

发电机励磁绕组一点接地保护改进方案研究

兰华¹, 张波¹, 艾涛¹, 温林昌²

(1. 东北电力大学, 吉林 吉林 132012; 2. 宿迁供电公司, 江苏 宿迁 223800)

摘要: 针对乒乓式一点接地保护无法解决励磁电压变化对保护精度和灵敏度的影响问题, 采用了在励磁回路的双端注入一个直流电压, 并将开关切换回路接在该电压两端的改进方案, 给出了该方案的原理和动作判据, 并对接地电阻的计算方法进行分析。仿真实验结果表明改进方案能满足实际运行需要的精度和灵敏度。

关键词: 励磁回路接地保护; 灵敏度; 直流电压; 电力系统

Study on improvement plans of ping-pong type ground protection for generator field winding

LAN Hua¹, ZHANG Bo¹, AI Tao¹, WEN Lin-chang²

(1. Northeast Dianli University, Jilin 132012, China; 2. Suqian Electric Power Company, Suqian 223800, China)

Abstract: Current ping-pong type field winding ground protections cannot detect the accuracy and sensitivity of winding affected by voltage change. To remedy this defect, this paper uses an improved scheme for ping-pong type field winding ground protection, i.e. a DC voltage is injected into field winding and switching-over circuit is connected in parallel with the injected voltage. Principle of this improving scheme and the criterion for protection action are given, and several problems such as the calculation method of grounding resistance are analyzed. Simulation results show that the accuracy and sensitivity of the improved scheme can meet the requirement of practical operation.

Key words: field winding ground fault protection; sensitivity; DC voltage; power system

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)07-0042-05

0 引言

发电机励磁回路接地是指励磁绕组与转子铁芯之间的绝缘损坏或者击穿, 它包括励磁回路一点接地和两点接地故障。在发生励磁回路一点接地时, 由于没有形成电流回路, 励磁电压仍然正常, 因此对发电机无害。但是励磁回路一点接地很容易发展成为两点接地故障, 给电机和系统带来严重危害。现在普遍采用以励磁电压为参量的乒乓式励磁保护^[1-6], 但是在发电机停机励磁消失状态下, 由于励磁电压很小或等于零, 乒乓切换式保护将无法检测到励磁绕组接地故障。为解决这个问题, 文献[7]针对模拟式转子一点接地保护方式提出了改进方案, 但其分析是在假设励磁电压不变的情况下进行的, 当励磁电压变化时, 将对计算带来较大误差, 本文采用一种乒乓切换式微机保护的改进方案, 并对其原理、灵敏度和应用中的若干问题进行分析。

1 乒乓式励磁回路一点接地保护基本原理

目前, 发电机的励磁回路大量采用了乒乓式励磁回路一点接地保护, 其原理图如图1所示^[8]。

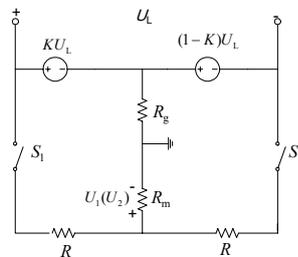


图1 乒乓式励磁回路一点接地保护原理图

Fig.1 Diagram of ping-pong one-point-earth-fault protection of generator rotor

其中: U_L 为转子绕组电压; R 为降压电阻; R_m 为测量电阻; K 为接地位置距离转子正极的电气百分距离。假设励磁电压 U_L 在开关切换过程中不变, R 、 R_m 已知, U_1 和 U_2 为保护的测量电压。转子绕组的直流电阻很小, 可以忽略。

其基本原理如下:

S_1 接通, S_2 断开时:

$$U_1 = \frac{KU_L}{(R + R_m + R_g)} R_m \quad (1)$$

S_2 接通, S_1 断开时:

$$U_2 = \frac{(1-K)U_L}{(R + R_m + R_g)} R_m \quad (2)$$

可以推导出:

$$K = \frac{U_1}{U_1 + U_2} \quad (3)$$

$$R_g = \frac{R_m U_L}{(U_1 + U_2)} - (R_m + R) \quad (4)$$

该保护的保护范围为整个励磁绕组。这种保护不受励磁回路绕组对地电容及接地点位置的影响, 调试、整定很方便, 正确动作率高, 优点突出。但存在以下不足:

① 电机停机或者无励磁状态时不能检测发电机励磁回路绕组接地故障的问题。

② 故障距离和接地电阻值是在励磁电压不变的情况下计算得到, 励磁电压变化时, 故障距离和接地电阻值无法由计算得到。

2 改进方案

2.1 单端注入直流电压源的乒乓式励磁回路一点接地保护^[7]

针对上述问题, 文献[7, 9]采用了在励磁回路单端叠加辅助直流电源的方式, 其原理图如图 2 所示。

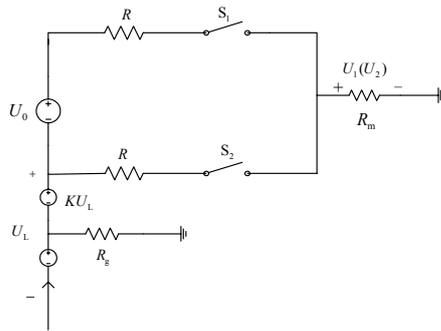


图 2 单端注入直流电压源的乒乓式一点接地保护原理图

Fig.2 Diagram of injecting DC voltage on ping-pong one point earth fault protection of generator rotor

在励磁电压 U_L 不变的情况下, S_1 接通, S_2 断开时, 可得:

$$U_1 = \frac{U_0 + KU_L}{R + R_m + R_g} R_m \quad (5)$$

S_1 断开, S_2 接通时:

$$U_2 = \frac{KU_L}{R + R_m + R_g} R_m \quad (6)$$

由此可以推导出:

$$K = \frac{U_0 U_2}{(U_1 - U_2) U_L} \quad (7)$$

$$R_g = \frac{U_0}{(U_1 - U_2)} R_m - (R_m + R) \quad (8)$$

在 $U_L = 0$ 、开关 S_1 接通时, 外加直流电压源 U_0 、 R_m 、 R 、 R_g 形成回路, 通过测量 R_m 的压降 U_1 和列解回路方程可求得 R_g 的值。解决了电机停机或者无励磁状态时不能检测发电机励磁回路绕组接地故障的问题。从式 (8) 可以看出: k 由外加直流源电压、换路后的电流变化和励磁电压共同决定。在外加电压很小时, 换路后电流的变化很小, 不利于计算。在外加电源很大时又会使回路电流很大, 易烧毁器件, 同时也会使励磁电压变化。励磁电压变化时, 该保护的故障距离和接地电阻值也无法由计算得到。假设开关在一次切换过程中励磁电压分别 U_L 和 U_L' , 此时可求得接地电阻值为:

$$R_g' = \frac{U_0 + K(U_L - U_L')}{(U_1 - U_2)} R_m - (R_m + R) \quad (9)$$

用式 (8) 减去式 (9) 可得:

$$\Delta R_g = R_g - R_g' = \frac{K \Delta U_L}{\Delta U_{mea}} R_m \quad (10)$$

由式 (10) 可以画出函数关系曲线如图 3 所示。

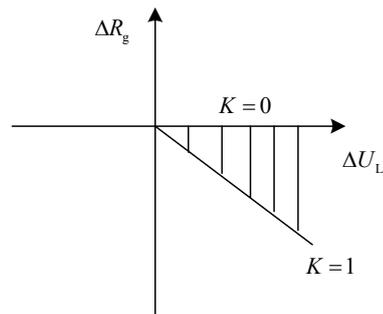


图 3 接点电阻随励磁电压变化关系图

Fig.3 Diagram of earth resistance with electromotive force change

由曲线可知, 如果按照励磁电压不变来计算接地电阻值, 会带来较大的误差。

2.2 考虑励磁电压变化的乒乓式励磁绕组一点接地保护

由图 1 可知该电路在考虑励磁电压变化的情况

下,列解的数学方程有两个,但存在 KU_L 、 R_g 、和 KU'_L 三个未知量,无法计算。如果要由运算得到励磁电压变化,必须增加方程数量,而单独增加一条支路,不但增加了开关数量,在开关轮流切换时也增加了新的变量,仍无法求解。可以采用在不增加开关数量的同时,采用增加网孔数,来增加求解方程数,同时方程的未知量不变。故对图 1 电路做如图 4 改进。

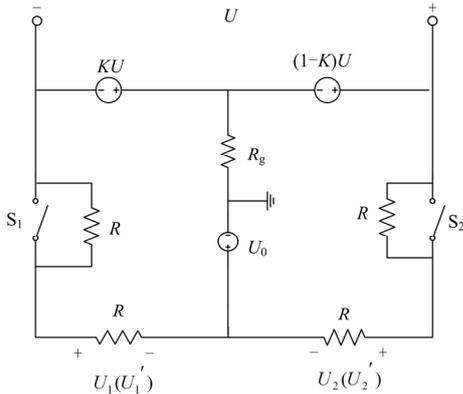


图 4 乒乓式一点接地保护改进原理图

Fig.4 Diagram of improving ping-pong one-point-earth protection of generator rotor

图 4 中: U 是额定励磁电压(考虑它的变化不同切换采样时刻分别用 U_L 和 U'_L 表示); R 为测量电阻; R_g 为过渡电阻; K 为接地位置距离转子负极的电气百分距离。

其原理如下:

S_1 接通, S_2 断开时:

$$U_0 + KU_L = -(R + R_g) \frac{U_1}{R} - R_g \frac{U_1}{R} \quad (11)$$

$$U_L = -U_1 + 2U_2 \quad (12)$$

S_1 断开, S_2 接通时:

$$U_0 + KU'_L = -(2R + R_g) \frac{U'_1}{R} - R_g \frac{U'_2}{R} \quad (13)$$

$$U'_L = -2U'_1 + U'_2 \quad (14)$$

在实测采样取得 U_1 、 U_2 、 U'_1 、 U'_2 后,联立式(11)~式(14),可以计算出不包含 U_L 和 U'_L 的 K 和 R_g 的表达式为:

$$R_g = \frac{(4U'_1U_2 - U_1U'_2) + (-U_1 + 2U_2 + 2U'_1 - U'_2)U_0}{U'_2(2U_1 - U_2) - U'_1(U_1 + 4U'_2)} R \quad (15)$$

$$K = \frac{U_1(U'_1 - U'_2) + 2U'_1U'_2}{U_1(U'_1 - 2U'_2) + U_2(4U'_1 + U'_2)} \quad (16)$$

计算出过渡电阻 R_g 就可以决定保护的动作为。由式(15)可以看到 R_g 与故障点位置 K 无关,灵敏度不随故障点位置改变。解决了因励磁电压变化带来的接地电阻计算的误差问题,为励磁回路接地电阻 R_g 提供了更高精度的计算;由于直流电压源 U_0 的注入,在电机停机或者无励磁状态时仍能检测发电机励磁回路绕组接地故障;由于没有固定的平衡点,保护不存在死区。一点接地的动作判据为:

$$R_g < R_{g.set} \quad (17)$$

$R_{g.set}$ 为一点接地过渡电阻整定值。一般可取为 $5 \sim 50 \text{ k}\Omega$ 或者更大。当一点接地故障发生后,根据整定判据,保护装置可以动作于信号。

3 灵敏度分析

在实际运行中,保护灵敏度受以下因素影响:

(1) 直流电压测量电路的精度限制,包括直流测量芯片的最大线性度、AD 转换芯片精度等;(2) 保护电路元件因素,包括注入电压的大小、电子开关的正向压降和处于截止状态时的泄漏电流等;(3) 其它因素,包括发电机励磁系统中的谐波电压分量等^[10]。取电压的最小准确测量值为 0.25 V ,以 $U = 500 \text{ V}$ (额定运行电压)、 $R = 20 \text{ k}\Omega$ 、 $U_0 = 50 \text{ V}$ 为例进行讨论。不计其它相关因素的影响,则保护能检 $R_{g.max}$ 为:

$$R_g = \frac{(4U'_1U_2 - U_1U'_2) + (-U_1 + 2U_2 + 2U'_1 - U'_2)U_0}{U'_2(2U_1 - U_2) - U'_1(U_1 + 4U'_2)} R = 316.6 \text{ (k}\Omega)$$

由上式可见,该保护可以检测 $R_g = 316.6 \text{ k}\Omega$ 的一点接地故障,灵敏度很高。

4 算例

取 $U = 500 \text{ V}$ (额定运行电压) $U_0 = 50 \text{ V}$ 、 $R = 20 \text{ k}\Omega$, R_g 为一点接地电阻, R'_g 为编写接地电阻程序求出的值。

(1) 改变 R_g 的大小检测保护的精度和灵敏度,结果如表 1 所示。表 1 仿真结果表明:随着 R_g 的增加测量误差增大。表格中的误差数据在 $R_g \leq 5 \text{ k}\Omega$ 时用绝对误差, $R_g > 5 \text{ k}\Omega$ 时用相对误差。

表 1 一点接地保护精度和灵敏度计算结果

Tab.1 Results of sensitivity and precision experiment of one point ground fault protection

$R_g / k\Omega$	R_g'	测量误差
0.1	0.099 3	7 Ω
2	1.99	10 Ω
50	49.5	1%
100	98.6	1.4%

(2) 励磁电压为零, 注入 50 V 直流电压, 测试在电机停机或励磁消失情况下接地电阻计算结果。

表 2 无励磁电压时一点接地计算结果

Tab.2 Results of no field electromotive force change of one point ground fault protection

接地电阻/ k Ω	测量值/ k Ω	测量误差
0	0.01	10 Ω
1	1.04	40 Ω
5	4.97	30 Ω
10	9.93	0.7%
20	19.82	0.9%
30	29.71	0.96%
100	99.58	0.42%

表 2 结果表明: 在发电机停机或无励磁的情况下, 通过双端叠加直流电压源可以解决接地电阻无法计算的问题。

表 3 励磁电压变化试验结果

Tab.3 Results of field electromotive force change experiment of one point ground fault protection

序号	k	U / V	R_g 测量值/ k Ω
1	0.2	500	47.5
2	0.2	450	46.2

5 仍需考虑的若干问题分析

5.1 接地电阻计算方法

发电机转子的偏心使得励磁绕组上不可避免地存在交流分量; 由于采用可控硅励磁调节器, 不同的导通角下也有交流分量。由于交流分量的存在, 转子绕组接地电阻的测量会产生误差。为了消除交流分量的影响, 可以采用傅里叶算法对测量电阻 R_m 上电压 $U_1(U_1')$ 的采样值进行滤波^[1,11]。假如采样频率为 600 Hz, 经 T_1 后读取 $U_{k,1}, U_{k,2}, \dots, U_{k,N-1}, U_{k,N}, U_{k,N+1}$ 。可以按下式计算 $U_1(U_1')$;

$$U_{1,N} = \frac{U_{k,1} + U_{k,2} + \dots + U_{k,N-1} + U_{k,N}}{N}$$

$$U_{1,N+1} = \frac{U_{k,2} + U_{k,3} + \dots + U_{k,N} + U_{k,N+1}}{N}$$

采用递归算法: $U_{1,N+1} = U_{1,N} + \frac{U_{k,N+1} - U_{k,1}}{N}$

如果 $|U_{1,N+1} - U_{1,N}| \leq \varepsilon$, R_m 上的测量电压 U_1 取 $U_{1,N+1}$ 。

5.2 励磁电压反向危害

为了防止励磁电压反向时的反向高电压对开关 S_1 、 S_2 的危害, 可以增设 RC 串联支路, 其测量回路如图 5。

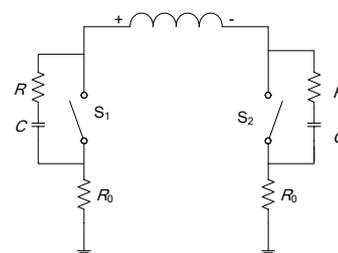


图 5 开关保护电路原理图

Fig.5 Diagram of switch protection

这样可以防止保护特性受励磁电压波动的影响和测量误差增大问题。

5.3 电机启动对保护的影响

仿真结果表明, 励磁电压突然升高, 计算出的接地电阻值将小于实际的接地电阻值, 当发电机启动的时候, 励磁调节器自动加励磁, 励磁电压从零升到额定电压, 调节时间为 2~3 s, 而保护开关的切换周期为 1~2 s, 电机的启动将影响保护的计算周期, 此时可以采用多次计算再出口的方式以防止保护误动。

6 结论

本文的改进方案对于一点接地保护, 接地电阻的计算不受故障位置和励磁电压变化的影响。解决了因励磁电压变化带来的接地电阻计算的误差问题, 为励磁回路接地电阻 R_g 提供了更高精度的计算; 解决了单端注入直流电源时保护灵敏度在励磁绕组正负端接地相差很大的问题; 解决了原有保护在电机停机或者无励磁状态时不能检测发电机励磁回路绕组接地故障的问题。保护的精度和灵敏度满足实际需要。

参考文献

[1] 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 Guang-rong. The Earth Fault Protection for Generator Rotor Field Coil[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 73-76.

[2] 徐立明, 赵彬, 唐云龙, 等. 采用动态测量技术实现转子一点接地保护[J]. 继电器, 2006, 34(17): 18-19.

XU Li-ming, ZHAO Bin, TANG Yun-long, et al. Realizing Rotor Grounding Protection by Adopting Dynamic Measurement [J]. Relay, 2006, 34(17): 18-19.

[3] 黄大健. 发电机转子一点接地故障处理[J]. 广西电力, 2007, 9(9): 130-132.

HUANG Da-jian. Processing on Generator Rotor Grounding Breakdown[J]. Guangxi Electric Power, 2007, 9(9): 130-132.

[4] 李宾, 屠黎明, 苏义, 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 Li-ming, SU Yi, et al. Summarization of One Point Earth-Fault Protection for Generator Rotor[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(11): 33-36.

[5] 余良国. 一种发电机乒乓式转子接地保护电路的设计[J]. 控制技术, 2008, 27(14): 72-74.

YU Liang-guo. Electric Circuit Design on Ping-Pong Type of Ground Protection for Field Winding[J]. Control Technology, 2008, 27(14): 72-74.

[6] GAN Zhi-jun, Khincha H P, Elangovan S. New Ground Fault Protection System for the Field Winding of a Brushless Generator[J]. Electric Machines and Power Systems, 1997, 25(5): 475-483.

[7] 张侃君, 尹项根, 陈德树. 乒乓式励磁绕组接地保护方式的改进与分析[J]. 电网技术, 2007, 31(12): 28-41.

ZHANG Kan-jun, YIN Xiang-gen, CHEN De-shu. Improvement and Analysis on Ping-Pong Type of Ground Protection for Field Winding[J]. Power System Technology, 2007, 31(12): 28-41.

[8] 卢继平, 张向军, 王晓健, 等. 交流励磁发电机转子绕组一点接地保护[J]. 继电器, 2008, 36(1): 5-8.

LU Ji-ping, ZHANG Xiang-jun, WANG Xiao-jian, et al. Rotor Winding One Point to Ground Fault Protection for AC-excited Generators[J]. Relay, 2008, 36(1): 5-8.

[9] 侯有韬, 张丽丽. 外加电源式定子接地保护影响因素的分析[J]. 继电器, 2005, 33(12): 27-31.

HOU You-tao, ZHANG Li-li. Influencing Factors of Stator Ground Fault Protection with Outside Sources[J]. Relay, 2005, 33(12): 27-31.

[10] 王显平. 提高切换采样式励磁回路接地保护灵敏度及可靠性的方法[J]. 继电器, 2002, 30(6): 52-53.

WANG Xian-ping. A Way to Improve the Sensitivity and Reliability of Grounding Protection in Switch-over Sampling Energized Circuit[J]. Relay, 2002, 30(6): 52-53.

[11] 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(16): 41-45.

XU Xi-dong, JIN Yu, GUO Xiao-ming. Study of Rotor Earth-fault Protection with Switch Sampling Principle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(16): 41-45.

收稿日期: 2009-04-09

作者简介:

兰 华 (1956-), 女, 教授, 硕士生导师, 主要从事电
工理论及继电保护的研究;

张 波 (1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系
统继电保护; E-mail:bozhang917@126.com

艾 涛 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系
统控制与继电保护。

关于征集“中国智能电网学术研讨会”会议论文的通知

为了推动我国智能电网技术的发展, 提高国内智能电网设备的开发、制造和运行水平, 促进与世界先进水平接轨, 中国电工技术学会电力系统控制与保护专业委员会、清华大学电机工程与应用电子技术系、华中科技大学电气与电子工程学院和华北电力大学电气与电子工程学院主办,《电力系统保护与控制》杂志社承办的“中国智能电网学术研讨会”定于 2010 年 8 月召开, 特向全国征集论文。详细征文通知请见 www.dlbn.net。