离散小波分析。消失矩 N 越大,它的支撑长度越大,对应的滤波器越平坦,小波函数的震荡越强。消失矩 N 越大,故障信号的高频系数越小,信号的能量谱越往低频集中。通过比较,发现采用 db3 小波基时,信号能量谱的分布能较好区分出不同故障。

1.2 Elman 神经网络

Elman 神经网络是对 BP 神经网络的改进,其在 BP 前馈网络的基础上,在隐含层中增加一个连接层作局部反馈。其中输入层、隐含层和输出层属于前馈网络。连接层将隐含层的输出值一步延时反馈到隐含层的输入端,使网络具有记忆功能,增强了网络的全局稳定性,能够适应时变输入过程而不产生泛化,适于在线诊断。

Elman 神经网络的结构如图 1 所示。

网络的数学模型为

$$\begin{cases} J(k) = m(k-1), \\ m(k) = f(W^1 J(k)) + W^2 u(k-1), \\ y(k) = g(W^3 m(k)), \end{cases} \quad (3)$$

式中: $y(k)$ 为输出层节点信号; $m(k)$ 为隐含层节点信号; $J(k)$ 为连接层节点信号; W^3 代表隐含层到输出层连接权值; W^2 代表输入层与隐含层连接权值; W^1 代表隐含层与连接层之间的连接权值; f 、 g 分别为隐含层与输出层神经元传递函数。Elman 网络采用 BP 算法进行权值修正。

2 故障模式分析与故障诊断仿真

在电源设备中,功率开关管由于持续的高频开断、损耗发热,反复承受高压、大电流冲击、驱动信号错误或丢失等因素,易于发生开路和短路故障^[12]。短路故障从发生到产生过电流时间很快、危害较大,多采用硬件电路进行保护^[13-15]。在工程应用中通常在每相桥臂中加入熔断器来进行短路保护,熔断器会在功率开关器件短路时断开,开关管短路故障转变为开路故障,方便了故障的诊断与容错拓扑的配置。因此,文中只分析功率管开路故障情况。

2.1 功率器件开路故障分类与编码

军用静止变频电源 PWM 逆变电路拓扑图如图 2 所示。对主电路的 6 只 IGBT 开路故障进行分析,为简化分析过程,假设最多有 2 只管子同时发生故障。于是故障状态可分为无故障、单管故障、上下同一桥臂两管故障、同极性两管故障、交叉两管故障 5 类 22 种类型,表 1 为典型故障模式分类。

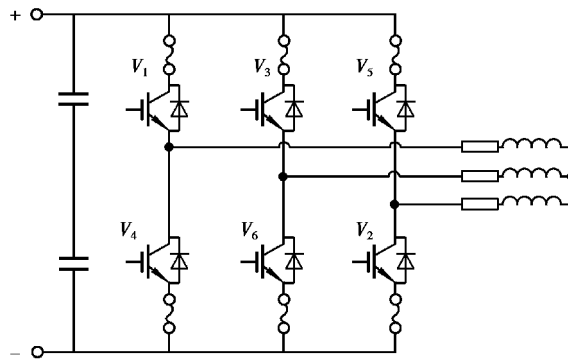


图 2 三相 SPWM 逆变电路拓扑结构

Fig. 2 Topology structure of three-phase SPWM inverter

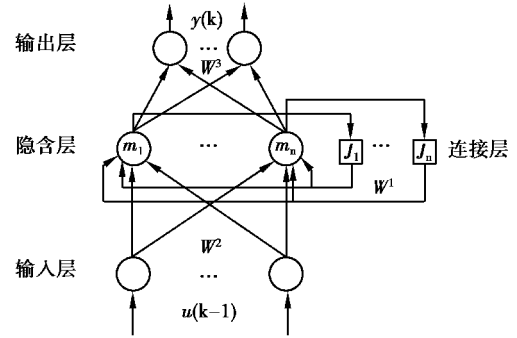


图 1 Elman 神经网络结构图

Fig. 1 Elman neural network structure

表 1 故障类型分类
Table 1 Fault types classification

故障类型	数量	故障管
无故障	1	无
1 只功率管	6	$V_i (i=1,2,\dots,6)$
同极性 2 只功率管	3	$V_{1,4}, V_{3,6}, V_{5,2}$
交叉 2 只功率管	6	$V_{1,6}, V_{1,2}, V_{3,4}, V_{3,2}, V_{5,4}, V_{5,6}$
同一桥臂 2 只功率管故障	6	$V_{1,3}, V_{1,5}, V_{3,5}, V_{4,2}, V_{4,6}, V_{6,2}$

对每种故障类型赋予 6 位二进制编码,按照从 V_1 到 V_6 管的顺序,有故障的功率管对应数字 1,无故障对应 0。例如 V_1 和 V_5 故障,则对应的故障编码为 100010。

2.2 故障样本的获取

逆变电路出现开路故障时,会引起负载侧电压的畸变,呈现非稳态特征。采样三相输出线电压作为故障检测信号。对故障特征信号进行小波包分解与重构,计算小波包能量谱作为表征故障的特征向量,输入神经网络进行故障诊断。

在 MATLAB/SIMULINK 环境下建立三相 SPWM 逆变电路模型。通过去掉 IGBT 驱动信号的方法模拟开路故障,采样逆变器三相输出线电压信号 V_{UV}, V_{VW} 。分别用 db1 至 db10 小波基对信号进行小波包分解、重构,计算能量谱,经综合比较,选用 db3 小波基对采样信号进行 3 层小波包分解,信号能量谱的分布能较好地反映出不同故障的差异。部分故障模式下线电压 V_{UV} 小波包能量谱如图 3 所示。

图 3 中,正常状态与 V_1, V_2 管故障状态线电压 V_{UV} 的各频带的能量谱差异较明显,较清晰地区分不同故障模式,能够用于故障类型的识别和定位。但对于 V_1, V_3 管故障,信号的能量谱则比较相近,无法区分出不同故障状态。这是因为 V_1, V_3 相对于线电压 V_{UV} 位置对称。因此同时用线电压 V_{UV} 与 V_{VW} 用于故障诊断,可以较好地地区分出各类故障。

对线电压信号 V_{UV}, V_{VW} 进行处理各得到 8 维的故障特征向量。为便于神经网络处理,提高运算速度,主成分分析法进行降维处理,得到 6 维的特征向量。将 22 种故障模式的故障特征向量作为输入样本,对应的故障编码作为期望输出,作为神经网络训练和测试的样本。

2.3 Elman 神经网络诊断结果

建立 Elman 神经网络,输入层神经元个数 m 为 6,输出层神经元个数 n 为 6。由最佳隐含节点数公式 $L = (m+n)1/2+c$,并综合考虑网络的性能和速度,将隐含层神经元的个数设定为 8。隐含层神经元和输出层神经元的传递函数分别为 Tansig 函数和 logsig 函数。训练目标误差为 0.000 1。

网络训练好后,用测试样本进行测试,准确率及训练速度均优于对照的 BP 神经网络,且没有 BP 神经网络收敛到局部极小值导致训练失败的缺点。表 2 为 Elman 神经网络与传统 BP 神经网络训练时间和诊断正确率的对比。

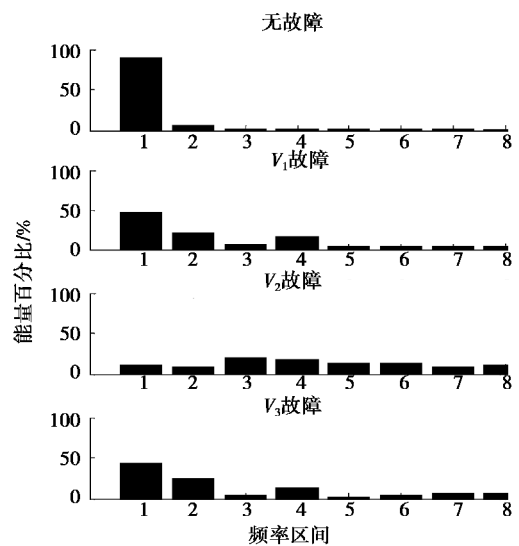


图 3 部分故障模式下线电压 V_{UV} 小波包能量谱
Fig. 3 The wavelet packet energy spectrums of the phase a current signal in normal state and partial failure conditions

表 2 Elman 和 BP 神经网络性能指标比较

Table 2 Comparison of performance indexes of Elman and BP neural network

方法	训练时间/s	诊断正确率/%
BP 神经网络	2.73	96.4
Elman 神经网络	1.45	99.1

3 三相逆变器的故障重构

3.1 故障隔离电路

当静变电源逆变器发生故障后,输出电能质量将变恶劣,严重影响地空导弹武器系统的正常运行。因此,有必要在准确诊断故障的基础上,设置故障隔离及切换的容错电路,使系统在发生一定的故障后仍能正常运行。文中采用设置备用桥臂的方式,在检测出故障后,及时隔离故障桥臂,投入备用桥臂实现系统的容错运行。逆变器的重构拓扑如图 4 所示。

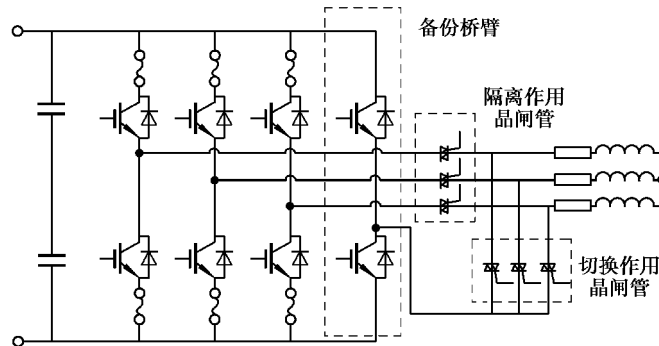


图 4 电路拓扑结构

Fig. 4 Circuit topology

为了将故障桥臂及时与其他正常桥臂隔离,采用如图 5 所示的故障隔离电路。当下桥臂的功率管故障需要隔离时,控制开通双向晶闸管 V_2 ,此时 C_1 、 C_2 与 Fuse2 构成通路,回路电流使 Fuse2 快速熔断,实现对下桥臂的隔离。上桥臂的故障同理。对于桥臂直通故障,使上下熔丝都熔断,即可将整个故障桥臂隔离。对于桥臂中一个功率管常开故障,切除桥臂另一个功率管即可。

除了将故障桥臂与其他桥臂隔离外,还应使故障桥臂与负载隔离。如图 4 所示,在各桥臂与各相负载之间设置隔离开关,控制故障桥臂与负载相之间的双向晶闸管断开,故障桥臂与负载即被隔离。

3.2 故障重构电路

在检测到某相桥臂发生故障后,为了使系统正常运行,在将故障桥臂隔离后,应当迅速将备用桥臂投入运行。如图 4 所示,在备用桥臂与各相负载间设置有切换开关。切换开关应具备电流双向流动能力。而双向晶闸管具备电流双向流动能力,控制极只有一个,相比其他实现双向流动的开关电路,可靠性最高^[16]。因此,采用双向晶闸管作为切换开关。同时故障桥臂与负载的隔离开关也采用双向晶闸管。

当某相桥臂发生故障后,控制故障桥臂与负载相之间的双向晶闸管断开,备用桥臂与相应负载相之间的双向晶闸管导通,使备用桥臂迅速切换到电路中,保证逆变器继续正常运行。从而使系统具有一定的容错运

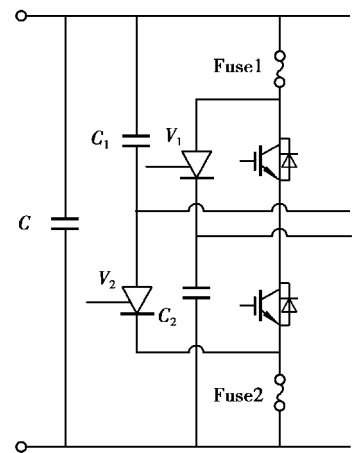


图 5 故障隔离电路

Fig. 5 Fault isolation circuit

行能力。图 6 为故障重构前后的三相输出电压仿真的动态过程。0.1 s 时 A 相上桥臂发生故障,此时 A 相和 C 相波形出现畸变。诊断系统迅速将 A 相桥臂隔离,将备用桥臂投入运行,0.13 s 左右三相输出电压波形恢复正常。采用的隔离重构措施能较快的使因故障而发生畸变的输出电压恢复正常,证明了方法的有效性。

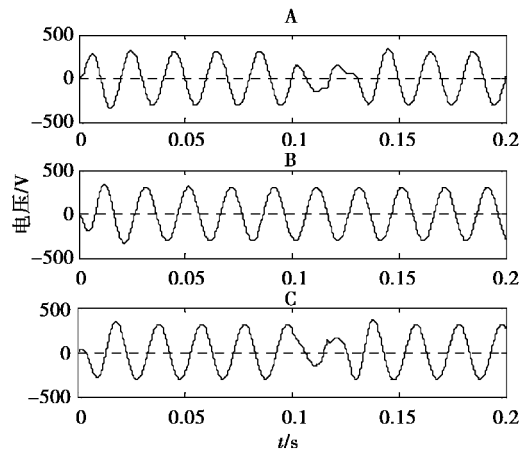


图 6 输出电压仿真波形

Fig. 6 Output voltage simulation waveform

4 结 语

为提高军用静止变频电源的可靠性,对三相 DC/AC 逆变器的故障诊断及容错运行问题进行了研究。将小波包分析与 Elman 神经网络结合用于静变电源逆变器的故障诊断,对逆变器输出三相电压信号进行小波包分解,获取能量特征谱作为故障特征,归一化并用 PCA 降维后作为神经网络的输入样本。针对 BP 神经网络训练时间慢,需要人工调节参数,对外部噪声敏感的不足,采用了具有记忆功能 Elman 神经网络用于故障类型辨识。相比 BP 神经网络,Elman 神经网络具有训练速度更快,适应时变特性,适于在线诊断等优点。实验结果显示该方法能有效提取故障信息进行故障诊断,且性能优于 BP 网络。采用在桥臂中植入熔丝的方法进行故障隔离。利用双向晶闸管双向导通能力将被备用桥臂投入系统替换故障部件,使系统能够继续正常运行。故障诊断和故障重构仿真的结果验证了方法的有效性。

参考文献:

- [1] Schwab H, Klonne A, Reck S, et al. Reliability evaluation of a permanent magnet synchronous motor drive for an automotive application[C]//Conference Rec EPE. Toulouse, France:[s. n.], 2003, 1: 56-60.
- [2] Lu B, Sharma S K. A literature review of IGBT fault diagnostic and protection methods for power inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(5): 1770-1777.
- [3] Fu J R, Lipo T A. A strategy to isolate the switching device fault of a current regulated motor drive[C]//Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting, 2-8 Oct. 1993, Toronto, Ontario, Canada, 1993: 1015-1020.
- [4] 崔江, 王强, 龚春英, 等. 结合小波与 Concordia 变换的逆变器功率管故障诊断技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 3110-3116.
CUI Jiang, WANG Qiang, GONG Chunying, et al. Inverter power switch fault diagnosis technique research based on wavelet and concordia transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3110-3116.(in Chinese)
- [5] 陈丹江, 叶银忠. 基于多神经网络的三电平逆变器器件开路故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 120-126.
CHEN Danjiang, YE Yinzong. Fault diagnosis of three level inverter based on multi neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 120-126.(in Chinese)

- [6] Szczesny R, Kurzynski P, Piqueb H, et al. Knowledge-base system approach to power electronic systems fault diagnosis [C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 17-17 June 1996, Warsaw, Poland, 1996: 1005-1010.
- [7] Delpha C, Chen H, Diallo D. SVM based diagnosis of inverter fed induction machine drive: a new challenge[C]//38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Canada: IEEE, 2012A: 3931-3936.
- [8] Wang B C, Li D H, Sun X F, et al. The studies of single-phase inverter fault diagnosis based on D-S evidential theory and fuzzy logical theory[C]//IEEE International Power Electronics & Motion Control Conference. IEEE, 2009: 1-4, 14-16.
- [9] 孙丹, 孟潜, 管宇凡, 等. 基于相空间重构和模糊聚类的永磁同步电机直接转矩控制系统逆变器故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(16): 49-53.
SUN Dan, MEMG Jun, GUAN Yufan, et al. Inverter faults diagnosis in PMSM DTC drive using reconstructive phase space and fuzzy clustering[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(16): 49-53.(in Chinese)
- [10] 张德丰. Matlab 神经网络应用设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
ZHANG Defeng. Application design of Matlab neural network[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [11] 杨忠林. 基于小波包分解的逆变器一相开路故障诊断[J]. 电机与控制应用, 2011, 38(7): 34-37.
YANG Zhonglin. Open fault diagnose in one-phase for inverter based on wavelet packet decomposition [J]. Electric Machines & Control Application, 2011, 38(7): 34-37.(in Chinese)
- [12] 肖岚, 李睿. 逆变器并联系统功率开关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)
- [13] 安群涛, 孙力, 孙立志, 等. 三相逆变器开关管故障诊断方法研究进展[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 135-144.
AN Quntao, SUN Li, SUN Lizhi, et al. Recent developments of fault diagnosis methods for switches in three-phase inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4): 135-144.(in Chinese)
- [14] Kim M S, Park B G, Kim R Y, et al. A novel fault detection circuit for short-circuit faults of IGBT[C]//2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Fort Worth, TX, USA, 2011: 359-363.
- [15] Huang F, Flett F. IGBT fault protection based on DI/DT feedback control[C]. 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference. Orlando, FL, USA, 2007: 1478-1484.
- [16] Alexander L, Julian. A comparison of redundant inverter topologies to improve voltage source inverter reliability[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(5): 1371-1378.

(编辑 詹燕平)