

基于小波神经网络的逆变器功率开关故障诊断

崔博文

(集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 针对逆变器经常出现的功率开关器件开路故障问题, 提出了一种基于小波分析和神经网络的逆变电路功率器件开路故障检测和诊断方法。利用小波递归方法对逆变器输出电流信号进行分析处理, 实现了逆变器故障检测。通过小波多尺度分析, 获得了信号各层细节系数及其能量, 对能量进行归一化处理, 得到不同故障状态的故障特征, 将其作为 BP 神经网络输入, 通过观察网络输出实现了功率器件开路故障分离。仿真结果表明, 该方法可以实现功率开关器件故障检测与分离。

[关键词] 小波; 神经网络; 逆变器; 故障诊断

[中图分类号] TM 464

Open – circuit Faults Diagnosis of Power Device in Inverter Based on Wavelet and Neural Network

CUI Bowen

(School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Aimed at the open – circuit faults of power device occurred in the inverter, the paper presents a technique of fault detection and diagnosis for open – circuit fault of power device in inverter – fed motor drives based on wavelet neural network. The output current of the inverter is processed by using the recursive wavelet transform, the coefficient value of the recursive wavelet transform is obtained and the value can be used for fault detection. The layer detail coefficient and its energy are obtained by wavelet transform and the fault features are got by normalized the energy. BP neural network is used to isolate switch faults by input the fault features to the input layer of the network. The simulation result shows that the method can detect and isolate open – circuit faults of power device effectively.

Keywords: wavelet; neural network; inverter; fault diagnosis

0 引言

工业应用中的变频调速系统通常由电力电子变换器、控制器及电动机等组成, 这类变频调速系统对于发生在整流、逆变及控制器环节中的任何故障都很敏感, 任何一个环节一旦发生故障都会导致变频调速系统性能变坏, 甚至系统崩溃^[1]。一般地讲, 故障有电力电子电路故障、控制器故障、传感器故障及冷却系统故障, 电力电子电路故障指电力电子变换器故障, 一般分为参数性故障和结构性故障, 参数性故障指由于电路元件参数(如电感、电容等)偏离正常值一定范围而导致的参数值变化,

[收稿日期] 2016-12-01

[修回日期] 2016-12-27

[基金项目] 福建省自然科学基金资助项目(2015J01640)

[作者简介] 崔博文(1966—), 男, 教授, 博士, 从事电力系统状态监控与参数估计研究。

结构性故障指由于功率开关器件出现短路、开路而导致电力电子电路拓扑发生变化的故障^[2]。研究表明^[3]，工业驱动系统中的电压源逆变器 37.9% 的故障发生在功率开关器件电路部分，而 Schwab 研究发现^[4]，逆变器中功率开关器件故障率远高于其他器件。最新研究也表明^[5]，变频调速系统中逆变电路功率开关元件故障占整个驱动系统故障的 82.5%，是驱动系统中最易发生故障的薄弱环节。

功率开关器件开路故障会造成故障桥臂无法向电动机正常供电，使得与该桥臂相连接的电机绕组与电源断开，形成缺相故障，如果不采取适当的措施，电动机缺相运行会造成电机烧毁，引发重大事故^[6]。

为了实现高可靠性变频驱动，逆变器硬件冗余容错驱动就成为变频驱动技术的重要发展方向之一。逆变器功率器件故障后容错驱动的前提条件是必须迅速准确地检测到故障并确定故障位置，只有检测到故障并实现故障分离后，才可采取相应的故障恢复策略，实现故障后系统重构。可见，容错驱动技术的核心问题和前提条件是逆变器的故障检测与诊断，因此研究逆变电路的故障诊断十分必要。

Wallace^[7]和 Spee^[8]最早采用仿真分析方法实现逆变器故障检测与诊断，该方法首先通过逆变器故障后的系统仿真，获取故障电流、转矩波形，然后通过与系统无故障状态下的电流、转矩波形对比，从而实现逆变器故障诊断。Smith 等^[9]针对逆变器中单个晶体管触发脉冲间歇性丢失故障，提出一种基于定子电流向量时域响应分析的故障诊断方法。Peuget^[10]则提出了一种基于知识的故障诊断方法，利用逆变器功率开关元件故障后的电流轨迹分析，实现故障诊断。但是，在外界干扰较强时，外界干扰会严重影响电流轨迹，不利于故障分离。

在工业生产实践中，功率开关器件经常工作在高频开关状态，开关损耗较大，会造成开关器件严重发热，功率开关器件发生故障的概率大，尤以功率开关器件的开路和短路最为常见^[11]。在实际应用中，由于每相桥臂都有熔断器进行短路保护，功率开关器件短路时，熔断器断开，因此功率开关器件短路相当于器件开路故障。本文以三相逆变器驱动的电动机变频调速系统为例，研究了逆变电路功率开关器件开路故障问题，通过对逆变输出的电流信号进行小波分析，获取故障特征，利用神经网络实现了故障分离。

1 功率开关器件开路故障分析

图 1 为逆变器驱动的电动机变频调速系统，本文研究的功率开关器件开路的故障有以下几种情况：1) 任一功率开关器件开路故障；2) 同一桥臂两功率开关器件同时开路故障。

任一功率开关器件开路故障指无论功率开关器件的驱动信号如何，逆变器中 VT₁ ~ VT₆ 6 个功率开关器件其中之一始终保持断开状态，这时只有同桥臂上的另一个功率开关器件保持正常工作状态，而与故障管并联的续流二极管导通与否由该相电流的极性决定。以 VT₁、VT₄ 桥臂为例，当功率开关器件 VT₁ 发生开路故障时，如果 $i_{an} > 0$ ，D₁ 截止，为维持 i_{an} 方向不变，D₄ 立即导通续流，且开通到 i_{an} 为零，直到 i_{an} 的值变为负值时，VT₄ 被驱动开通，VT₄ 和 D₄ 轮流导通。如果 VT₁ 发生故障时， $i_{an} < 0$ ，VT₁ 不工作，不影响电路正常运行，此时 D₁ 续流导通。

同一桥臂两个功率开关器件同时开路时，该桥臂只有与之并联的二极管续流导通，哪一个二极管导通，同样由流过相电流的极性决定。同样，以 VT₁、VT₄ 桥臂为例，如果某时刻 VT₁、VT₄ 同时发生开路，如果此时该相电流 $i_{an} > 0$ ，则 D₄ 续流导通，反之 D₂ 续流导通。

图 2a 为功率开关器件 VT₁ 开路故障前后时的三相电流仿真波形。从仿真波形可以看到，VT₁ 故

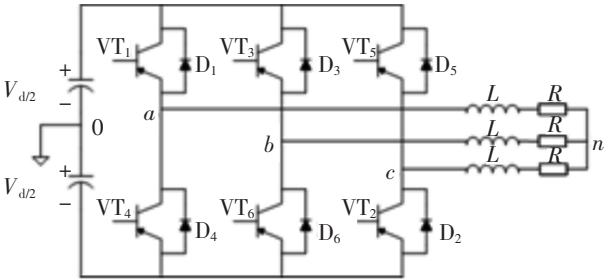


图 1 逆变器驱动的电动机系统

Fig.1 Schematics of inverter-fed motor drive system

图 2a 为功率开关器件 VT₁ 开路故障前后时的三相电流仿真波形。从仿真波形可以看到，VT₁ 故

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

障后，该相电流 i_{an} 幅值明显降低，并产生一个很大的负的直流分量，其他两相电流则明显增大，分别产生一个与之对应的正的直流分量。图 2b 为 VT_1 、 VT_4 同时开路故障前后仿真波形，故障后该相电流迅速减小，而其他两相则明显增大。

逆变器中有 6 个功率开关器件，任一功率开关器件开路故障都会引起逆变器输出电压、电流信号发生突变。逆变器任一功率开关器件故障后，逆变器输出电压信号便不再对称，Frotesu 提出的对称分量方法为研究电动机驱动系统不对称状态下的稳态性能带来极大方便。本文采用小波对正序瞬值对称分量进行分析。

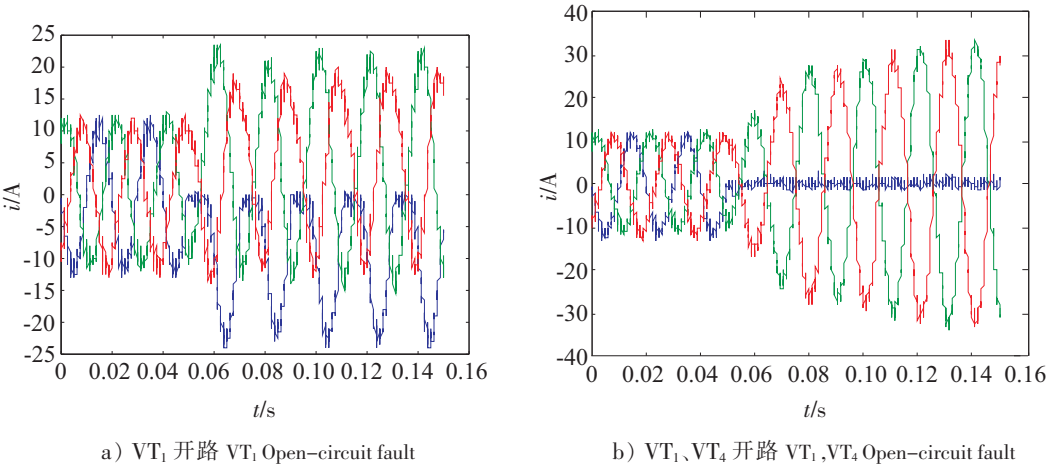


图 2 功率开关器件开路故障的三相电流波形

Fig.2 Three phase current waveform when open-circuit fault of power device occurred in the inverter

2 小波分析理论

小波分析是一种时域-频域分析方法，它可在时域和频域同时具有良好的局部化性质，可以根据信号的不同频率成份，在时域或频域自动调节取样的疏密，因此可以聚焦到信号的任何细节。

对于任何一个函数 $f(x) \in L^2(R)$ ，其小波变换可以表示为

$$f(x) = \sum_{j,k=-\infty}^{\infty} c_{j,k} \psi_{j,k}(x), \tag{1}$$

对于每个 $f(x) \in L^2(R)$ ，固定 $N \in \mathbf{Z}$ ，设 f_j 是 f 在分辨率 2^{j-1} 下的近似，则 f_j 可进一步分解为 f 在分辨率 2^{j-1} 下的近似 $f_{j-1}(x)$ 以及位于分辨率 2^{j-1} 和 2^j 之间的细节 $g_{j-1}(x)$ 之和。设 φ 及 ψ 分别为尺度函数和小波函数，信号 f 的近似 f_j 可表示为

$$f_j(x) = f_{j-1}(x) + g_{j-1}(x); \tag{2}$$

$$f_{j-1}(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{j,k} \varphi_{j,k}(x); \tag{3}$$

$$g_{j-1}(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{j,k} \psi_{j,k}(x). \tag{4}$$

其中： $c_{j,k}$ 、 $d_{j,k}$ 分别为分辨率 2^{j-1} 下的粗糙系数和细节系数， $f_{j-1}(x)$ 称为 $f(x)$ 的逼近信号，相当于一组低通滤波器对 $f(x)$ 的滤波的结果， $g_{j-1}(x)$ 称为细节信号，相当于一组高通滤波器对 $f(x)$ 滤波的结果。研究 $f_j(x)$ 与 $f_{j-1}(x)$ 、 $g_{j-1}(x)$ 之间的关系就可以转化为找出系数 $c_{j,k}$ 与 $c_{j-1,k}$ 、 $d_{j-1,k}$ 的关系。其 Mallat 塔式分解算法如下

$$\begin{cases} c_{j-1,n} = \sum_{k \in \mathbf{Z}} a_{l-2n} c_{j,k}, \\ d_{j-1,n} = \sum_{k \in \mathbf{Z}} b_{l-2n} d_{j,k} \end{cases} \tag{5}$$

a_k 、 b_k 分别称为低通与高通滤波系数^[12~13]。小波分解的实质就是把原始信号不同频段的信息抽取出来，并将其显示在时间轴上，这样既可以反映信号的时域特征也可以反映信号的频域特征。

3 基于小波分析的故障检测

为了实现变频驱动系统高可靠运行，必须对功率开关器件的开路故障实时在线检测，一般的小波变换无法达到这个要求。因此，人们提出了许多关于小波变换的快速算法，其中的改进递归算法^[14~16]在实时性处理方面引起了人们的关注。本文利用文献 [15~16] 提出的一种指数衰减快速递归复小波，该类小波系数和尺度确定，能更准确地反映对应信号频率的幅值。由于是单向递归小波，小波系数的计算依递推关系实现，其计算量随数据量增加不大，有更快的计算速度，能满足故障实时检测要求。

定义指数衰减复值小波函数为^[15]

$$\Psi(t) = (\sigma^3 t^3 / 3 - \sigma^4 t^4 / 5 + \sigma^5 t^5 / 15) e^{\sigma t} e^{j\omega_0 t} u(t) \tag{6}$$

其中 $\sigma = 2\pi/3$ ， $\omega_0 = 2\pi$ ，此时小波母函数 $\Psi(t)$ 满足允许性条件 $\Psi(0) = 0$ 。

其离散小波变换定义为

$$W_f(s, kT) = \sqrt{f} T \sum_{n=1}^{\infty} s(nT) \Psi^* f((nT - kT))。 \tag{7}$$

式中：频率 $f=1/a$ ， a 为母小波的尺度因子； T 为采样周期； $s(nT)$ 为采样信号； Ψ^* 是 Ψ 的共轭复数。对式 (7) 施以 Z 变换，并利用 Z 变换的位移性质，得到快速递推算公式如下

$$W(kT, f) = \sqrt{f} \{ T\delta_1 s((k-1)T, f) + \delta_2 s((k-2)T, s) + \delta_3 s((k-3)T, s) + \delta_4 s((k-4)T, s) + \delta_5 s((k-5)T, s) - \lambda_1 W((k-1)T, f) - \lambda_2 W((k-2)T, f) - \lambda_3 W((k-3)T, f) - \lambda_4 W((k-4)T, f) - \lambda_5 W((k-5)T, f) - \lambda_6 W((k-6)T, f) \}。 \tag{8}$$

式中 $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6$ 等具体表达式及推导过程详见文献 [15]。

基于递归小波变换，对逆变器三相电流瞬时值正序对称分量进行分析，分别获取了功率开关器件开路故障的小波变换结果，见图 3a，图 3b。

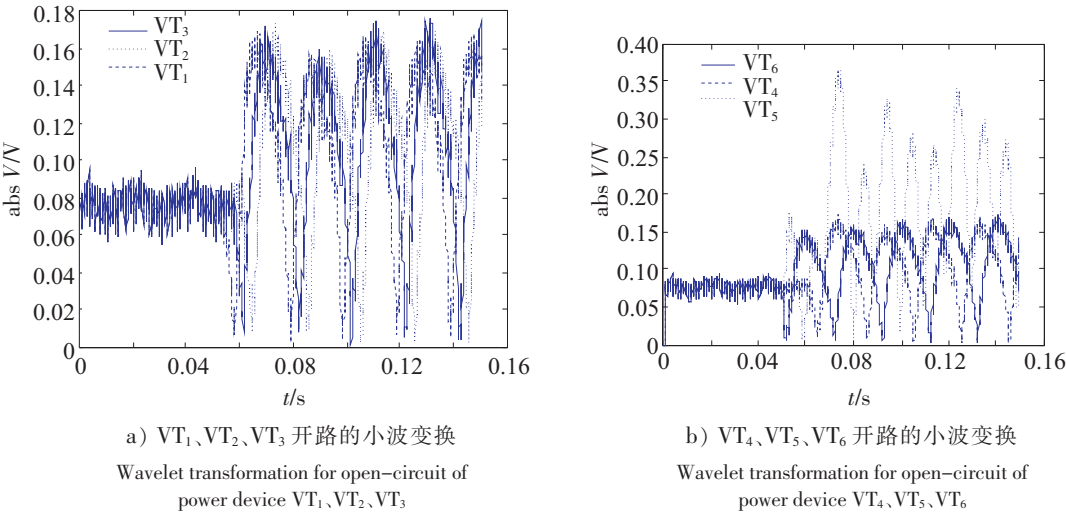


图 3 功率开关器件开路故障的小波变换

Fig.3 Wavelet transformation results for open-circuit of Power device

由图 3 可见，功率开关器件无故障时，小波递归变换结果很小；当功率开关器件发生开路故障时，其输出信号递归变换幅值明显增大，出现明显波动变化现象。因此，利用逆变器输出信号的递归变换结果可以判定逆变器功率开关器件是否有故障发生。

为了便于实现故障检测，可确定如下故障决策逻辑

$$\begin{cases} \text{abs}(W(kt,f)) \geq T_D, & \text{系统发生故障;} \\ \text{abs}(W(kt,f)) < T_D, & \text{系统无故障。} \end{cases} \quad (9)$$

式中 T_D 为阈值，可通过仿真及试验确定，例如在故障仿真或故障实验中，设置各种故障模式，利用仿真结果或实验数据可直接获取各种故障状态下的决策函数值，据此可确定阈值 T_D 。

4 逆变电路的故障特征提取

由于逆变器输出信号直接取决于逆变器开关器件的工作状态，开关器件发生故障后，其正序瞬时值对称分量不同频率成份的幅频特性和相频特性都会发生改变，与正常系统的输出信号相比，相同频段内的信号能量会有较大差别。运用小波分析对正序瞬时值对称分量的实部信号作多分辨分析（MRA），将信号的不同分量无冗余、无泄露、正交地分解到独立的频段上，这些子带信号的能量包含着丰富的故障信息，因此可以把小波能量作为故障特征。

首先对原始信号进行 12 层小波分解，然后对小波包分解系数重构，提取各频带范围的信号，分别表示为 $D^1、D^2、\cdots、D^{11}、D^{12}$ ，总信号可以表示为

$$A^0 = A^1 + D^1 = A^5 + D^1 + D^2 + \cdots + D^{11} + D^{12}。 \quad (10)$$

式中： A^0 表示原始信号离散化序列； A^j 代表低频部分，为近似信号； D^j 代表高频部分，为细节信号。定义细节信号能量为

$$ED_j = \sqrt{\sum_{i=1}^N D^2}， \quad (11)$$

细节信号总能量为 $ED = \sum ED_j$ 。近似信号能量为

$$EA_j = \sqrt{\sum_{i=1}^N A^2}， \quad (12)$$

信号总能量为 $E = ED + EA_j$ 。考虑神经网络输入需要，对第 j 层的近似信号和细节信号能量进行归一化处理，并将其作为故障特征，即

$$\Theta = [ED_1/E \quad ED_2/E \quad \cdots \quad ED_{11}/E \quad EA_{12}/E] \quad (13)$$

5 基于小波神经网络的故障分离

神经网络结构有两种，一是先利用小波变换对数据进行预处理，然后将处理后的信号输入神经网络；另一种是直接把小波函数作为神经网络的激活函数或权值函数。本文采用第一种形式的小波神经网络结构，利用小波分析获取的故障能量特征作为神经网络输入，通过神经网络输出即可确定故障位置。

本文以图 1 所示的驱动系统为例，研究任一功率器件开路，或同一桥臂两功率器件同时开路时故障特性。具体参数为：角频率 $w = 2p \times 42.5 \text{ rad/s}$ ，载波比 $R = 18$ ，调制系数 $M = 0.85$ ，输入直流电压 $U = 632 \text{ V}$ 。电机参数为： $R_s = 2.15 \text{ }\Omega$ ， $R_r = 2.33 \text{ }\Omega$ ， $L_m = 0.2025 \text{ H}$ ， $L_r = 0.025 \text{ H}$ ， $J = 0.008 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，负载转矩 $T_L = 20 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。利用文献 [17] 方法，建立 SIMULINK 仿真模型，获取逆变器输出电流信号。对获取的电流信号进行小波分析，获取的能量作为故障特征，如表 1 表示。

逆变器有 6 个功率器件，本文研究的故障模式有 9 种，分别表示为 $F_1、F_2、F_3、F_4、F_5、F_6、F_7、F_8、F_9$ 。根据研究的故障模式，采用 BP 神经网络结构进行故障分离，考虑到无故障模式，表示为 F_0 ，因此网络输出端应该有 10 个结点，分别对应 1 种无故障状态和 9 种开路故障状态。本文选择的网络输入端有 12 个结点，每个结点输入值分别为对应归一化能量值。网络隐层结点数取为 20，期望的网络输出见表 2，实际的网络输出见表 3。

表 1 故障特征
Tab.1 Fault Feature

故障类型 Fault type	归一化能量 Normalized energy											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
F_0	1.7650e-009	4.6681e-006	1.3511e-005	5.8209e-005	1.1361e-004	1.8512e-004	5.7058e-004	6.6198e-004	1.5410e-003	2.4990e-001	7.5327e-002	3.7381e-001
F_1	1.1009e-004	9.5853e-005	3.0362e-004	3.3448e-004	1.5030e-002	3.0861e-003	1.5335e-001	1.8727e-001	1.3020e-001	1.3070e-001	8.7877e-001	3.2353e-001
F_2	2.2440e-001	1.8965e-004	7.2223e-004	6.5799e-004	2.9459e-002	3.7643e-002	4.0027e-001	3.8147e-001	2.7415e-001	2.4597e-001	1.1795e-001	6.7183e-001
F_3	4.9420e-005	4.1958e-005	1.5321e-004	1.3212e-004	6.5045e-003	5.3958e-003	7.3338e-002	4.3357e-002	5.6628e-002	2.4786e-001	6.9110e-001	6.5851e-001
F_4	9.0589e-005	1.7444e-005	1.2227e-004	3.8994e-003	2.0371e-003	1.1110e-002	1.1012e-001	3.8390e-002	5.4894e-002	2.4689e-002	8.5780e-001	9.4794e-003
F_5	0.0257e-004	8.2241e-005	2.4955e-004	3.7428e-003	2.5367e-003	2.2506e-002	1.8762e-001	7.5431e-002	2.2893e-002	8.3420e-001	1.9449e-001	4.2366e-001
F_6	6.5196e-005	3.7481e-005	3.6899e-005	1.8774e-003	3.0008e-003	1.1873e-002	7.5922e-002	1.9633e-002	3.0084e-002	2.8102e-002	3.9242e-001	8.5753e-001
F_7	2.2713e-004	8.1468e-004	6.8346e-004	6.0467e-003	1.0109e-002	1.8397e-002	2.5686e-001	9.6722e-002	5.8974e-002	4.2255e-002	2.1976e-002	9.0986e-001
F_8	3.6387e-004	2.9942e-004	8.7798e-004	1.4074e-002	1.1817e-002	7.0713e-002	6.7039e-001	2.4256e-001	1.8808e-001	5.1393e-001	8.5925e-001	2.0990e-001
F_9	1.9160e-005	4.2279e-005	4.5348e-005	5.2469e-004	2.1154e-004	8.5317e-003	1.0343e-002	1.2929e-002	8.0589e-002	5.4496e-001	4.5639e-001	6.8625e-001

表 2 网络期望输出
Tab.2 Desired network output

故障 Fault	网络输出 Networ output									
	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9	y_{10}
F_0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
F_2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
F_3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
F_4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
F_5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
F_6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
F_7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
F_8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
F_9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

表 3 网络实际输出
Tab.3 Real network output

故障 Fault	网络输出 Networ output									
	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9	y_{10}
F_0	0.97613	0.00051	0.00239	0.00668	0.00378	0.00596	0.00611	-0.00785	0.00231	-0.00564
F_1	-0.00100	0.92044	0.00361	0.01303	0.00252	-0.00376	0.00548	-0.00525	0.00469	-0.00736
F_2	0.00018	-0.00042	1.01290	0.00299	0.00454	-0.00769	0.00693	-0.00850	0.00301	-0.00222
F_3	0.00472	0.00532	-0.00207	0.92595	0.00279	-0.00742	0.10147	-0.00328	0.00295	-0.00237
F_4	0.00039	-0.00036	0.00107	0.00195	1.04430	0.00560	0.00816	-0.00799	0.00214	-0.00330
F_5	-0.00047	-0.00078	0.00358	0.00477	0.00269	0.92343	0.00608	-0.00469	0.00254	-0.00621
F_6	-0.00531	-0.00540	0.00309	0.01576	0.00473	-0.00441	1.03890	-0.00998	0.00191	-0.00657
F_7	0.00080	0.00229	0.00291	0.00399	0.00549	-0.00939	0.00821	0.90022	0.00321	-0.00621
F_8	-0.00100	-0.00312	0.00185	0.00551	0.00319	-0.00531	0.00562	-0.00486	1.01070	-0.00295
F_9	-0.00012	-0.00251	0.00427	0.13589	0.00294	-0.00321	0.00509	-0.00908	0.00011	0.98070

表 2、表 3 中 $y_i(i = 1,2,\cdots10)$ 为网络输出节点输出。从表 3 可以看出，当无故障（即故障 1）发生时，网络输出的第一个位置出现接近于 1 的数，当功率开关 1 发生开路故障（即故障 2），网络

输出的第二个位置出现接近于 1 因此, 针对所研究的故障类型, 对应每个故障的网络总有一个接近于 1 的最大输出。当发生故障时, 利用网络输出值就可以确定故障的发生位置, 实现故障分离。

6 结论

本文利用小波分析方法研究了逆变电路功率器件故障检测与诊断问题。首先利用小波递归算法对逆变器输出电流信号进行处理, 实现了逆变电路的故障检测。其次利用小波分析对逆变器输出电流信号进行多尺度分析, 获得了各层的细节系数能量, 能量归一化处理后得到了对应不同故障类型的故障特征, 利用神经网络实现了故障分离。仿真实验结果表明, 利用小波神经网络可以实现逆变电路的故障分离。

[参 考 文 献]

- [1] KASTHA D, BOSE B K. Investigation of fault modes of voltage – fed inverter system for induction motor drive [J]. IEEE Trans on Industry Application, 1994, 30(4): 1028-1038.
- [2] 张志学, 马皓, 毛兴云. 基于混杂系统模型和事件辨识的电力电子电路故障诊断 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 49-52.
- [3] THORSEN O V, DALVA M. A survey of the reliability with an anlysis of faults on the variable frequency drives in industry [C] //Conf Rec EPE. Sevilla, Spain:[s. n.], 1995: 33-38.
- [4] SCHWAB H, KLONNE A, RECK S, et al. Reliability evaluation of a permanent magnet synchronous motor drive for an automotive application [C] //Conf Rec EPE. Toulouse, France:[s. n.], 2003, 1: 56-60.
- [5] WIKSTRON P W, TERENS L A, KOBİ H. Reliability, availability, and maintainability of high-power variable speed drive systems [J]. IEEE Trans Ind Application, 2000, 36(1): 231-241.
- [6] 崔建明. 三相异步电动机单相运行特性分析 [J]. 太原理工大学学报, 1999, 30(6): 623-625.
- [7] WALLACE A K, SPEE R. The simulation of brushless DC drive failures [C] //PESC Record-IEEE Power Electronics Specialists Conference, Kyoto Japan:[s. n.], 1988: 199-206.
- [8] SPEE R, WALLACE A K. Remedial strategies for brushless DC drive failures [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1990, 26(2): 259-266.
- [9] SMITH K S, RAN L, PENMAN J. Real-time detection of intermittent misfiring in a voltage-fed PWM inverter induction-motor drive [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1997, 44(4): 468-476.
- [10] 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.
- [11] 肖岚, 李睿. 逆变器并联系统功率开关器件开路故障诊断研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 99-104.
- [12] 成礼智, 郭汉伟. 小波与离散变换理论与实践 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [13] 张兢, 路彦和. 基于小波包频带能量检测技术的故障诊断 [J]. 微计算机信息, 2006, 22(4): 202 -204.
- [14] CHAARI O, MEUNIER M, BROUAYE F. Wavelets: a new tools for the resonant ground power distributions systems relaying [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(3): 1301-1308.
- [15] 张传利, 黄益庄, 马晓旭, 等. 改进递归小波变换在变压器保护中的应用研究 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(17): 20-22.
- [16] 黄建军, 任震, 黄雯莹, 等. 电力系统突变信号检测的一种实时小波算法 [J]. 中国科学 (E 辑), 2000, 30(1): 79-84
- [17] CUI BOWEN. Simulation of inverter with switch open faults based on switching function [C] //Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics. Jinan:[s. n.], 2007: 2774-2778.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)