

· 风电机组运行检测技术专题 ·

基于实时电流幅值的风电整流器故障诊断方法

黄凯, 邱颖宁, 秦伟, 冯延晖

(南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要:直驱式风电系统整流器的开路故障会造成机侧交流电流半相缺失、直流侧电压波动、发电机转速波动等问题,严重影响风力发电系统的运行稳定性。文中提出一种基于实时电流幅值的永磁直驱风电系统整流器开路故障诊断方法,利用电机的运行特性来计算实时电流幅值,实现对故障的实时诊断和定位;将故障状态下的电流幅值与设定的电流幅值阈值进行比较,利用电流幅值异常所在区间来判定故障开关管位置,消除误差和外界条件变化带来的误诊断。实验结果验证了理论分析的正确性和故障诊断方法的有效性,通过与其他方法进行对比,验证了文中方法的检测速度和多管故障的诊断能力。

关键词:风力发电;永磁直驱;整流器故障;故障诊断;电流幅值

中图分类号: TM461

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2019)02-0025-07

0 引言

风力发电等新能源发电方式受到越来越多的关注。风电机组故障停运检修运维成本高,提高风电机组的可靠性成为风电机组研究中最受关注的问题之一^[1]。

直驱式风力发电系统中整流器的开路故障会导致整流器的电流输出紊乱,容易引起其他器件的次生故障,严重的会导致整流器系统损坏和系统停机,干扰电网正常运行^[2]。因此,为了提高风电系统的稳定性和减少故障引起的停机时间,需要对整流器的开路故障进行实时诊断定位。

现有的诊断方法可分为基于电流、电压、神经网络等不同参数的方法,文献[3—5]介绍了基于电流的方法,诊断速度慢,多数需要一个电流基波周期以上;文献[6—8]介绍了几种基于模式识别和神经网络的故障诊断方法,能够实现对故障的诊断和定位,但需要大量正常和故障数据进行模型训练,过于复杂,应用成本高,不同风机系统适用性差;文献[9—12]介绍了基于电压参数的故障诊断方法,采用参数为线电压、相电压、门极电压等电压信号,与设定的阈值相比较或者建立电压分析模型,进行故障诊断和定位,但该类方法需要增加额外的电压传感器,对已在运行的风电系统适用难度大,且增加系统成本的同时降低了方法的可靠性。

文中提出了一种基于实时电流幅值的风电整流器开路故障诊断方法。首先对风电系统运行特性、整流器的开路故障进行原理分析;其次,提出基

于实时电流幅值的整流器故障诊断方法,将三相电流瞬时值的故障特征转化为实时电流幅值的变化,提高了诊断方法的诊断速度,结合故障发生的电机等效电流角度区间进行故障诊断定位,提高了故障诊断方法的准确性;最后,通过实验结果验证了故障诊断方法的正确性和有效性。

1 风电整流器开路故障特征分析

1.1 风电系统运行原理

对于直驱式同步风力发电系统而言,整个风电系统机侧整流器的控制策略如图1所示。多数运行工况下,发电机侧整流器以最大功率点跟踪(maximum power point tracing, MPPT)方式控制发电机有功功率,而电网侧逆变器则控制直流电压和注入电网的无功功率^[13]。机侧变流器多采用零d轴电流控制和最大功率点跟踪,并通过空间矢量脉宽调制(space vector pulse width modules, SVPWM)方式实现对整流器的控制^[14]。

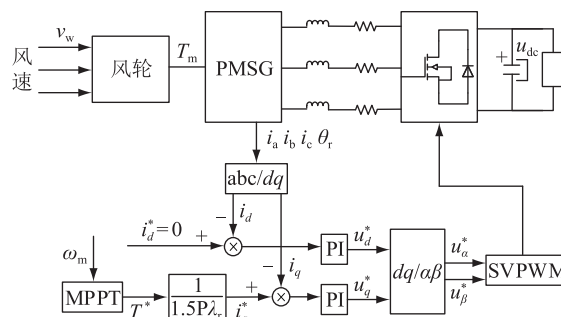


图1 直驱式风力发电机机侧变流器控制策略

Fig.1 Diagram of direct drive wind turbine generator side converter system control strategy

永磁同步发电机(permanent magnet synchronous

收稿日期:2018-11-27;修回日期:2018-12-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51505225);江苏省自然科学基金资助项目(BK20131350)

generator, PMSG)转子所处的机械角度与电角度之间的关系存在 n 倍的关系 (n 为电机的磁极对数)^[15-16]。因此,PMSG 的机械角度 θ_r 与电角度 θ_e 、定子功率因数角 φ_s 、定子电流相位角度 θ_i 之间关系如式(1)所示。

$$\theta_e = n\theta_r = \theta_i + \varphi_s \quad (1)$$

1.2 整流器开路故障特征分析

图 2 是机侧整流器的拓扑结构,其中 S1~S6 为变频器的功率开关管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT);D1~D6 为对应 IGBT 反并联的续流二极管; R 为发电机线间绕组; L 为电机线间电感; P 点为直流侧正极; N 点为直流侧负极; i_a, i_b, i_c 为发电机输出的三相电流; C 为直流侧稳压电容。

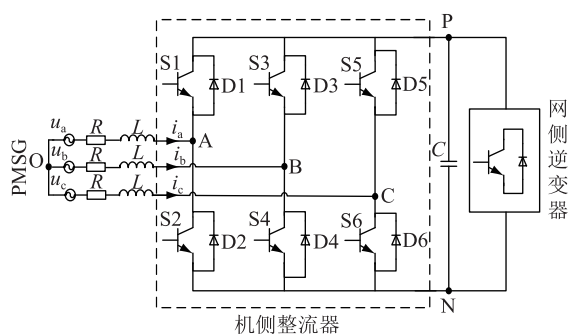


图 2 机侧整流器拓扑结构示意图

Fig.2 Structure of the machine side converter

当发电机正常稳定运行时,三相输入的电流波形谐波很少,根据 SVPWM 原理,发电机发出的三相电流波形及电流流过的开关管、二极管如图 3 所示。

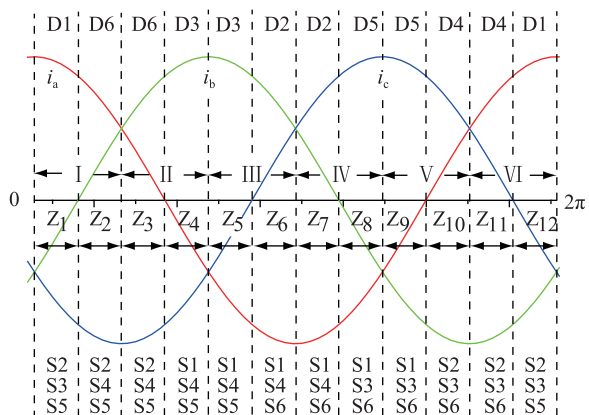


图 3 正常情况下三相电流及导通的 IGBT 和二极管

Fig.3 Three-phase current and conductive IGBT, diode under normal conditions

图中 I~VI 对应 SVPWM 方法中的 6 个矢量扇区。在一个 $0 \sim 2\pi$ 基波周期内,电流可以平均分为 12 个区域(图中 $Z_1 \sim Z_{12}$),每个区间大小为 $\pi/6$ 。当特定 IGBT 开关管发生开路故障时,会导致在故障开关管作用区间内的电流交流分量缺失,引入直流

分量,发生电流半相缺失现象^[17-18]。

风力发电机输出的三相交流电为三相对称系,当整流器发生 IGBT 开路故障时,会导致对应相上的电流缺失。根据基尔霍夫电流定律,某一相桥臂上的开路故障也会导致其他相桥臂上的电流发生畸变。

对于 IGBT 开关管在正常与故障情况下的工作状态,以 A 相桥臂为例,对 A 相上管 S1、A 相下管 S2 在故障与正常模式下整流器的工作状态进行分析,不同状态下的工作状态分析如图 4 所示。电流方向以电流流出电机为正,开关管在整流器中位置如图 2 所示,S1、S2 为 A 相桥臂上的开关管;D1、D2 为相应的反并联二极管;A 点为 A 相桥臂中点。

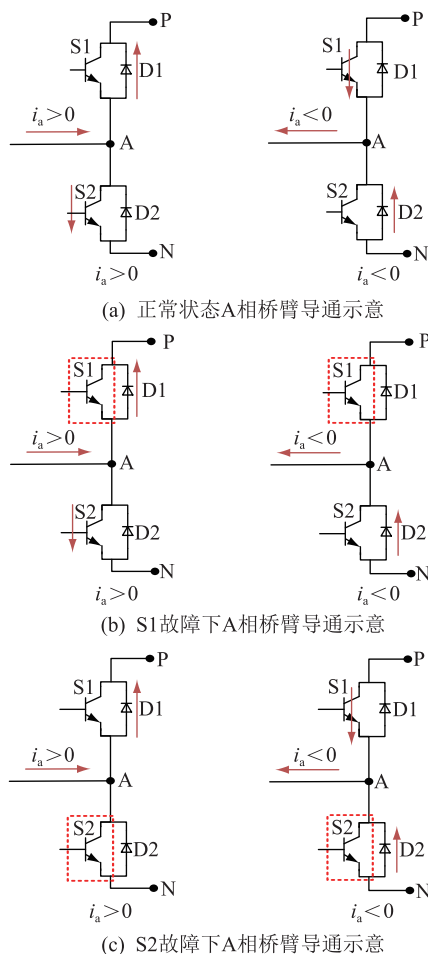


图 4 正常与故障状态下 A 相桥臂的工作状态分析

Fig.4 Analysis of working state of A-phase bridge arm under normal and fault conditions

(1) 正常模式下,开关管 S1、S2 与反并联二极管 D1、D2 共同完成 A 相电流在电机与直流端之间的流动。当 $i_a > 0$ 时,电流通过 S2 和 D1 从电机流向直流端;当 $i_a < 0$ 时,电流通过 S1 和 D2 从直流端流向电机,如图 4(a) 所示。

(2) S1 发生开路故障时, S1 无法导通,导致 i_a

<0 时,电流只能通过 D2 续流;而当 $i_a > 0$ 时,电流可以通过 S2 和 D1 续流,不受 S1 开路故障影响,如图 4(b)所示。

(3) S2 发生开路故障时,S2 无法导通,导致 $i_a > 0$ 时,电流只能通过 D1 续流;而当 $i_a < 0$ 时,电流通过 S1 和 D2 续流,不受 S2 开路故障影响,如图 4(c)所示。

(4) 对于反并联二极管 D1,其导通条件是 A 相电压与高于直流端正极电压,即 $U_{AP} > 0$ 、 $U_{AP} > U_{BP}$ 且 $U_{AP} > U_{CP}$ 时,D1 导通;对于 D2,其导通条件是 A 相电压低于负极电压,即 $U_{AN} < 0$ 、 $U_{AN} < U_{BN}$ 且 $U_{AN} < U_{CN}$ 时,D2 导通。

因此,当开关管发生开路故障时,整流器的开路故障特征主要包括:(1) 故障相上的电流在故障作用区间内会发生半相缺失现象,瞬时值近似为 0 A;(2) 故障状态下,当桥臂中点与直流侧正负极之间电压关系满足时,由于闭环控制会产生反并联二极管导通产生的电流续流;(3) 由于发电机三相为三相对称系,某一相桥臂发生开路故障不仅会导致该相电流近似为 0 A,也会导致其他相的电流发生相应畸变。

当整流器开关管发生故障时,结合图 3 中的区间划分,各个开关管的开路故障对电流波形的影响区间如表 1 所示。

表 1 故障开关管作用区间
Table 1 Fault switch tube influence zone

项目	故障 IGBT					
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
受影响角度	$[\pi/2, 3\pi/2)$	$[3\pi/2, \pi/2)$	$[7\pi/6, \pi/6)$	$[\pi/6, 11\pi/6)$	$[11\pi/6, 5\pi/6)$	$[5\pi/6, 11\pi/6)$
受影响区间	Z_4-Z_9	$Z_{10}-Z_3$	Z_8-Z_1	Z_2-Z_7	$Z_{12}-Z_5$	Z_6-Z_{11}

2 基于实时电流幅值的故障诊断方法

发电机输出的三相电流瞬时值随风速、负载、电流周期等运行条件变化十分复杂,故障导致的电流瞬时值的半相缺失不易于直接用来作为诊断变量进行故障诊断和定位。

通过对发电机机械特性与电流电气特性的对比利用,将复杂变化的三相电流瞬时值,转化为实时电流幅值,能够有效转化电流故障特征,准确区分故障相与非故障相电流状态。无故障时,三相电流的实时电流幅值保持相等,故障后,故障相实时电流幅值在故障作用区间内会变为 0 A 附近波动。

发电机发出的三相交流瞬时值为电流幅值与电流相位角度余弦值的乘积,如式(2)所示。

$$\begin{cases} i_a = i_{ma}^* \cos \theta_i \\ i_b = i_{mb}^* \cos(\theta_i - 2\pi/3) \\ i_c = i_{mc}^* \cos(\theta_i - 4\pi/3) \\ i_\alpha = 2/3 i_a - (i_b + i_c)/3 \\ i_\beta = (i_b - i_c)/\sqrt{3} \\ \theta_i = \tan^{-1}(i_\beta/i_\alpha) \end{cases} \quad (2)$$

式中: i_{ma}^* , i_{mb}^* , i_{mc}^* 分别为 A、B、C 三相对应的电流幅值; i_a, i_b, i_c 为 A、B、C 三相电流的瞬时值; i_α, i_β 为三相电流 i_a, i_b, i_c 在 $\alpha\beta$ 坐标系下的 α 轴分量和 β 轴分量; θ_i 为三相电流的相位角度。

由于故障状态下的电流瞬时值会变为 0,经式(3)变换计算得到的角度值 θ_i 不再与 θ_r, φ_s 保持式(1)的对等关系。同时,由式(1)可得到整流器输出的三相电流相位角度 θ_i 与发电机转子所处的机械角度 θ_r 和运行功率因数 φ_s 之间的关系,并将 $n\theta_r - \varphi_s$ 定义为等效电流角度 θ_m ,三者之间关系表达式如式(5)所示。进行实时电流幅值计算时,将电流相位角度 θ_i 替换为 θ_m 以保证实时电流幅值的准确。

$$\theta_i = n\theta_r - \varphi_s = \theta_m \quad (4)$$

故障状态下,实时电流幅值由于电流畸变影响在计算过程中会产生正负变化的情况,会对故障诊断方法的判断产生干扰,因此将计算得到的电流幅值取绝对值,即:

$$\begin{cases} i_{ma} = |i_a / \cos(\theta_m)| \\ i_{mb} = |i_b / \cos(\theta_m - 2\pi/3)| \\ i_{mc} = |i_c / \cos(\theta_m - 4\pi/3)| \end{cases} \quad (5)$$

由于余弦函数值域为 $[-1, 1]$,而且在 $\pi/2, 3\pi/2$ 附近角度区间余弦值会变得很小,对应余弦值的范围仅为 $(-0.1, 0.1)$ 。电流细小的纹波会在该区间内还原为失真的电流幅值,对故障诊断定位产生干扰。因此,为了避免产生误诊断,将各相电流等效角度处于 $[17\pi/36, 19\pi/36], [53\pi/36, 55\pi/36]$ 的计算结果排除在外,默认该区域没有发生开路故障。故障排除角度区间总宽度为 $\pi/9$,占整个电流周期 2π 的 $1/18$,不足 6%,对故障识别和检测的影响很小。图 5 是正常与故障状态下角度区间去除前后的对比,处理后的实时电流幅值失真明显减少,有利于提高故障诊断的准确性。排除部分容易造成误诊断的区间不会降低故障诊断精度,而且有助于提高故障诊断的准确性。

在实际运行中,当开路故障发生时,故障相的瞬时电流会变为 0 A 附近,同时伴随纹波振荡,还原出的实时电流幅值体现故障特征,是一个 0 A 附近的电流幅值,因此要选取一个较小的电流幅值作为

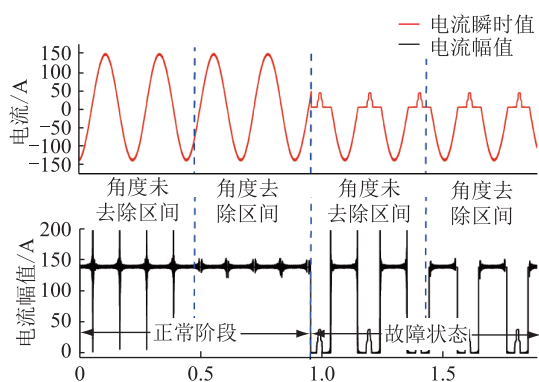


图5 角度区间去除的对比

Fig.5 Comparison of angle range removal

诊断阈值;在角度去除区间以外的区域,正常运行条件下三相电流还原得到的实时电流幅值理论上是远远大于额定电流幅值的 10%的,而故障下的实时电流幅值又会降到 0 A 附近,因此,设定诊断阈值为 10%的正常电流幅值,可以区分故障状态与正常状态,保证开路故障检测的准确性和检测速度。同时对诊断阈值进行适当调整,能够适应较小正常幅值时的检测准确性要求。

设定实时电流幅值的阈值区间后,当某一相电流幅值绝对值小于阈值时,认定该相电流幅值异常,判定该桥臂上的 IGBT 发生开路故障,发出故障信号,故障诊断方法的诊断流程如图 6 所示。

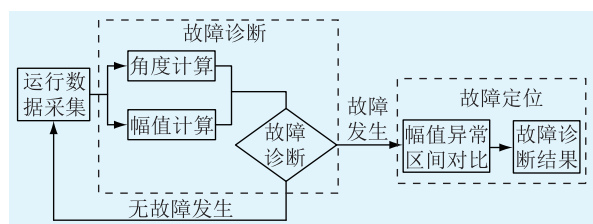


图6 故障诊断方法结构框图

Fig.6 Block diagram of fault diagnosis algorithm

根据表 1 中的故障开关管作用区间,结合故障相实时电流幅值 i_{ma} , i_{mb} , i_{mc} 异常情况,通过电流幅值低于阈值时 θ_m 的区间来综合判断故障发生位置。故障开关管作用区间与受故障影响幅值异常区间的对应关系如表 2 所示。

表2 故障开关管诊断

Table 2 Diagnosis table of fault switch tube

异常电流幅值	幅值异常区间	θ_m 区间	诊断结果
i_{ma}	$[\pi/2, 3\pi/2)$	Z_4-Z_9	S1
	$[3\pi/2, \pi/2)$	$Z_{10}-Z_3$	S2
i_{mb}	$[7\pi/6, \pi/6)$	Z_8-Z_1	S3
	$[\pi/6, 7\pi/6)$	Z_2-Z_7	S4
i_{mc}	$[11\pi/6, 5\pi/6)$	$Z_{12}-Z_5$	S5
	$[5\pi/6, 11\pi/6)$	Z_6-Z_{11}	S6

故障按等效电流角度 θ_m 区间进行划分,区间分布与图 3 一致。即:当检测到 A 相实时电流幅值 i_{ma} 异常,且 θ_m 位于区间 $[\pi/2, 3\pi/2)$ 内时,判定 A 相上桥臂 S1 管发生开路故障。其他故障判断逻辑相同。

3 实验验证

3.1 实验平台

为了验证故障诊断结果,搭建的永磁直驱式风力发电机机侧变流器平台参数如表 3 所示,直驱式风力发电机侧变流系统实验平台结构如图 7 所示。采用数字信号处理器(digital signal processing, DSP)作为系统控制器;通过变频器驱动异步电机拖动永磁同步发电机模拟风力发电系统中风轮拖动发电机工作过程。设定异步电机转动频率为 2 Hz,开关管通断以及数据采集频率为 4 kHz。移除驱动电路的脉宽调制(pulse width modules, PWM)信号模拟开关管开路故障。实验前测量正常情况下电流幅值约为 2.2 A,设定故障诊断阈值为 0.25 A,当电流幅值小于阈值时进行故障诊断与定位。

表3 电机平台参数

Table 3 Wind turbine and generator parameters

参数	数值	参数	数值
额定功率/kW	3.0	转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	0.003 869
线间电阻/ Ω	0.4	额定转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	1 500
线间电感/mH	2.42	极对数	4

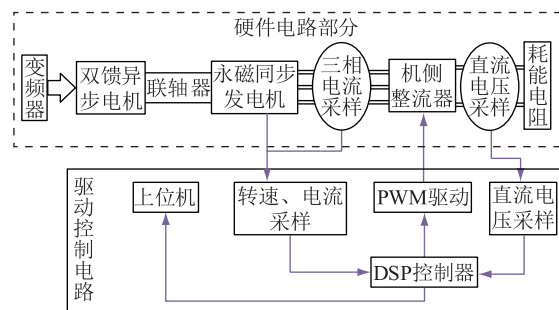


图7 直驱式风力发电机侧变流系统实验平台

Fig.7 Direct-drive wind turbine side converter system experimental platform

3.2 实验对比验证

实验平台通过各采样电路记录电机及整流器运行参数,通过数据连接线传输给 DSP,软件程序控制 DSP 输出 PWM 信号控制整流器,通过故障诊断方法对整流器运行状态进行监测。

3.2.1 开路故障

通过实验平台模拟不同故障类型,分别对正常状态、S1 管开路故障、S2 管开路故障和 S1、S2 双管

开路故障进行验证,图8是系统平台在4种工况下的运行参数。

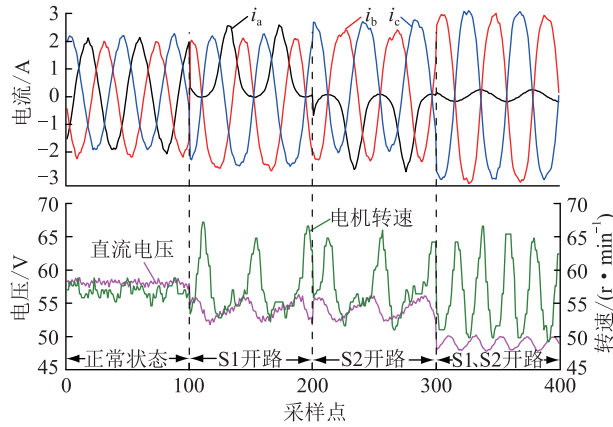


图8 不同状态下实验平台运行参数

Fig. 8 Experimental platform operating parameters in different states

从图8可以看出,正常状态下发电机运行稳定,输出电流为三相正弦波,转速、直流电压保持稳定;当整流器发生S1(或S2)开路故障时,发电机输出电流波形受故障影响,A相电流发生负(正)半相缺失,B、C相电流同时产生畸变,发电机转速产生明显波动,直流电压平均值减小,并产生明显波动;当整流器同时发生S1、S2开路故障时,发电机输出电流波形受故障影响,A相电流交替发生正、负半相缺失,B、C相电流波形在对应区间内产生更严重畸变,对应区间内,发电机转速产生明显波动,直流电压产生明显波动,电压平均值进一步降低。

3.2.2 故障检测及对比

图9分别为S1、S2和S1、S2开路故障运行条件下的文中方法的诊断结果。图中阴影区域代表等效电流角度位于区间 $[3\pi/2, \pi/2)$ 内,白色区域为区间 $[\pi/2, 3\pi/2)$;竖直虚线表示故障发生时刻,水平虚线代表故障诊断的判断阈值0.25 A。

从图9可以看出,正常状态下三相电流的实时电流幅值保持相等,均大于诊断阈值,故障诊断方法判断无故障产生;当S1或S2故障发生时,A相实时电流幅值 i_{ma} 发生变化,迅速下降并小于诊断阈值,此时根据表2中的故障诊断对应关系,判断出故障开关管所在位置;当S1、S2同时发生开路故障时,三相实时电流幅值产生明显变化, i_{ma} 在几乎全部区间内小于诊断阈值, i_{mb} 、 i_{mc} 在全周期故障区间内产生明显畸变,小于诊断阈值的区间分别位于等效电流角度区间 $[3\pi/2, \pi/2)$ 和区间 $[\pi/2, 3\pi/2)$ 内,诊断方法根据表2的对应关系判断系统发生S1、S2开路故障。

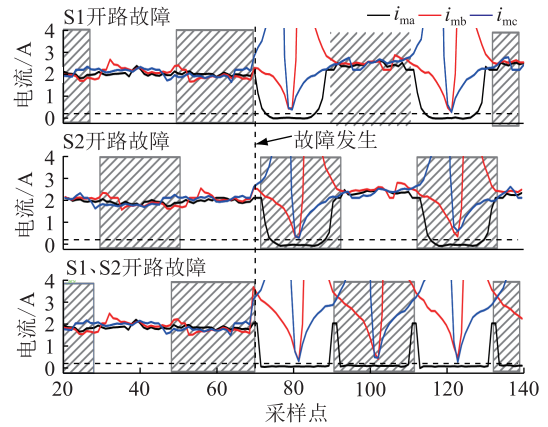


图9 不同故障下的方法诊断结果

Fig.9 Algorithm diagnosis results under different faults

为对比故障诊断方法的检测性能,与归一化电流平均值(normalised current average value, NCAV)故障检测方法^[19-20]进行对比。以S1单管开路故障和S1、S2双管开路故障为诊断对象,通过采集运行数据、设定故障类型和故障发生时间来对比检测速度、检测准确性。

NCAV检测方法主要对三相电流 i_a, i_b, i_c 进行取绝对值和做周期平均值计算,然后利用绝对值和平均绝对值计算检测变量 r_n 和 S_n 。设定检测变量的阈值,通过检测 r_n 和 S_n 的变化情况进行诊断和定位。其中 r_n 和 S_n 的计算公式如式(6)所示。

$$\begin{cases} r_n = \frac{i_n}{|i_n|} \\ S_n = \frac{2|i_n|}{|i_l| + |i_m|} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $l, m, n \in \{a, b, c\}, l \neq m \neq n$; i_n 对应三相电流 i_a, i_b, i_c 。

图10为2种故障情况下2个方法的诊断结果。图中一个电流基波周期约为42个采样点,设定于70采样点时发生开路故障,2种方法分别进行故障诊断和定位。

当S1发生开路故障时,文中方法能够迅速转化故障特征,并于74采样点附近定位S1故障,而NCAV方法需要对3个诊断变量 r_n 进行比较之后才能够定位,故障特征转化不明显,与80采样点附近定位S1故障,诊断速度慢;

当S1、S2同时发生开路故障时,文中方法分别在2个故障的作用区间内的72、94采样点定位S1、S2开路故障,故障定位迅速准确;相比NCAV方法, r_n 参数已不能检测同桥臂上下同时开路故障,需引入 S_n 进行诊断,约一个电流基波周期后的108采样点位置才能够定位故障位置,NCAV方法的检测速

度明显慢于文中方法,而且对于多管故障的检测需要引入新的诊断参数。2种方法的对比结果如表4所示。

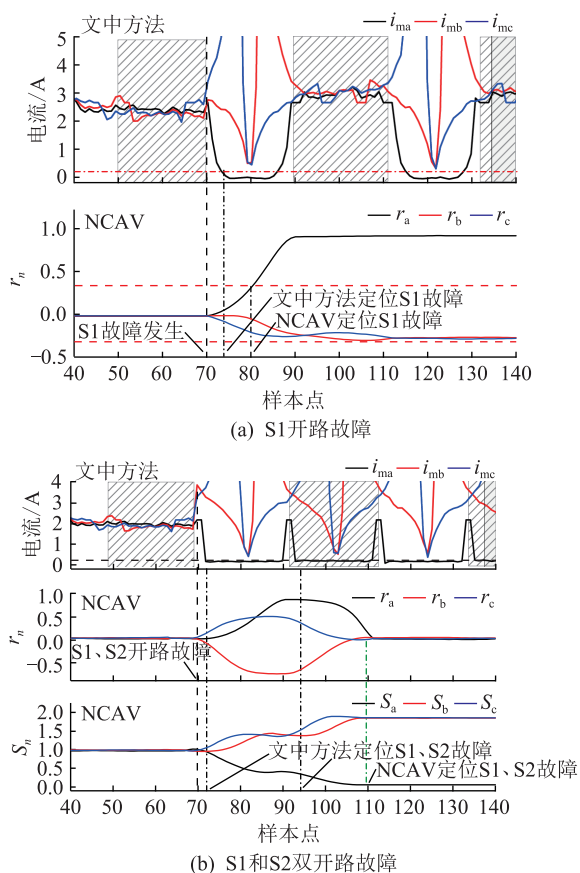


图10 不同故障下的方法对比结果

Fig.10 Algorithm comparison results under different faults

表4 故障诊断方法对比

Table 4 Comparison of fault diagnosis methods

诊断方法	检测速度	变量干扰	多管故障	复杂程度
文中方法	快	无	可直接检测	一般
NCAV	慢	存在	引入其他参数	简单

4 结论

文中在分析了功率管开路故障对电流幅值影响的基础上,提出基于实时电流幅值的风电整流器开路故障诊断方法。实验结果对比验证了该故障诊断方法的有效性、准确性和检测性能,并得到以下结论:

(1) 所提方法将正常与故障状态下的发电机电流瞬时值变化转化成实时电流幅值的变化,能够实现故障特征直接转化,成为更加容易识别判断的诊断量,能够迅速诊断定位故障开关管;

(2) 所提方法充分利用发电机的基本运行特性,将发电机的机械运转特性与电气特性相结合,

基于电流幅值和转子角度区间双重标准的判断定位方法,减少误差和运行波动等因素引起的误诊断,提高了故障诊断方法的准确性和可靠性。

本文得到江苏风力发电工程技术中心开放基金项目(No.ZK18-03-01)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] SONG Y, WANG B. Survey on reliability of power electronic systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1):591-604.
- [2] BALA S, PAN J, DAS D, et al. Lowering failure rates and improving serviceability in offshore wind conversion-collection systems[C]//Power Electronics and Machines in Wind Applications. IEEE, 2012:1-7.
- [3] ESTIMA J O, CARDOSO A J M. A new approach for real-time multiple open-circuit fault diagnosis in voltage-source inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 47(6):2487-2494.
- [4] IM W S, KIM J M, LEE D C, et al. Diagnosis and fault-tolerant control of three-phase AC-DC PWM converter systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(4):1539-1547.
- [5] QIU Y, JIANG H, FENG Y, et al. A new fault diagnosis algorithm for PMSG wind turbine power converters under variable wind speed conditions[J]. Energies, 2016, 9(7):548.
- [6] DUAN P, XIE K G, ZHANG L, et al. Open-switch fault diagnosis and system reconfiguration of doubly fed wind power converter used in a microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3):816-821.
- [7] JUNG S M, PARK J S, KIM H W, et al. A MRAS-based diagnosis of open-circuit fault in PWM voltage-source inverters for PM synchronous motor drive systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5):2514-2526.
- [8] ZIDANI F, DIALLO D, BENBOUZID M E H, et al. A fuzzy-based approach for the diagnosis of fault modes in a voltage-fed PWM inverter induction motor drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(2):586-593.
- [9] 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 Jun, ZHANG Jianzhong, CHENG Ming, et al. Fault diagnosis of open-circuit faults in converters of direct-driven permanent magnet wind power generation systems based on line voltage errors[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10):2933-2943.
- [10] SHAHBAZI M, POURE P, SAADATE S. Real-time power switch fault diagnosis and fault-tolerant operation in a DFIG-based wind energy system[J]. Renewable Energy, 2018, 116.
- [11] 姜保军, 安群涛. 基于运行模式分析的逆变器功率管开路故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(24):30-37.
JIANG Baojun, AN Quntao. A novel diagnostic technique for

- open-switch faults of inverters based on operating mode analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(24): 30-37.
- [12] 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.
- [13] YU O S, PARK N J, HYUN D S. A novel fault detection scheme for voltage fed PWM inverter[C]//IEEE Industrial Electronics, IECON 2006, Conference on IEEE, 2007: 2654-2659.
- [14] 朱志键,唐卫民. 三相电压型 PWM 整流器的新型双闭环控制方法[J]. 电力工程技术, 2018,37(1):86-90.
ZHU Zhijian, TANG Weimin. Anovel double closed loop control strategy of three-phase voltage-sourced PWM rectifier [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018,37(1): 86-90.
- [15] WU B, LANG Y, ZARGARI N, et al. Power conversion and control of wind energy systems [M]. IEEE Press, 2011: 228-264.
- [16] 曹红,陈耀,王冬,等.基于模糊转矩的永磁同步风力发电机输出功率的平滑控制策略研究[J].陕西电力,2017,45(3):11-16,22.
CAO Hong, CHEN Yao, WANG Dong, et al. Fuzzy torque based output power smoothing control strategies for direct drive permanent magnet synchronous wind turbine[J]. Shaanxi Electric Power, 2017,45(3):11-16,22.
- [17] 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.
- [18] 杨林,曾江,杨清波. 三电平逆变器简化 SVPWM 策略及其误差电流分析[J]. 广东电力,2017,30(12):48-54.
YANG Lin, ZENG Jiang, YANG Qingbo. Analysis on simplified SVPWM strategy for three-level inverter and its error current[J]. Guangdong Electric Power,2017,30(12):48-54.
- [19] 秦伟,冯延晖,黄凯,等. 基于 NCAV 和电路等效替换的 PWM 整流器容错控制系统[J]. 电力工程技术,2017,36(6):84-89,131.
QIN Wei, FENG Yanhui, HUANG Kai, et al. Fault tolerant control system of PWM rectifier based on NCAV and circuit equivalent replacement[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017,36(6):84-89, 131.
- [20] FREIRE N M A, ESTIMA J O, CARDOSO A J M. Open-circuit fault diagnosis in PMSG drives for wind turbine applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(9):3957-3967.

作者简介:



黄凯

黄凯 (1993),男,硕士在读,研究方向为风力发电系统变流器故障诊断(E-mail:huangkai807@njust.edu.cn);

邱颖宁 (1977),女,副教授,硕士生导师,研究方向为风力发电机故障诊断与可靠性;

秦伟 (1994),男,硕士在读,研究方向为直驱式风力发电系统变流器故障诊断及容错控制。

Fault diagnosis algorithm for wind power rectifier based on real-time current amplitude

HUANG Kai, QIU Yingning, QIN Wei, FENG Yanhui

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The open circuit fault of the direct-drive wind power system converter causes problems such as half-phase loss of AC current on the machine side, voltage fluctuation on the DC side, fluctuation of generator speed, etc., which seriously affects the operational stability of the wind power generation system. A fault diagnosis method for open-circuit fault of permanent magnet direct-drive wind power system based on real-time current amplitude is proposed. The real-time current amplitude is calculated by using the running characteristics of the motor, so that the fault diagnosis algorithm can diagnose and locate the fault in real time. Comparing the current amplitude in the fault state with the set current amplitude threshold eliminates the misdiagnosis caused by errors. The position of the abnormality of the current amplitude is used to determine the position of the fault switch tube. Experimental results verify the correctness of the theoretical analysis and the effectiveness of the fault diagnosis method. Compared with other methods, the detection speed of the method and the diagnostic capability of multiple switch faults are verified.

Keywords: wind power generation; permanent magnet synchronous generator; rectifier fault; fault diagnosis; current amplitude

(编辑 方晶)