

乒乓式励磁绕组接地保护若干问题的分析

兰华, 张波, 李卫国

(东北电力大学, 吉林 吉林 132012)

摘要: 针对目前乒乓式励磁绕组接地保护存在的问题, 从励磁电压变化、元件参数选取、交流分量等方面对乒乓式励磁绕组接地保护的测量精度进行了理论分析和仿真验证。实验结果表明: 在桥臂电阻和测量电阻选取不同阻值时保护精度不同, 励磁电压变化时保护的精度也相应变化。为了尽量减少交流分量的影响, 采用傅里叶算法对测量值进行了滤波处理。仿真结果验证了理论分析的正确性, 测量数据与测量精度满足实际需要。

关键词: 乒乓式; 转子接地保护; 励磁电压; 暂态

Analysis of ping-pong type of rotor earth fault protection

LAN Hua, ZHANG Bo, LI Wei-guo

(Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: In view of the problem of current ping-pong-type of rotor earth fault protection, this paper does theoretical analysis and simulation on its measuring accuracy from the the aspects of excitation voltage change, the components parameters selecting and AC components, etc. The experimental results show that the accuracy is different when the bridge arm resistance and measurement resistance are different, protection also changes accordingly in accuracy with excitation voltage changed. In order to minimize the impact of the AC component, Fourier algorithm is used to filter the measurements. The simulation results confirm the correctness of theoretical analysis. Measurement data and measurement accuracy can meet the actual demand.

Key words: ping-pong-type; rotor earth fault protection; excitation voltage; transient

中图分类号: TM772 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)15-0028-05

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。现在普遍采用乒乓式励磁保护, 但是乒乓切换式保护在应用中存在着一些问题: 由于切换电路中元件参数选取不合适, 会对保护精度造成较大影响; 接地电阻数值的变化也会影响保护动作的准确性; 另外, 保护在应用中, 相关因素对保护性能也会产生一定的影响。本文从励磁电压变化、元件参数选取、交流分量等方面对乒乓式励磁绕组接地保护的测量精度进行理论分析和仿真验证。

1 乒乓式转子接地保护原理分析

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^[1-9], 其原理图如图1所示。

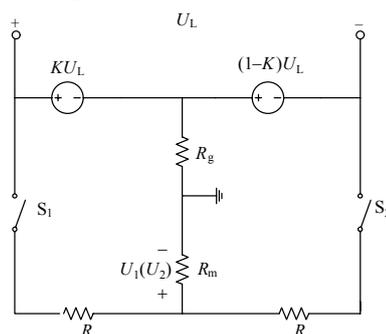


图1 乒乓式励磁回路一点接地保护原理图

Fig.1 Diagram of one point earth ping-pong 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, 可以忽略不计。保护的基本

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。为了避免扰动带来的误差, 可以进行多次测量, 在连续多次计算皆满足:

$$R_g < R_{g.set} \quad (5)$$

才能确认发生了一点接地故障, 再转入两点接地故障流程。其中, $R_{g.set}$ 为一点接地保护整定值。

2 须考虑的若干问题分析

2.1 励磁电压变化对保护精度的影响

对图 2 所示电路, 假设开关在一次切换过程中励磁电压分别 U_L 和 U'_L , 此时可求的接地电阻值为:

$$R'_g = \frac{U_0 + K(U_L - U'_L)}{(U_1 - U_2)} R_m - (R_m + R) \quad (6)$$

用式 (4) 减去式 (5) 可得:

$$\Delta R_g = R_g - R'_g = \frac{K \Delta U_L}{\Delta U_{mea}} R_m \quad (7)$$

可以画出如图 2 所示函数关系曲线。

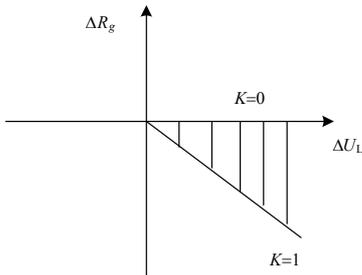


图 2 接地电阻随励磁电压变化关系图

Fig.2 Diagram of earth resistance with electromotive force change

如果只按励磁电压不变来计算接地电阻值, 势必会对计算精度带来较大的误差。

2.2 参数选取对保护精度的影响

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 3。

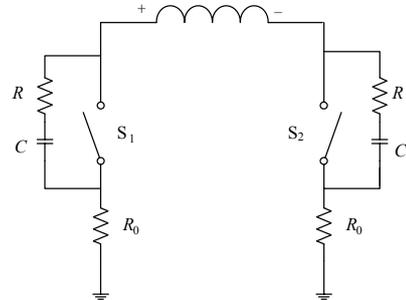


图 3 开关保护电路原理图

Fig.3 Diagram of switch protection

这样切换电路中主要的非线性元件有励磁绕组的电感、对地电容和电子开关缓冲回路电容。在开关的切换过程中, 这三种非线性元件都会出现暂态过程。由于切换回路中流过的电流较小, 励磁绕组电感和电子开关缓冲电容的暂态过程对保护精度的影响可以忽略不计。将励磁绕组简化为一个含有内电动势的 π 型等效电路, 励磁绕组对地电容等效为电容 C_1 和 C_2 , $C_1 = KC_y$, $C_2 = (1-K)C_y$, C_y 为励磁绕组对地总电容。此时保护的原理图化简为图 4。

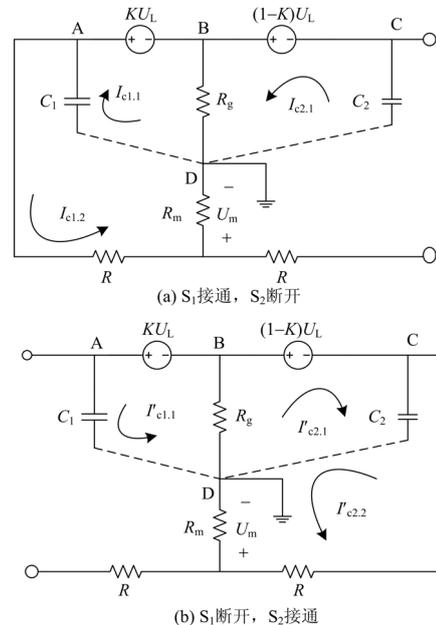


图 4 乒乓式励磁回路一点接地保护等效图

Fig.4 Equivalent diagram of one point earth fault protection of ping-pong generator rotor

假设切换过程中, 励磁电压保持不变, 并且正常运行时励磁绕组对地电阻为无穷大。

S_1 接通, S_2 断开时:

$$U_{C1} = KU_L - I_1 R_g \quad (8)$$

$$U_{C2} = -(1-K)U_L - I_1 R_g \quad (9)$$

S_1 断开, S_2 接通时:

$$U_{C1} = KU_L + I_2 R_g \quad (10)$$

$$U'_{C2} = -(1-K)U_L + I_2 R_g \quad (11)$$

当 S_1 接通, S_2 断开时, 电容 C_1 和 C_2 由电压 U_{C1} 和 U_{C2} 分别开始放电和充电, 最后达到电压 U'_{C1} 和 U'_{C2} 。如图 4 (a) 所示, C_1 有两条放电回路: 一路为电流 $I_{C1.1}$, 由 A 点 (电容正极), 经 B 点、D 点至电容负极; 另一路为电流 $I_{C1.2}$, 由 A 点, 经 R、 R_m 、D 点至电容负极。当 $R + R_m \gg R_g$ 时, $I_{C1.1} \gg I_{C1.2}$ 。电容 C_2 的充电电流也有两路: 一路为电流 $I_{C2.1}$, 由 C 点 (电容负极), 经 B 点、D 点至电容正极; 另一路为电流 $I_{C2.2}$, 由 C 点经 B 点、A 点、R、 R_m 、D 点至电容正极; 同样, 当 $R + R_m \gg R_g$ 时, 电流 $I_{C2.1} \gg I_{C2.2}$ 。同理, 当 S_1 断开, S_2 接通时, 电容 C_1 和 C_2 由电压 U'_{C1} 和 U'_{C2} 开始充放电, 其过程与 S_1 接通, S_2 断开时相类似。

由上述分析可知, 当电阻 $R + R_m$ 为高阻时, 流过采样电阻的暂态电流较小, 即励磁绕组对地电容对采样电压的测量的影响不大, 反之, 则会产生较大的冲击电压, 影响保护精度。

2.3 交流分量的影响

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。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 $U_1(U'_1)$:

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

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

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

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

取 $U_{1,N+1}$ 。

2.4 电机启动对保护的影响

由式 (7) 可知, 励磁电压突然升高时, 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。

3 仿真分析

构建励磁绕组接地故障仿真模型^[10], 励磁绕组用 4 段 π 型等效电路来表示, 采用三峡左岸电厂 ALSTOM 机组参数^[11]额定电压为 475.9 V, 空载电压为 191.8 V, 电阻 $R_e = 0.1029 \Omega$, 电感 $L_e = 1.58 \text{ mH}$, 对地电阻 $R_y = 5 \text{ M}\Omega$, 对地电容 $C_y = 1.264 \mu\text{F}$ 。开关 S_1 、 S_2 的切换周期为 1 s。阻容吸收回路参数为 $R_s = 20 \Omega$, $C_s = 0.1 \mu\text{F}$ 。仿真模型如图 5 所示。

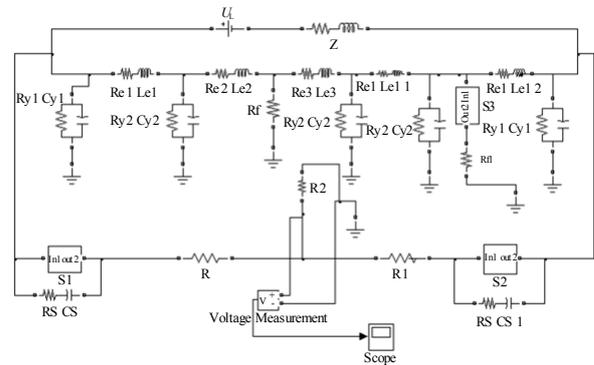


图 5 转子绕组接地故障仿真模型

Fig.5 Rotor winding earth fault simulation model

其他参数为: 一点接地故障位置 $K = 0.4$, 一

$$R_{g1} = 20 \text{ k}\Omega; \quad R_{e1} = \frac{1}{4} R_e;$$

$$R_{e2} = 0.15 R_e; \quad R_{e3} = 0.10 R_e; \quad L_{e1} = 0.25 L_e;$$

$$L_{e2} = 0.15 L_e; \quad L_{e3} = 0.10 L_e; \quad R_{y1} = 8 R_y;$$

$$R_{y2} = 4 R_y; \quad C_{y1} = 0.125 C_y; \quad C_{y2} = 0.25 C_y。$$

3.1 一点接地故障实验

假设在开关切换过程中励磁电压保持不当, R 和 R_m 取不同的数值时, R_m 两端的电压波形及精度测量结果如图 6 所示。

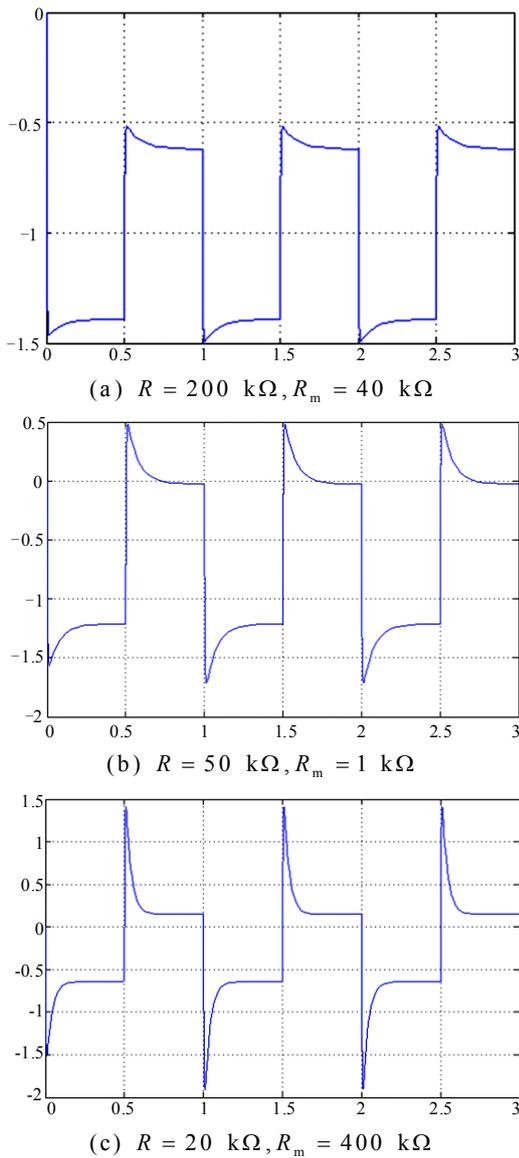


图 6 R 和 R_m 变化时采样电压波形图

Fig.6 Diagram of voltage waveform when R and R_m change

从仿真波形可以看出：当 R 的阻值越小，由励磁绕组对地电容充放电引起暂态现象就越明显。但是 R 的阻值越小，暂态过程持续的时间也越短。

表 1 R 和 R_m 变化时一点接地测量结果

Tab.1 Measurement results of one point earth fault protection when R and R_m change

$R/\text{k}\Omega$	R_m/Ω	$R_g/\text{k}\Omega$	测量误差
10	200	19.97	0.15%
20	400	19.999	0.005%
100	2 000	20.56	2.8%
200	4 000	22.05	10.25%

从仿真数据可以看出，桥臂电阻 R 和采样电阻 R_m 阻值较小时，测量精度较高，但是考虑到励磁绕组的对地绝缘的因素，所选取的阻值不能太小，一般选取分压电阻 $R = 20 \sim 50 \text{ k}\Omega$ ，取样电阻 $R_m = 0.02R$ ，切换周期按工程要求选择为 $1 \sim 2 \text{ s}$ 。

3.2 两点接地故障实验

由开关 S_3 控制和模拟第二点接地故障。两故障点之间的电气距离为 0.35 。

(1) 两点接地时采样电压波形

$T_1 = 1.05 \text{ s}$ 时，开关 S_3 投入， $R = 20 \text{ k}\Omega$ 、 $R_m = 400 \Omega$ 、 $R_{g1} = 20 \text{ k}\Omega$ 、 $R_{g2} = 2 \text{ k}\Omega$ 时采样电压的波形如图 7 所示。

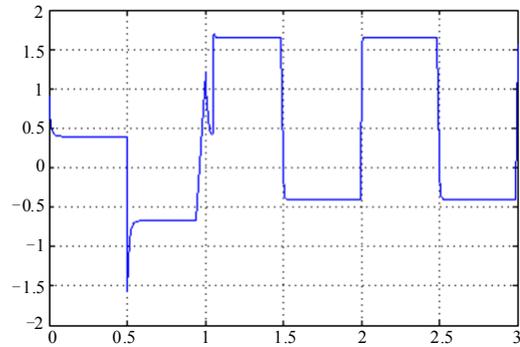


图 7 两点接地时采样电压波形

Fig.7 Diagram of voltage waveform with two-point earth fault protection

(2) 两点接地故障精度计算结果

$T_1 = 1.05 \text{ s}$ 、 $R = 20 \text{ k}\Omega$ 、 $R_m = 400 \Omega$ 、 $R_{g1} = 20 \text{ k}\Omega$ ，其他参数不变。 R'_{g2} 为计算值，仿真结果如下。

表 2 两点接地保护精度计算结果

Tab.2 Precision results of two-point earth fault protection

$R_{g2}/\text{k}\Omega$	$R'_{g2}/\text{k}\Omega$	测量误差
0.1	0.099	1Ω
2	1.98	20Ω
50	49.56	0.88%
100	98.63	1.63%

从仿真结果可知，第二点接地电阻的计算值与实际值相差不大，所以可以按照电阻判据来判断两点接地故障。

(3) 励磁电压变化实验结果

其余参数不变，只改变励磁电压的数值，观察励磁电压变化对保护精度的影响如表 3 所示。

表3 励磁电压变化时保护精度实验结果

Tab.3 Accuracy of experimental results
with excitation voltage change

序号	U/V	$R_{\Sigma}^{\prime}/k\Omega$
1	0	—
2	475.9	1.908
3	200	1.901

4 结论

乒乓切换式保护的原理是基于稳态直流工况，未考虑惯性元件在切换过程中的暂态影响，也未考虑开关在切换过程中励磁电压变化，即认为励磁电压为常数。所以在切换过程中，若原件参数选取不合适会对保护的精度和灵敏度带来较大的影响。并且在开关切换过程中，如果励磁电压发生变化，可能导致保护的误动或拒动。本文通过仿真对元件参数进行了合理的选取，并分析了励磁电压变化对保护精度的影响。测量数据与测量精度满足实际需求。

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]. 广西电业, 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] 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.
- [7] 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.
- [8] 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): 41245.
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.
- [9] 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.
- [10] 屠黎明, 吴济安, 胡敏强, 等. 大型水轮发电机不完全差动保护的配置及其灵敏度分析[J]. 电力自动化设备, 2002, 22 (1): 6-10.
TU Li-ming, WU Ji-an, HU Min-qiang, et al. Large hydrogenerators incomplete differential protection configuration and its sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22 (1): 6-10.
- [11] 刘俊宏, 王维俭, 王祥市. 发电机不完全纵差保护[J]. 中国电力, 1997, 30 (4): 34-37.
LIU Jun-hong, WANG Wei-jian, WANG Xiang-shi. Generator incomplete differential protection[J]. Electric Power, 1997, 30 (4): 34-37.

收稿日期: 2009-09-03

作者简介:

兰 华 (1956-), 女, 教授, 硕士生导师, 主要从事电工程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