

6-1-2020

Multiple Faults Identification of Three-level Inverter

Yanxia Shen

Institute of Electrical Automation, College of Internet of things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

Wu Juan

Institute of Electrical Automation, College of Internet of things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

Zhipu Zhao

Institute of Electrical Automation, College of Internet of things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

Zhicheng Ji

Institute of Electrical Automation, College of Internet of things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Multiple Faults Identification of Three-level Inverter

Abstract

Abstract: A three-level neutral point clamped (NPC) inverter was taken as an example, phase current and bridge voltage in the fault states of single switch open and several switches open at the same time were analyzed, and a method based on reconstructive phase space (RPS) and wavelet packet analysis was proposed to identify three-level inverter faults. *Based on RPS method, totally different reconstructed current trajectories were obtained, which showed the features of the inverter under different fault conditions. With the help of image processing technology, all kinds of faults with different phase currents were identified. The wavelet packet analysis was adopted to extract the features of frequency-spectrum for different faults with the same phase currents and all typical faults were identified.* Simulations and experiments show that the method can accurately extract the feature vectors for each fault condition and various failure modes can be identified.

Keywords

three-level inverter, fault identification, phase current, bridge voltage, reconstructive phase space, wavelet packet analysis

Recommended Citation

Shen Yanxia, Wu Juan, Zhao Zhipu, Ji Zhicheng. Multiple Faults Identification of Three-level Inverter[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(7): 1447-1457.

三电平逆变器多故障模式识别方法

沈艳霞, 吴娟, 赵芝璞, 纪志成

(江南大学物联网工程学院 电气自动化研究所, 江苏 无锡 214122)

摘要: 以二极管中点钳位型三电平逆变器为例, 分析了三电平逆变器单管开路和多管同时开路故障状态下的相电流和桥臂电压信号, 提出了基于相空间重构和小波包分析的三电平逆变器故障识别方法。利用相空间重构技术, 对相电流进行重构, 得到表征系统故障特征的不同形状、大小和方向的电流轨迹图形, 借助图像处理技术识别出相电流不同的各类故障; 对相电流相同的不同故障模式辅以小波包分析, 提取出桥臂电压的特征频谱, 识别出三电平逆变器的所有典型故障。仿真与实验结果表明该方法可以精确提取出各故障状态的特征向量, 实现多种故障模式的识别。

关键词: 三电平逆变器; 故障识别; 相电流; 桥臂电压; 相空间重构; 小波包分析

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2017)07-1447-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201707008

Multiple Faults Identification of Three-level Inverter

Shen Yanxia, Wu Juan, Zhao Zhipu, Ji Zhicheng

(Institute of Electrical Automation, College of Internet of things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: A three-level neutral point clamped (NPC) inverter was taken as an example, phase current and bridge voltage in the fault states of single switch open and several switches open at the same time were analyzed, and a method based on reconstructive phase space (RPS) and wavelet packet analysis was proposed to identify three-level inverter faults. *Based on RPS method, totally different reconstructed current trajectories were obtained, which showed the features of the inverter under different fault conditions. With the help of image processing technology, all kinds of faults with different phase currents were identified. The wavelet packet analysis was adopted to extract the features of frequency-spectrum for different faults with the same phase currents and all typical faults were identified.* Simulations and experiments show that the method can accurately extract the feature vectors for each fault condition and various failure modes can be identified.

Keywords: three-level inverter; fault identification; phase current; bridge voltage; reconstructive phase space; wavelet packet analysis

引言

随着工业领域对大容量功率变换装置的要求日益增加, 多电平逆变器开始得到广泛的研究和应

用。多电平逆变器克服了传统的两电平逆变器开关应力大, 直流母线电压利用率低等缺点, 改善了输出波形, 提高了逆变效率, 因此适用于高压大功率领域。多电平逆变器主要包括二极管中点钳位、飞跨电容以及独立直流电压源的级联型等几种类型, 其中二极管中点钳位型电路在实际中应用最多。但由于功率管工作在高频状态, 要承受高电压和大电流, 而自身过载能力有限, 导致开关器件损坏的几



收稿日期: 2015-09-07 修回日期: 2015-12-19;
基金项目: 国家自然科学基金(61573167), 高等学校博士学科点专项科研基金(20130093110011), 江苏省自然科学基金(BK20141114);
作者简介: 沈艳霞(1973-), 女, 山东淄博, 博士, 教授, 博导, 研究方向为新能源控制技术、轻工装备智能制造。

<http://www.china-simulation.com>

• 1447 •

率很大。其中，以 IGBT 器件的开路故障和短路故障最为常见。短路故障存在的时间极短，可在硬件电路上进行处理，也可以将快速熔丝植入电路中，将短路故障转化为开路故障，利用开路故障诊断方法加以处理^[1]。而 IGBT 开路故障时，系统往往还能继续运行，不易被发现，但会导致功率管工作不正常，使输出波形发生畸变。对于三电平电路，较长时间的功率管开路故障还会导致变换器直流侧电压不平衡^[2]。且多电平逆变器由于结构复杂，采用元器件较多，也致使电路的可靠性相应降低。任何一个器件故障都可能导致整个电路停止工作，有时甚至会影响到其他电路的安全，造成严重事故或不可估量的经济损失^[3]。因此，需要尽快识别并排除。

目前国内外针对 NPC 三电平逆变器的故障诊断问题已开展了不少研究，例如，文献[4]通过分析 NPC 三电平逆变器的极电压及其持续时间，提出一种基于连续脉宽调制固有特性的功率管开路故障识别方法，该方法能在 2 个采样周期内完成故障识别，具有诊断速度快等优点。文献[5]基于平均电流矢量轨迹进行故障识别，该方法不用添加额外的传感器，并且无需复杂的计算。文献[6]在平均电流矢量轨迹的基础上引入了时间轴来显示诊断过程，仿真与实验验证了该方法的有效性。文献[7]通过分析故障对电流的影响，利用零电流持续的时间识别出故障类型，并对开路功率管进行定位。文献[8]通过设计具体的故障诊断电路，根据桥臂电压波形的电平及其持续时间变化实现了器件开路故障的自动诊断。

但是，以上研究都只考虑单个器件开路的故障模式。而在实际运行时，由于三电平逆变器使用了数量较多的开关器件，难免出现双管开路的情况。引入两个器件同时开路的故障模式后，采用单个测量信号已无法区分所有故障模式。文献[9]提出一种基于多神经网络的故障诊断方法，实现了单个器件开路和多个器件同时开路的故障模式的诊断。采用三电平逆变器的上、中、下桥臂电压作为测量信号，利用频谱分析提取桥臂电压的谐波幅值和相位作为故障特征信息，通过多神经网络结构进行诊断，为三电平逆变器的故障诊断提供了新思路。该

方法虽然相比于传统的神经网络结构和计算量要小得多，但特征向量维数依然较多，仅主神经网络就需要 11 个输入节点。为降低特征向量的维数，基于相空间重构的时间序列数据挖掘技术可以把原系统中的非线性时间序列重建为一种低阶非线性系统，简化非线性系统的分析。通过合理设计嵌入维数和延迟时间，利用相空间重构技术可以提取出系统参数中隐含的内在特征进而用于故障识别，已广泛应用于电机等动力系统的故障诊断中^[10-11]。

本文针对二极管中点钳位型三电平逆变器，分析并总结出三电平逆变器功率管开路故障的类型。在分析各开路故障状态下相电流信号的基础上，利用相空间重构技术对故障相电流进行重构，得到不同大小、形状和方向的重构电流轨迹，从中提取出反映系统故障类型的特征向量。针对相电流相同的不同故障模式采用上下桥臂电压作为测量信号，利用小波包分解与重构算法确定故障信息所在的频带范围，并对能量集中频带的小波系数进行功率谱分析，得到不同故障类型下的频谱特征，从而实现三电平逆变器的故障识别。

1 三电平逆变器的故障特征分析

1.1 电路工作模式分析

二极管中点钳位型三电平逆变器主电路拓扑如图 1 所示，电路工作时逆变器的每相桥臂开关有 3 种不同的通断组合，对应着不同的输出状态，如表 1 所示。

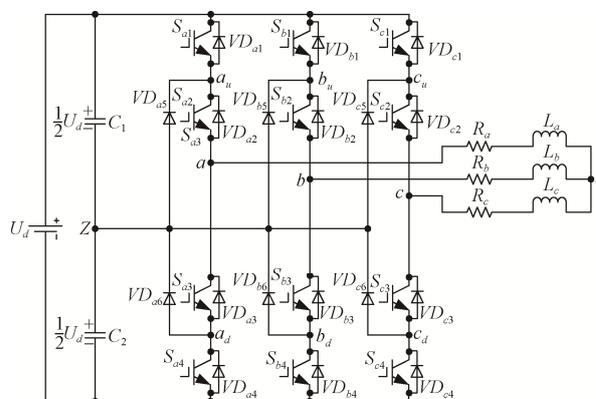


图 1 中点钳位三电平逆变主电路拓扑
Fig. 1 Main circuit of NPC inverter

表 1 三电平逆变器的开关状态和输出电平关系
Tab. 1 Relationship between the switch states and output voltage of the three level inverter

输出电平	开关状态(x=a, b, c)			
	S _{x1}	S _{x2}	S _{x3}	S _{x4}
P	on	on	off	off
O	off	on	on	off
N	off	off	on	on

为简化分析, 用开关逻辑函数 $S_x(x=a, b, c)$ 描述电路的开关状态, 其定义如下:

$$S_x = \begin{cases} 1 & S_{x1} \text{ 和 } S_{x2} \text{ 导通} \\ 0 & S_{x2} \text{ 和 } S_{x3} \text{ 导通} \\ -1 & S_{x3} \text{ 和 } S_{x4} \text{ 导通} \end{cases} \quad (1)$$

正常情况下, 分压电容 C_1 和 C_2 的电压相等, 为输入直流电压的一半, 即 $U_d/2$, 令 $E=U_d/2$, 则三电平逆变器每相输出电压为

$$U_x = S_x \cdot E \quad (2)$$

对于 Y 连接的三相负载, 负载中心点 n 相对于 Z 点电压为:

$$U_{nz} = (S_a + S_b + S_c)E / 3 \quad (3)$$

因此三相对称负载相电压为:

$$U_{xn} = E[S_x - (S_a + S_b + S_c) / 3] = R_x i_x + L_x \frac{d}{dt} i_x \quad (4)$$

将 S_x 的各个可能取值组合代入(4)可知, 相电压可以取 9 个不同的值, 即 $\pm 4E/3, \pm E, \pm 2E/3, \pm 1E/3$ 和 0。

当电路带阻感性负载时, 在各种开关状态下, 电流分别有两种通路, 假设以流向负载方向为正, 反之为负, 则电路共有 6 种不同的工作状态, 见图 2。

从图 2 可看出, 每种状态分别对应了特有的输

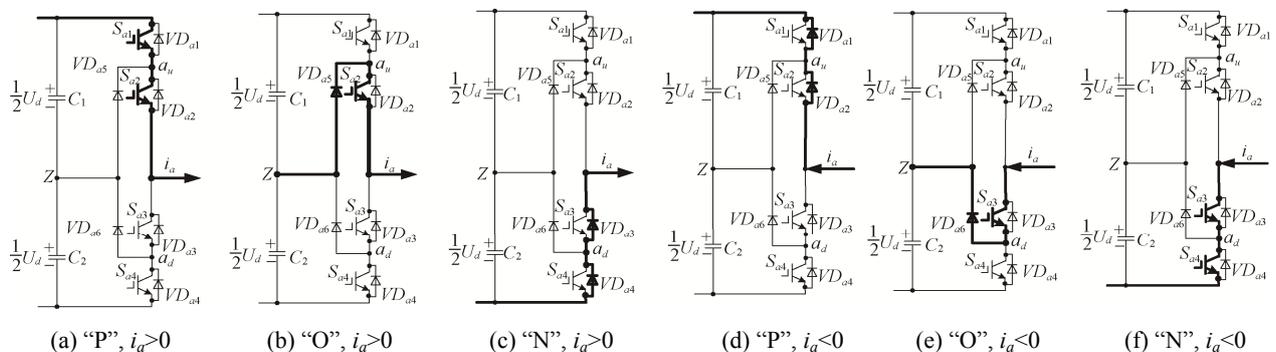


图 2 逆变器主电路在各状态下的工作电路

Fig. 2 Main circuits under different switch states of the inverter

<http://www.china-simulation.com>

出电压和输出电流极性, 而每种状态的工作回路所涉及的功率开关管的组合也是不同的。

1.2 故障分析

三电平逆变器在正常工作状态下, 其工作模式按图 2 所示的 6 种状态有规律地变换, $S_{x1} \sim S_{x4}$, VD_{x5} 和 VD_{x6} 这 6 只功率管的通断组合决定了电路的工作状态。当 $S_{x1} \sim S_{x4}$, VD_{x5} 和 VD_{x6} 发生开路故障时, 必然导致开关组合发生变化, 其工作电路也随之改变, 因此, 相应的输出电压、电流以及桥臂电压等都随之发生畸变。但由于二极管特性好, 使用寿命长, 不易出现故障, 因此只考虑 IGBT 元件的开路故障。

实际运行时, 很少出现 3 只或 3 只以上开关管同时故障的情况, 针对常见的单管和双管故障情况进行分类, 如表 2 所示。

综上所述, 三电平逆变器 IGBT 开路故障分为 5 大类, 一共 79 种可能情况。前 3 类故障为典型故障, 共计 31 种; 其余 2 类为非典型故障, 共计 48 种。本文针对典型故障进行识别, 即单独某一相功率管发生开路故障, 下面以 A 相为例, 对三电平逆变器的典型故障进行分析。

当某一相的 IGBT 发生开路故障时, 该相的相电流、桥臂电压等发生变化。考虑电路的对称性, 对于单管故障, 只分析 S_{a1} , S_{a2} 两个器件开路的情况; 对于两只功率管故障, 只分析 S_{a1} 和 S_{a2} , S_{a1} 和 S_{a3} , S_{a1} 和 S_{a4} , S_{a2} 和 S_{a3} 同时开路的情况。无故障以及各典型故障模式下的一相电流波形见图 3。

表2 三电平逆变器 IGBT 开路故障分类
Tab. 2 Open circuits faults classification of IGBT in the three level inverter

故障分类	故障大类	故障描述
第1类	正常运行	无
第2类	单管故障	共12种情况, 即 $S_{x1} \sim S_{x4}$
第3类	同一桥臂2只功率管同时故障	共18种情况, 即 S_{ij} 和 S_{in} 同时发生故障, 其中 $i=a,b,c, j \neq n, j,n=1,2,3,4$
第4类	同一半桥交叉两桥臂2只功率管故障	共24种情况, 即 S_{ij} 和 S_{mn} 同时发生故障, 其中 $i,m=a,b,c, i \neq m, j,n=1,2,3,4, j-n \leq 1$
第5类	上下半桥交叉两桥臂2只功率管故障	共24种情况, 即 S_{ij} 和 S_{mn} 同时发生故障, 其中 $i,m=a,b,c, i \neq m, j,n=1,2,3,4, j-n > 1$

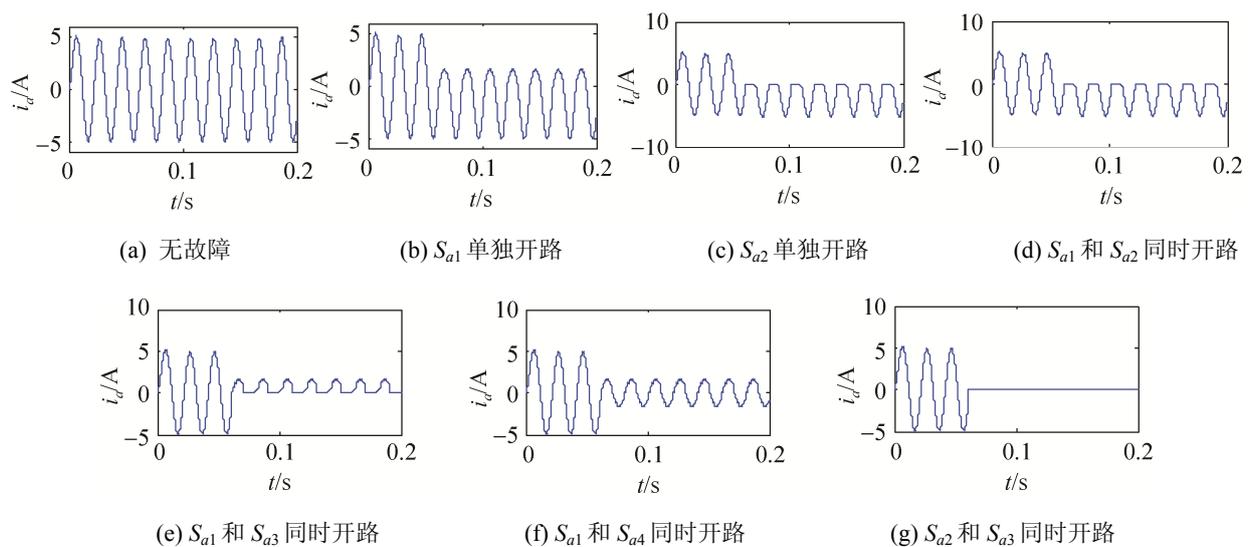


图3 正常与各故障状态下一相电流仿真波形

Fig. 3 Simulation results of phase current under normal case and different faults case

1) S_{a1} 开路: 只有工作状态图 2(a)无法实现, 由式(1)可知, $S_a=1$ 的状态将无法实现, 导致 A 相电压将无法达到最大值 $4E/3$, 因此 A 相电流在正半周期的幅值将随之减小, 负半周期不变, 如图 3(b)所示。

2) S_{a2} 开路: 工作状态图 2(a)、图 2(b)都无法实现, 导致 A 相将无正向输出电流, 反向电流不变, 如图 3(c)所示。

3) S_{a1} 和 S_{a2} 同时开路: 与 S_{a2} 单独开路相同, 工作状态图 2(a)、图 2(b)都无法实现, 这两种情况下的相电流是相同的, 如图 3(d)所示, 只利用相电流无法实现这两种故障模式的隔离。 S_{a1} 是否发生开路故障, 其两端所承受的电压是不同的, 导致上桥臂电压幅值和相位不同, 因此引入上桥臂电压 u_{auz} (a_u 点和 z 点之间的电压)作为新的故障特征信

息。 S_{a2} 单独开路与 S_{a1} 和 S_{a2} 同时开路上桥臂电压分别如图 4(a)和图 4(b)所示。

4) S_{a1} 和 S_{a3} 同时开路: 这种情况可看成 S_{a1} 开路和 S_{a3} 开路的结合, S_{a1} 开路导致 A 相电流在正半周期幅值减小; S_{a3} 与 S_{a2} 处于对称位置, 因此 S_{a3} 开路导致 A 相无反向输出电流, 如图 3(e)所示。

5) S_{a1} 和 S_{a4} 同时开路: 这种情况可看成 S_{a1} 开路和 S_{a4} 开路的结合, S_{a1} 与 S_{a4} 处于对称位置, S_{a1} 开路导致 A 相电流在正半周期幅值减小; S_{a4} 开路导致 A 相电流在负半周期幅值减小, 如图 3(f)所示。

6) S_{a2} 和 S_{a3} 同时开路: 这种情况可看成 S_{a2} 开路和 S_{a3} 开路的结合, 因此这种情况下输出电流将为 0, 如图 3(g)所示。

可见, 以相电流为特征信号, 可以区分除 S_{a2} 单独开路和 S_{a1} 和 S_{a2} 同时开路以外的其他故障类

型。因此包含在相电流波形中的时间序列可作为相空间重构检测电路运行状态的数据源。而 S_{a2} 单独开路和 S_{a1} 和 S_{a2} 同时开路的情况可以通过上桥臂电压 u_{auz} 加以区分。根据电路的对称性, S_{a3} 单独开路和 S_{a3} 和 S_{a4} 同时开路的情况可以通过下桥臂电压 u_{adz} 加以区分。

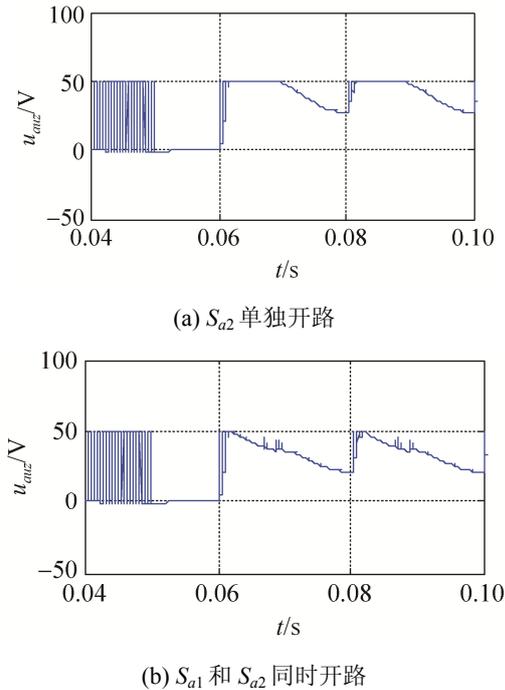


图4 上桥臂电压仿真波形

Fig. 4 Simulation results of upper-leg voltages

2 故障识别方法

2.1 基于相空间重构的电流信号分析

相空间重构理论是混沌时间序列分析的基础,其目的是:在高维相空间中恢复出体现混沌系统规律性的混沌吸引子,从而获取更多的隐藏信息^[12]。混沌时间序列重构相空间的方法主要包括导数重构法和坐标延迟重构法^[13],最常用的为时间延迟法。其基本思想是(Takens 嵌入定理)^[14]:系统中的任一分量的演化都是由与其相互作用的其他分量所决定,这些相关分量的信息就隐含在任一分量的演化过程中,只要选择合适的延迟时间和嵌入维数,就能重构出一个与原系统具有相同拓扑性质的动力学系统。根据这一特性,由相空间重构方法得

到的重构电流轨迹所显示的系统特性也存在于原系统之中,重构过程如下:

假设采集到的一相电流时间序列为

$$I = [i(t)], t = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

N 是序列总长度,以延迟时间 τ 和嵌入维数 m 进行相空间重构得:

$$I = \begin{bmatrix} i(1) & i(1+\tau) & \dots & i[1+(m-1)\tau] \\ i(2) & i(2+\tau) & \dots & i[2+(m-1)\tau] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ i(M) & i(M+\tau) & \dots & i[M+(m-1)\tau] \end{bmatrix} \quad (6)$$

相空间中的相点可以表示为:

$$I(t) = [i(t), i(t+\tau), \dots, i(t+(m-1)\tau)], \\ t = 1, 2, \dots, M \quad (7)$$

$$M = N - (m-1)\tau$$

相空间重构理论的关键在于延迟时间 τ 和嵌入维数 m 的选取,其中延迟时间 τ 的选择尤为重要。如果 τ 选的太小,则 $i(t)$ 和 $i(t+\tau)$ 强相关,导致 I 中所有向量都聚合在对角线处;如果 τ 选得过大,将导致 $i(t)$ 和 $i(t+\tau)$ 相互独立。对于这两个参数的选取方法,已经有许多学者进行了深入探讨,本文分别采用自相关函数法和虚假邻近点法单独确定延迟时间 τ 和嵌入维数 m 。

通过相空间重构方法可以得到直观地反应故障特征的重构电流轨迹,很容易被人眼识别,但为了系统能够自动识别故障,需要进一步提取出能够反映相电流重构轨迹大小、形状和方向的特征向量。因此可将相空间转换为二值图像进行处理,其具体步骤如下:

1) 将各故障状态下的电流重构轨迹转换为像素相同的二值图像;

2) 将无故障状态下的电流图像作为参考,将各故障状态下电流图像作为测试样本,分别逐列求出两者上下边界所在行的绝对差,即

$$F_U(i) = \text{abs}(\mathbf{H}_U(i, j) - \mathbf{T}_U(i, j)) \\ F_D(i) = \text{abs}(\mathbf{H}_D(i, j) - \mathbf{T}_D(i, j)) \quad (8)$$

式中: i, j 分别表示行列数; \mathbf{H}_U 和 \mathbf{H}_D 分别表示参考图像上下边界向量; $\mathbf{T}_U, \mathbf{T}_D$ 分别表示测试图像

上下边界向量。

3) 求出各上下边界偏差向量的均值和标准差, 如式(9)所示

$$\begin{aligned} \text{mean}_U &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_U(i) \\ \text{std}_U &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_U(i) - \text{mean}_U)^2 \end{aligned} \quad (9)$$

式中: n 为边界向量的大小, 该式同样适用于下边界。

实际运行时, 可测量多组数据, 根据这 4 个特征值的分布情况对电路的故障状态进行分类。然而, 由上一节的分析可知, 仅对电流信号进行处理, 并不能区分出所有故障, 还需对桥臂电压进行进一步处理。

2.2 基于小波包运算的电压信号分析

通过上面的分析可知, S_{a2} 单独开路和 S_{a1} 和 S_{a2} 同时开路时, 桥臂电压的幅值和相位发生不同变化, 导致相同频带内信号的能量发生变化, 而各频率成分的能量中包含了系统的故障信息, 因此通过分析其中某种或某几种频率成分的能量可以对不同故障加以区分。小波系数表示的是在特定频段内的时间序列信号, 因此利用傅里叶变换对能量集中频带重构后的小波系数进行功率谱分析, 可以获取信号的特征频率, 具体分析过程如下:

1) 选取合适的小波函数, 对桥臂电压进行小波包分解与重构, 得到各频带信号。其中小波包分解算法是由 $\{d_l^{j,n}\}$ 求 $\{d_k^{j+1,2n}\}$ 和 $\{d_k^{j+1,2n+1}\}$, 采用下式递推:

$$\begin{cases} d_k^{j+1,2n} = \sum_k h_{0(2l-k)} d_l^{j,n} \\ d_k^{j+1,2n+1} = \sum_k h_{1(2l-k)} d_l^{j,n} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $d_l^{j,n}$, $d_k^{j+1,2n}$, $d_k^{j+1,2n+1}$ 分别为小波包分解系数; $h_{0(2l-k)}$, $h_{1(2l-k)}$ 分别为小波包分解的低通、高通滤波器系数。

小波包系数重构算法是由 $\{d_k^{j+1,2n}\}$ 和 $\{d_k^{j+1,2n+1}\}$ 求 $\{d_l^{j,n}\}$, 即:

$$\begin{aligned} d_l^{j,n} &= \sum_k [h_{0(2l-k)} d_k^{j+1,2n} + h_{1(2l-k)} d_k^{j+1,2n+1}] = \\ & \sum_k g_{0(2l-k)} d_k^{j+1,2n} + \sum_k g_{1(2l-k)} d_k^{j+1,2n+1} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $g_{0(2l-k)}$, $g_{1(2l-k)}$ 分别为小波包重构的低通、高通滤波器系数。

2) 计算各频带信号的能量, 归一化后确定能量集中的频带范围;

3) 利用傅里叶变换对能量集中频带的小波系数进行功率谱分析, 得到信号的特征频率与对应的谱值。

综上, 基于相空间重构和小波包分析的三电平逆变器功率管开路故障识别过程可用图 5 所示的流程图概要地描述。

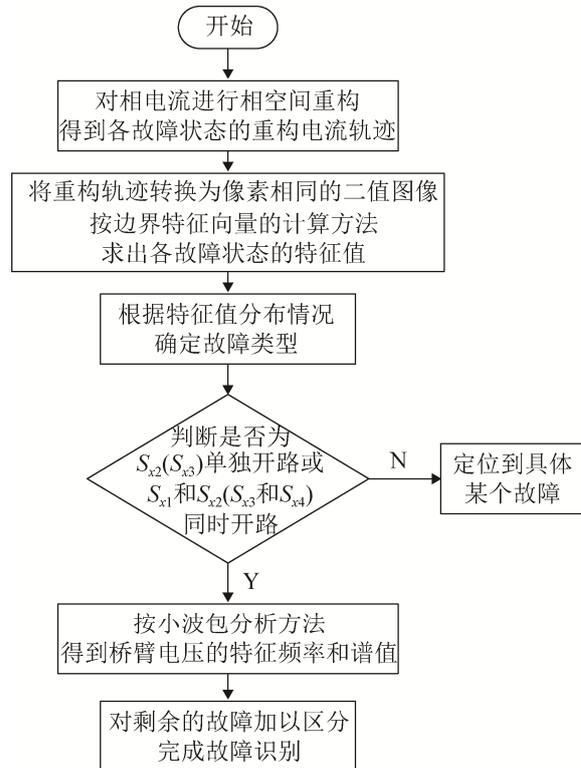


图 5 故障识别流程图

Fig. 5 Flowchart of faults identification

3 实验与诊断结果分析

实验系统主要参数如下: 输入直流电压 100 V, 负载为每相 8 Ω 电阻和 20 mH 电感串联, 驱动和控制信号利用 DSP TMS320F28335 产生, 逆变器载波频率为 2.5 kHz, 调制波为 50 Hz 正弦波。图 6

为各状态下的相电流实验波形, 图 7 为上桥臂电压实验波形。

由图 6 和图 7 可以看出, 实验波形与仿真波形基本一致。唯一不同的是在实验波形中, 故障发生后, 出现毛刺即谐波分量略有增大的现象, 而在仿真中没有, 这是由电路的不平衡以及外界干扰引起的, 仿真却是在理想状态下进行的。

3.1 电流信号的相空间重构

根据相空间重构理论, 本文选取延迟时间 $\tau=260 T_s$, 嵌入维数 $d=2$, 其中 T_s 为系统离散化采

样周期。分别得到各状态下的相电流波形的相空间重构轨迹, 如图 8 所示。

从图中可以看出, 与理论分析一致, 除了 S_{a2} 单独开路和 S_{a1} 和 S_{a2} 同时开路的情况, 其他故障状态下的相空间重构轨迹明显不同: 逆变器无故障状态下的电流重构轨迹是一个椭圆, 故障发生后椭圆出现不同的缺失情况, 缺失部分的大小、形状和方向都各不相同。因此, 通过将有故障与无故障时的重构电流轨迹进行比较, 可以识别出故障类型。

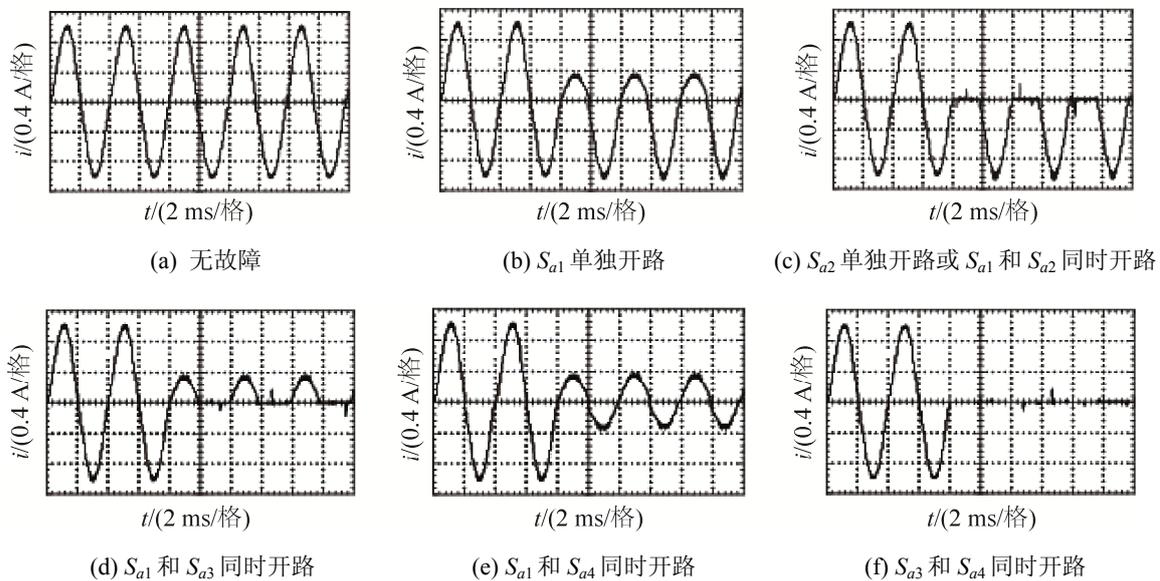


图 6 正常与各故障状态下一相电流实验波形

Fig. 6 Experimental results of phase current under normal case and different faults case

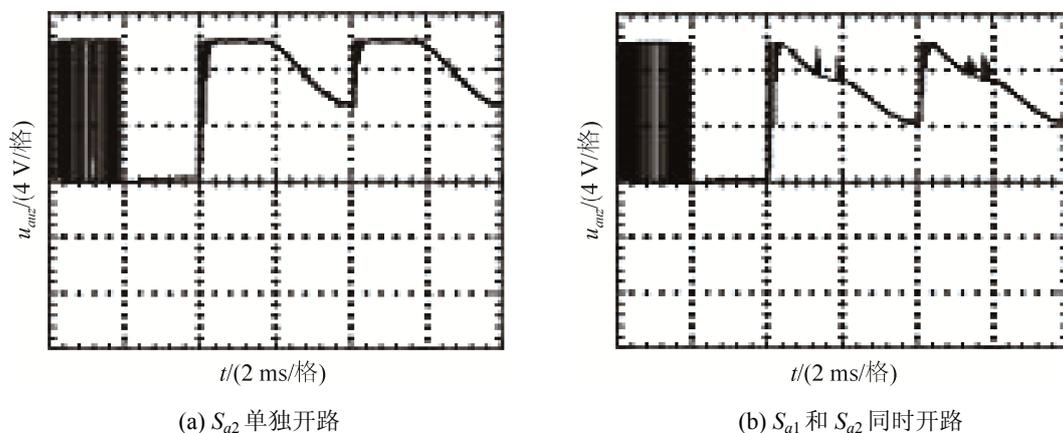


图 7 上桥臂电压实验波形

Fig. 7 Experimental results of upper-leg voltages

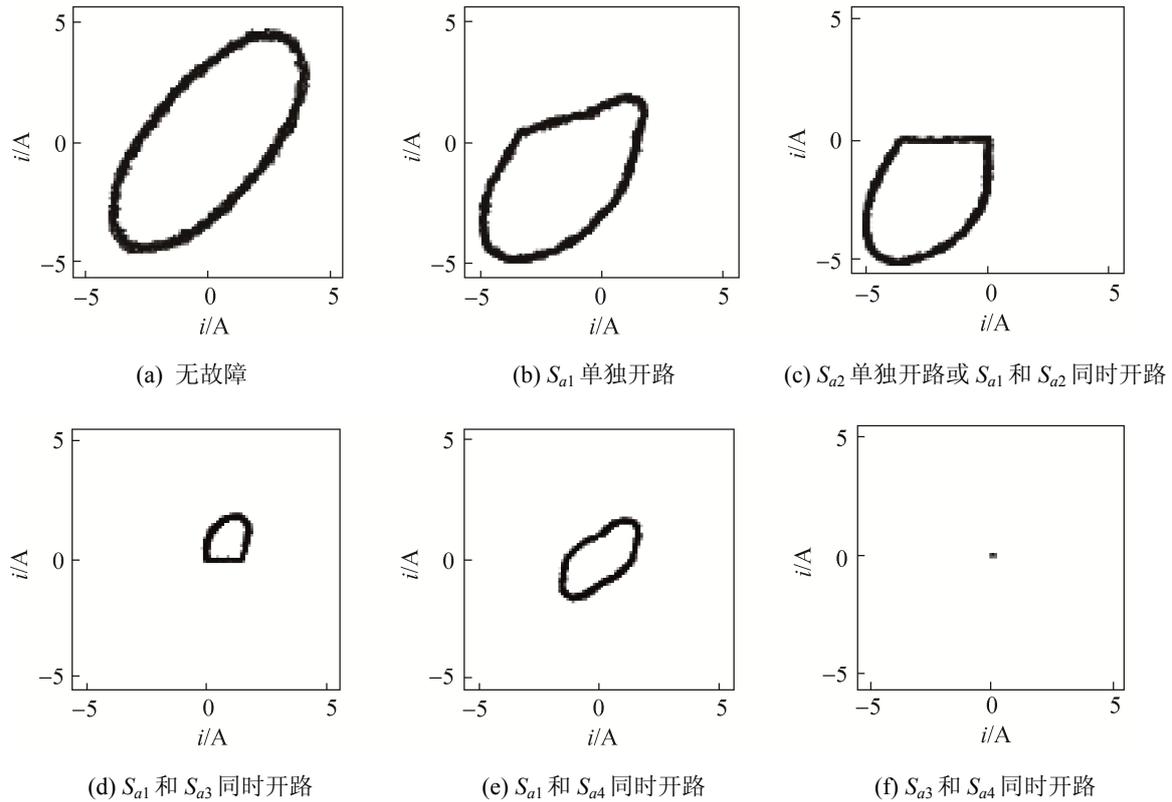


图 8 相电流的相空间重构轨迹

Fig. 8 Reconstructive phase currents using reconstructive phase space method

为便于分析, 本文将重构电流轨迹图形转换为像素为 250×250 的二值图像, 分别计算出各故障状态下图像的上下边界与无故障时的图像边界的偏差向量, 求出其均值和标准差 mean_U , mean_D , std_U , std_D , 如表 3 所示。

表 3 各故障状态下的特征值数据

Tab. 3 Fault signature value under different faults

故障状态	特征值数据			
	mean_U	mean_D	std_U	std_D
无故障	0	0	0	0
S_{a1} 单独开路	21.65	34.86	22.13	53.21
S_{a2} 单独开路或 S_{a1} 和 S_{a2} 同时开路	25.88	52.97	25.45	67.69
S_{a1} 和 S_{a3} 同时开路	48.76	106.12	43.66	79.01
S_{a1} 和 S_{a4} 同时开路	46.84	86.76	42.93	76.22
S_{a2} 和 S_{a3} 同时开路	50.07	119.65	43.37	81.83

从表 3 可以看出, 在各故障状态下, 至少有一个特征值有非常明显的区别, 且上下波动的幅值较大。当改变电路的直流输入电压和负载大小时, 这

些特征值的大小会发生变化, 但分布情况是相同的, 因此根据特征值的分布情况可以确定出相应的故障类型。另外根据电路的对称性, S_{a3} 单独开路, S_{a3} 和 S_{a4} 同时开路以及 S_{a2} 和 S_{a4} 同时开路的情况分别与 S_{a2} 、 S_{a1} 单独开路, S_{a1} 和 S_{a2} 同时开路以及 S_{a1} 和 S_{a3} 同时开路时上下边界的特征值正好相反, 因此利用 mean_U , mean_D , std_U , std_D , 这 4 个特征量就足以识别出相电流不同的故障模式。

然而, 仅通过相电流得到的特征信息不足以区分所有的故障, 如 S_{a2} 单独开路与 S_{a1} 和 S_{a2} 同时开路时相电流的波形相同, 因此利用小波包分析对新的特征信号桥臂电压进行进一步处理。

3.2 电压信号的小波包分析

本文采用 Daubechies 小波作为小波基, 选取“db16”小波函数对采样信号进行 3 层小波包分解与重构, 将信号分为 8 个节点, 其重构系数的能量直方图如图 9 所示。

从图中可以看出, 第 3 层第 1 个节点的能量均为 1, 即重构后的第 3 层第 1 个节点包含了原信号的所有信息, 因此对第 3 层第 1 个节点系数 (S_{31}) 进行小波包功率谱分析, 并与原始信号直接的功率谱分析进行对比, 结果如图 10 所示。

通过观察和对比可以发现, 原始信号的功率谱虽有不同但却不是很明显, 而第 3 层第 1 个节点系数的功率谱中存在明显特征频率, 不同故障下特征频率对应着不同的功率谱值。 S_{a2} 单独开路与 S_{a1} 和 S_{a2} 同时开路时的特征频谱值见表 4。

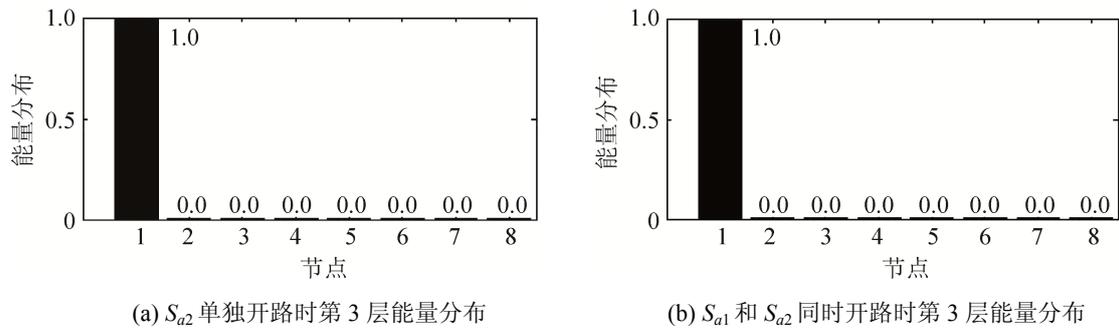


图 9 重构系数的能量直方图

Fig. 9 Energy histogram of reconstructive coefficient

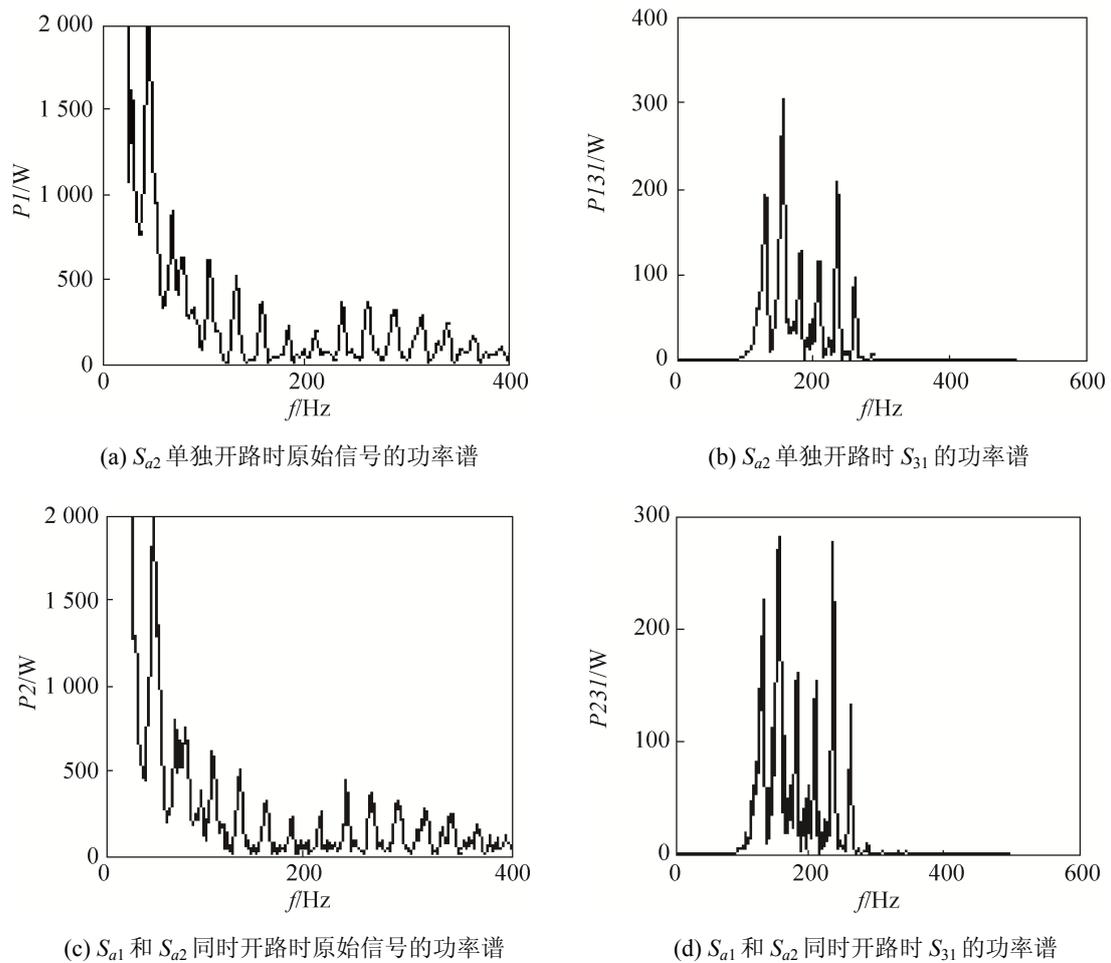


图 10 原始信号与重构信号的功率谱图

Fig. 10 Power spectrum of original and reconstructive signals

表 4 S_{a2} 单独开路与 S_{a1} 和 S_{a2} 同时开路时的特征频谱数据
Tab. 4 Signature spectrum values when only S_{a2} is faulty and when both S_{a1} and S_{a2} are faulty

故障信息	(特征频率/Hz, 功率谱/W)
S_{a2} 单独开路	(132.5, 190.72)(157.5, 305.64)(237.5, 205.76)
S_{a1} 和 S_{a2} 同时开路	(132.5, 230.27)(157.5, 281.83)(237.5, 278.32)

由以上结果可知, 利用小波包能量谱分析可以确定出特征频率及其对应的功率谱数据, 用来定位逆变器的故障器件。同样, 根据电路的对称性, 通过对下桥臂电压 u_{adz} 进行小波包分析, 可以识别出 S_{a3} 单独开路与 S_{a3} 和 S_{a4} 同时开路的情况, 从而实现所有典型故障的识别。

4 结论

本文以中点箝位型三电平逆变器为研究对象, 分析了 IGBT 开路故障类型, 并以 A 相为例, 针对无故障和典型故障进行仿真分析。利用相空间重构技术得到相电流不同形状、大小和方向的重构轨迹, 并转换为二值图像进行处理, 求出上下边界的特征值数据, 用于识别相电流不同的故障类型; 并利用小波包分解与重构对桥臂电压进行辅助分析, 确定出能量集中的节点, 通过对比该节点系数功率谱中的特征频率及谱值, 最终识别出三电平逆变器的所有典型故障, 为之后的神经网络或支持向量机等算法奠定了基础。

参考文献:

- [1] Karimi S, Gaillard A, Poure P, et al. FPGA-based real-time power converter failure diagnosis for wind energy conversion systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S1557-9948), 2008, 55(12): 4299-4308.
- [2] 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, 2008, 28(21): 26-32.)
- [3] Ceballos S, Pou J, Robles E, et al. Three-leg fault-tolerant neutral-point-clamped converter [C]// IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vigo, Spain, USA: IEEE, 2007: 3180-3185.
- [4] Tae-Jin Kim, Woo-Cheol Lee, Dong-Seok Hyun. Detection method for open-circuit fault in neutral-point-clamped inverter systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S1557-9948), 2009, 56(7): 2754-2763.
- [5] Ui-Min Choi, Hae-Gwang Jeong, Kyo-Beum Lee, et al. Method for detecting an open-switch fault in a grid-connected NPC inverter system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics (S1557-9948), 2012, 27(6): 2726-2739.
- [6] Mohsen Bandar Abadi, Mendes A M S, Cruz S M A. Three-level NPC inverter fault diagnosis by the average current Park's vector approach [C]// IEEE International Conference on Electrical Machines (ICEM). Marseille, France, USA: IEEE, 2012: 1893-1898.
- [7] June-Seok Lee, Kyo-Beum Lee, Blaabjerg F. Open-switch fault detection method of an NPC converter for wind turbine systems [C]// IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Denver, CO, USA, USA, IEEE, 2013: 1696-1701.
- [8] 陈丹江, 叶银忠, 华容. 基于波形实时分析的动车组三电平逆变器故障诊断技术 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 106-113. (Chen Danjiang, Ye Yinzong, Hua Rong. Fault Diagnosis for Three-Level Inverter of CRH Based on Real-Time Waveform Analysis [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 106-113.)
- [9] 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.)
- [10] Bangun J, Povinelli R, Herdash N, et al. Diagnostics of eccentricities and bar/end-ring connector breakages in polyphase induction motors through a combination of time-series data mining and time stepping coupled-state-space techniques [J]. IEEE Transactions on Industry Applications (S1939-9367), 2003, 39(4): 1005-1013.
- [11] 孙丹, 孟濬, 管宇凡. 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(6): 49-53. (Sun Dan, Meng Jun, Guan Yufan. Inverter Faults Diagnosis in PMSM DTC Drive Using Reconstructive Phase Space and Fuzzy Clustering [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(6): 49-53.)

(下转第 1463 页)

<http://www.china-simulation.com>

• 1456 •