

直流起励过程中绝缘监测系统对转子接地保护的影响及对策

李华忠, 陈俊, 张琦雪, 严伟

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 发电机直流起励过程中转子接地保护可能报警或跳闸, 因此通过现场案例分析动作原因。通过分析直流起励过程中绝缘监测系统和转子接地保护构成的回路, 推导出转子接地电阻计算公式, 计算公式表明转子接地电阻阻值与直流绝缘监测系统的平衡电阻和接地电阻有关。当转子接地保护电阻值整定偏灵敏时, 如果直流绝缘监测回路的接地电阻值不够大, 就可能导致转子接地保护报警或跳闸。基于理论分析提出了相应的解决方案。

关键词: 发电机; 继电保护; 转子接地保护; 直流起励; 直流绝缘监测

中图分类号: TM 772

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.01.026

0 引言

转子一点接地故障为发电机常见的故障形式之一^[1], GB/T14285—2006《继电保护和安全自动装置技术规程》要求大型汽轮机组和水轮机组均应装设转子一点接地保护。转子一点接地保护按照原理可分为注入式转子一点接地保护和非注入式转子一点接地保护2类, 目前普遍采用的转子接地保护原理有切换采样式(乒乓式)原理^[2-4]、注入直流电压原理^[5-6]、注入方波电源原理^[7-10]和注入交流电压原理^[5,10]。在实际运行过程中, 经常发生转子一点接地保护的误动, 文献[11-12]指出, 励磁绕组轴电压吸收回路电容充放电过程、接地碳刷与大轴滑环间电阻接触不良等原因都可能导致转子一点接地保护误动作。

本文将通过2起发电机起励过程中转子接地保护的相关案例, 分析机组在直流起励过程中直流绝缘监测系统对转子接地保护的影响, 确认转子一点接地保护报警或动作原因, 与此同时提出相应的解决方案。

1 现场案例情况简介

1.1 起励过程中注入式转子接地保护报警案例

国内DB燃气电厂1台409.7 MW机组(下文简称DB燃机)自投运以来, 在直流起励过程中转子接地保护装置频繁报警, 工作人员进行故障排查, 并核实装置报警信息和中央信号后, 确定为转子一点接地保护报警。查看装置定值参数可知: 转子接地保护采用注入方波电源原理, 发电机转子一点接地报警电阻定值为50 kΩ, 一点接地报警延时定值为10 s。分析录波数据如图1所示。由图1可见, 转子接地电阻计算值为42.67 kΩ, 低于转子一点接地报警电阻定

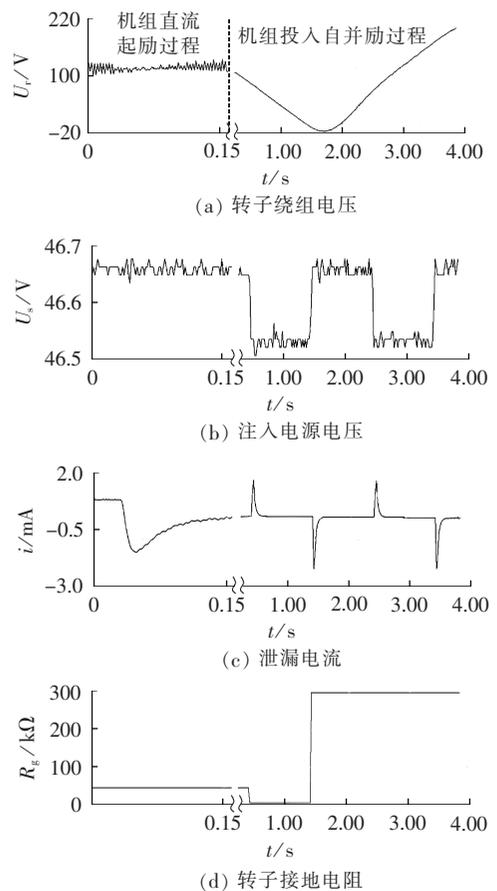


图1 转子接地保护报警波形

Fig.1 Waveforms of rotor grounding protection alarm

值, 满足转子一点接地保护报警条件, 报警行为正确。

1.2 起励过程中乒乓式转子接地保护跳闸案例

2012年12月7日, 国内ZH燃气电厂1台152 MW机组(下文简称ZH燃机)在直流起励过程中, 乒乓式转子一点接地保护动作跳闸, 发电机机组全停。该机组发电机转子一点接地报警电阻定值为5 kΩ, 转子一点接地跳闸电阻定值为2 kΩ, 一点接地报警延时定值为2 s, 一点接地跳闸延时定值为5 s。经现场工作人员反馈, 转子接地电阻计算值低于转子一点

接地跳闸电阻定值 $2\text{k}\Omega$,且故障时间超过 5s ,已满足转子一点接地保护动作跳闸条件。

下文将对现场电气回路进行理论计算以及故障分析。

2 起励过程中励磁绕组电气回路情况

经核实 DB 燃机和 ZH 燃机除发电机转子接地保护回路有区别外,励磁绕组相关电气回路相似,见图 2。图中, R_n 为起励回路串联的起励电阻; L_r 为发电机转子绕组; V_D 为整流二极管; C_H 为励磁调节器或手动控制的接触器的触点; K_M 为灭磁开关;直流监视绝缘回路由过流元件构成绝缘检测, R_s 为平衡电阻, R_m 为大功率接地电阻。两燃气发电机组励磁方式均采用自并励励磁方式。机组在加励磁升压过程中,因机端残压较低,约为额定值的 $1\%\sim 2\%$ ^[13],晶闸管整流桥不能正常工作,无法送出励磁电流供发电机建立电压,所以需提供初始励磁^[14]。图 2 中,直流母线正、负端各自经初始励磁回路接触器触点 C_H 接至励磁绕组回路, C_H 接通后使发电机建立一定的电压,此时机端电压上升;当机端电压升至 30% 的额定电压时自动投入励磁调节器,采用自并励励磁方式,并退出初始起励回路,此后机端电压自动上升至额定值。此外,为了防止直流系统发生接地故障,直流母线正负端均配置直流绝缘监视系统^[15],用来监测直流母线绝缘情况。

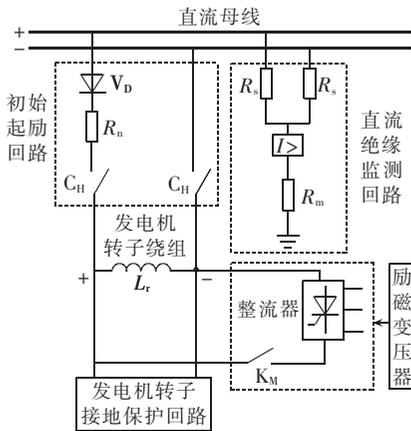


图 2 励磁绕组相关电气回路示意图

Fig.2 Schematic diagram of electrical circuits related to excitation windings

当起励接触器的触点 C_H 闭合时,直流绝缘监视回路和转子接地保护回路同时接在转子绕组的正、负两端。此时转子接地保护和直流绝缘监视回路各有 1 个接地点,转子接地保护和直流绝缘监测设备相互检测对方的对地绝缘。

3 转子接地保护动作分析

根据起励过程中的直流绝缘监测回路和转子接

地保护回路,分析和推导 DB 燃机注入方波电源转子接地保护、ZH 燃机乒乓式转子接地保护在直流起励过程中的转子接地电阻计算情况。

3.1 注入式转子接地报警分析

由于转子接地保护和直流绝缘监测设备相互测量对方的对地绝缘,结合图 2 和注入方波电源转子接地保护回路,可得到起励过程中二者的电路接线示意图如图 3 所示。图中, U_s 为注入方波电源; R_c 为耦合电阻; R_t 为测量电阻;其他符号含义与图 2 相同。考虑起励电阻 R_n 阻值很小(现场阻值为十几欧姆),忽略其对电气回路的影响。

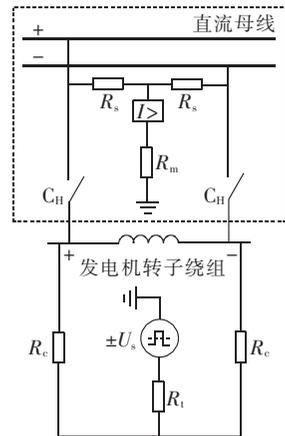


图 3 直流起励绝缘监视回路和注入方波电源转子接地保护回路连接示意图

Fig.3 Schematic diagram of DC excitation insulation monitoring circuit connecting with rotor grounding protection circuit

由图 3 画出相应等效电路图,如图 4 所示,图中, U_r 为转子电压。

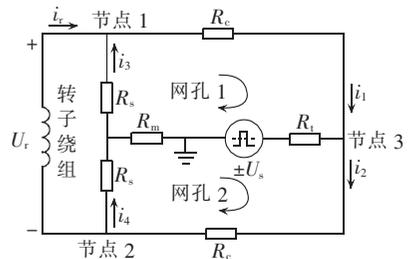


图 4 注入方波电源转子接地保护回路等效电路图

Fig.4 Equivalent circuit of voltage-injection-type rotor grounding protection circuit

根据注入方波电源转子接地保护原理,方波电源有 2 种状态:

a. 方波电源为正值时,对应电气量为 i_1 、 i_2 、 i_3 、 i_4 、 i_r 和 U_s ;

b. 方波电源为负值时,同理也可标注对应的电气量为 i'_1 、 i'_2 、 i'_3 、 i'_4 、 i'_r 和 $-U_s$ 。

以下均采用采样值的稳态量进行计算。

当方波电源为正值时,列网孔 KVL 方程和节点 KCL 方程,可推得泄漏电流为:

$$i = -\frac{2U_s}{2R_m + R_s + R_c + 2R_l} \quad (1)$$

当方波电源为负值时,同理也可推得泄漏电流如式(2)所示。

$$i' = \frac{2U_s}{2R_m + R_s + R_c + 2R_l} \quad (2)$$

转子接地过渡电阻公式^[11]为:

$$R_g = \frac{2U_s}{i' - i} - \left(R_l + \frac{R_c}{2} \right) \quad (3)$$

将式(1)、(2)代入式(3)可计算出接地电阻值如式(4)所示。

$$R_g = R_m + \frac{R_s}{2} \quad (4)$$

3.2 乒乓式转子接地动作分析

与图 4 相类似,画出乒乓式转子接地保护和绝缘监视回路等效电路图,如图 5 所示。图中, U_r 为转子电压(初励时的直流电压); R 为转子回路切换电阻; S_1 和 S_2 为电子开关;其他符号的含义与图 2 中相同。

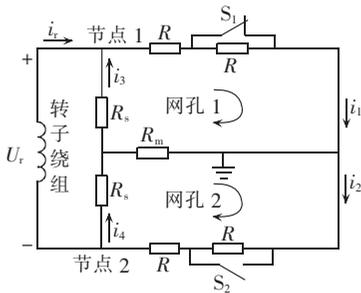


图 5 乒乓式转子接地保护和绝缘监视回路等效连接电路图

Fig.5 Equivalent circuit of ping-pong-type rotor grounding protection connecting with DC insulation monitoring system

乒乓式转子接地保护原理的电子开关有以下 2 种状态:

① S_1 合, S_2 开, 对应该状态的电气量为 i_1 、 i_2 、 i_3 、 i_4 、 i_r 和 U_r ;

② S_1 开, S_2 合, 同理也可标注对应的电气量为 i_1' 、 i_2' 、 i_3' 、 i_4' 、 i_r' 和 U_r' 。

根据电子开关不同状态,列出网孔 KVL 方程和节点 KCL 方程,求得状态 ① 下的电流 i_2 和状态 ② 下的电流 i_2' :

$$i_2 = \frac{2R_m + R_s + R}{2R_m + R_s + 2R} i_1 \quad (5)$$

$$i_2' = \frac{2R_m + R_s + 2R}{2R_m + R_s + R} i_1' \quad (6)$$

假设电子开关切换的 2 种状态下转子电压不变,可求得电流:

$$i_1' = \frac{2R_m + R_s + R}{2R_m + R_s + 2R} i_1 \quad (7)$$

转子接地过渡电阻公式^[11]如下:

$$R_g = \frac{(i_1 - 2i_2) - (2i_1' - i_2') R}{(i_1' - i_2') - (i_1 - i_2)} \quad (8)$$

将式(5)—(7)代入式(8),求得转子接地电阻如式(9)所示。

$$R_g = R_m + \frac{R_s}{2} \quad (9)$$

3.3 案例分析结论

根据上文的分析可见,机组在直流起励过程中,注入式转子接地保护和乒乓式转子接地保护计算的接地电阻阻值与直流绝缘监测系统的平衡电阻和大功率接地电阻大小相关。由式(4)、(9)所示的接地电阻计算结果可知,当平衡电阻 R_s 和大功率接地电阻 R_m 不足够大,同时转子接地电阻值整定得偏灵敏时,就可能使得实测的转子接地阻值小于转子一点接地报警定值或者动作定值,从而导致转子接地保护报警或跳闸。

4 本故障案例的解决方案

为了防止以上情况的发生,可以采取以下几种解决方案。

a. 将起励接触器的辅助接点接入转子接地保护装置。当起励接触器触点闭合时,由软件自动退出转子接地保护功能,此时直流起励绝缘监视回路也可兼顾检测转子绕组对地绝缘情况;当起励过程结束、接触器的触点分开后,转子接地保护功能又自动投入。

b. 由于起励回路只要 10s 左右的工作时间,也可考虑适当加长转子接地保护的延时定值,将转子接地保护的延时整定为大于 10s,躲过起励过程。文献[16]建议转子一点接地保护延时取 5~10s,由于转子一点接地故障对发电机并没有直接的严重影响,适当延长转子一点接地保护的動作延时是可以接受的。

c. 将起励接触器的辅助接点串入转子接地保护的大轴输入回路。采用常闭接点,当起励接触器的触点闭合时,其常闭辅助接点打开,使得转子接地保护的大轴输入回路处于打开状态,即相当于取消了转子接地保护的接地点,退出了转子接地保护功能;当起励过程结束后,起励接触器的触点打开,其常闭辅助接点闭合,自动将转子接地保护的接地点投入,转子接地保护恢复正常工作。

d. 采用交流起励方式。由于交流起励一般配置单相隔离变压器,在隔离变压器二次侧无接地点,不会导致转子接地保护报警或动作。

对于方案 **a**,由于起励接触器辅助接点的重要性,转子接地保护装置应做好对该接点的自检,一旦判

出异常应及时发出报警信号;对于方案**b**则需要适当加长延时,这对于转子接地而言是可以接受的;对于方案**c**,由于难以监测接触器辅助接点是否正常,可靠性要比方案**a**、**b**差;对于方案**d**,可在设计机组励磁系统时考虑。

5 结论

本文对直流起励过程中绝缘监测系统对转子接地保护影响的2起实际案例进行了分析,并提出了相应对策,结论如下。

a. 在机组初始起励过程中,转子接地保护计算的转子接地电阻阻值与直流绝缘监测系统的平衡电阻和大功率接地电阻均相关。当转子接地保护电阻值整定偏灵敏,同时直流绝缘监测回路的接地电阻值不足够大时,就可能导致转子接地保护报警或跳闸,应采取相应措施进行妥善处理。

b. 现场应用中建议在软件上利用起励接触器辅助接点实现起励过程中转子接地保护的自动退出。该方案已在现场得到应用,有效解决了起励过程对转子接地保护的影响问题。

本文仅以基于注入方波电源原理和乒乓式原理的转子接地保护为例进行分析,对其他原理的转子接地保护分析方法类似。

参考文献:

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京:中国电力出版社,2002:263-264.
- [2] 夏勇军,尹项根,杨经超,等. 发电机乒乓式转子接地保护电路设计[J]. 电力自动化设备,2004,24(12):52-55.
XIA Yongjun, YIN Xianggen, YANG Jingchao, et al. Circuitry design of ping-pong type grounding fault protection for generator rotor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(12): 52-55.
- [3] 姚翔. 发电机转子一点接地乒乓式微机保护的研究[J]. 电力自动化设备,2000,20(6):27-28.
YAO Xiang. Study on ping-pong type microcomputer protection for one-point grounding fault of generator exciting rotor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20(6): 27-28.
- [4] 徐习东,金宇,郭晓明. 一种切换采样原理转子接地保护算法的研究[J]. 电工技术学报,2005,20(6):41-45.
XU Xidong, JIN Yu, GUO Xiaoming. Study of earth-fault protection with switch sampling principle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(6): 41-45.
- [5] 李宾,屠黎明,苏毅,等. 发电机转子绕组接地保护综述[J]. 电力设备,2006,7(11):33-36.
LI Bin, TU Liming, SU Yi, et al. Summarization of one point earth-fault protection for generator rotor[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(11): 33-36.
- [6] 刘小波,刘万斌,包明磊,等. 转子一点接地保护双重化配置研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(10):162-167.
LIU Xiaobo, LIU Wanbin, BAO Minglei, et al. Dual-configuration of rotor one-point grounding protection[J]. Electric Power Auto-

mation Equipment, 2013, 33(10): 162-167.

- [7] 王光,温永平,陈俊,等. 注入方波电压式转子接地保护装置的研制及应用[J]. 江苏电机工程,2009,28(2):74-76.
WANG Guang, WEN Yongping, CHEN Jun, et al. Development and application of device of injecting-step-voltage rotor ground protection[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2009, 28(2): 74-76.
- [8] 陈俊,陈佳胜,张琦雪,等. 超临界机组发电机定子和转子接地保护方案[J]. 电力系统自动化,2008,32(20):101-104.
CHEN Jun, CHEN Jiasheng, ZHANG Qixue, et al. Generator stator and rotor earth fault protection scheme of ultra-supercritical generating unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 101-104.
- [9] 严伟,方运昇,陈俊,等. 特大型机组保护若干问题探讨[J]. 江苏电机工程,2011,30(2):16-19.
YAN Wei, FANG Yunsheng, CHEN Jun, et al. Research on protection issues of oversize power plants[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2011, 30(2): 16-19.
- [10] 高春如. 叠加交流电压转子一点接地保护误动的分析[J]. 继电器,1994,22(3):19-23.
GAO Chunru. Analysis of misoperation of rotor earth fault protection with AC voltage injection[J]. Relay, 1994, 22(3): 19-23.
- [11] 陈俊,王光,严伟,等. 关于发电机转子接地保护几个问题的探讨[J]. 电力系统自动化,2008,32(1):90-92.
CHEN Jun, WANG Guang, YAN Wei, et al. Study on issues of generator rotor earth fault protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(1): 90-92.
- [12] 陈俊,谈涛,王光,等. 发电机转子绕组接地故障定位功能的商榷[J]. 电力系统自动化,2011,35(21):31-33,73.
CHEN Jun, TAN Tao, WANG Guang, et al. Discussion on location function of detecting generator rotor earth fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 31-33, 73.
- [13] 李基成. 现代同步发电机励磁系统设计及应用[M]. 北京:中国电力出版社,2002:216-217.
- [14] 李奎涛. 静止可控硅励磁装置起励控制回路改进[J]. 农业与技术,2011,31(2):126-129.
- [15] 陈元平,李树君,张玉奎. 绝缘监测装置在直流系统中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(15):91-93.
CHEN Yuanping, LI Shujun, ZHANG Yukui. Application of insulated monitoring device in DC system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(15): 91-93.
- [16] 国家能源局. DL/T684—2012大型发电机变压器继电保护整定计算导则[S]. 北京:中国电力出版社,2012.

作者简介:



李华忠

李华忠(1983—),男,福建三明人,工程师,硕士,主要从事电力主设备继电保护的研究、开发工作(E-mail:lihzh@nrec.com);

陈俊(1978—),男,江苏姜堰人,高级工程师,硕士,主要从事电力主设备的继电保护研究、开发及管理工作;

张琦雪(1974—),男,江苏沐阳人,高级工程师,博士,主要从事电力主设备继电保护的

研究、开发工作;

严伟(1975—),男,湖南长沙人,高级工程师,硕士,从事电气主设备微机保护的研究、开发和管理工作。

Influences of insulation monitoring system on rotor grounding protection during DC excitation process and countermeasures

LI Huazhong, CHEN Jun, ZHANG Qixue, YAN Wei

(Nanjing Nari-Relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The improper alarm or trip of rotor grounding protection during the DC excitation is analyzed based on a field case. The circuit composed of the DC insulation monitoring system and the rotor grounding protection is analyzed, and the calculation formula of rotor grounding resistance is deduced, which shows that the rotor grounding resistance is related to the grounding resistance and balance resistance of DC insulation monitoring system. When the resistor settings of rotor grounding protection are biased towards sensitivity, if the grounding resistance of DC insulation monitoring circuit is not large enough, the rotor grounding protection may improperly alarm or trip. Corresponding solutions are given based on the theoretical analysis.

Key words: electric generators; relay protection; rotor grounding protection; DC excitation; DC insulation monitoring

(上接第 169 页 continued from page 169)

- [24] LANDRY M. An improved vibration analysis algorithm as a diagnostic tool for detecting mechanical anomalies on power circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 1986-1994.
- [25] BRAUNOVIC M, MYSHKIN N K, KONCHITS V V. Electrical contacts fundamentals, applications and technology [M]. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press Inc, 2006: 67-75.



周 鑫

电压试验技术、GIS 状态检测方面的研究工作 (E-mail: 2010282070205@whu.edu.cn);

鲁铁成 (1953—), 男, 江苏无锡人, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为高电压与绝缘技术、电气设备故障诊断;

罗容波 (1979—), 男, 湖北天门人, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力系统高压电气设备试验工作;

张 博 (1979—), 男, 河北武强人, 副教授, 博士, 研究方向为高电压与绝缘技术、电气设备故障诊断。

作者简介:

周 鑫 (1986—), 男, 湖北武汉人, 博士研究生, 从事高

Loop resistance measuring system based on kA-level impact current

ZHOU Li¹, LU Tiecheng¹, LUO Rongbo², ZHANG Bo¹, WAN Jiawei¹,

YU Guangkai¹, HU Taishan¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Foshan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corporation, Foshan 528000, China)

Abstract: Since the accurate loop resistance measuring of GIS (Gas Insulated Switchgear) contacts is helpful to reduce GIS failure probability, a loop resistance measuring system based on kA-level impact current is proposed. Its hardware consists of IPC (Industrial Personal Computer), charging module, main discharging circuit, voltage sensor and digital signal processor. The flowchart of its software is given. The field tests for the GIS equipments of a 500 kV substation show that, the system can generate kA-level impact current on field and its sensitivity and accuracy are higher than those of traditional DC loop resistance tester.

Key words: kA-level impact current; super-capacitor; gas insulated switchgear; contactor; measurements; loop resistance