

# 三相六开关 VIENNA 整流器功率开关开路故障诊断

韦 徵 陈轶涵 龚春英 陈 杰

(南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016)

**摘要:**分析了 VIENNA 整流器在桥臂各个功率器件出现开路故障时所呈现的故障特征,指出了各桥臂续流二极管的开路故障对整流器的危害最大。进一步提出了利用三相输入电流直流分量以及输出电压交流纹波作为功率器件开路故障诊断的故障特征值。构建了基于人工神经网络的功率开关开路故障分类系统,并将所提取的故障特征值作为输入训练样本对其进行训练,最后通过 MATLAB 软件中 M 语言编程完成对故障分类系统的训练和测试。训练和测试的结果表明,训练后的神经网络故障分类系统可很好地对 VIENNA 整流器除续流二极管外的功率器件开路故障进行定位。

**关键词:**三相 VIENNA 整流器;开路故障;故障特征;故障诊断;神经网络

**中图分类号:**TM461 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2014)01-0121-08

## Fault Diagnostic System for Three-Phase Six-Switch VIENNA Rectifier Open-Circuit

Wei Zheng, Chen Yihan, Gong Chunying, Chen Jie

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** The operation modes of rectifier with different switches open-circuit faults are analyzed. The analysis result shows that the fly-wheel diode open-circuit faults will cause the most damage for rectifier. The fault diagnostic system based on neural network is constructed. The DC component in three-phase input current and the AC ripple in output voltage of rectifier are proposed as fault characteristic values and training data for neural network. The training and testing results demonstrate that the fault diagnostic system using the proposed neural network has the excellent fault diagnostic ability that can locate the fault power devices in the rectifier except the fly-wheel diodes.

**Key words:** three-phase VIENNA rectifier; open-circuit faults; fault characteristics; fault diagnostic; neural network

三相三电平 VIENNA 整流器由维也纳技术大学的 J W Kolar 教授于 20 世纪 90 年代所提出<sup>[1]</sup>,根据整流器的开关管数目可分为三开关和六开关两种,分别如图 1(a, b)所示。由于该类变换器可实现三电平调制,同时只能实现交流到直流的变换,无逆变功能,因此国内外文献称之为三相/三电平/三开关 VIENNA 整流器和三相/三电平/六开关 VIENNA 整流器。其中,六开关 VIENNA

整流器因其具有更低的功率器件导通损耗(在开关管导通期间内,每相输入电感电流仅流过一个二极管),故其理论上可具有更高的系统效率。VIENNA 整流器因其结构简单、控制时无需设置开关死区、电路可靠性较高等特点,适合应用在某些对整流器可靠性要求较高的场合,如航空电源等<sup>[2-4]</sup>。

电力电子变换器一般由控制系统、采样系统和主回路系统构成。相比较主回路而言,前两者的故

**基金项目:**国家自然科学基金(51377079)资助项目;江苏省高校优势学科建设工程资助项目。

**收稿日期:**2013-10-20;**修订日期:**2013-12-16

**通信作者:**龚春英,女,教授,博士生导师,E-mail:zjnjgcy@nuaa.edu.cn。

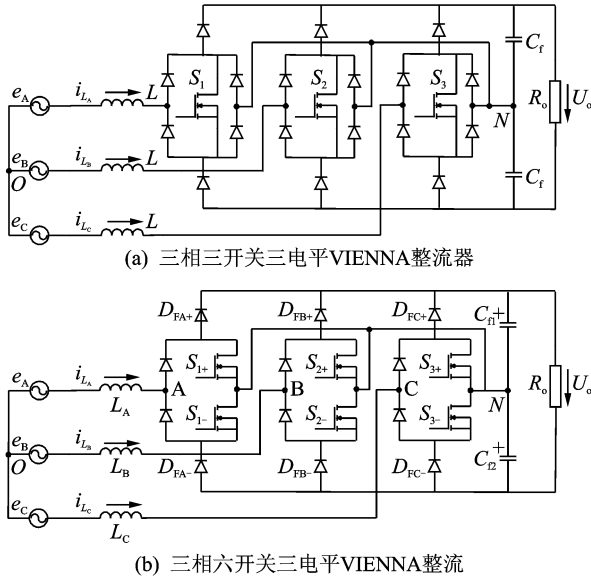


图1 三相三电平三开关/六开关 VIENNA 整流器拓扑图

Fig.1 Topologies of three-phase three-level three-switch/six-switch VIENNA rectifier

障几率要小得多。因此,电力电子变换器的故障诊断通常情形下指的都是其主回路故障诊断过程。对于整流器而言,其主回路故障多为开关器件故障<sup>[5-10]</sup>,后者可进一步分为贯穿故障以及开路故障。由于开关器件的贯穿故障易将引发变换器的大幅过流现象,因而诊断和保护起来较为容易。相对而言,开关器件的开路故障在通常情况下不会引起主电路的大幅过流或过欠压现象,因此需要对其进行故障诊断<sup>[11]</sup>。近年来有关整流器的故障检测与诊断问题,如正确的故障诊断策略以及准确的故障分离技术已经引起国内外众多学者极大关注,同时也都成为提高整流器系统可靠性和可维修性的重要手段<sup>[12-14]</sup>。

本文以三相六开关 VIENNA 整流器为对象,重点对其开关器件的开路故障诊断方法开展研究。分析了整流器每相各个功率器件出现开路故障时的电路输入输出特性,提出通过提取整流器三相输入电流的直流分量以及输出直流电压交流脉动幅值作为故障特征值,并设计构建多层神经网络对所提取的故障特征值进行故障分离,从而达到实现故障诊断的目的。

## 1 开关器件开路故障对整流器工作特性影响分析

### 1.1 三相 VIENNA 整流器正常工作模式分析

根据如图 1(b)所示的三相六开关 VIENNA

整流器拓扑图,其中  $e_A, e_B, e_C$  为三相输入电源,  $L_A, L_B, L_C$  为三相输入滤波电感,  $C_{f1}, C_{f2}$  为直流侧上下输出滤波电容,  $U_o$  为输出电压,  $R_o$  为输出负载电阻。  $S_{1+} S_{1-}, S_{2+} S_{2-}, S_{3+} S_{3-}$  分别为 A, B, C 三相各个桥臂开关管,并与二极管  $D_{NA+} D_{NA-}, D_{NB+} D_{NB-}, D_{NC+} D_{NC-}$  构成双向开关。  $D_{FA+} D_{FA-}, D_{FB+} D_{FB-}, D_{FC+} D_{FC-}$  分别为各相桥臂正向和负向续流二极管。当整流器输入电源电压三相平衡以及两个输出电容电压对称时,忽略开关管脉宽调制所引起的高频谐波分量,此时直流侧输出中点  $N$  可视为与输入电源中点电位  $O$  点等效。下面以 A 相为例,分析电源电压在正、负半周时,电流连续导通模式下的电路工作模式。

当电源工作在正半周,即  $e_A > 0$  时:

(1)当开关管  $S_{1+}$  导通时,由于二极管  $D_{FA-}$  的存在,无论开关管  $S_{1-}$  此时是否导通, A 相电流通路均为  $O \rightarrow L_A \rightarrow D_{NA+} \rightarrow S_{1+} \rightarrow N \rightarrow O$ ,此时输入滤波电感两端电压为  $u_{L_A} = e_A > 0$ ,电感电流  $i_{L_A} > 0$  且逐渐增大,故滤波电感位于储能阶段,电路工作模式如图 2(a)所示。

(2)当开关管  $S_{1+}$  关断,无论  $S_{1-}$  此时是否开通,输入电感电流通过二极管  $D_{FA+}$  进行续流。此时 A 相电流通路为  $O \rightarrow L_A \rightarrow D_{NA+} \rightarrow D_{FA+} \rightarrow N \rightarrow O$ 。输入滤波电感两端电压为  $u_{L_A} = e_A - 0.5U_o < 0$ ,电感电流  $i_{L_A} > 0$  且逐渐减小,电路工作模式如图 2(b)所示。

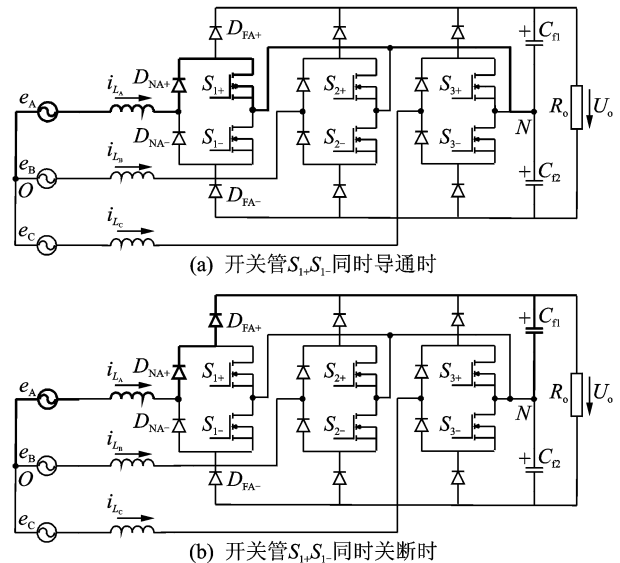


图2 电源电压工作在正半周时,电路工作模式  
Fig.2 Operation mode of rectifier in condition of  $e_A > 0$

当电源工作在负半周,即  $e_A < 0$  时:

(1)当开关管  $S_{1-}$  导通时,由于二极管  $D_{FA+}$  的存在,无论开关管  $S_{1+}$  此时是否导通, A 相电流通

路为  $O \rightarrow N \rightarrow S_{1-} \rightarrow D_{NA-} \rightarrow L_A \rightarrow O$ , 此时输入滤波电感两端电压为  $u_{L_A} = e_A < 0$ , 电感电流  $i_{L_A} < 0$  且逐渐增大, 故滤波电感位于储能阶段, 电路工作模式如图 3(a) 所示。

(2) 当开关管  $S_{1-}$  关断时, 无论  $S_{1+}$  此时是否导通, 输入电感电流通过二极管  $D_{FA-}$  进行续流。此时 A 相电流通路为  $O \rightarrow N \rightarrow D_{FA-} \rightarrow D_{NA-} \rightarrow L_A \rightarrow O$ 。输入滤波电感两端电压为  $u_{L_A} = e_A + 0.5U_o > 0$ , 电感电流  $i_{L_A} < 0$  且逐渐减小, 电路工作模式如图 3(b) 所示。

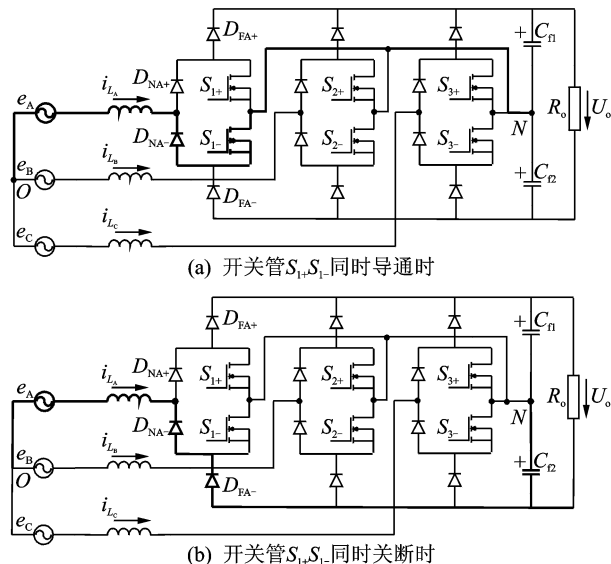


图 3 电源电压工作在负半周时, 电路工作模式

Fig. 3 Operation mode of rectifier in condition of  $e_A < 0$

## 1.2 功率器件开路故障对整流器工作特性影响

假设任意时刻仅有一个功率器件产生结构性开路, 根据三相六开关 VIENNA 整流器电路拓扑结构, 继续以 A 相为例, 对功率开关管和功率二极管发生开路故障时的整流器输入输出性能进行分析。

### (1) 开关管 $S_{1+}$ 或 $S_{1-}$ 发生开路故障时

当开关管  $S_{1+}$  发生开路故障时, 在输入电源电压正半周内, 输入电感电流失去开通回路, 所有正向电流只流过二极管  $D_{NA+}$  和  $D_{FA+}$ , 即仅存在电感续流回路, 从而使得输入电感电流失去正半周主要波形, 导致 A 相输入电流产生严重畸变。

同理, 当开关管  $S_{1-}$  发生开路故障时, 在输入电源负半周内, 输入电感电流失去开通回路, 所有负向电流只流过二极管  $D_{NA-}$  和  $D_{FA-}$ , 即仅存在负向电感续流回路, 从而使得输入电感电流失去负半周主要波形。

图 4(a, b) 给出了变换器 A 相功率开关  $S_{1+}, S_{1-}$  分别发生开路故障时, 三相输入电感电流、A 相桥臂电压  $u_{AN}$  以及直流侧输出电压仿真波形, 图 4(c, d) 为相应故障条件下的 A 相输入电流频谱。其中主电路仿真参数为: 三相输入对称电压, 输出直流电压 350 V, 输出功率 2.5 kW, 开关频率 50 kHz, 三相输入滤波电感为 1.5 mH, 直流侧上下两个输出滤波电容均为 1 000  $\mu$ F。

根据图 4 所示的整流器开关管  $S_{1+}, S_{1-}$  分别发生开路故障时的仿真波形可以看出, 由于失去功率开关的控制作用和电流流通通路, A 相桥臂电压  $u_{AN}$  分别在电源输入正半周和负半周时只出现高或低电平。同时, 三相输入电流均产生了不同程度的畸变, 其中 A 相输入电流畸变最严重, 频谱分析进一步显示 A 相输入电流在  $S_{1+}$  ( $S_{1-}$ ) 发生开路故障时含有明显的正(负)直流分量。此外, 由于三相输入电流的不对称, 使得直流侧输出电压出现明显的交流脉动。

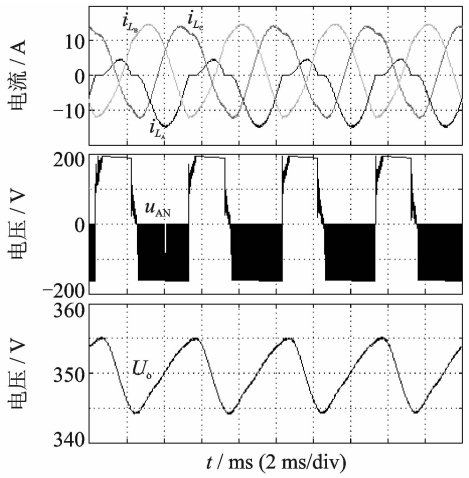
### (2) 功率二极管 $D_{NA+}$ 或 $D_{NA-}$ 发生开路故障时

当二极管  $D_{NA+}$  发生开路故障时, 在输入电源电压正半周内, 整流器 A 相输入电感电流将同时失去了开通回路和续流回路, 从而使得输入电感电流失去了全部正半周波形, 使得 A 相输入电流严重不对称。

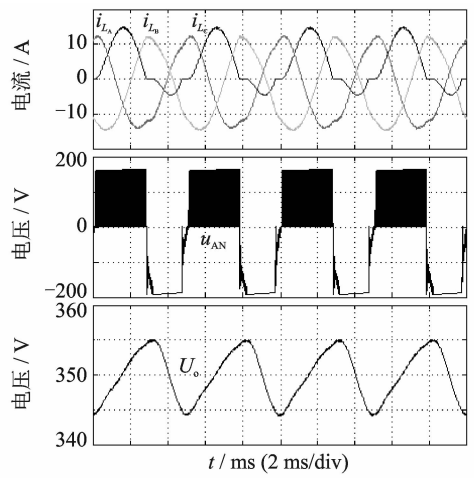
同理, 当功率二极管  $D_{NA-}$  发生开路故障时, 在输入电源负半周内, 输入电感电流同时失去了开通回路和续流回路, 从而使得输入电感电流失去了全部负半周波形。

图 5(a, b) 给出了变换器 A 相功率二极管  $D_{NA+}, D_{NA-}$  分别发生开路故障时, 三相输入电感电流、A 相桥臂电压  $u_{AN}$  以及直流侧输出电压仿真波形。图 5(c, d) 为相应故障条件下的 A 相输入电流频谱分析。

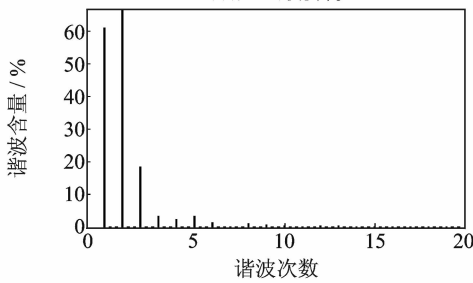
由图 5 所示的仿真波形可以看出, 当功率二极管  $D_{NA+}$  ( $D_{NA-}$ ) 发生开路故障时, 由于失去电感电流在输入电源正(负)半周同时失去了开通回路和续流回路, 使得 A 相输入电感电流在正(负)半周几乎为零。频谱分析进一步显示 A 相输入电流在  $D_{NA+}$  ( $D_{NA-}$ ) 发生开路故障时含有明显的正(负)直流分量, 且该直流分量要大于功率开关管  $S_{1+}$  ( $S_{1-}$ ) 发生开路故障时的情况。此外, 由于三相输入电流的不对称, 使得直流侧输出电压出现明显的交流脉动, 且脉动幅值同样要大于功率开关管  $S_{1+}$  ( $S_{1-}$ ) 发生开路故障时的情况。



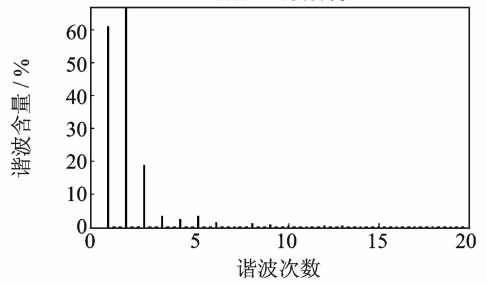
(a) 功率开关 $S_{1+}$ 发生开路故障时



(b) 功率开关 $S_{1-}$ 发生开路故障时



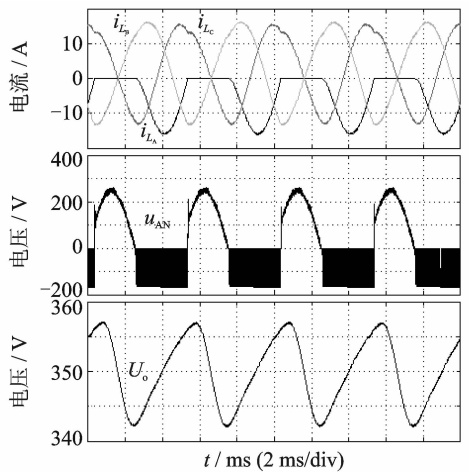
(c)  $S_{1+}$ 发生开路故障时A相输入电流频谱



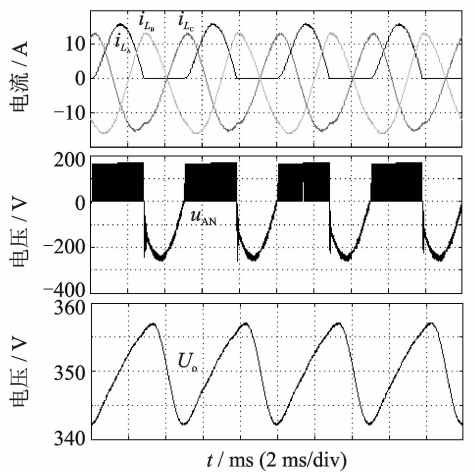
(d)  $S_{1-}$ 发生开路故障时A相输入电流频谱

图 4 变换器 A 相功率开关  $S_{1+}$   $S_{1-}$  发生开路故障时的仿真波形

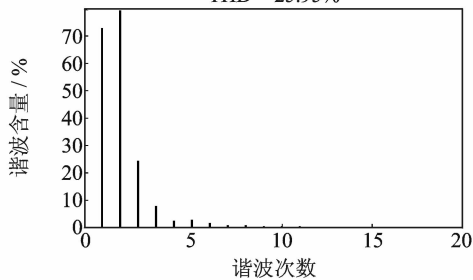
Fig. 4 Simulated waveforms of rectifier in conditions of  $S_{+}$   $S_{-}$  open-circuit in phase A



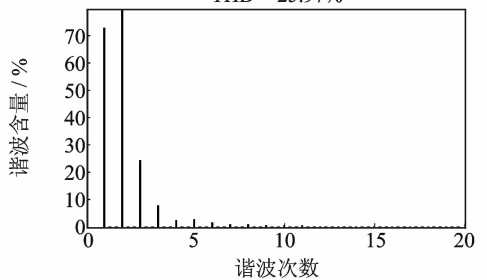
(a) 功率二极管 $D_{NA+}$ 发生开路故障时



(b) 功率二极管 $D_{NA-}$ 发生开路故障时



(c)  $D_{NA+}$ 发生开路故障时A相输入电流频谱



(d)  $D_{NA-}$ 发生开路故障时A相输入电流频谱

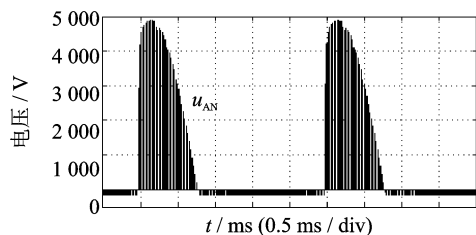
图 5 整流器 A 相二极管  $D_{NA+}$   $D_{NA-}$  发生开路故障时的仿真波形

Fig. 5 Simulated waveforms of rectifier in conditions of diode  $D_{NA+}$   $D_{NA-}$  open-circuit in phase A

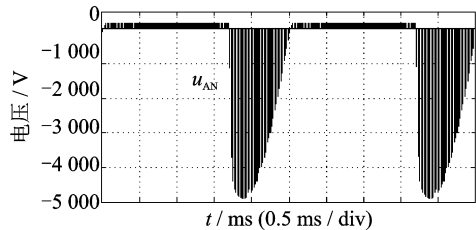
(3) 功率二极管  $D_{FA+}$  或  $D_{FA-}$  发生开路故障时  
当功率二极管  $D_{FA+}$  发生开路故障时,在输入电源电压正半周内,输入电感电流失去了续流回路。由于电感中所储存的能量无法释放,在功率管  $S_{1+}$  关断瞬间,将导致 A 相桥臂电压  $u_{AN}$  出现很大的尖峰,从而可将处于关断状态的开关管  $S_{1+}$  瞬间击穿。

同理,当功率二极管  $D_{FA-}$  发生开路故障时,在输入电源负半周内,输入电感电流失去了续流回路。故在功率管  $S_{1-}$  关断瞬间,将导致 A 相桥臂电压同样出现很大的尖峰,从而可将处于关断状态的开关管  $S_{1-}$  瞬间击穿。

图 6(a, b) 给出了变换器 A 相功率二极管  $D_{FA+}$   $D_{FA-}$  分别发生开路故障时, A 相桥臂电压  $u_{AN}$  仿真波形(由于  $D_{FA+}$   $D_{FA-}$  的开路故障将导致功率开关  $S_{1+}$   $S_{1-}$  瞬间击穿,因此该仿真波形在实际情况中并不会出现)。



(a) 功率二极管  $D_{FA+}$  发生开路故障时



(b) 功率二极管  $D_{FA-}$  发生开路故障时

图 6 变换器 A 相二极管  $D_{FA+}$   $D_{FA-}$  发生开路故障时的仿真波形

Fig. 6 Simulated waveforms of rectifier in conditions of diode  $D_{FA+}$   $D_{FA-}$  open-circuit in phase A

根据图 6 所示的仿真波形可以看出,由于失去电感电流续流回路,在功率开关  $S_{1+}$  ( $S_{1-}$ ) 关断瞬间,电感中所存储的能量将导致 A 相桥臂电压  $u_{AN}$  出现异常的电压尖峰,从而将开关管  $S_{1+}$  ( $S_{1-}$ ) 瞬间击穿,严重时甚至可能会导致整流器 A 相其他功率器件的损毁,造成整流器缺相运行。因此,当整流器功率二极管  $D_{FA+}$  ( $D_{FA-}$ ) 发生开路故障时,此时该故障模式对整流器的危害为最大。

根据上述关于 VIENNA 整流器 A 相中各个

功率器件发生结构性开路故障时的工作特性分析,可对其进行归纳总结,如表 1 所示。

表 1 整流器故障特征状态表

Tab. 1 Fault modes of rectifier

故障功率器件	整流器故障特征
功率开关管 $S_{1+}$	输入电流 $i_{L_A}$ 产生明显畸变,且含有较大的正直流分量,输出电压产生明显的交流脉动
功率开关管 $S_{1-}$	输入电流 $i_{L_A}$ 产生明显畸变,且含有较大的负直流分量,输出电压产生明显的交流脉动
功率二极管 $D_{NA+}$	输入电流 $i_{L_A}$ 正半周几乎为零,输出电压产生明显的交流脉动
功率二极管 $D_{NA-}$	输入电流 $i_{L_A}$ 负半周几乎为零,输出电压产生明显的交流脉动
功率二极管 $D_{FA+}$	A 相桥臂电压产生异常尖峰,使得功率管 $S_{1+}$ 被击穿,严重时可导致 A 相桥臂其他功率器件同时损毁,造成整流器缺相运行
功率二极管 $D_{FA-}$	A 相桥臂电压产生异常尖峰,使得功率管 $S_{1-}$ 被击穿,严重时可导致 A 相桥臂其他功率器件同时损毁,造成整流器缺相运行

由表 1 所归纳的整流器故障特征状态可得知,功率器件的开路故障将造成 VIENNA 整流器输入电流和输出电压产生较大的变化,其中当功率二极管  $D_{FA+}$  ( $D_{FA-}$ ) 发生开路故障时将导致整流器 A 相桥臂多个功率器件同时损坏。因此,该故障模式将对整流器运行产生巨大危害。对于整流器其他功率器件发生开路故障时,可提取输入三相电流直流分量以及直流侧输出电压交流纹波作为功率器件结构性开路故障特征参数。

当整流器 B, C 相发生类似的功率器件结构性开路故障时,其对整流器输入输出工作特性的影响以及相关故障诊断逻辑均与 A 相类似,在此不赘述。

## 2 基于人工神经网络的故障分离

人工神经网络具有自学习、自适应能力,且具有逼近任意复杂的非线性函数(或映射)的能力。当人工神经网络用于故障诊断时,可以改善常规故障诊断方法,解决多维空间模式或非线性模式的识别问题,适合于对多故障、多征兆这类复杂对象的故障诊断<sup>[15]</sup>。因此,本文提出建立基于人工神经网络的智能功率器件开路故障分类系统,以实现三相六开关 VIENNA 整流器功率开关器件开路故障诊断。

针对第1节所分析的三相VIENNA整流器不同功率器件出现开路故障时对电路输出特性的影响,拟提取整流器三相输入电流直流分量以及输出直流电压交流纹波作为神经网络的训练样本。所构建的神经网络如图7所示,其结构参数为:输入层神经元数为4,隐层神经元数为3,输出层神经元数为1,选用S形激活函数,其中隐层的激活函数选用tansig,输出层激活函数选用logsig,训练误差目标设为 $10^{-5}$ ,采用经典的BP学习方法对神经网络进行训练。整流器故障诊断系统由13个图7所示的神经网络组成,其构架如图8(a)所示。每

个神经网络的训练样本均由13组样本组成,即一组整流器正常工作以及12组整流器出现不同功率器件开路故障(各相桥臂续流二极管除外)时所提取的三相输入电流直流分量和输出直流电压交流纹波,从而构成了一个 $[4 \times 13]$ 的样本矩阵。每个神经网络的训练输出目标均为一个 $[1 \times 13]$ 的矩阵,各个神经网络的训练目标及其对应故障代码如表2所示。其中故障代码F0~F12分别代表整流器正常、A相 $S_{1+}$ 管开路、A相 $S_{1-}$ 管开路、A相 $D_{NA+}$ 管开路、A相 $D_{NA-}$ 管开路、……、C相 $D_{NC+}$ 管开路、C相 $D_{NC-}$ 管开路。当13个神经网络按照各自的目标训练完成之后即可对输入故障诊断系统的任意故障样本进行故障诊断。故障诊断流程如图8(b)所示,即将整流器实时采集的一组 $[4 \times 1]$ 故障样本矩阵分别输入故障诊断系统中的13个已训练好的神经网络,将各个神经网络输出值进行合并,查询对应的故障代码即可获知当前整流器故障状态。

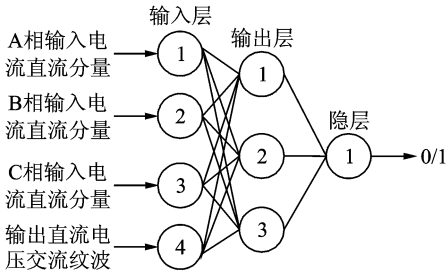


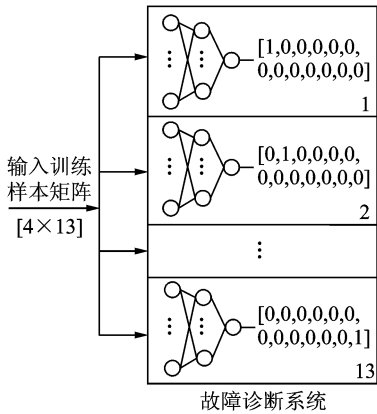
图7 所构建的神经网络示意图

Fig.7 Proposed neural network architecture

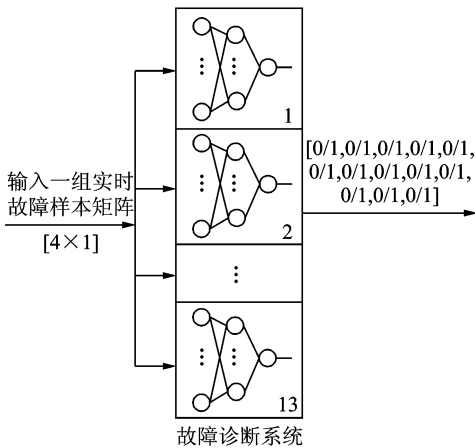
表2 神经网络训练目标及故障代码

Tab.2 Target and fault codes of neutral network

神经网络编号	故障代码	神经网络训练目标
1	F0(变换器正常)	[1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]
2	F1( $S_{1+}$ 管开路)	[0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]
3	F2( $S_{1-}$ 管开路)	[0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]
4	F3( $D_{NA+}$ 管开路)	[0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0]
5	F4( $D_{NA-}$ 管开路)	[0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0]
6	F5( $S_{2+}$ 管开路)	[0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0]
7	F6( $S_{2-}$ 管开路)	[0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0]
8	F7( $D_{NB+}$ 管开路)	[0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0]
9	F8( $D_{NB-}$ 管开路)	[0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0]
10	F9( $S_{3+}$ 管开路)	[0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0]
11	F10( $S_{3-}$ 管开路)	[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0]
12	F11( $D_{NC+}$ 管开路)	[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0]
13	F12( $D_{NC-}$ 管开路)	[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1]



(a) 故障诊断系统



(b) 故障诊断系统工作示意图

图8 所构建的故障诊断系统示意图

Fig.8 Proposed neural network fault diagnostic system

### 3 人工神经网络故障分类系统的训练结果

为了验证所构建的人工神经网络故障诊断系统的可行性,首先根据前文所述的整流器仿真参数,在整流器满载工作条件下,分别针对整流器正常工作以及不同功率开管发生开路故障时进行仿真,以获取故障诊断系统的训练样本矩阵,然后结合表2所示的训练目标,通过在MATLAB仿真软件中进行M语言编程,实现对所构建的基于神经网络的故障诊断系统进行训练。由于篇幅所限,表

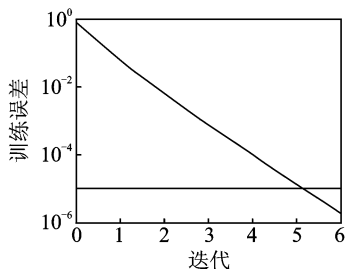
3 给出了 F0~F4 的训练结果,即训练样本为一组整流器正常工作以及 4 组整流器 A 相出现不同功率器件开路故障时整流器三相输入电流直流分量和输出直流电压交流纹波,图 9 为对应的神经网络训练中误差变化图。训练结果显示:1~5 号神经网络分别经过 6,10,31,20,13 次迭代运算后均达到预期的误差设定目标( $10^{-5}$ ),经过训练后的各个神经网络输出值均非常接近目标值,从而表明 1~5 号神经网络所构成的故障诊断系统可以对任何来自 A 相功率器件发生故障时所获得的实时样本

进行判断,并确定故障功率器件。

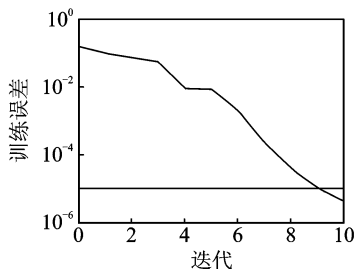
表 3 神经网络训练结果

Tab. 3 Training results of neutral network

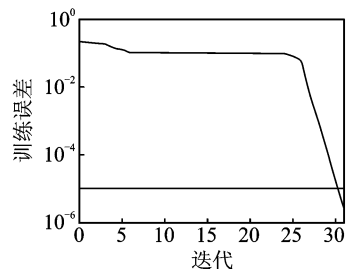
故障代码	训练结果				
F0	0.998 4	0.000 3	0.020 0	0.000 3	0.000 9
F1	0.002 7	0.990 0	0.000 1	0.000 2	0.000 1
F2	0.000 1	0.000 1	0.998 4	0.000 1	0.005 4
F3	0.000 1	0.000 5	0.000 1	0.995 3	0.000 1
F4	0.000 1	0.000 1	0.003 0	0.000 3	0.996 7



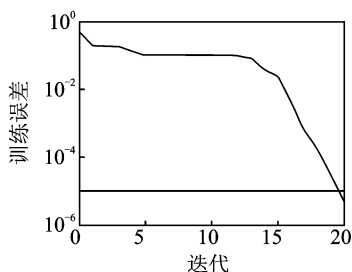
(a) 1号神经网络误差变化图



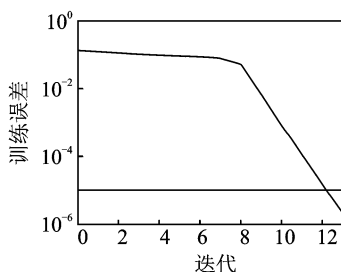
(b) 2号神经网络误差变化图



(c) 3号神经网络误差变化图



(d) 4号神经网络误差变化图



(e) 5号神经网络误差变化图

图 9 1~5 号神经网络训练中误差变化图

Fig. 9 Training goal variation of neutral network 1-5

在实际运用中,可首先对各个神经网络进行离线训练,完成神经网络中各权值系数的计算。当各神经网络达到训练目标后,再将其运用到整流器在线功率器件故障诊断中,即对输入到神经网络故障诊断系统的实时样本直接计算并输出结果,从而可有效节约诊断系统运行时间,提高故障诊断效率。

### 4 结束语

三相 VIENNA 整流器因其电路结构简洁、可靠性较高、对应用在某些特定场合的电源系统如航空电源等具有重要意义。本文首先分析了三相六开关 VIENNA 整流器在桥臂各个功率器件出现开路故障时所呈现的故障特征,指出了各桥臂续流二极管的开路故障对整流器的危害最大。同时,针对整流器其他功率器件提出了提取三相输入电流直流分量以及输出电压交流纹波作为故障特征值,

以实现其开路故障诊断。最后构建了人工神经网络故障诊断系统,并将所提取的故障特征值作为神经网络的训练样本对其进行训练,从而利用训练后的神经网络诊断系统实现对功率器件的故障定位。

### 参考文献:

[1] Kolar J W, Zach F C. A novel three-phase utility interface minimizing line current harmonics of high-power telecommunications rectifier modules [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997, 44(4): 456-468.

[2] Gong G, Heldwein M L. Comparative evaluation of three-phase high-power-factor AC/DC converter concepts for application in future more electronic aircraft [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(3): 727-737.

[3] Lai R, Pei Y, Wang F. A systematic evaluation of

- AC-fed converter topologies for light weight motor drive applications using SiC semiconductor devices [C]//IEEE Electric Machines & Drives Conference. Antalya; IEEE, 2007; 1300-1305.
- [4] Karutz P, Round S D, Kolar J W. Ultra compact three-phase PWM rectifier[C]//IEEE Applied Power Electronics Conference. Dallas; IEEE, 2007; 816-822.
- [5] 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.  
An Quntao, Sun Li, Zhao Ke, et al. Diagnosis method for inverter open-circuit fault based on switching function model[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(6): 1-6.
- [6] 王磊, 赵雷霆, 张钢, 等. 电压型 PWM 整流器的开关器件断路故障特征[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 108-116.  
Wang Lei, Zhao Leiting, Zhang Gang, et al. Analysis of fault characteristics after the breakdown of power switches in voltage-source PWM rectifiers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 108-116.
- [7] 李敏远, 陈如清. 一种基于模式识别的可控整流电路故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2004, 19(7): 53-59.  
Li Minyuan, Chen Ruqing. A method for fault diagnosis in controlled rectifier based on pattern recognition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(7): 53-59.
- [8] 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): 18-23.  
Yang Zhonglin, Wu Zhengguo, Li Hui. Inverter fault diagnostic based on detecting DC side current [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(27): 18-23.
- [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): 26-33.  
Tang Qingquan, Yan Shichao, Lu Songsheng, et al. Open-circuit fault diagnostic of transistor in three-level inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21): 26-33.
- [10] 崔博文, 任章. 基于谱估计的三相逆变器故障诊断[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 192-199.  
Cui Bowen, Ren Zhang. Fault detection and diagnostics of inverter based on spectral estimation and neutral network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 192-199.
- [11] 安群涛, 孙力, 赵克, 等. 三相逆变器开关管开路故障诊断方法研究进展[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 135-145.  
An Quntao, Sun Li, Zhao Ke, et al. Recent developments of fault diagnostic methods for switches in three-phase inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4): 135-145.
- [12] Song Yantao, Wang Bingsen. Survey on reliability of power electronics systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 591-604.
- [13] Yang Shaoyong, Bryant A, Mawby P. An industry-based survey of reliability in power electronics converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3): 1441-1452.
- [14] Yang Shaoyong, Xiang Dawei, Bryant A, et al. Condition monitoring for device reliability in power electronics converters: A review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(11): 2734-2752.
- [15] 陈如清. 两种基于神经网络的故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 112-116.  
Chen Ruqing. Comparison between two fault diagnosis methods based on neutral network[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 112-116.