

基于变流器网侧电流的双馈风力发电机转子绕组故障诊断

朱玲, 王建锋, 时维俊

(江苏省电力公司检修分公司, 江苏泰州 225300)

摘要: 双馈风力发电机转子绕组状态监测与故障诊断技术能够及时发现并诊断转子绕组故障, 有效地降低风电场的运行和维护费用。首先根据双馈风力发电机的数学模型和转子绕组故障模拟方法在电力系统电磁暂态仿真软件(PSCAD)环境中建立转子绕组的故障模型, 通过仿真分析出变流器网侧电流的故障特征频率; 然后搭建双馈风力发电机的故障实验平台, 并对不同运行状态和不同故障程度下的录波数据进行频谱分析, 由此验证转子绕组故障时变流器网侧电流的特征频率, 且当故障严重程度加剧时, 故障特征频率的幅值会增大。

关键词: 双馈风力发电机; 转子绕组故障; 变流器网侧电流; 实验平台

中图分类号: TM307

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2016)03-0076-04

近年来随着风电机组装机容量的逐渐增大, 以及海上风电的发展, 对风力发电机组进行预防性的维护变得非常重要。这不仅保证了风电机组运行可靠性, 而且也有效降低了运行和维护费用, 其中海上风电场中的运行和维护费用约占总能源投资成本的30%。双馈风电机组是目前应用于风力发电的一种主流机型, 转子绕组通过电刷和滑环由三相变频双向背靠背变流器接到电网进行励磁。发电机本身的故障和背靠背变流器故障都可能造成电机不能正常运转。对这条支路上设备状态检测和诊断的最好方案是通过变流器网侧电流的检测来实施对设备的状态监测^[1]。双馈风力发电机组10%的故障是由转子绕组引起的, 当发生早期的不平衡故障时, 机组仍可继续运行, 但若不能及时检测而导致故障严重程度加剧时, 将会使转子电流显著增大, 转子绕组温度升高, 还会引起发电机转速、有功功率等产生振荡, 甚至被迫停机。因此, 利用变流器网侧电流诊断转子绕组故障, 可以更加全面地反映系统的故障信息。

目前国内外针对双馈风力发电机转子绕组故障诊断的研究比较少, 还处于起步阶段。文献[2-4]都是针对异步电机转子绕组早期故障进行研究, 再根据合适的特征方法和特征信号诊断出故障; 文献[5]提出采用转子电流、转子电压信号来诊断转子绕组的不平衡故障。文献[6]进一步分析了转子变换器不同的控制策略与选取故障特征信号的关系。考虑到背靠背变流器的故障率比较高, 以及网侧电流在实际工程中更易于提取, 故文中采用网侧电流作为转子绕组故障分析的特征信号, 同时它还能反映出变流器的故障信息。利用电力系统电磁暂态仿真软件(PSCAD)建立转子绕组的故障模型, 通过仿真分析出变流器网侧电流的特征频率; 搭建双馈风力发电机的故障实验平台, 对录波数据

进行频谱分析验证网侧电流的故障特征频率, 从而诊断出转子绕组早期的不平衡故障。

1 双馈风力发电机转子绕组故障模型

1.1 DFIG 的数学模型

假设发电机为三相对称的理想电机, 按照电动机正方向的规定, 不计零轴分量, 在 d, q 轴坐标系下, 建立双馈异步发电机的数学模型^[7], 电压方程:

$$\begin{cases} u_{sd} = p\Psi_{sd} + R_s i_{sd} - \omega_1 \Psi_{sq} \\ u_{sq} = p\Psi_{sq} + R_s i_{sq} + \omega_1 \Psi_{sd} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_{rd} = p\Psi_{rd} + R_r i_{rd} - \omega_2 \Psi_{rq} \\ u_{rq} = p\Psi_{rq} + R_r i_{rq} + \omega_2 \Psi_{rd} \end{cases} \quad (2)$$

磁链方程:

$$\begin{cases} \Psi_{sd} = L_{ss} i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \Psi_{sq} = L_{ss} i_{sq} + L_m i_{rd} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Psi_{rd} = L_m i_{sd} + L_{rr} i_{rd} \\ \Psi_{rq} = L_m i_{sq} + L_{rr} i_{rq} \end{cases} \quad (4)$$

电磁转矩方程:

$$T_e = 3n_p L_m (i_{sq} i_{rq} - i_{sd} i_{rd}) / 2 \quad (5)$$

转子运动方程:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (T_m - T_e) \quad (6)$$

式中: u, i, Ψ 分别为电压、电流、磁链; n_p 为电机极对数; R_s, R_r 分别为定子、转子电阻; $\omega_2 = \omega_1 - \omega_r$ 为转差电角速度, ω_1 为 d, q 轴坐标系相对于定子的电角速度, ω_r 为转子的电角速度; $L_{ss} = L_s + L_m, L_{rr} = L_r + L_m, L_s, L_r$ 分别为定子、转子漏感, L_m 为定转子互感; T_e, T_m 分别为电磁转矩和机械转矩; J 为转动惯量; p 为微分算子。

1.2 转子变换器的矢量控制

转子变换器的控制目标是实现双馈感应电机定子侧有功功率和无功功率的解耦控制, 文中选用定子磁

链定向,取定子磁链方向与 d 轴重合,则:

$$\begin{cases} \Psi_{sd} = \Psi_s \\ \Psi_{sq} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)代入式(4)中,有:

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{\Psi_s - L_m i_{rd}}{L_s} \\ i_{sq} = \frac{-L_m i_{rq}}{L_s} \end{cases} \quad (8)$$

忽略发电机的定子电阻及暂态过程,并将磁链方程代入电机的定子电压方程有:

$$\begin{cases} u_{sd} = 0 \\ u_{sq} = \omega_1 \Psi_{sd} = U_s \end{cases} \quad (9)$$

已知定子侧有功功率和无功功率表达式:

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} (u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq}) \\ Q_s = \frac{3}{2} (-u_{sd} i_{sq} + u_{sq} i_{sd}) \end{cases} \quad (10)$$

将式(8)、(9)代入式(10)中,即有:

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} U_s \frac{L_m}{L_s} i_{rq} \\ Q_s = \frac{3}{2} U_s \frac{L_m}{L_s} (\frac{U_s}{2\pi f_s L_m} - i_{rd}) \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可知,定子有功功率和无功功率分别与转子电流的转矩分量 i_{rq} 和励磁分量 i_{rd} 成线性关系,通过独立调节转子电流的转矩分量、励磁分量,即可对发电机输出功率进行解耦控制。

1.3 网侧变换器的矢量控制

网侧变换器的控制采用基于电网电压定向的矢量控制,该方案用于电网与电网侧变流器之间传输的有功功率和无功功率的解耦控制。网侧变换器必须将直流侧电容电压维持在设定值,并且还要保证变换器运行在单位功率因数上^[8,9]。

图1所示为网侧变流器的拓扑结构, R 和 L 分别为网侧变流器串联的电阻和电感。

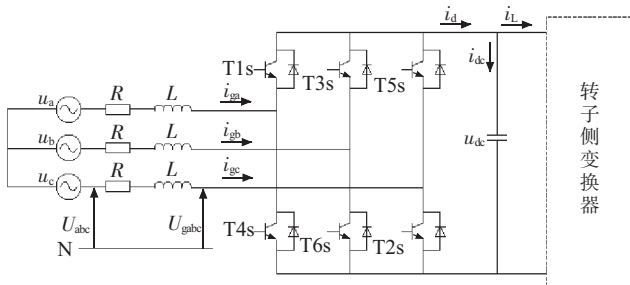


图1 网侧变流器拓扑结构

由图1得电感两侧的电压方程如下:

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{pmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_{ga} \\ u_{gb} \\ u_{gc} \end{pmatrix} \quad (12)$$

式中: u_a, u_b, u_c 和 u_{ga}, u_{gb}, u_{gc} 分别表示电网三相电源电压和网侧变换器三相电压; i_{ga}, i_{gb}, i_{gc} 表示网侧变换器三相电流; i_d 和 i_l 分别表示网侧变换器、转子变换器的直流电流; C 为直流母线电容; u_{dc} 为电容电压。

在同步旋转 d, q 轴坐标下,电感两侧的电压方程转变为:

$$\begin{cases} u_d = R i_{gd} + L \frac{di_{gd}}{dt} - \omega_1 L i_{gq} + u_{gd} \\ u_q = R i_{gq} + L \frac{di_{gq}}{dt} + \omega_1 L i_{gd} + u_{gq} \end{cases} \quad (13)$$

当坐标变换矩阵为等幅值变换矩阵时,网侧变换器从电网吸收的有功功率和无功功率分别为:

$$\begin{cases} P_g = \frac{3}{2} (u_d i_{gd} + u_q i_{gq}) \\ Q_g = \frac{3}{2} (-u_d i_{gq} + u_q i_{gd}) \end{cases} \quad (14)$$

采用电网电压定向矢量控制时,参考坐标系 d 轴和电网电压矢量一致, q 轴沿电压矢量旋转方向超前 d 轴 90° ,即:

$$\begin{cases} u_d = U_s \\ u_q = 0 \end{cases} \quad (15)$$

把式(14)代入(15)中,有:

$$\begin{cases} P_g = \frac{3}{2} U_s i_{gd} \\ Q_g = -\frac{3}{2} U_s i_{gq} \end{cases} \quad (16)$$

由式(16)可知,在电网电压为恒定值时,网侧变换器与电网交换的有功功率与网侧交流电流直轴分量成比例,网侧变换器与电网交换的无功功率与网侧交流电流交轴分量成比例。因此根据电网电压定向控制策略可以实现网侧变流器与电网交换有功功率和无功功率的解耦控制。

双馈风力发电机转子绕组严重的瞬变电气故障,包括绕组相间金属性短路、绕组单相金属性短路接地等,这些故障会引起继电保护装置动作,从而迅速切除故障。文中主要针对转子绕组早期缓变的轻微电气故障,通常包括转子绕组不平衡、转子绕组匝间短路等,这些故障都会引起气隙磁场的畸变,进而导致转子阻抗的三相不平衡。通过在转子 a 相串接电阻 R_a 来实现不平衡,该方法简单易行,不需要进行破坏性实验,是模拟转子绕组故障的常用方法^[5,10]。

2 基于网侧电流的转子绕组故障仿真分析

结合模拟转子绕组故障的方法,在 PSCAD 的仿真环境中建立了双馈风力发电机的故障模型。其中双馈发电机参数如下:额定容量 $2 \text{ MV} \cdot \text{A}$;额定线电压 0.69 kV ;基频 50 Hz ;定转子匝数比 0.333 ;定子电阻

0.010 8 p.u.; 转子电阻 0.012 1 p.u.; 互感 3.362 H; 定子漏感 0.102 H; 转子漏感 0.11 H; 转子故障电阻 0.001 Ω ; 转子故障电抗 0.002 H。

图2、图3分别为次同步状态和超同步状态下正常与转子绕组故障时变流器网侧电流的频谱,对比可知,当出现转子绕组早期不平衡故障时,无论双馈风力发电机运行于次同步或超同步状态,网侧电流都会出现 $(1\pm 2s)f$ 的边频分量,其中 s 为转差率, f 为基频,由此可作为故障的特征频率用于诊断转子绕组故障。

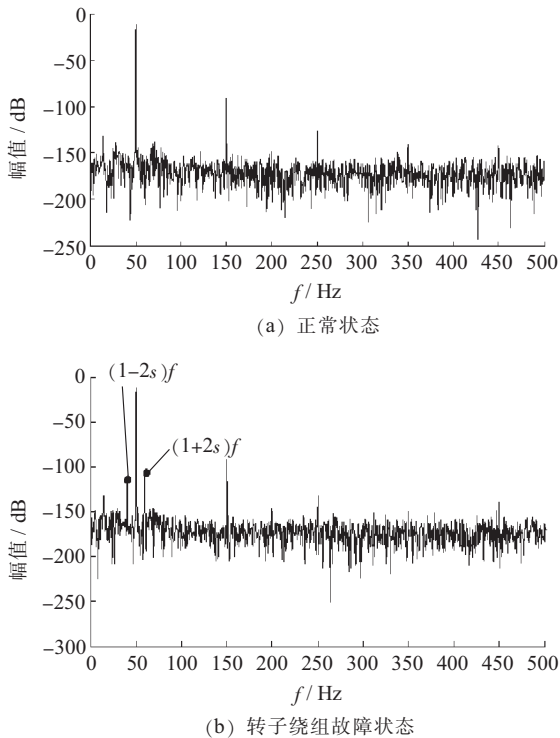


图2 次同步状态下网侧电流的仿真频谱

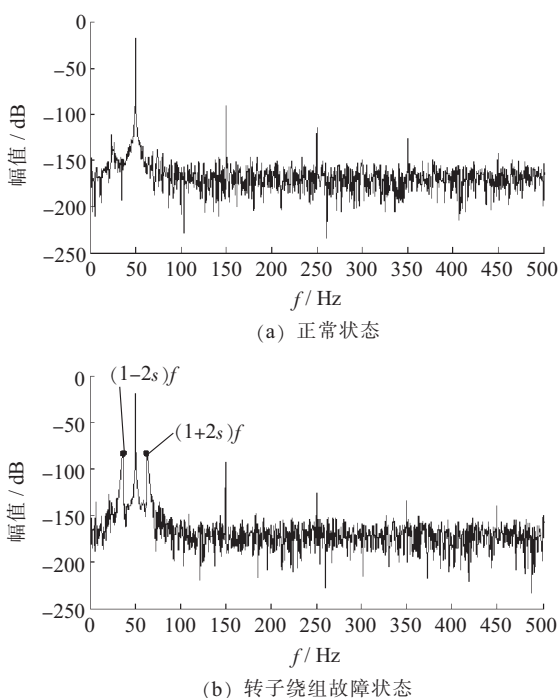
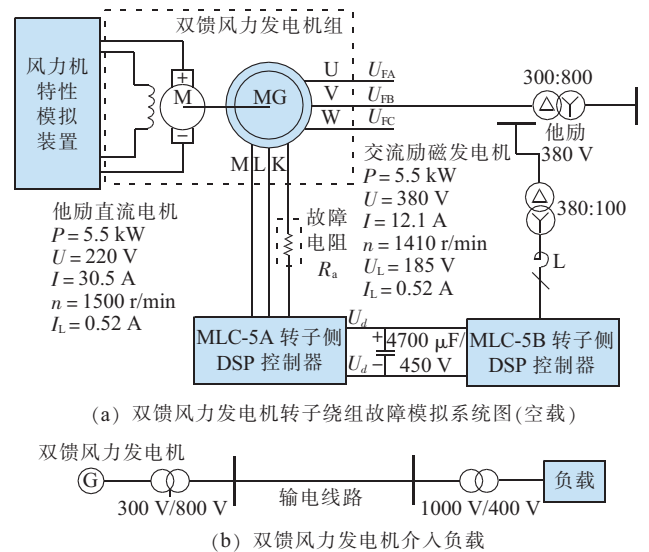


图3 超同步状态下网侧电流的仿真频谱

3 基于网侧电流的转子绕组故障实验验证

3.1 实验平台的搭建

实验平台由直流电动机、绕线式异步电机、模拟风力机特性的仿真装置、双馈风力发电机励磁控制装置、负载和故障录波器等组成。图4(a)为双馈风力发电机转子绕组故障模拟系统(图中数据为额定运行参数),其中风力机特性仿真装置能调节电机转速,从而模拟风力场变化的风速。风力发电机励磁控制装置可调整转子侧控制器和电网侧控制器的起、停及参数变化。图4(b)为双馈风机经过升降变压器和输电线路接入负载的接线,文中的负载用灯泡来替代。



(a) 双馈风力发电机转子绕组故障模拟系统图(空载)

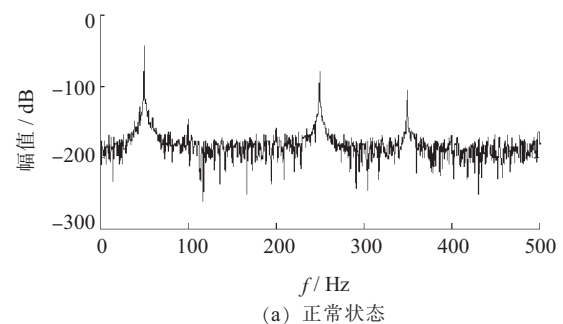
(b) 双馈风力发电机接入负载

图4 双馈风力发电机转子绕组故障实验平台

采集装置由电流、电压传感器和故障录波器组成。由于转子侧电流、电压是低频信号,使用工频互感器会产生较大误差不能满足测量要求。实验使用霍尔电流传感器,它基于霍尔效应和开环测量原理能精确测量转子电流。转子电压由于数值不大,直接接入定制的低频信号测量装置中。

3.2 实验数据分析

实验中采集的数据由电力故障录波器进行相应的录波,利用 Matlab R2011b 数学分析软件对采集的数据进行分析,得到实际测量的正常与转子绕组故障时的网侧电流频谱图,并分析了故障严重程度对特征频率提取的影响。



(a) 正常状态

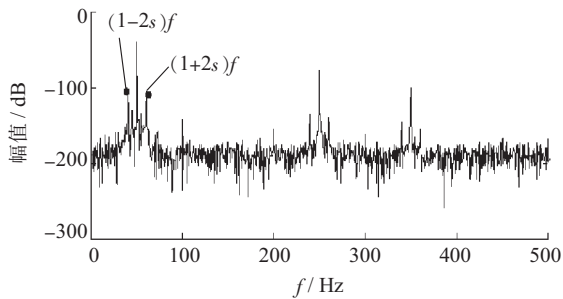
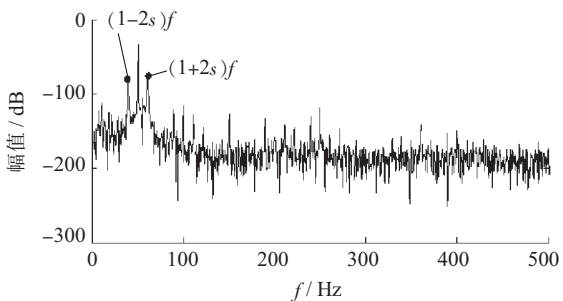
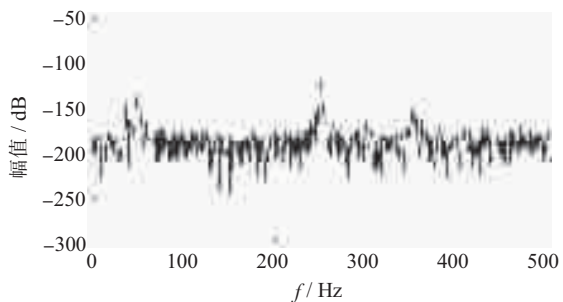
(b) 转子绕组故障($R_a=0.3R_r$)(c) 转子绕组故障($R_a=R_r$)

图5 次同步状态变流器网侧电流的频谱



(a) 正常状态

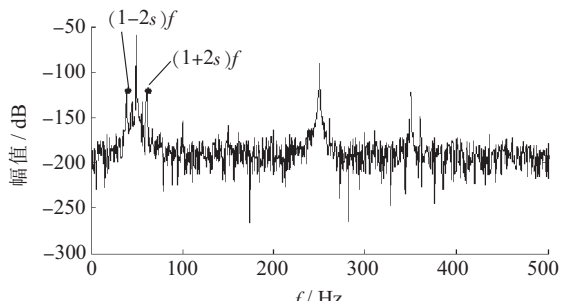
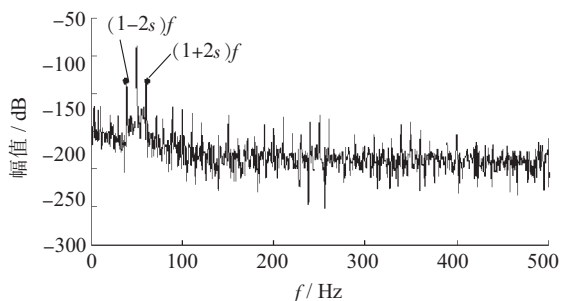
(b) 转子绕组故障($R_a=0.3R_r$)(c) 转子绕组故障($R_a=R_r$)

图6 超同步状态变流器网侧电流的频谱

图5、图6分别为双馈风力发电机运行于次同步和超同步状态时转子绕组正常以及2种故障状态时变流器网侧电流的频谱,由图5、图6对比可知,当转子

绕组发生早期故障,变流器网侧电流会出现 $(1\pm 2s)f$ 的边频分量,这与仿真结论相一致。进一步分析可知,当转子绕组故障严重程度加剧时,边频分量 $(1\pm 2s)f$ 的幅值会增大,由此验证了它可以作为双馈风力发电机转子绕组故障诊断的特征频率。

4 结束语

根据双馈风力发电机的数学模型和转子绕组故障模拟方法,在软件PSCAD仿真环境中建立了转子绕组的故障模型,通过仿真分析出变流器网侧电流的故障特征频率;然后搭建了双馈风力发电机的故障实验平台,对不同运行状态和不同故障程度下的录波数据进行了频谱分析,由此验证了边频分量 $(1\pm 2s)f$ 可以作为转子绕组故障的特征频率,且当故障严重程度加剧时,故障特征频率的幅值会增大。

参考文献:

- [1] 胡文彪,夏立,吴正国,等. 感应电机转子故障特征在交直交变频器中的传播[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(4): 418-421.
- [2] 马宏忠,胡虔生,黄允凯,等. 感应电机转子绕组故障仿真与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 107-112.
- [3] 马宏忠,李训铭,方瑞明,等. 利用失电残余电压诊断异步电机转子绕组故障[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 183-187.
- [4] 黄进,牛发亮,杨家强,等. 基于双PQ变换的感应电机转子故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 135-140.
- [5] STEFANI A, YAZIDI A, ROSSI C, et al. Double Fed Induction Machines Diagnosis Based on Signature Analysis of Rotor Modulating Signals [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2008, 44(6): 1711-1721.
- [6] 马宏忠,时维俊,韩敬东,等. 计及转子变换器控制策略的双馈风力发电机转子绕组故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 119-125.
- [7] TAPIA A, TAPIA G, OSTOLAZA J X, et al. Modeling and Control of a Wind Turbine Driven Doubly Fed Induction Generation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2003, 18(2): 194-204.
- [8] 刘国华,洪丹,王瑞,等. 双馈风机转子侧变流器不平衡控制策略[J]. 江苏电机工程, 2015, 32(2): 5-9.
- [9] 郑华,李忠,陈凡,等. 双馈风机附加阻尼控制环节与PSS的参数协调优化[J]. 江苏电机工程, 2015, 32(3): 25-29.
- [10] 许伯强,宋佳伟,孙丽玲,等. 变频供电异步电动机转子断条状态下变频器一次侧特征电流分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(12): 76-79.

作者简介:

朱玲(1990),女,江苏姜堰人,硕士,从事继电保护、电力设备状态监测与故障诊断工作;
王建锋(1980),男,江苏靖江人,工程师,从事变电站运行维护与管理工
时维俊(1988),男,江苏兴化人,硕士,从事变电站运维、电力设备
状态监测与故障诊断工作。

(下转第83页)

拒在验收操作时,线路尚未投运,逻辑闭锁装置采线路无压,逻辑闭锁回路可以通过,故操作正常。变电站投运时 913 开关、9131 隔离开关、9133 隔离开关均在合上位置,由上级电源对母线充电,所以 9131 隔离开关拒绝操作问题未暴露。但该操作为投运后的第一次操作,线路带电,逻辑闭锁装置采线路无压,逻辑闭锁回路未通过,所以 9131 隔离开关出现拒绝操作的现象。

3 改进措施

基于对 9131 隔离开关拒绝操作的原因分析,从变电运维角度提出以下措施,以避免再次发生此类问题。

(1) 将逻辑闭锁“可视化”。间隔测控装置虽有逻辑闭锁功能,但是不能直接查看逻辑闭锁条件,给故障查找和变电验收工作增加了难度。对于新设备采购应倾向于具有闭锁条件显示功能的间隔测控装置,或在具备条件的情况下,联系厂家对现有间隔测控装置进行技术改造,或者在变电站后台机显示逻辑关系。

(2) 管理上重视变电站防误闭锁装置验收工作,针对新型防误闭锁装置应及时改进验收方式,例如间隔逻辑闭锁中某些条件需要由运维人员和检修人员共同配合验收,例如间隔 TA 无流条件闭锁逻辑等。

4 结束语

通过 9131 闸刀拒动的异常分析处理可以看出,新

建变电站采用防误间隔逻辑闭锁和电气防误闭锁相结合的双重化闭锁方式,其相比传统防误闭锁具有一定复杂性,因而防误装置异常的判断处理更加复杂,对变电运维人员技术水平提出更高要求,应加强对运维人员有关防误闭锁知识的培训,包括防误装置原理、防误操作流程、日常管理和维护中注意事项等。在保证安全的前提下,可以考虑通过优化变电运维工作方式、培训内容,来提高变电运维管理水平。变电站防误闭锁装置的运行维护、异常处理则可以作为变电运维一体化工作一项有效尝试,运维人员正确迅速对防误闭锁装置异常做出判断,有助于提高操作效率和操作可靠性,确保电网安全稳定运行。

参考文献:

- [1] 李艳军. 综合自动化变电站防误闭锁系统应用研究[J]. 华中电力, 2012, 25(2): 34-37.
- [2] 赵旭峰. 变电站防误闭锁装置的功能及应用[J]. 江苏电机工程, 2010, 29(4): 59-64.
- [3] 王鹏程. 综合自动化变电站防误闭锁系统的应用分析[J]. 中国电力教育, 2010(S1): 573-574.
- [4] 王一清. 综合自动化变电站中隔离刀闸防误操作的闭锁策略分析[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(5): 137-140.

作者简介:

刘善军(1982),男,山东临沂人,工程师,从事变电站管理维护工作。

Analysis on a Fault Caused by Anti-mislock Device in 110 kV Substation

LIU Shanjun

(Zhenjiang Power Supply Company, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: The anti-mislock function of 110 kV SF₆ based GIS is comprised of one electric blocking coupled with an interval logic blocking. The double-blocking enhanced the ability of preventing anti-mislock. The breaking failure of disconnecting switch caused by the abnormal of double-blocking anti-mislock device is analyzed. Based on the analysis, from the point of view of operation and maintenance, some improving plans and measures to prevent the abnormal of double-blocking anti-misblock devices are proposed.

Key words: interval logic blocking; electric blocking; anti-mislock; integration of operation and maintenance; mal-operation

(上接第 79 页)

Double-fed Induction Generator Rotor Fault Diagnosis Based on Grid-side Current of Back-to-back Converter

ZHU Ling, WANG Jianfeng, SHI Weijun

(Jiangsu Electric Power Company Maintenance Branch, Taizhou 225300, China)

Abstract: Condition monitoring and fault diagnosis of rotor windings of double fed induction generator (DFIG) can detect the fault timely and reduce operation and maintenance costs effectively. First, a double fed induction generator's rotor fault model is established in PSCAD software based on its mathematical model, and then the fault characteristic frequency of the grid-side current of back-to back converter is detected through simulation analysis. In addition, the experimental platform of double fed induction generator is built in laboratory, and the recorded data is analyzed by using FFT under different operational conditions and different fault levels. Thus the fault characteristic frequency of the grid-side current of back-to-back converter is validated. Also when rotor fault severity is intensified, the fault characteristic frequency amplitude increases.

Key words: DFIG (double fed induction generation); rotor fault; grid-side current of back-to-back converter; experimental platform