

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003742

# 基于畸变电流的直驱式永磁风电变流器 故障诊断研究\*

何怡刚<sup>1</sup> 谢望<sup>1</sup> 施天成<sup>2</sup> 许水清<sup>1</sup> 高贺<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院 合肥 230009; 2. 国网安徽省电力有限公司经济技术研究院 合肥 230000)

**摘要:**针对直驱式永磁风电变流器开关管开路故障诊断的问题,提出了一种基于机侧电流畸变规律的故障诊断方法。该方法研究了在不同开路故障类型下的机侧三相电流的畸变规律,总结畸变规律并设计诊断变量,实时监测低通滤波后的机侧三相电流并计算诊断变量,然后根据诊断变量得出诊断信号,最后根据诊断信号完成实时故障诊断,并在单管故障诊断方法的基础上提出了支持双管故障诊断的方法。实验结果表明,该方法对单管故障和双管故障均能进行准确且快速的诊断,诊断成本较低,鲁棒性较好,不容易出现误诊和漏诊。

**关键词:**风力发电;直驱式永磁风电变流器;故障诊断;电流信号;状态监测

**中图分类号:** TN358; TM461 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

## Study on fault diagnosis of direct drive permanent magnet wind power converter based on distorted current

He Yigang<sup>1</sup> Xie Wang<sup>1</sup> Shi Tiancheng<sup>2</sup> Xu Shuiqing<sup>1</sup> Gao He<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Economic Research on State Grid Anhui Electric Power Company, Hefei 230000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of open circuit fault diagnosis of direct drive permanent magnet wind power converter, a fault diagnosis method based on generator side current distortion law is proposed. This method studies the distortion law of three-phase current under different open circuit fault types, summarizes the distortion law and designs diagnostic variables, monitors the three-phase current of generator side after low-pass filtering in real time and calculates diagnostic variables, then obtains diagnostic signals according to the diagnostic variables, and finally completes real-time fault diagnosis according to the diagnostic signals. On the basis of single tube fault diagnosis method, a method supporting double tube fault diagnosis is proposed. The experimental results show that this method can diagnose single tube fault and double tube fault accurately and quickly, with low cost, good robustness and less misdiagnosis and missed diagnosis.

**Keywords:** wind power generation; direct-drive permanent magnet wind power converter; fault diagnosis; current signal; condition monitoring

## 0 引言

随着环境污染问题的日益突出,同时为了克服能源危机,风能作为一种绿色可再生能源越来越受到世界各国的重视,风电机组的装机量在逐年提升<sup>[1-2]</sup>。直驱式永磁同步风电系统是我国大型风电机组采用的主流系统结

构之一,该系统的特点是不需要齿轮箱,主传动链主要由永磁同步发电机(PMSG)和背靠背脉宽调制(PWM)变流器组成。其中背靠背变流器主要组件包括机侧PWM整流器、直流链、网侧PWM逆变器及辅助的滤波器<sup>[3]</sup>。有研究证明,变流器是永磁直驱风电系统的核心部件和脆弱环节,也是故障率最高的器件之一<sup>[4]</sup>。变流器中的绝缘栅双极型晶体管(IGBT)长期工作在高应力状态,工

收稿日期:2020-12-04 Received Date: 2020-12-04

\* 基金项目:国家自然科学基金(51977153,51977161,51577046)、国家自然科学基金重点项目(51637004)、国家重点研发计划“重大科学仪器设备开发”项目(2016YFF0102200)、装备预先研究重点项目(41402040301)资助

作过程中容易因为失效而导致开关管故障<sup>[5]</sup>。通常情况下,变流器的开关管故障分为开路故障和短路故障,短路故障后果较严重,产生的大电流会导致风电机组紧急停机<sup>[6]</sup>。开路故障虽然不会导致电流急剧增加,但是会导致电流中的谐波增加,如果开路故障长时间存在,可能会引发其他电力电子器件发生过热损坏进而导致风电机组发生严重的火灾事故,因此本文只研究变流器中开关管的路故障诊断。研究变流器开关管开路故障诊断对提高风电系统可靠性、降低运行成本和提升电网电能质量都具有重要意义。

目前对于变流器开关管的路故障诊断方法,根据故障特征对象类型的选取,可以分为基于电流和基于电压的两类故障诊断方法。文献[7]基于故障下的电流波形畸变,提出了一种基于归一化后的平均电流 Park 矢量的诊断方法,该方法的鲁棒性较强。而在此基础之上,文献[8]研究了平均电流 Park 矢量相角特征,并得到了和各种故障类型之间的对应关系。更进一步的,文献[9]对平均电流的 Park 矢量的幅值进行指数变换,从而得到了更高的故障诊断准确度。这几种基于 Park 矢量的方法复杂度较高,导致诊断速度较慢。文献[10]提出了一种基于电流直流分量和谐波畸变率的故障诊断方法,并使用 BP 神经网络实现对多种故障类型的快速分类。文献[11]则使用了故障发生之后的线电压误差对故障进行诊断,采用的电压和时间的双重标准提高了故障诊断的可靠性,但是这种方法需要用到电压互感器,使得诊断成本增加。文献[12]扩大了特征量的选取范围,增加了发电机的振动信号作为诊断信号,降低了漏检率和误检率,但是获取振动信号增加了诊断成本和时间。而在相似的电压源逆变器故障诊断领域,文献[13]提出了一种基于三相电流残差矢量的故障诊断方法,并引入了深度优化学习算法进行故障诊断。除此之外,文献[14-15]使用了变分模态分解和支持向量机对变流器开路故障进行故障诊断,这种方法的准确度较高。上文提到的诊断方法有的诊断成本较高,有的诊断时间较长,导致不能快速定位故障开关并进行处理。本文提出了一种基于畸变电流规律的故障诊断方法,该方法只需要获取风电变流器机侧三相电流就能快速并准确的诊断开关管开路故障,诊断成本较低并且诊断时间较短。首先,对风电变流器在不同开路故障类型下的机侧电流畸变规律进行分析和总结,并根据畸变规律设置诊断变量,然后计算出诊断变量用于故障诊断。

## 1 直驱式永磁系统结构及数学模型

### 1.1 直驱式永磁系统结构

永磁直驱系统的拓扑结构如图 1 所示,系统主要由

风机、传动系统、永磁同步发电机和两个背靠背变流器组成。连接发电机侧的变流器称为机侧变流器,连接电网的变流器称为网侧变流器。本文主要研究机侧变流器的开关管开路故障诊断。

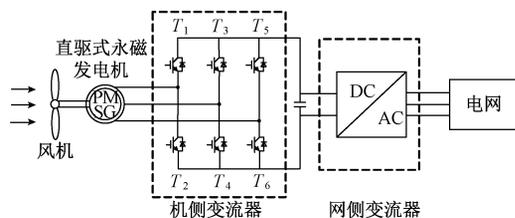


图 1 风力发电系统结构

Fig. 1 Wind power system structure diagram

可以将直驱式风机系统的运行过程概括为自然风带动风机转子旋转,实现机械能到电能的转化;机侧变流器将发电机输入不稳定的交流电转化成稳定的直流电并传递到网侧变流器;网侧变流器将直流电转化为稳定的符合并网要求的三相交流电,实现并网传输电能的最终目的<sup>[16]</sup>。

### 1.2 永磁同步发电机数学模型

机侧变流器为整流器,包含 6 个带反并联二极管的 IGBT。根据发电机的电路模型,可以得到  $dq$  坐标下的永磁同步发电机的电压方程如下:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_a i_{sd} - \omega \psi_{sq} + \psi_{sd} \\ u_{sq} = R_a i_{sq} - \omega \psi_{sd} + \psi_{sq} \end{cases} \quad (1)$$

定子磁链分量为:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_{sd} i_{sd} + \psi_f \\ \psi_{sq} = L_{sq} i_{sq} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$  是同步发电机直轴和交轴下的电压分量;  $i_{sd}$  和  $i_{sq}$  是直轴和交轴下的电流分量;  $\omega$  是转子的角速度。  $R_a$  是发电机每相绕组的电阻;  $L_{sd}$ 、 $L_{sq}$  为同步发电机的定子电感的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $\psi_{sd}$ 、 $\psi_{sq}$  为定子绕组磁链的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $\psi_f$  是定子磁链<sup>[17-18]</sup>。

在发电机运行过程中,可以认为  $\psi_f$  恒定不变,永磁同步发电机的电磁转矩表达式如下:

$$T_e = \frac{3}{2} n_p \psi_f i_{sq} \quad (3)$$

式中:  $n_p$  为发电机极对数;  $T_e$  为电磁转矩。

### 1.3 故障分类

可以将机侧变流器开关管开路故障划分为单管开路故障和多管开路故障,值得一提的是很多故障诊断方法都只支持单管开路故障诊断,虽然出现多管故障的几率较小,但是这种故障类型同样值得研究。

单管开路故障一共有 6 种,分别为 T1、T2、T3、T4、T5 和 T6 开路故障。而对于包含 6 个开关管的机侧变流器,

双管故障类型共有  $C_6^2 = 15$  种。根据两个故障开关管的位置关系,可以将双管开路故障分为双管同相故障和双管非同相故障两大类。

双管同相开路故障,是指同一相的上下两个桥臂的开关管都发生了开路故障,分别为 T1T2、T3T4 和 T5T6 发生开路故障。

双管非同相开路故障是指两个开路故障的开关管不

属于同一相。又可以细分为非同相同组和非同相不同组两类。其中非同相同组是指开路故障的两个开关管同处于上桥臂或者下桥臂,分别为 T1T3、T1T5、T3T5、T2T4、T2T6 和 T4T6 发生开路故障。非同相不同组是指开路故障的两个开关管一个在上桥臂,另一个在下桥臂,分别为 T1T4、T2T3、T1T6、T2T5、T3T6 和 T4T5 发生开路故障。21 种故障类型如表 1 所示。

表 1 开路故障分类表

Table 1 Open circuit fault classification table

故障类型	故障组合	故障类型	故障组合	故障类型	故障组合	故障类型	故障组合
单管故障	T1	双管同相故障	T1T2	双管非同相同组故障	T1T3	双管非同相不同组故障	T1T4
	T2		T1T5		T2T3		
	T3		T3T4		T3T5		T1T6
	T4		T2T4		T2T5		
	T5		T2T6		T3T6		
	T6		T5T6		T4T6		T4T5

## 2 基于电流畸变规律的故障诊断方法

### 2.1 电流畸变规律

在直驱式风电变流器机侧开关管发生开路故障时,故障开关管所在相的机侧电流,会发生严重的波形畸变。当故障开关管处于上桥臂时,故障相电流的正半周期出现畸变,电流负半周期保持正常;当故障开关管处于下桥臂时,故障相电流的负半周期出现畸变,电流正半周期保持正常,具体畸变规律表现如图 2 和 3 所示。虽然开路故障开关管的位置不同,故障相的电流出现畸变的位置也会不同,但是畸变电流的形状和特征却基本相同,表现为均有两个较长的持续过零区间。基于故障相电流的这一畸变规律,研究了一种基于机侧电流的开关管开路故障诊断方法。

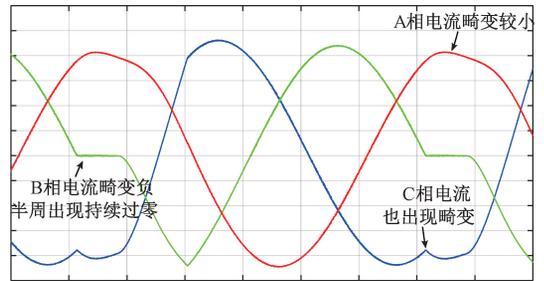


图 3 T4 开路故障电流波形

Fig. 3 T4 open circuit fault current waveform

程中也会存在误差,因此持续过零电流可能会在 0 附近存在微小的波动。因此可以预先设置一个电流过零幅值的阈值,若某时刻的电流幅值在阈值内,就可以认为该时刻的电流是过零的。

$$\delta_m = \begin{cases} 1, & |i_m| \leq I_{td} \\ 0, & |i_m| > I_{td} \end{cases}$$

$$m = a, b, c \tag{4}$$

式中:  $i_m$  为机侧三相电流;  $I_{td}$  为电流过零幅值阈值;  $\delta_m$  为  $m$  相电流的过零标志。

当某时刻的电流过零标志为 1 的时候,就可以认为该时刻电流的幅值接近于 0。从上文描述的故障情况下的电流畸变规律中可以看出,机侧变流器开关管的开路故障会导致机侧电流的持续过零。也就是说,在开关管发生开路故障的时候,对应相的电流过零标志  $\delta_m$  会出现较多时刻的保持为 1 的状态。考虑到实际系统中风电机组的控制系统是数字化的,并且采样系统得到的电流也是离散的。因此为了方便进行故障诊断,可以使用计数系统记录电流的过零标志为 1 的时刻点数  $N$ 。当  $N$  大于设定的过零时刻点阈值时,就可以判断为出现了较长时间的电流过 0。

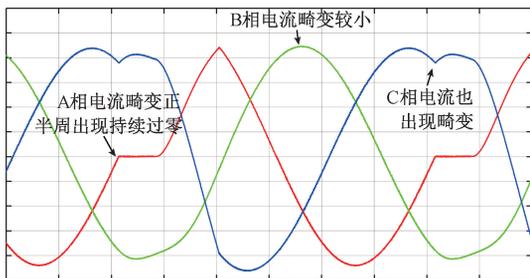


图 2 T1 开路故障电流波形

Fig. 2 T1 open circuit fault current waveform

### 2.2 基于电流畸变的方法

观察图 2 和 3 可以发现,开关管发生开路故障时,机侧电流会出现较长时间的持续过零现象,因此考虑使用这一畸变规律实现开路故障诊断。在实际的情况下,机侧电流包含一定的高频谐波,并且测量和传输数据的过

$$u_m = \begin{cases} 1, N_m \geq N_{td} \\ 0, N_m < N_{td} \end{cases} \quad (5)$$

$m = a, b, c$

式中:  $N_m$  为  $m$  相的电流过零标志位为 1 的时刻点总数;  $N_{td}$  为过零时刻点阈值;  $u_m$  为  $m$  相开路故障信号, 可以详细描述为当  $N_m$  大于  $N_{td}$  时,  $u_m = 1$ , 表示电流  $i_m$  出现了持续过零, 也就意味着  $m$  相出现了开路故障。当  $N_m$  小于  $N_{td}$  时,  $u_m = 0$ ,  $m$  相没有出现开路故障。综上所述, 可以将  $u_m$  选择为开路故障信号, 用于开路故障诊断。

根据故障相电流会持续过零这一特征, 经过上述的处理后, 能够实现开路故障的快速诊断, 并且能够准确的反映到对应的故障相, 但是还是无法确定是该相的上桥臂还是下桥臂的开关管发生了开路故障。因此还需要更多的诊断变量来进行故障开关定位。

除了 2.1 节的故障相的电流会发生畸变之外, 非故障相的电流也出现了一定的畸变。进一步研究发现, 在故障相电流刚开始出现持续过零的时间点附近, 非故障相的电流会出现特征性的变化, 并且在同一相的两个不同的开关管分别发生开路故障的时候, 非故障相的电流会出现相反的变化规律, 如图 4、5 所示。

个小区间内, 和故障相在正相序上相差 2 个相位的非故障相的电流, 会出现具有特征性的畸变。具体畸变规律如下: 当故障相的上桥臂的开关管发生开路故障的时候, 对应相位的非故障相的电流在这个小区间内会出现电流幅值先下降再上升的变化趋势, 当故障相的下桥臂的开关管发生开路故障的时候, 对应相位的非故障相的电流在这个小区间内会出现电流幅值先上升再下降的变化趋势。因此, 这一畸变规律可以用来对故障开关进行定位。为了准确的判断非故障相电流的变化趋势, 计算出电流的导数值, 根据导数值的正负来确定电流是在增加、减少还是保持不变。

$$\sigma_m = \begin{cases} +1, \frac{d(i_m)}{d(t)} > 0 \\ 0, \frac{d(i_m)}{d(t)} = 0 \\ -1, \frac{d(i_m)}{d(t)} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$m = a, b, c$

式中:  $\sigma_m$  为  $m$  相电流的变化趋势标志, 当  $m$  相的电流在增加时,  $\sigma_m = +1$ , 当  $m$  相电流减少时,  $\sigma_m = -1$ 。当  $\sigma_m$  出现从  $-1 \sim +1$  的跳变, 则可以判断出故障相的上桥臂的开关管出现了开路故障, 而  $\sigma_m$  出现从  $+1 \sim -1$  的跳变, 则可以判断出故障相的下桥臂的开关管出现了开路故障。

综上所述, 综合电流持续过 0 标志  $u_m$  和电流变化趋势标志  $\sigma_m$ , 可以进行变流器机侧开关管的开路故障诊断。在实际的应用过程中, 需要考虑实际采样电流中存在的噪声和采样过程中的误差, 因此需要在故障诊断工作前, 对机侧电流信号进行滤波处理, 并且要根据实际系统对诊断方法中的阈值参数和区间范围参数进行合理的设置, 以得到更准确的诊断结果。

综上所述, 本方法的诊断流程如图 6 所示。

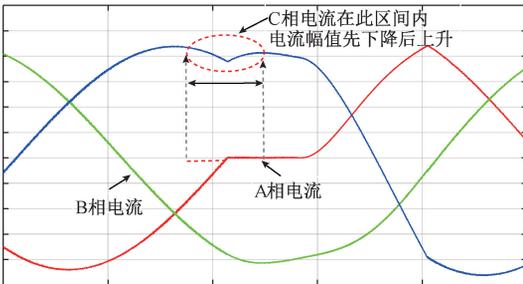


图 4 T1 开路故障 C 相电流畸变规律

Fig. 4 Distortion law of C-phase current in T1 open circuit fault

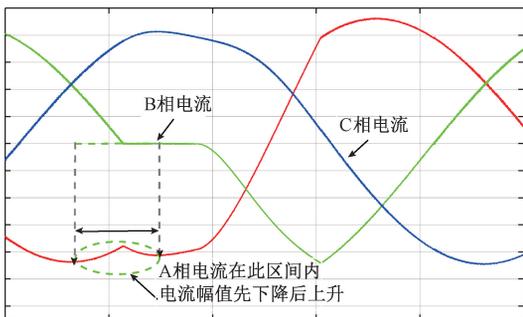


图 5 T4 开路故障 A 相电流畸变规律

Fig. 5 Distortion law of A-phase current of T4 open-circuit fault

由图 4 和 5 可知, 当机侧变流器的某一相出现开关管开路故障的时候, 对应相的电流会出现持续过零现象, 并且在此相电流刚开始出现持续过零的时间点附近的一

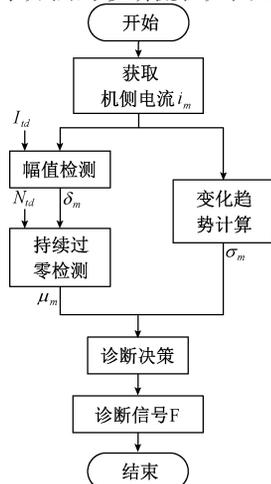


图 6 诊断流程

Fig. 6 Diagnostic flowchart

故障诊断流程的最后的诊断决策得出的诊断信号  $F$  的生成规则如下:可知当开关管 T1 故障,  $F$  数值为 1, 开关管 T2 故障,  $F$  数值为 -1, 开关管 T3 故障,  $F$  数值为 2, 开关管 T4 故障,  $F$  数值为 -2, 开关管 T5 故障,  $F$  数值为 3, 开关管 T6 故障,  $F$  数值为 -3.  $F$  的所有可能的值为 0、1、-1、2、-2、3、-3, 0 表示无故障, 除此之外的每个值对应一种开路故障类型。

### 2.3 故障诊断系统的参数设置

#### 1) 机侧电流信号降噪处理

从电流采样器中直接获取的电流采样信号, 会含有高频谐波<sup>[19]</sup>和采样误差, 为了避免误诊断, 需要先使用低通滤波器对电流信号进行滤波处理。而机侧电流中的谐波主要和机侧开关管的开关频率有关<sup>[20]</sup>, 因此本方法采用的低通滤波器的截止频率  $f_L$  设置为机侧开关管的开关频率的 1/2, 即:

$$f_L = \frac{1}{2}f_T \quad (7)$$

式中:  $f_T$  为机侧开关管的开关频率。

#### 2) 电流过零幅值阈值设定

设置电流过零幅值阈值的原因是实际的风电发电系统中机侧电流存在着少量的谐波。在电流持续过零的区间内, 实际的采样器采集到的电流信号也不会全部为 0, 而是在 0 附近的小区间内波动, 为了诊断方法的准确性, 本方法选取的电流过零幅值阈值如下:

$$I_{td} = I_m \times 3\% \quad (8)$$

式中:  $I_m$  为机侧电流基波幅值。

#### 3) 过零时刻点阈值设定

为了提高诊断的准确性, 过零时刻点阈值的大小也极为重要, 观察实际系统中正常情况下的电流过零区间的长度  $\Delta t$ , 为了避免误诊断, 本方法将过零采样点阈值设置为 10 倍的  $\Delta t$ , 而实验平台中的正常情况下的电流过零区间的长度  $\Delta t$  为一个基波周期的 0.18%, 因此设定过零时刻点阈值如下:

$$N_{td} = N_m \times 10 \times 0.18\% = N_m \times 1.8\% \quad (9)$$

式中:  $N_m$  为采样器采样的机侧电流在一个基波周期内的总采样点数。

#### 4) 非故障相的电流趋势检测区间设置

在故障相的电流刚开始出现过零的时间点附近, 上下桥臂的故障会导致非故障相电流出现不同的变化趋势, 观察实际系统发现, 此小区间的长度可以选择为和故障相的电流持续过零区间的长度相同, 但是为了捕获非故障相的电流变化趋势的全部信息, 此区间相对于故障相的电流持续过零区间需要向左平移, 本方法选择的非故障相的电流趋势检测区间设置为故障相的电流持续过零区间向左平移半个该区间的长度, 即:

$$T_{zero} = [t_1, t_2] \quad (10)$$

$$T_{td} = [t_1 - \frac{1}{2}(t_2 - t_1), \frac{1}{2}(t_1 + t_2)] \quad (11)$$

式中:  $T_{zero}$  为电流持续过零区间;  $t_1$  和  $t_2$  分别为该区间的左端点和右端点;  $T_{td}$  为非故障相电流的趋势检测区间。

## 3 实验验证与分析

### 3.1 实验平台介绍

本试验平台采用双 PWM 变流器拓扑结构, 机侧和网侧变流器都是全控变流器。机侧变流器的控制发电机按照最大功率进行发电工作, 作为设备的功率输入。网侧变流器控制母线电压稳定和并网电流的相位, 变流器额定功率为 5 kW。设备由主控板、电源、驱动板、主电路和散热器组成。结合风速与风机模型, 使用变频器控制原动机以模拟实际风机的输出转矩变化, 搭建虚拟风场和风机模拟系统。

直驱式永磁风电变流器故障模拟实验平台结构如图 7 所示。实验平台机侧开关管无故障时的机侧电流波形如图 8 所示。

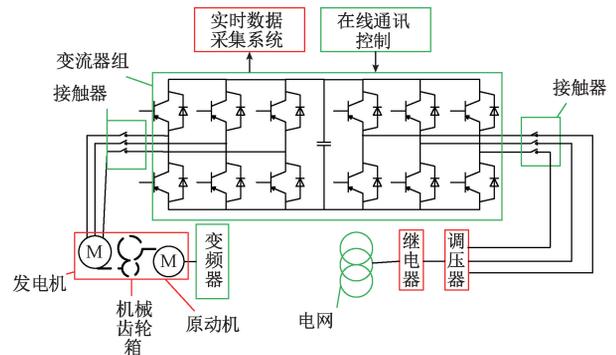


图 7 实验平台示意图

Fig. 7 Diagram of experimental platform

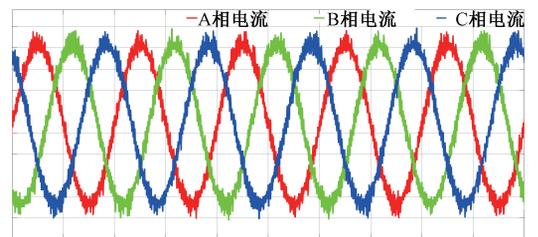


图 8 实验平台电流波形

Fig. 8 Experimental platform current waveform

### 3.2 单管故障诊断基本性能实验

T1 管和 T4 管分别发生开路故障时的诊断结果如图 9 和 10 所示, 图中给出了机侧三相交流电流  $i_m$ , 电流过

零标志  $\delta_m$ , 开路故障信号  $u_m$  以及诊断信号  $F$ 。从图中可以看出, 当电流信号过 0 的时候, 电流过零标志均能做出准确的反应, 从 0 跳变为 1。当电流出现了持续长时间的过零畸变, 并且持续时间超过了设定的过零时刻点阈值之后, 开路故障信号会从 0 跳变为 1, 表示该相出现了开路故障, 并且诊断系统会在预先设置好的时间区间内, 计算另外两相电流的变化趋势, 结合另外两相电流的变化趋势结果, 生成诊断信号  $F$ , 进而确定故障开关管, 完成故障诊断。

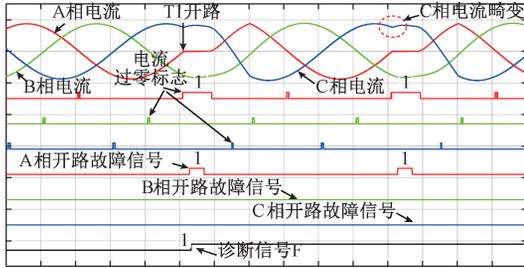


图9 T1 开路诊断结果

Fig. 9 Open diagnosis of T1

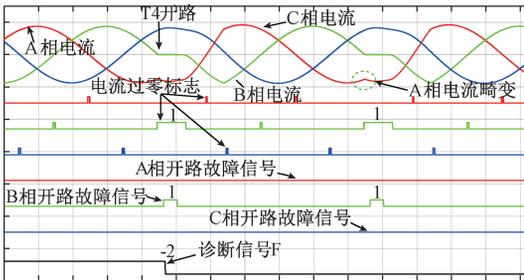


图10 T4 开路诊断结果

Fig. 10 Open diagnosis of T4

从图9、10可以看出, 发生开关管开路故障之前, 各相开路故障信号均保持为0, 当出现开路故障之后, 对应相的开路故障信号迅速跳变成1。诊断信号  $F$  在发生开路故障之前也一直保持为0, 当发生了开路故障的时候, 诊断信号  $F$  迅速跳变为特定值, 完成开路故障诊断。

### 3.3 单管故障诊断鲁棒性分析

对于故障诊断系统来说, 除了诊断的准确度之外, 鲁棒性也同样重要, 提高鲁棒性, 是避免漏诊断和误诊断的关键。对于直驱式永磁风电变流器, 导致机侧电流变化的因素都有可能对诊断结果产生影响。在实际系统中, 风速是影响机侧电流的主要因素, 自然风速的变化会影响到机侧电流的幅值。因此, 在风速变化的情况下对本方法的鲁棒性进行验证。

图11所示为模拟风速在短时间内从10 m/s增加到15 m/s情况下的诊断结果。从图11可以发现, 当风速增

加的时候, 机侧电流幅值也随之增加, 但是并没有出现较为明显的电流波形的畸变, 诊断信号也不会发生跳变。而当开关管 T1 发生开路故障时, 诊断信号  $F$  立即从 0 跳变为 1, 完成故障诊断。

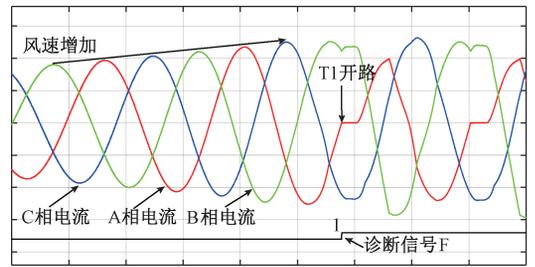


图11 风速增加下的诊断结果

Fig. 11 Diagnostic under increased wind speed

综上所述, 设计了风速发生突变的实验, 实验结果表明, 该诊断方法对风速变化的敏感程度低, 鲁棒性较好。

### 3.4 双管故障诊断方法

开关管开路故障诊断方法虽然具有准确性高, 鲁棒性强等特点, 但是此方法仅仅是针对单管开路故障设计的, 不适用于实际情况中也会出现的双管开路故障。因此, 在本节提出一种基于电流畸变规律的双管开路故障诊断方法。

分析发现, 双管开路故障对机侧电流的影响, 可以看做是单独的两个开关管分别发生开路故障时对电流影响的叠加, 并且这两种故障不会互相影响, 而在时域上是交替出现的。发生双管开路故障时, 使用3.3节提出的单管故障诊断方法, 可以得到两个故障诊断信号。根据诊断信号生成的时间先后, 可以将它们分为历史诊断信号和当前诊断信号。根据历史诊断信号和当前诊断信号, 就可以对当前存在故障的多个开关管进行确定, 因此也就可以实现双管故障诊断。记录这两个诊断信号并比较, 若二者相同, 说明当前只发生了单管开路故障, 若二者不同, 则说明当前发生了双管开路故障。在诊断信号处理模块中, 分别采用两个寄存器  $P$  和  $N$  来保存历史诊断信号和当前诊断信号, 并且随着时间的推移, 当前诊断信号会变为历史诊断信号, 同时也会出现新的诊断信号, 因此需要在每个周期下进行一次诊断信号值的记录与更新。记录和更新诊断信号的步骤如下:

- 1) 初始化寄存器  $P$  的值为 0;
- 2) 根据系统的实时状态, 求得当前诊断信号并保存在  $N$  中, 若  $N$  的值为 0, 则  $P$  的值保持不变。否则进入步骤 3);
- 3) 比较  $N$  和  $P$  的值, 若两者相等, 则保持  $P$  的值不变。否则进入步骤 4);
- 4) 将  $N$  的值赋值给  $P$ , 结束本周期的记录和更新。

记录和更新诊断信号流程如图 12 所示。

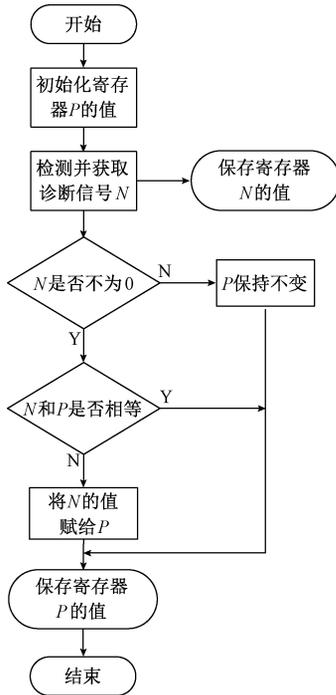


图 12 记录和更新诊断信号流程

经过上述运算之后,则可以保证寄存器  $P$  的值是历史诊断信号,而寄存器  $N$  的值是当前诊断信号。结合  $P$  和  $N$  的值,就可以确定当下是哪两个开关管发生了开路故障。如果根据  $P$  和  $N$  的值,只输出一个诊断信号,那么诊断信号就需要有 21 种不同的值,这种情况下很难直观的表示出发生开路故障的开关管。为了便于观察,将总结的 21 种开路故障类型和无故障这种情况进行统一编码,不同故障类型对应的编码如表 2 所示。在双管故障诊断方法诊断结束之后,根据诊断出来的故障开关管的组合,直接输出对应的故障编码。为方便起见,将编码分为 2 位,用  $n_1$  和  $n_2$  来表示,其中  $n_1$  的范围为 0~3,  $n_2$  的范围为 0~6。

### 3.5 双管故障诊断方法实验验证

使用 3.4 节双管故障诊断方法进行故障诊断实验,  $T1$  和  $T2$  先后发生开路故障时的诊断结果如图 13 所示,  $T1$  和  $T3$  先后发生开路故障时的诊断实验如图 14 所示。从图 13、14 可以发现,当发生开路故障的时候,  $P$  和  $N$  的值会实时更新。根据  $P$  和  $N$  的值,根据表 2 得出编码  $n_1$  和  $n_2$  的值并进行输出,使用编码就能够对发生开路故障的两个开关管进行定位,验证了 3.4 节提出的双管开路故障诊断方法的有效性。

Fig. 12 Record and update diagnostic signal flow chart

表 2 双开关管开路故障编码表

Table 2 Double switch tube open circuit fault code table

故障开关	编码	故障开关	编码	故障开关	编码	故障开关	编码
T1	01	正常	00	T1T3	21	T1T4	31
T2	02	状态		T1T5	22	T2T3	32
T3	03	T1T2	11	T3T5	23	T1T6	33
T4	04	T3T4	12	T2T4	24	T2T5	34
T5	05	T5T6	13	T2T6	25	T3T6	35
T6	06			T4T6	26	T4T5	36

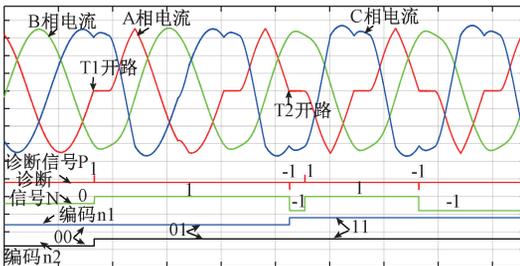


图 13 T1 和 T2 开路诊断结果

Fig. 13 T1 and T2 open circuit diagnosis results

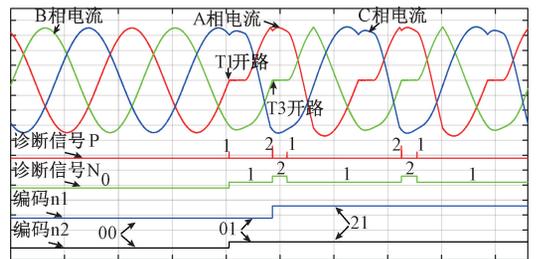


图 14 T1 和 T3 开路诊断结果

Fig. 14 T1 and T3 open circuit diagnosis results

## 4 结论

为了对直驱式永磁风电变流器开关管开路故障进行诊断,本文提出了一种基于电流畸变规律的故障诊断方

法。该方法只需要提取风电变流器机侧电流作为诊断依据,根据机侧三相电流畸变的规律,能够对机侧变流器的开关管开路故障进行诊断。实验结果表明,该方法精度较高,并且在风速突变的情况下,鲁棒性较好,不会出现误诊和漏诊。并且该方法不仅能应用于单管开路故障

的情况,对于实际中存在的双管开路故障也能够进行有效的诊断,诊断范围更加的全面。

## 参考文献

- [ 1 ] 金晓航,孙毅,单继宏,等. 风力发电机组故障诊断与预测技术研究综述 [J]. 仪器仪表学报,2017,38(5): 1041-1053.  
JIN X H, SUN Y, SHAN J H, et al. Summary of research on fault diagnosis and prediction technology of wind turbines [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5): 1041-1053.
- [ 2 ] 金晓航,许壮伟,孙毅,等. 基于生成对抗网络的风电机组在线状态监测 [J]. 仪器仪表学报,2020,41(4): 68-76.  
JIN X H, XU Z W, SUN Y, et al. Online condition monitoring of wind turbine based on generative admittedly network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020,41(4):68-76
- [ 3 ] 秦伟,冯延晖,邱颖宁,等. 基于等模补偿比和 SVPWM 八扇区划分的直驱式风力发电系统变流器容错控制 [J]. 中国电机工程学报,2019,39(2):376-385.  
QIN W, FENG Y H, QIU Y N, et al. Converter fault-tolerant control of direct drive wind power generation system based on equal mode compensation ratio and SVPWM eight-sector division [J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2019, 39(2): 376-385.
- [ 4 ] RIBRANT J, BERTLING L M. Survey of failure in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997-2005 [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2007, 22(1): 167-173.
- [ 5 ] 何怡刚,周健波,李兵. NPC 三电平中 IGBT 焊料层多物理场耦合失效分析 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019,33(4):71-78.  
HE Y G, ZHOU J B, LI B. Multi-physical field coupling failure analysis of IGBT solder layer in NPC three levels [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,2019,33(4):71-78.
- [ 6 ] 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.  
YU Y, JIANG SH H, YANG R F, et al. Diagnosis method of inverter IGBT open circuit fault [J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2011, 31(9): 30-35.
- [ 7 ] JLASSI I, ESTIMA J O, KHOJET EI KHIL S, et al. Multiple open-circuit faults diagnosis in back-to-back converters of PMSG drives for wind turbine systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2689-2702.
- [ 8 ] 黄科元,刘静佳,黄守道,等. 永磁直驱系统变流器开路故障诊断方法 [J]. 电工技术学报,2015,30(16): 129-136.  
HUANG K Y, LIU J J, HUANG SH D, et al. Permanent magnet direct drive system converter open circuit fault diagnosis method [J]. Transactions of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2015, 30(16): 129-136.
- [ 9 ] 陶松兵,柴毅,刘玉虎,等. 基于指数变换的风电并网变流器开路故障诊断 [C]. 第 30 届中国过程控制会议,2019.  
TAO S B, CHAI Y, LIU Y H, et al. Open-circuit fault diagnosis of wind power grid-connected converter based on exponential transformation [C]. 30th China Process Control Conference Abstract Collection, 2019.
- [ 10 ] 王美,谭阳红,何怡刚. 永磁直驱风电系统变流器开路故障诊断方法 [J]. 控制工程,2018,25(1):50-56.  
WANG M, TAN Y H, HE Y G. Permanent magnet direct drive wind power system converter open circuit fault diagnosis method [J]. Control Engineering, 2018, 25(1): 50-56.
- [ 11 ] 杭俊,张建忠,程明,等. 基于线电压误差的永磁直驱风电系统变流器开路故障诊断 [J]. 中国电机工程学报,2017,37(10):2933-2943.  
HANG J, ZHANG J H, CHENG M, et al. Permanent magnet direct drive wind power system converter open circuit fault diagnosis based on line voltage error [J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2017, 37(10): 2933-2943.
- [ 12 ] 施耀华,冯延晖,任铭,等. 融合电流和振动信号的永磁同步风电系统变流器故障诊断方法研究 [J]. 中国电机工程学报,2020,40(23):7750-7760.  
SHI Y H, FENG Y H, REN M, et al. Research on fault diagnosis method of permanent magnet synchronous wind power system converter based on current and vibration signals [J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2020,40(23):7750-7760.
- [ 13 ] SHI T C, HE Y G, WANG T. Open switch fault diagnosis method for pwm voltage source rectifier based on deep learning approach [J]. IEEE Access, 2019, 7: 66595-66608.
- [ 14 ] 袁媛. 基于电流信号的风电变流器开路故障诊断方法研究 [D]. 重庆:重庆大学,2017.  
YUAN Y. Research on open circuit fault diagnosis method of wind power converter based on current signal [D]. Chongqing:Chongqing University, 2017.
- [ 15 ] 刘延兴. 基于深度学习模型的风电变流器故障诊断 [D]. 重庆:重庆大学,2018.

LIU Y X. Wind power converter fault diagnosis based on deep learning model [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.

- [16] 张明锐, 尉芬. 基于比例谐振的永磁直驱风电机组高压穿越控制策略 [J]. 电气工程学报, 2018, 13(3): 1-8.

ZHANG M R, WEI F. High voltage ride control strategy of permanent magnet direct drive wind turbine based on proportional resonance [J]. Journal of Electrical Engineering, 2018, 13(3): 1-8.

- [17] 黄浩. 直驱式永磁同步风力发电系统低压穿越技术研究 [D]. 株洲: 湖南工业大学, 2018.

HUANG H. Research on low-voltage passing technology of direct drive permanent magnet synchronous wind power system [D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2018.

- [18] 刘斌, 李光辉, 王甲军, 等. 永磁同步风电机组机侧直流阻抗建模 [J]. 电气传动, 2020, 50(6): 109-114.

LIU B, LI G H, WANG J J, et al. Modeling of DC impedance of permanent magnet synchronous wind turbine [J]. Electric Drive, 2020, 50(6): 109-114.

- [19] 赵梓航, 王海云, 唐新安, 等. 风电机组变流器电流谐波水平案例分析 [J]. 电测与仪表, 2018, 55(24): 114-120.

ZHAO Z H, WANG H Y, TANG X A, et al. Wind turbine converter current harmonic level case analysis [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(24): 114-120.

- [20] 殷振环. PWM 整流器直接功率控制的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009.

YIN ZH H. Research on direct power control of PWM rectifier [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.

## 作者简介



何怡刚(通信作者), 1992 年于西安交通大学获得博士学位, 现为合肥工业大学教授, 主要研究方向为混合信号电路故障诊断、电子设备可靠性和通讯信道建模与监测等。

E-mail: 18655136887@163.com

**He Yigang** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 1992. Now he is a professor at Hefei University of Technology. His main research interests include mixed-signal circuit fault diagnosis, electronic equipment reliability, and communication channel modeling and monitoring.



谢望, 2017 年于合肥工业大学获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为电力电子线路和器件的故障诊断。

E-mail: xiewang305@163.com

**Xie Wang** received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2017. Now he is a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. His main research interests include fault diagnosis of power electronic circuits and devices.



施天成, 2013 年于合肥工业大学获得学士学位, 2019 年合肥工业大学于获得博士学位, 主要研究方向为现代电气测量。

E-mail: hfut\_stc1027@163.com

**Shi Tiancheng** received B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2013 and Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2019. His main research interest includes modern electrical measurement.