

文章编号:1005-0523(2016)06-0110-08

基于数学形态学广义分形维数逆变器故障诊断

宋平岗,章伟,林家通,游小辉,罗剑

(华东交通大学电气学院,江西 南昌 330013)

摘要:基于逆变器开路故障输出电流波形的差异,提出将形态学广义分形维数运用于逆变器故障检测中。将逆变器三相输出电流按a,b,c三相依次取六个不同参数下的形态学广义分形维数作为ELM神经网络的输入,以故障类型作为神经网络的输出。仿真结果显示该方法的故障区分率高达97.62%。基于三相输出电流的形态广义分形维数能够准确的识别出逆变器在各种故障状态下的电流信号,为逆变器开路故障诊断提供了一种简单准确的新方法。

关键词:逆变器;故障诊断;数学形态学;广义分形维数

中图分类号:TM464

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.06.016

电压源型逆变器凭借其优异的性能在工业生产中得到广泛的应用^[1]。然而工业生产过程中,受工作环境条件的限制使得逆变器频繁承受大电流冲击、高频开断、以及温升超限等现象,这些应力容易造成逆变器处于故障状态,如不及时发现可能造成整个电气系统瘫痪。变频调速系统中,有38%的故障是由于功率管开关器件的损坏导致^[2]。逆变器功率管故障有开路故障及短路故障两种。功率管短路故障由于存在时间极短不易诊断,因此多采用基于硬件电路的设计^[3];IGBT开路故障的发生伴随着电机的持续运行,因而不易被发觉,继而容易引发二次故障^[4],最终导致整个系统的瘫痪,存在极大的安全隐患。

目前,对于逆变器IGBT开路故障的研究主要在于提取逆变器输出电压或电流中隐含的故障信息,文献[5]提出通过比较直流侧故障前后电流的频谱来进行单管开路诊断,但难以实现双管故障的精确定位。不同种类不同位置的IGBT故障,其交流侧输出电压和电流所携带的故障信息有所差别。因此,IGBT的故障诊断方法可以分为电压诊断法和电流诊断法。电流诊断法中直接对输出电流进行取样分析,利用傅里叶变换、小波分解、模糊识别等技术手段来进行故障管的诊断与定位^[6-10]。文献[11]中提出利用不同故障下电流的矢量轨迹呈现出不同的半圆来进行故障的诊断与定位,该方法易于实现,但是空载和轻载时易受到测量误差的影响。文献[12]中提出简单直流法,设定阈值并计算三相电流均值并与之比较来实现故障诊断。电压诊断法可以直接对输出电压进行取样分析,但更多的是利用故障前后不同类型的电压(如中性点电压、相电压)进行比较分析进而识别诊断。文献[13]中提出利用正常逆变器与实际逆变器输出电压信号的差异结合最小二乘估计得出谱残差,利用多层感知神经网络对逆变器故障进行分离,从而实现逆变器的故障诊断。

文章首先将数学形态学理论运用于分形维数的计算中,得出数学形态学广义分形维数的计算公式,利用所得公式,分别计算逆变器输出三相电流波形每一相的形态学广义分形维数值,并按照a,b,c三相的顺序排列好,并以此作为特征向量输入ELM神经网络中进行区分,以期实现逆变器的故障诊断。

收稿日期:2016-05-11

基金项目:国家自然科学基金(51367008)

作者简介:宋平岗(1965—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为电力电子与新能源。

1 数学形态学、分形维数简介

形态滤波理论是基于信号的几何特性以不同的结构元素对对象进行形态变换从而达到信号处理的目的^[14-18]。膨胀和腐蚀是数学形态学中两种最基本的运算。两种基本运算的定义如下: $f(n)$ 与 $g(n)$ 是定义在离散域 $F=\{0,1,\dots,N-1\}$ 及 $G=\{0,1,\dots,M-1\}$ 的实函数($N>M$),其中: $f(n)$ 是待处理信号, $g(n)$ 为结构元素。记腐蚀运算符号为 $\ominus$,膨胀运算符号为 $\oplus$,则可定义:

腐蚀运算为

$$(f \ominus g)(n) = \min[f(n+m) - g(m)] \quad (1)$$

膨胀运算为

$$(f \oplus g)(n) = \max[f(n-m) + g(m)] \quad (2)$$

式中: $m \in 0, 1, \dots, M-1$ 。

分形维数是将事物的分形特征量化的度量参数,是描述事物分形特性的一种有效方式以数值的形式呈现是分形维数的基本特性,正是由于这个特性使得分形维数具备直观简单的优点。

利用分形维数的数值,我们可以对定量的分析事物的分形特性,也可以对不同的事物进行区分,这便是分形维数理论可用于故障诊断,识别不同故障的重要原因。

2 形态学广义分形维数估计

2.1 形态学单一分形维数估计

设输入信号为 $f(n)$,单位结构元素为 $g(n)$ 则尺度 ε 下的结构元素为

$$\varepsilon g = g \oplus g \oplus \dots \oplus g (\varepsilon \text{ 次}) \quad (3)$$

由式(3)计算出 ε 尺度下形态覆盖面积 $S_g(\varepsilon)$

$$S_g(\varepsilon) = \sum_{n=1}^N (f \oplus \varepsilon g(n) - f \ominus \varepsilon g(n)) \quad (4)$$

不同尺度下 $S_g(\varepsilon)$ 均满足

$$\log\left(\frac{S_g(\varepsilon)}{\varepsilon^2}\right) = D_M \log\left(\frac{1}{\varepsilon}\right) + c \quad (5)$$

其中 c 为常数。则通过式(5)可以求得形学单一分形维数

$$D_M = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log[S_g(\varepsilon)/\varepsilon^2]}{\log(\varepsilon)} \quad (6)$$

2.2 形态学广义分形维数估计

相比于单一分形维数而言,形态学单一分形维数是形态学广义分形维数的一个特例,广义分形维数更能从多个测度出发,能够更加全面的描述设备状态信号的分形特征。数学形态学广义分形维数的计算分5步进行:

1) 定义分布函数

$$u_i(\varepsilon) = \frac{f \oplus \varepsilon g(n) - f \ominus \varepsilon g(n)}{\sum_{n=1}^N (f \oplus \varepsilon g(n) - f \ominus \varepsilon g(n))} \quad (7)$$

其中: $f \oplus \varepsilon g(n)$ 和 $f \ominus \varepsilon g(n)$ 表示多种尺度下对信号 f 的膨胀和腐蚀;引入函数 $u_i(\varepsilon)$ 的目的是定义一个反应局部度量的分布函数;该函数中 $f \oplus \varepsilon g(n) - f \ominus \varepsilon g(n)$ 表示膨胀结果与腐蚀结果之差, $u_i(\varepsilon)$ 描述了这种差异的分布情况; $u_i(\varepsilon)$ 的高阶矩表现出的奇异性可以用来反应信号在尺度上的不均匀性。

2) 计算形态学广义信息熵 $K_q(\varepsilon)$ 。确定参数 q 后便确定广义信息熵为

$$K_q(\varepsilon) = \alpha \cdot \frac{\ln \sum_{n=1}^N [u_i(\varepsilon)]^q}{(1-q)} \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{\log[A_q(\varepsilon)/\varepsilon^2]}{\log(N(\varepsilon))} \quad (9)$$

广义分形维数作为 $K_q(\varepsilon)$ 和尺度之间满足下列关系式

$$K_q(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-D_q} (-\infty < q < +\infty) \quad (10)$$

3) 计算广义分形维数 D_q

$$D_q = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln K_q(\varepsilon)}{\ln(\varepsilon)} \quad (11)$$

实际计算过程中,对于广义分形维数 D_q 我们通常将 $K_q(\varepsilon)$ 和 $\ln(\varepsilon)$ 进行最小二乘线性拟合来得到。

3 形态学广义分形维数逆变器故障诊断仿真

3.1 逆变器功率管开路故障分类

逆变器实际运行过程中,功率管开路以单管开路及双管开路情况居多,三只功率管同时开路的情况极其少见,因此文章主要对逆变器单管开路以及双管开路故障进行诊断与区分。

在 MATLAB/Simulink 里搭建开环 PWM 调制三相逆变器模型,通过移除 IGBT 的驱动信号实现各种单管、双管故障的模拟。图 1 为电压源型逆变器示意图。

通常情况下 IGBT 一般发生单管故障和双管故障,其中双管故障又分为同一桥臂上下两只 IGBT 故障、不同桥臂交叉两只 IGBT 故障、不同桥臂同侧两只 IGBT 故障三种。各种情况所对应的具体功率管故障见表 1。

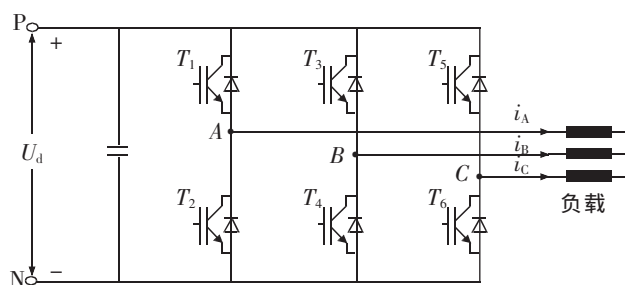


图 1 三相桥式电压源型逆变器

Fig.1 Three-phase voltage source inverter

表 1 逆变器 IGBT 开路故障分类

Tab.1 Types of open-circuit switch faults in IGBT inverters

单管故障	同一桥臂两管故障	不同桥臂交叉两管故障	不同桥臂同侧两管故障
T_1	$T_1 T_2$	$T_1 T_4$	$T_1 T_3$
T_2	$T_3 T_4$	$T_1 T_6$	$T_1 T_5$
T_3	$T_5 T_6$	$T_2 T_3$	$T_2 T_4$
T_4		$T_2 T_5$	$T_2 T_6$
T_5		$T_3 T_6$	$T_3 T_5$
T_6		$T_4 T_5$	$T_4 T_6$

3.2 输出相电流故障波形差异分析

无故障状态下,三相逆变器输出相电流波形如图 2 所示。当 IGBT 发生开路故障时,三相输出相电流波形将发生变化。单管发生故障时,以 a 相上侧 IGBT(T_1)开路为例。 T_1 开路后,电流流向如图 3 所示,其中代表途经 a 相桥臂的电流。无故障状态下,a 相电流将通过功率管 T_1 及与 T_2 反向并联的二极管流通, T_1 有正半波电流流过。 T_1 开路后,电流便只能通过 D2 向直流侧反送电流,如上图箭头流向所示,此时 a 相正半波电流将会在短时间内衰减为零。而其他两相电流波形只出现微小畸变如图 4(a)所示:

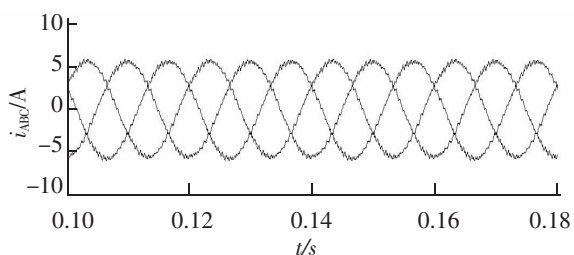


图2 无故障状态相电流波形

Fig.2 Phase current waveform in no fault state

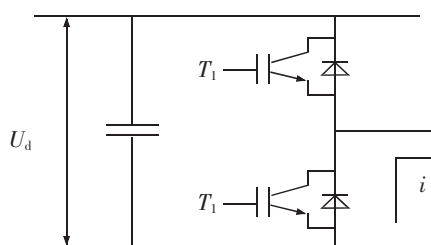


图3 A相上侧 IGBT 断路后电流途径

Fig.3 Current flow route after open-circuit of the upper phase A IGBT

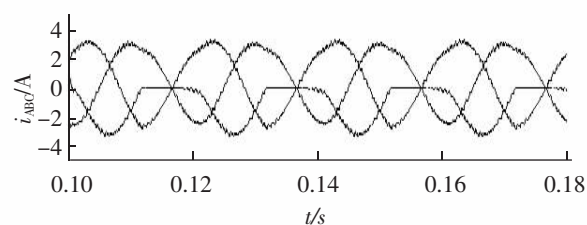
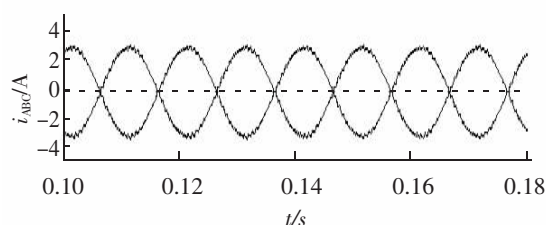
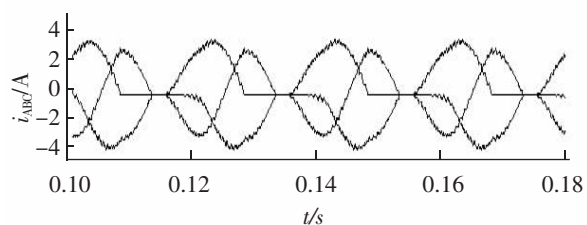
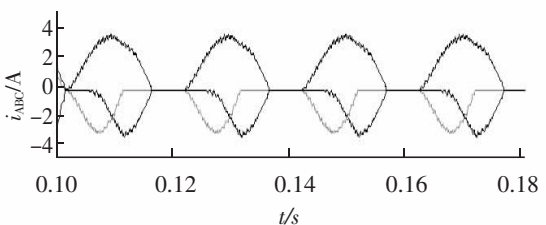
(a) T_1 开路时三相电流波形图(b) $T_1 T_2$ 管开路相电流波形图(c) $T_1 T_4$ 管开路相电流波形图(d) $T_1 T_3$ 管开路相电流波形图

图4 逆变器各类功率管开路故障下输出波形

Fig.4 Output waveform of inverters under the condition of open-circuit faults of different power tubes

同理可知,其他位置的功率管发生单管开路故障时,故障管相应位置的三相输出相电流波形将发生缺失。因此,单管故障下,不同功率管故障三相输出相电流各有差异。

双管故障又分为同一桥臂上下两只 IGBT 故障、不同桥臂交叉两只 IGBT 故障、不同桥臂同侧两只 IGBT 故障三种。双管故障下,于前两种情况而言,故障发生后每个故障管的表现和单管故障下每各故障管的表现类似。同一桥臂上下两只功率管故障时,对应故障相将出现正半波电流波形与负半波电流波形同时缺失的现象,故障相输出电流为一直线。如图 4(b)所示(以 T_1 、 T_2 故障波形为例)。

不同桥臂交叉两只功率管发生故障时,对应故障相两相半波电流将出现波形缺失现象,如图 4(c)所示(以 T_1 、 T_4 管故障波形为例)。

第三种情况则有所不同。不同桥臂同侧两只功率管发生故障时,由于三相对称调制的原因导致另一正常相对侧的功率管也没有电流流过。因此,这种情况下各相半波电流均出现缺失,如图 4(d)所示:(以 T_1 、 T_3 管故障波形为例)。

上述分析得出:逆变器功率管故障将导致三相输出相电流中正负半波电流的缺失,不同位置的故障管故障导致输出相电流中半波电流的缺失位置各不相同。可见,逆变器每种开路故障的三相输出相电流波形均不相同。

3.3 特征向量的提取

本文以逆变器各种故障状态下的三相输出电流的各相形态学广义分形维数作为识别各种故障的特征向量。选取的结构元素为 $g(n)=[0 \ 0 \ 0]$,尺度选择为 1:100,参数 q 取[0:2:10]。设置逆变器直流侧电压为 300,350,400,450,500,550 V 以获得足够的训练样本和测试样本。以上文形态学广义分形维数中的方法分

别计算 a,b,c 三相的输出电流的形态学广义分形维数并按[a 相,b 相,c 相]的顺序组成特征向量,输入 ELM 神经网络进行区分。以电压 300 V,功率管 T_1 故障为例,详细介绍其形态学广义分形维数计算:

1) 将逆变器模型逆变桥中的功率管 T_1 在 0.1 s 时去除其驱动信号,得出如图 4 所示的输出电流波形。

2) 对上述 T_1 故障输出电流波形 a,b,c 三相分别进行四个周期的采样并分别计算各相在给定参数 $q=[0\ 2\ 4\ 6\ 8\ 10]$ 下的形态学广义分形维数 D_{qa}, D_{qb}, D_{qc} 。

3) 将 D_{qa}, D_{qb}, D_{qc} 按 a,b,c 三相的顺序组成特征向量 D_{01300} 则得电压 300 V 下 T_1 管故障的特征向量 $D_{01300}=[D_{qa}\ D_{qb}\ D_{qc}]^T$ 。

按上述步骤可计算出各电压下不同故障对应的特征向量。将 300,350,400,450 V 电压下的故障特征向量作为训练样本见表 2(部分),将 500,550 V 电压下的故障特征向量作为测试样本见表 3(部分)。

3.4 仿真分析

1) ELM 神经网络参数的确定:训练样表表 2 中,每一列代表在 300,350,400,450 V 中的某一电压下 a,b,c 三相输出电流波形在参数取[0:2:10]时的形态学广义分形维数。测试样表表 3 中每一列代表在 500,550 V 中的某一电压下 a,b,c 三相输出电流波形在参数取[0:2:10]时的形态学广义分形维数。显然,故障特征向量有 18 个征兆数,所以 ELM 神经网络的输入层神经元个数为 18;需要进行区分的故障如表 1 所示有 21 种,所以输出层神经元个数为 21;以提高准确率缩短训练时间为原则,多次运行对比后设定隐含层神经元个数为 34,训练允许误差为 4%。

2) 故障类别编号:为了方便 ELM 神经网络区分各类故障需要对每种故障进行编号如表 4,而测试集样本也需按其表 2 中的列数取数 1~42 进行编号。

表 2 训练输入样表
Tab.2 Training input sample

三相取值	D_{01300}	D_{01350}	...	D_{12300}	D_{12350}	...	D_{14300}	D_{14350}	...	D_{13300}	D_{13350}	...
a(q=0)	1.349 5	1.335 4	...	1.764 7	1.751 3	...	1.375 3	1.362 1	...	1.282 1	1.251 6	...
a(q=2)	1.261 2	1.246 0	...	1.704 1	1.676 3	...	1.305 3	1.289 4	...	1.269 8	1.238 7	...
a(q=4)	1.219 0	1.202 7	...	1.613 3	1.566 7	...	1.271 2	1.255 9	...	1.260 9	1.229 2	...
a(q=6)	1.191 0	1.172 8	...	1.551 2	1.503 3	...	1.246 2	1.232 2	...	1.392 9	1.367 5	...
a(q=8)	1.170 4	1.150 4	...	1.516 0	1.469 3	...	1.226 3	1.213 0	...	1.326 3	1.296 7	...
a(q=10)	1.155 7	1.134 1	...	1.494 2	1.448 7	...	1.211 1	1.198 0	...	1.296 1	1.265 4	...
b(q=0)	1.324 0	1.311 2	...	1.272 5	1.246 5	...	1.366 1	1.338 6	...	1.278 7	1.247 8	...
b(q=2)	1.228 3	1.210 1	...	1.200 2	1.167 2	...	1.276 0	1.237 7	...	1.266 9	1.236 1	...
b(q=4)	1.087 2	1.061 6	...	1.098 2	1.054 3	...	1.151 3	1.106 1	...	1.258 2	1.227 3	...
b(q=6)	1.018 5	0.992 6	...	1.031 7	0.987 4	...	1.085 1	1.040 7	...	1.373 2	1.350 0	...
b(q=8)	0.986 7	0.960 8	...	0.998 9	0.954 9	...	1.053 7	1.009 8	...	1.313 3	1.286 3	...
b(q=10)	0.968 7	0.942 8	...	0.979 9	0.936 2	...	1.035 8	0.992 2	...	1.286 2	1.259 1	...
c(q=0)	1.413 4	1.390 7	...	1.288 5	1.271 8	...	1.296 1	1.276 4	...	1.269 3	1.243 0	...
c(q=2)	1.286 8	1.253 6	...	1.201 3	1.181 3	...	1.213 4	1.185 6	...	1.257 2	1.232 0	...
c(q=4)	1.157 7	1.119 8	...	1.110 4	1.083 8	...	1.121 3	1.085 7	...	1.247 9	1.223 9	...
c(q=6)	1.094 2	1.057 2	...	1.048 8	1.021 1	...	1.057 7	1.020 9	...	1.282 1	1.251 6	...
c(q=8)	1.064 5	1.028 0	...	1.018 0	0.989 9	...	1.025 9	0.988 9	...	1.269 8	1.238 7	...
c(q=10)	1.047 5	1.011 3	...	1.000 0	0.971 7	...	1.007 5	0.970 4	...	1.260 9	1.229 2	...

表 3 测试输入样表
Tab.3 Test input sample

三相取值	D_{01500}	D_{01550}	...	D_{12500}	D_{12550}	...	D_{14500}	D_{14550}	...	D_{13500}	D_{13550}	...
a(q=0)	1.315 7	1.309 0	...	1.731 8	1.713 6	...	1.310 6	1.303 7	...	1.324 1	1.309 1	...
a(q=2)	1.211 4	1.202 3	...	1.626 4	1.601 9	...	1.226 2	1.215 4	...	1.242 0	1.222 8	...
a(q=4)	1.109 0	1.096 3	...	1.491 8	1.460 7	...	1.188 5	1.177 1	...	1.203 6	1.184 2	...
a(q=6)	1.043 3	1.029 9	...	1.427 0	1.395 8	...	1.161 0	1.149 5	...	1.183 4	1.164 7	...
a(q=8)	1.009 9	0.996 1	...	1.394 5	1.364 1	...	1.138 9	1.127 5	...	1.171 0	1.152 6	...
a(q=10)	0.990 5	0.976 5	...	1.375 6	1.345 7	...	1.122 3	1.111 2	...	1.162 2	1.144 1	...
b(q=0)	1.223 3	1.216 1	...	1.214 8	1.204 5	...	1.296 8	1.284 6	...	1.315 4	1.303 8	...
b(q=2)	1.142 0	1.131 9	...	1.123 1	1.108 2	...	1.177 3	1.155 9	...	1.228 9	1.213 2	...
b(q=4)	1.053 6	1.040 5	...	0.995 9	0.978 2	...	1.032 9	1.008 5	...	1.193 9	1.179 1	...
b(q=6)	0.991 2	0.977 1	...	0.927 2	0.909 1	...	0.967 4	0.943 2	...	1.175 3	1.161 8	...
b(q=8)	0.958 2	0.943 5	...	0.894 0	0.875 8	...	0.936 6	0.912 5	...	1.162 9	1.150 5	...
b(q=10)	0.938 5	0.923 6	...	0.874 9	0.856 6	...	0.919 1	0.895 0	...	1.153 3	1.142 1	...
c(q=0)	1.342 6	1.332 6	...	1.234 0	1.225 3	...	1.234 9	1.225 2	...	1.304 8	1.294 9	...
c(q=2)	1.181 9	1.166 2	...	1.128 8	1.116 1	...	1.126 4	1.111 3	...	1.233 9	1.220 8	...
c(q=4)	1.024 8	1.006 2	...	1.018 9	1.002 8	...	1.011 9	0.991 6	...	1.204 7	1.190 9	...
c(q=6)	0.960 0	0.941 2	...	0.954 7	0.938 1	...	0.945 5	0.924 7	...	1.188 2	1.173 8	...
c(q=8)	0.930 7	0.911 8	...	0.923 1	0.906 5	...	0.913 1	0.892 2	...	1.177 1	1.162 2	...
c(q=10)	0.914 3	0.895 3	...	0.904 8	0.888 1	...	0.894 4	0.873 5	...	1.169 1	1.153 4	...

表 4 故障类别编号
Tab.4 Fault class number

故障管	编号	故障管	编号
T_1	1	$T_2 T_3$	12
T_2	2	$T_2 T_5$	13
T_3	3	$T_3 T_6$	14
T_4	4	$T_4 T_5$	15
T_5	5	$T_1 T_3$	16
T_6	6	$T_1 T_5$	17
$T_1 T_2$	7	$T_2 T_4$	18
$T_3 T_4$	8	$T_2 T_6$	19
$T_5 T_6$	9	$T_3 T_5$	20
$T_1 T_4$	10	$T_4 T_6$	21
$T_1 T_6$	11		

3) 将训练样本与测试样本同时输入 ELM 神经网络中得测试集预测结果与真实值之间的对比如图 5 所示。由于样本数量有限并且仿真信号中添加了 5% 的白噪声所以导致分类准确率未达到 100%但也高达 97.62%。

4 结论

提出利用数学形态学广义分形维数,从输出三相相电流波形的几何特征出发,对逆变器功率管开路故障进行诊断。相比于现有的逆变器功率管开路诊断方法,本文提出的方法避免了坐标变换、傅里叶变换等复杂的数学运算,综合输出相电流各相的故障特征,计算三相的形态学广义分形维数作为特征向量,实现简单、快速、准确的逆变器故障诊断。

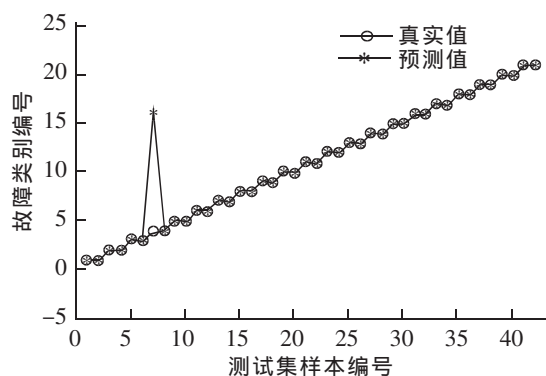


图 5 真实值与预测值对比结果

Fig.8 Comparison between true values and predicted values

参考文献:

- [1] FUCHS F W. Some diagnosis methods for voltage source inverters in variable speed drives with induction machines—a survey[C]// Proceedings of the IEEE Industrial Society Annual Conference Roanoke Virginia, USA, 2003: 1378–1385.
- [2] 宋平岗,周军,蔡双. 基于形态学分形维数的输电线路故障选相方法[J]. 华东交通大学学报, 2014, 31(3): 88–94.
- [3] 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.
- [4] 于泳,蒋生成,杨荣峰,等. 变频器 IGBT 开路故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(9): 30–35.
- [5] 杨忠林,吴正国,李辉. 基于直流侧电流检测的逆变器开路故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(27): 18–22.
- [6] 崔江,王强,龚春英. 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): 3111–3116.
- [7] 安群涛,孙力,赵克,等. 基于开关函数模型的逆变器开路故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(6): 1–6.
- [8] CRUZ S M A, FERREIRA M, CARDOSO A J M. Output error voltages—a first method to detect and locate faults in matrix converters[C]// Proceedings of the 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, Orlando, Florida, USA, 2009: 1319–1325.
- [9] 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.
- [10] 刘艳,李海燕. 三相逆变器功率管故障智能诊断研究[J]. 电测与仪表, 2013, 50(1): 15–20.
- [11] 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.
- [12] 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, 2011: 4348–4354.
- [13] 胡清,王荣杰,詹宜巨. 基于支持向量机的电力电子电路故障诊断技术[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(12): 107–111.
- [14] 李沁,张劲松. 基于分形的电力电子电路故障诊断[J]. 电气技术, 2007(11): 27–30, 42.
- [15] 宋平岗,文发. 基于 LMS 形态滤波和 Hilbert 变换的电能质量扰动定位[J]. 华东交通大学学报, 2015, 32(1): 86–92.
- [16] 宋平岗,周军. 基于形态学广义分形维数的电力电子电路故障诊断[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(12): 53–59.
- [17] 李兵,张培林,任国全,等. 形态学广义分形维数在发动机故障诊断中的应用[J]. 振动与冲击, 2011, 30(10): 30–10.
- [18] 赵春晖. 形态滤波器原理及应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2013.

Inverter Fault Diagnosis Based on Generalized Fractal Dimensions of Mathematical Morphology

Song Pinggang, Zhang Wei, Lin Jiatong, You Xiaohui, Luo Jian

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Based on the current waveform differences output by inverters with open-circuit fault, this paper puts forward the application of mathematical morphology-based generalized fractal dimensions for inverter fault diagnosis. Mathematical morphology-based generalized fractal dimensions with six parameters in the sequence of three-phase output current(a,b,c) are taken as the input of Elman Neural Network, and fault types are set as the output. The simulation result shows that the fault discrimination rate is up to 97.62%. The current signals under various conditions of breakdown can be identified properly by mathematical morphology-based generalized fractal dimensions of three-phase output current, which may provide a new and precise method for open-circuit fault diagnosis.

Key words: inverter; fault diagnosis; mathematical morphology; generalized fractal dimensions

(责任编辑 姜红贵)