

励磁变压器低压侧单相接地故障在线识别方法

陈俊,王昀帆,严伟,沈全荣

(南京南瑞继保电气有限公司,江苏 南京 211102)

摘要: 励磁变压器低压侧单相接地故障时,乒乓式转子接地保护原理也能检测到对地绝缘电阻下降,并且计算的励磁绕组一点接地位置百分比为 50%,可能会误导故障排查的方向。因此提出了一种励磁变压器低压侧单相接地故障在线识别方法,当励磁绕组一点接地电阻计算值小于定值,接地故障位置计算值在 50% 左右,且励磁绕组正、负端对地电压的基波有效值中的较大值与励磁电压的比值超过设定值时,则认为励磁变压器低压侧发生了单相接地故障。理论分析和现场录波数据验证了所提方法的正确性。

关键词: 励磁变压器; 单相接地故障; 在线识别; 故障定位; 继电保护; 乒乓式转子接地保护

中图分类号: TM 772

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.11.023

0 引言

发电机励磁回路接地故障是发电机组最为常见的故障形式之一^[1-7]。由于励磁回路的复杂性,发生一点接地故障后,需要排查的环节比较多,接地故障点位置测量功能可减少排查工作量,缩短故障排查时间^[8]。乒乓式转子接地保护原理(也称为切换采样式转子接地保护原理)在现场得到广泛应用,该原理不仅能够检测励磁绕组本体的绝缘下降,其检测范围还包括励磁绕组至晶闸管之间的电缆、励磁绕组至保护之间的电缆、碳刷、集电环等部位。对于静态励磁系统,当励磁变压器(以下简称励磁变)低压侧发生单相接地故障时,在 1 个工频周期内,励磁绕组的正端和负端各有 1/3 的时间接地,乒乓式转子接地保护原理也可以检测到对地绝缘电阻值的下降,并且计算出接地位置值在 50% 左右,导致故障定位错误^[9-14],误导现场人员接地故障排查的方向。目前,尚未见励磁变低压侧单相接地故障识别方法的相关文献。

为了区分励磁绕组一点接地故障和励磁变低压侧单相接地故障,减少故障排查时间,本文提出了一种基于乒乓式转子接地保护原理的励磁变低压侧单相接地故障在线识别方法。

1 励磁变低压侧单相接地故障特征分析

励磁变低压侧发生单相接地故障时(假设 B 相为故障相),整流电路采用 6 脉动桥式全控整流电路,其输出直接与励磁绕组相连,如图 1 所示。

由于励磁变低压侧的电缆 B 相金属性接地,当晶闸管 V_{T3} 导通时,相当于励磁绕组正端接地;当晶闸管 V_{T4} 导通时,相当于励磁绕组负端接地,在 1 个工频周期内,励磁绕组的正端和负端各有 1/3 的时

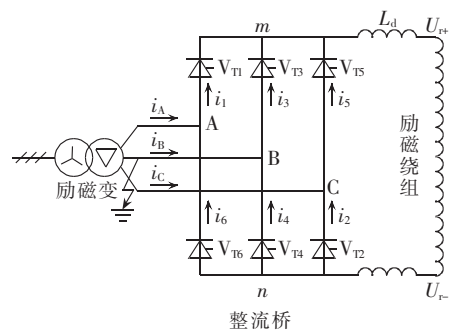


图 1 励磁变低压侧 B 相接地故障示意图

Fig.1 Schematic diagram of phase-B grounding fault at low-voltage side of excitation transformer

间接地,励磁电压在故障过程中不发生变化^[15-16]。

某电厂 125 MW 机组励磁变低压侧 B 相金属性接地时的录波数据如图 2 所示,图中 U_{r+} 、 U_{r-} 和 U_r 分别为励磁绕组正端对地电压、负端对地电压及励磁电压,波形特征与前面的理论分析相吻合。

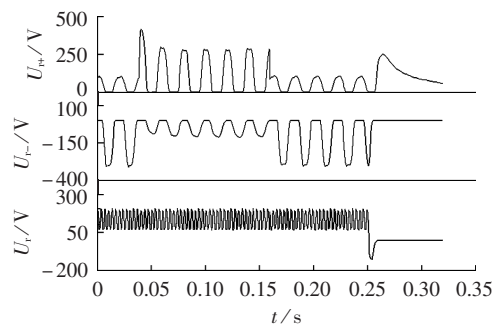


图 2 励磁变低压侧 B 相接地时的励磁电压

Fig.2 Excitation voltage when phase-B grounding fault occurs at low-voltage side of excitation transformer

乒乓式转子接地保护原理如图 3 所示。图 3 中, R 为乒乓式转子接地保护回路电阻; R_g 为励磁绕组对地绝缘电阻; S_1 和 S_2 为电子开关,两者的状态始终相反; i_{i1} 和 i_{i2} 为回路电流。

定义 S_1 处于合位且 S_2 处于分位为状态 1, S_1 处于分位且 S_2 处于合位为状态 2。

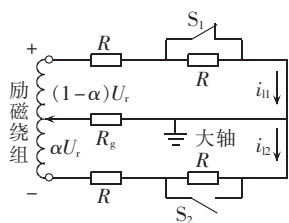


图 3 乒乓式转子接地保护原理图

Fig.3 Schematic diagram of ping-pong type rotor grounding fault protection

图 3 中励磁绕组一点接地电阻 R_g 为:

$$R_g = \frac{(2i'_{11} - i'_{12})U_r/U'_r - (i_{11} - 2i_{12})R}{(i_{11} - i_{12}) - (i'_{11} - i'_{12})U_r/U'_r} \frac{R}{2} \quad (1)$$

其中, U_r 和 U'_r 分别为状态 1 和状态 2 时的励磁电压; i_{11} 、 i_{12} 为状态 1 时的回路电流; i'_{11} 、 i'_{12} 为状态 2 时的回路电流。

励磁绕组一点接地相对位置 α 以百分比表示,故障点位于负端时为 0,故障点位于正端时为 100%。

$$\alpha = \left[0.5 - \frac{(i_{11} - 2i_{12} + 2i'_{11} - i'_{12})\frac{R}{2} + (i_{11} - i_{12} + i'_{11} - i'_{12})R_g}{U_r + U'_r} \right] \times 100\% \quad (2)$$

式(1)、(2)中励磁电压已采用数字滤波技术去除了高次谐波分量,基本可以认为是直流电压。

假设当电子开关 S_1 处于合位且 S_2 处于分位时, V_{13} 导通,励磁绕组正端接地,过渡电阻为 R_g ,励磁电压为 U_r ,称为状态 **a**;当电子开关 S_1 处于分位且 S_2 处于合位时, V_{14} 导通,励磁绕组负端接地,过渡电阻和励磁电压均不变,称为状态 **b**,如图 4 所示。

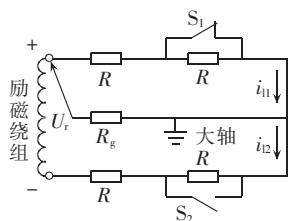
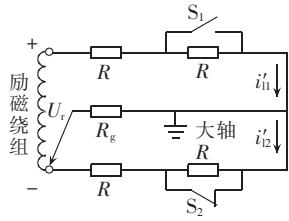
(a) V_{13} 导通(b) V_{14} 导通

图 4 励磁变低压侧单相接地时的等效图

Fig.4 Equivalent diagram of single-phase grounding fault at low-voltage side of excitation transformer

状态 **a** 下的回路电流分别为:

$$i_{11} = i_{12} = \frac{R_g}{R + R_g} = \frac{U_r}{R(3 + 2R/R_g)} \quad (3)$$

$$i'_{12} = \frac{U_r}{2R + RR_g/(R + R_g)} = \frac{U_r}{R[2 + R_g/(R + R_g)]} \quad (4)$$

状态 **b** 下的回路电流为:

$$i'_{11} = \frac{U_r}{2R + RR_g/(R + R_g)} = \frac{U_r}{R[2 + R_g/(R + R_g)]} \quad (5)$$

$$i'_{12} = i'_{11} \frac{R_g}{R + R_g} = \frac{U_r}{R(3 + 2R/R_g)} \quad (6)$$

可见: $i_{11} = i'_{12}$, $i_{12} = i'_{11}$ 。

将以上结果代入式(2)可得 $\alpha = 50\%$,与保护装置实测的故障位置完全吻合,即励磁变低压侧单相接地故障时,乒乓式转子接地保护计算的相对位置为 50%,与接地过渡电阻的大小无关。

对于另一种情况:电子开关 S_1 处于合位且 S_2 处于分位时, V_{14} 导通;电子开关 S_1 处于分位且 S_2 处于合位时, V_{13} 导通,接地故障相对位置 α 同样为 50%,此处不再推导。

以上接地故障位置分析是基于 2 种状态下励磁电压不变的前提,当励磁电压有一定波动时,计算出的 α 将会在 50% 附近上下波动。

2 励磁变低压侧单相接地故障识别方法

从图 2 可见,励磁变低压侧发生单相金属性接地故障时,在 1 个工频周期内,励磁绕组的正端和负端各有 1/3 的时间接地,接地时的对地电压为 0,通过全周傅里叶算法可以提取出 U_{r+} 和 U_{r-} 中含量较大的工频交流分量。

对图 2 所示的 U_{r+} 和 U_{r-} 进行频谱分析,其幅频特性如图 5 所示。

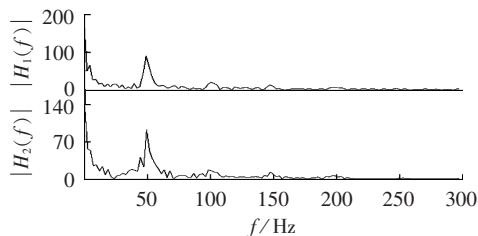
图 5 U_{r+} 和 U_{r-} 的幅频特性Fig.5 Amplitude-frequency characteristics of U_{r+} and U_{r-}

图 5 中 $|H_1(f)|$ 和 $|H_2(f)|$ 分别为 U_{r+} 和 U_{r-} 在不同频率时的幅值特性,可见除了含有较大的直流分量外, U_{r+} 和 U_{r-} 中还含有较大的 50 Hz 工频交流分量。

当励磁变低压侧发生非金属性(经过渡电阻)接地故障时,1 个工频周期内,励磁绕组的正端和负端各有 1/3 的时间经过渡电阻接地,接地时的对地电压不再为 0,正端对地电压略大于 0,负端对地电压略小于 0,过渡电阻越小越靠近 0, U_{r+} 和 U_{r-} 的波形仍然会呈现交流脉动特征,且 U_{r+} 和 U_{r-} 中仍然含有一定的工频交流分量。

可见,励磁变低压侧发生单相接地故障时,无论是金属性接地还是非金属性接地, U_{r+} 、 U_{r-} 中均含有一定的工频交流分量。而励磁绕组一点接地故障时, U_{r+} 和 U_{r-} 中主要是直流分量和高次谐波分量,几乎

没有工频交流分量。可见,利用 U_{r+} 和 U_{r-} 中的工频交流分量大小即可区分以上 2 种故障。

为了提高故障识别的准确性,引入励磁变低压侧单相接地故障时的另外一个特征量 $\alpha=50\%$,则构成如下判据:

$$\begin{cases} R_g < R_{g\text{-set}} \\ |\alpha - 50\%| < \Delta\alpha_{\text{set}} \\ k = \frac{\max\{U_{r+1\omega}, U_{r-1\omega}\}}{U_r} > k_{\text{set}} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $R_{g\text{-set}}$ 为励磁绕组一点接地电阻定值,依机组实际冷却方式整定; \max 表示取最大值; U_r 为励磁电压,由乒乓式转子接地保护装置内的采样电阻测量; $U_{r+1\omega}$ 和 $U_{r-1\omega}$ 分别为励磁绕组正、负对地电压的基波有效值; $\Delta\alpha_{\text{set}}$ 可取 $10\% \sim 20\%$; k_{set} 可取 $0.2 \sim 0.4$ 。

满足式(7)则认为励磁变低压侧发生了单相接地故障。

3 现场录波数据验证

图 6 为图 2 所示的励磁变低压侧发生 B 相金属性接地时,励磁绕组正端对地电压、负端对地电压的工频交流有效值最大值与励磁电压的比值 k ,故障过程中该比值大于 0.8。

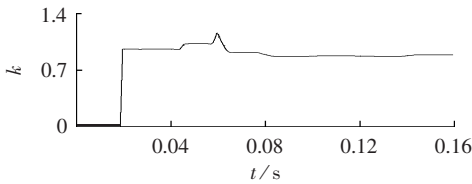


图 6 励磁变低压侧 B 相金属性接地时的 k 值
Fig.6 Variation of ratio k during phase-B metallic grounding fault at low-voltage side of excitation transformer

图 7 为某电厂 600 MW 机组励磁绕组一点接地故障时的励磁绕组正、负端对地电压以及励磁电压,故障过程中励磁绕组正、负端对地电压中含有少量工频交流分量,励磁电压中含有明显的 6 次谐波分量,其直流分量为 175 V 左右。图 8 为图 7 故障过程中励磁绕组正端对地电压、负端对地电压的工频交

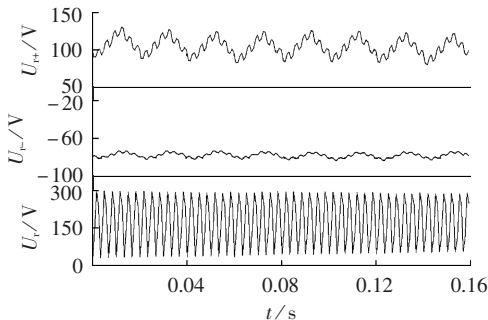


图 7 励磁绕组一点接地时的励磁电压
Fig.7 Excitation voltage when single-point grounding fault of excitation winding occurs

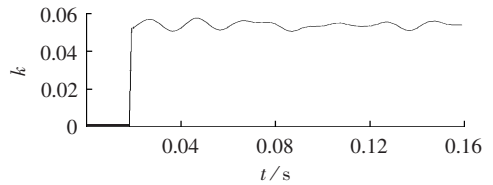


图 8 励磁绕组一点接地故障时的 k 值
Fig.8 Ratio k when single-point grounding fault of excitation winding occurs

流有效值最大值与励磁电压的比值 k ,故障过程中该比值为 0.05~0.06。

比较图 6 和图 8 可见,2 种情况下的 k 值差别明显,考虑非金属性接地时过渡电阻的影响, k_{set} 取 $0.2 \sim 0.4$,即可区分励磁变低压侧单相接地故障和励磁绕组一点接地故障。

本文方法可大幅缩短故障排查时间,有效性已得到多个现场案例的验证。

4 结语

本文提出了一种基于乒乓式转子接地保护原理的励磁变低压侧单相接地故障在线识别方法,当励磁绕组一点接地电阻计算值小于定值,接地故障位置计算值在 50% 左右,且励磁绕组正、负端对地电压的基波有效值最大值与励磁电压的比值超过设定值时,则认为励磁变低压侧发生了单相接地故障。理论分析和现场录波数据验证了本文方法的正确性。

本文方法能够有效区分励磁绕组一点接地故障和励磁变低压侧单相接地故障,显著提高了故障排查效率。

参考文献:

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 2 版. 北京:中国电力出版社,2001:214.
- [2] 马宏忠. 电机状态监测与故障诊断[M]. 北京:机械工业出版社,2007:906-907.
- [3] 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.
- [4] 郭光荣. 发电机转子励磁绕组接地保护[J]. 电力系统自动化,2003,27(20):73-76.
GUO Guangrong. The earth fault protection for generator rotor field coil[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(20):73-76.
- [5] 张侃君,尹项根,李方方,等. 一种新型低频电压注入式励磁绕组接地保护[J]. 电力系统自动化,2008,32(7):57-62.
ZHANG Kanjun,YIN Xianggen,LI Fangfang,et al. A new field winding ground fault protection with low frequency voltage injection[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(7):57-62.
- [6] 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): 74-77.
- 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): 74-77.
- [7] 李哲, 季学军, 仇新宏. 双周期可调节的变极性方波电压注入式转子接地保护[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 98-101.
- LI Zhe, JI Xuejun, QIU Xinhong. Injecting variable polarity square wave voltage with adjustable two periods for generator rotor ground fault protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 98-101.
- [8] 陈俊, 陈佳胜, 张琦雪, 等. 超超临界机组发电机定子转子接地保护方案[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 101-103.
- 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): 101-103.
- [9] 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.
- CHEN Jun, TAN Tao, WANG Guang, et al. Discussion on the function of detecting generator rotor earth fault location[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 31-33.
- [10] 石建勇, 杜志刚. 600 MW 汽轮发电机转子接地故障查找及原因分析[J]. 浙江电力, 2008(4): 71-72.
- SHI Jianyong, DU Zhigang. Search for grounding fault of 600MW turbine generator rotor and reason analysis[J]. Zhejiang Electric Power, 2008(4): 71-72.
- [11] 李平, 郭丽颖. 龙滩水轮发电机转子动态接地故障分析及处理[J]. 广西电力, 2009, 32(1): 21-26.
- LI Ping, GUO Liying. Analysis and treatment of rotor dynamic ground fault of hydro generator in Longtan[J]. Guangxi Electric Power, 2009, 32(1): 21-26.
- [12] 李富营. 水轮发电机转子动态接地故障原因分析及处理[J]. 大电机技术, 2007(2): 15-16.
- LI Fuying. Analysis and treatment for dynamic grounding fault of hydro generator rotor[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2007(2): 15-16.
- [13] 李翔, 韩浩, 赵强. 发电机大轴接地碳刷引起跳机事故的分析 and 处理[J]. 东北电力技术, 2005(6): 36-37.
- LI Xiang, HAN Hao, ZHAO Qiang. The analysis and treatment on accidents induced by shaft grounding carbon brush of the generator[J]. Northeast Electric Power Technology, 2005(6): 36-37.
- [14] 郑茂然, 陈建玉, 吴崇昊. 电刷接触不良对旋转励磁回路接地保护性能的影响[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(20): 94-97.
- ZHENG Maoran, CHEN Jianyu, WU Chonghao. Impacts of brush's bad contact on the performance of grounding protection of generator rotating excitation loop[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(20): 94-97.
- [15] 陈俊, 张琦雪, 吴龙, 等. 一起励磁变压器差动保护误动原因分析及启示[J]. 江苏电机工程, 2010, 29(2): 18-20.
- CHEN Jun, ZHANG Qixue, WU Long, et al. Analysis of mal-operation of excitation transformer differential protection[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2010, 29(2): 18-20.
- [16] 吴笃贵. 静止励磁系统保护配置方案[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 72-75.
- WU Dugui. Protection configuration scheme of static excitation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 72-75.

作者简介:



陈俊

陈俊(1978—),男,江苏姜堰人,高级工程师,硕士,主要从事电气主设备保护的研究、开发和管理工 作(E-mail: chenjun@nari-relays.com);

王昀帆(1977—),男,四川南充人,助理工程师,从事电厂电气自动化方面的工作;

严伟(1975—),男,湖南长沙人,研究员级高级工程师,硕士,从事电力系统继电

保护的研究、开发和管理工 作;

沈全荣(1965—),男,江苏吴江人,研究员级高级工程师,硕士,从事电力系统继电保护的研究、开发和管理工 作。

Online identification of single-phase grounding fault at low-voltage side of excitation transformer

CHEN Jun, WANG Yunfan, YAN Wei, SHEN Quanrong

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

Abstract: When single-phase grounding fault occurs at the low-voltage side of excitation transformer, the ping-pong type rotor grounding fault protection may detect the reduction of grounding insulation resistance and misconstrue it as the single-point grounding fault of excitation winding with location percentage of 50%. A method to online identify the single-phase grounding fault at the low-voltage side of excitation transformer is proposed. The criteria are: the calculated rotor winding grounding resistance is smaller than the setting value; the grounding location percentage is about 50%; and the ratio of the fundamental voltage at any terminal of excitation winding to the excitation voltage is larger than the setting value. Theoretical analysis and field waveform records prove its correctness.

Key words: excitation transformer; single-phase grounding fault; online identification; electric fault location; relay protection; ping-pong type rotor grounding fault protection