

发电机定子单相接地故障电阻在线监测研究

罗建¹, 熊再豹¹, 张强², 杨健², 张长春³, 李松林¹

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000;
3. 重庆电力公司万州供电局, 重庆 404000)

摘要: 针对目前基波零序电压型和三次谐波型发电机定子单相接地保护不能计算接地故障电阻的情况, 提出了一种在线监测单相接地故障电阻的方法, 以便实时监测发电机由于绝缘降低而引发的单相接地故障。结合行波故障定位功能, 提出了在发电机零序网络结合三次谐波等效电路中建立定子接地电阻的计算模型, 运用发电机定子单相接地多回路仿真模型对某大型发电机进行仿真实验。仿真数据表明了所提出的方法是准确可行的。

关键词: 发电机保护; 定子单相接地; 接地故障电阻; 在线监测

Study of online monitoring of the stator single-phase grounding fault resistance in generator

LUO Jian¹, XIONG Zai-bao¹, ZHANG Qiang², YANG Jian², ZHANG Chang-chun³, LI Song-lin¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipments & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China;
3. Chongqing Wanzhou Electric Power Bureau, Wanzhou 404000, China)

Abstract: On the condition that the grounding resistance on the stator single-phase grounding fault can't be monitored by the stator ground relay based on third harmonic voltage and zero-sequence fundamental voltage, a method for monitoring the grounding resistance online is proposed. At first, fault location by traveling wave is used, and then the model combined zero sequence equivalent circuit diagram with equivalent third harmonic circuit of stator ground fault to calculate the grounding resistance online is presented. At last, a large generator is simulated with the multi-loop analysis model to test the method, and the simulation data verify the feasibility of the method.

Key words: generator protection; stator single-phase grounding; grounding fault resistance; monitoring online

中图分类号: TM772; TM341 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)20-0136-05

0 引言

随着冷却方式的不断改进, 发电机的单机容量也不断提高。大型发电机是电力系统中最重要的主设备之一, 大型发电机的故障和停运, 将会造成巨大的经济损失和严重的后果。据统计, 发电机损坏事故中有50%是由定子绕组绝缘损坏引起的^[1-2], 定子绕组与铁心之间的绝缘破坏就会发生定子绕组单相接地故障, 这是发电机最常见的一种故障, 然而如果不加以保护和预防, 定子绕组单相接地故障会演变为匝间短路或者相间短路, 从而烧毁定子绕组和铁心, 造成巨大的经济损失。因此, 开展大型发电机定子绕组接地的在线监测尤为必要。另外, 对发电机进行在线监测能够及时预防事故发生, 防止事故扩大和提高事故分析的正确性, 还将使维修方

式从计划检修向更灵活的检修方式转变, 从而节约大量的物力和财力。

对于发电机定子单相接地故障, 目前已有成熟的保护算法^[3-7], 发电机定子绕组局部放电的监测技术已经运用到定子绝缘监测中, 但是对单相定子接地故障电阻的在线计算方法研究还很少。利用发电机可以测量的电压电流量来在线监测发电机定子绕组绝缘接地情况, 是本文要解决的主要问题。本文尝试利用零序网络和三次谐波电压等效网络来实时监测计算发电机定子单相接地电阻。

1 基于基波零序网络的发电机定子接地电阻监测

图1是发电机单相接地时的零序网络图。图中 Z_n 为发电机中性点接地阻抗(包括经消弧线圈或电阻接地), Z_c 为发电机定子和机端对地容抗总和,

基金项目: 国家111计划项目(B08036)

R_g 为接地电阻, 工程上一般取 $\dot{U}_p = \alpha \dot{U}_a$ [8], 其中: α 即为故障点到中性点的匝数与单相单分支绕组总匝数的比值。

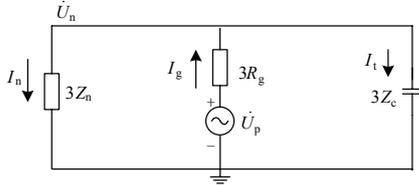


图 1 发电机定子单相接地零序网络图

Fig.1 Stator single grounding zero sequence equivalent circuit diagram

对于图 1, 根据电路原理有:

$$\dot{I}_n = \frac{\dot{U}_n}{3Z_n} \quad (1)$$

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{U}_n}{3Z_c} \quad (2)$$

$$\dot{I}_g = \dot{I}_c + \dot{I}_n \quad (3)$$

$$\dot{U}_p = \dot{I}_g \times 3R_g + \dot{U}_n \quad (4)$$

联立式 (1) ~ (4) 可以解出:

$$R_g = \frac{\alpha \dot{U}_a - \dot{U}_n}{\frac{\dot{U}_n}{Z_c} + \frac{\dot{U}_n}{Z_n}} \quad (5)$$

由式 (5) 可知仅需要故障位置百分比 α 和可测量的中性点基波电压或者零序基波电压就可以实时计算出定子绕组的接地情况。图 2 是利用多回路模型的仿真数据, 某一设定的接地故障电阻在取不同的 α 值时的计算结果, 通过比较可以看出, 式 (5)

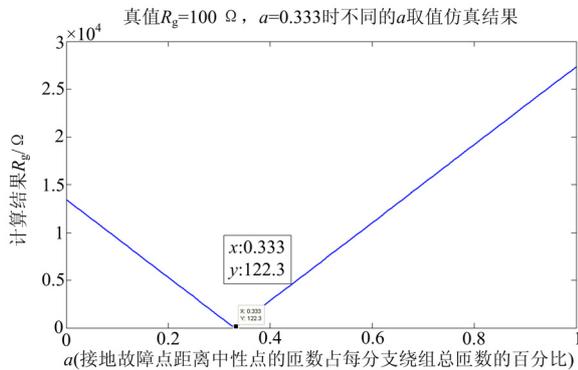


图 2 故障确定取不同的 α 值时的计算结果

Fig.2 The resistance values calculated by monitoring online by different α value to one fault

中计算接地故障电阻时 α 的精确计算尤为重要。双端法测距利用故障产生的首个行波波头信号比较强烈的特点, 测出发电机定子绕组接地故障时的位置 (可以确定 α 值)。文献[9]对这种方法有详细的介绍和仿真验证。

然而在 $\alpha = 0$ 附近时, 根据式 (5) 可以计算出:

$$R_g = -\frac{Z_c Z_n}{Z_c + Z_n} \quad (6)$$

由式 (6) 可知计算出来的接地电阻值是一个定值, 与实际的接地电阻值无关, 因此, 当发电机中性点附近接地时, 这种方法会出现错误。根据多回路模型的仿真结果 (如图 3 所示), 我们可以看出在 $\alpha = 2\%$ 时各计算值趋于真值, 下面用三次谐波的方法来解决 $\alpha < 2\%$ 这一区域存在计算死区的问题。

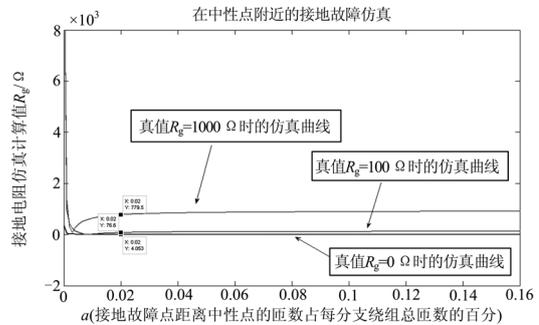


图 3 在中性点附近接地故障的仿真结果

Fig.3 Simulation results on stator ground fault near the generator neutral point

2 基于三次谐波的发电机定子接地电阻在线监测

国内外的运行经验已经证明, 由于机械原因或者水冷机组的定子漏水, 单相接地故障有可能首先在中性点附近发生, 所以要寻找发电机中性点附近的绝缘监测方法。

基波零序网络模型在中性点附近存在计算死区, 但是三次谐波分量在中性点附近变化明显, 利用三次谐波分量可以有效地计算中性点附近的接地故障电阻。

2.1 汽轮发电机定子接地电阻三次谐波模型

图 4 是汽轮发电机定子单相接地的三次谐波等效电路 [8-10], 其中 C_M 是单相绕组对地电容之和, C_1 是机端系统对地电容, α 为接地故障点距离中性点的匝数占每分支绕组总匝数的百分比 [9], Z_n 为中性点经消弧线圈或者接地变接地时的阻抗。当中性点附近 (即 $0 \leq \alpha < 2\%$) 接地时, 其等效电路如图 5 所示。

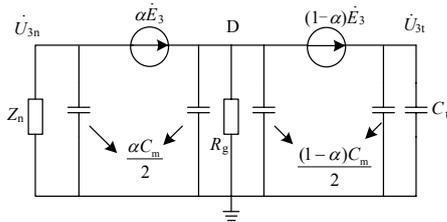


图 4 汽轮发电机定子单相接地三次谐波电路等效图

Fig.4 Equivalent third harmonic circuit of stator ground fault in turbine-generator

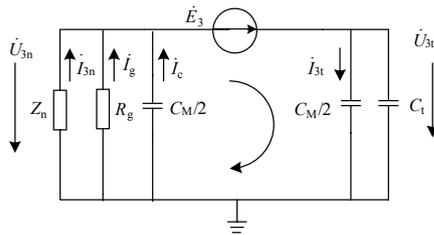


图 5 汽轮发电机机中性点接地故障的三次谐波等效电路图

Fig.5 Simplified equivalent third harmonic circuit of neutral grounding fault in turbine-generator

由图 5 根据电路原理可以得出：

$$Z_t = 1 / [j3\omega(C_M/2 + C_t)] \quad (7)$$

$$Z_c = 2 / (j3\omega C_M) \quad (8)$$

$$\dot{I}_{3t} = \dot{U}_{3t} / Z_t \quad (9)$$

$$\dot{I}_c = -\dot{U}_{3n} / Z_c \quad (10)$$

$$\dot{I}_{3n} = -\dot{U}_{3n} / Z_n \quad (11)$$

$$\dot{I}_g = \dot{I}_{3t} - \dot{I}_{3n} - \dot{I}_c \quad (12)$$

$$R_g = -\dot{U}_{3n} / \dot{I}_g \quad (13)$$

联立式 (7) ~ (13) 就可以求出利用三次谐波分量来计算汽轮机中性点接地电阻的计算式：

$$R_g = \frac{-\dot{U}_{3n}}{\dot{U}_{3t} \cdot j3\omega(C_M/2 + C_t) + \dot{U}_{3n} / Z_n + \dot{U}_{3n} \cdot j3\omega C_M / 2} \quad (14)$$

2.2 水轮发电机定子绕组三次谐波模型

由于水轮发电机绕组各分支的匝电动势分布复杂而无规律，因而使三次谐波电压的分析工作十分复杂。本文中所提出的方法仅针对发电机中性点附近，而水轮发电机中性点附近（即 $\alpha \approx 0\%$ ）发生接地故障时的等效电路和图 5 汽轮发电机是相似的，因此其接地故障电阻也可以用这种模型即式 (14) 来计算。

3 发电机定子单相接地电阻的综合在线监测

发电机正常运行时，实时监测机端零序电压，并且准确地分离出机端和中性点的三次谐波电压分量，同时精确提取机端与中性点电压的行波信息，一旦出现接地情况，就要启动故障定位程序，快速计算出 α 后，就可以决定采用哪种方法来计算接地电阻值。本文采用当 $\alpha < 2\%$ 时用三次谐波方法计算接地电阻，当 $\alpha \geq 2\%$ 时用基波零序的方法来计算接地电阻，这样就可以实现监测绕组全长的接地情况。具体的计算步骤如下：

- 1) 开始测量机端和中性点电压，并准确分离出基波和 3 次谐波分量。
- 2) 发现故障，启用行波故障定位（参考文献[9]中的方法）。
- 3) 计算出 α ，确定计算方法（当 $\alpha < 2\%$ 时用三次谐波方法计算接地电阻，当 $\alpha \geq 2\%$ 时用基波零序的方法来计算接地电阻）。
- 4) 输出计算出来的故障电阻。
- 5) 与预设的阈值比较，确定发电机的接地状态。

4 发电机定子绕组单相接地在线监测的仿真验证

大型同步发电机单相接地故障的多回路分析模型^[11-14]是从单个线圈出发，根据实际线圈的连接以及故障发生的情况，将相关的线圈连接在一起作为研究单元，从而将整个电机看作由相对运动的多个回路组成的电路，因此，这种方法具有较大的灵活性，可以实现发电机定子单相不同位置接地故障的仿真。

本节以某大型水电站发电机的一种机型为对象，通过多回路定子单相接地仿真模型来对本文所提出的在线监测定子接地电阻的方法进行仿真验证。该发电机的主要数据：额定容量 778 MVA，额定电压 20 kV，空载额定励磁电流 2 100 A，极对数 40，定子槽数 540，每相并联支路数 5，每相绕组对地电容 1.81 μF 。假设发电机机端有对地电容 $C_t = 0.2 \mu\text{F}/\text{相}$ ，当中性点经消弧线圈接地时，为使基波接地电流小于 1 A，取消弧线圈电感 $L_n = 1.7 \text{ H}$ ，串联电阻值 $R_n = 20 \Omega$ ，此时消弧线圈的补偿系数 $K = 1.01$ ，接近谐振接地。

分别取金属接地(0.001 Ω)，100 Ω ，1 000 Ω ，8 000 Ω 在中性点到机端每个线圈（每个分支绕组等分为 6 个线圈）两端进行接地仿真，运用 Matlab 语言进行编程计算，表 1 和表 2 是仿真计算结果。

表 1 中性点经消弧线圈接地时 A 相 1 分支绕组接地仿真结果

Tab.1 Simulation results on stator ground fault of No.1 branch of phase A of generator neutral by arc extinction coil grounding

R_g / Ω	α (接地故障点距离中性点的匝数占每分支绕组总匝数的百分比)						
	0	0.167	0.333	0.5	0.667	0.833	1.0
0.001	0	1 931.24	3 857.57	5 753.54	7 674.88	9 609.78	11 507.12
100	0	1 912.83	3 810.56	5 723.46	7 631.28	9 542.62	11 447.23
1 000	0	1 804.58	3 604.52	5 376.36	7 171.48	8 979.73	10 752.25
8 000	0	1 235.42	2 467.78	3 681.12	4 910.15	6 148.34	7 362.02

表 2 中性点附近接地故障时三次谐波仿真结果

Tab.2 Third harmonic volt of simulation results on neutral grounding fault

R_g / Ω	U_{3n} / V	U_{3t} / V	$\dot{U}_{3t} / \dot{U}_{3n}$
0.001	0	770.82	$0.60 \angle 177.20^\circ$
100	216.79	703.98	$3.24 \angle 99.74^\circ$
1 000	471.52	325.77	$0.69 \angle 119.57^\circ$
8 000	480.44	291.55	$0.6 \angle 173.5^\circ$

通过表 1 和表 2 仿真结果我们就可以运用上文所提出的方法对这些数据进行计算,表 3 是综合运用基波零序网络和三次谐波等效电路计算的接地电阻值。

图 6 和图 7 是在不同的接地阻值下运用本文提出的在线监测方法计算电阻值与真值之间的比较。由图 6、图 7 和表 3 中的对比结果可以看出这种方法是切实可行的。

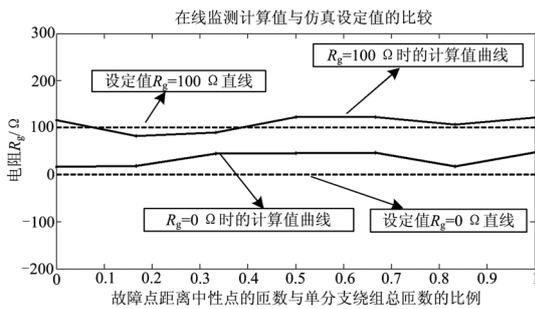


图 6 接地电阻为 0 Ω 和 100 Ω 时在线监测的仿真计算值

Fig.6 Relationship between the resistance values calculated by monitoring online and the supposed value ($R_g=0\&100 \Omega$)

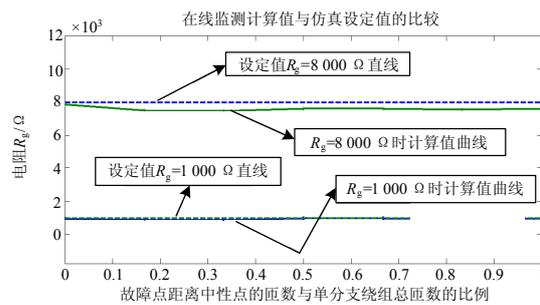


图 7 接地电阻为 1 000 Ω 和 8 000 Ω 时在线监测的仿真计算值

Fig.7 Relationship between the resistance values calculated by monitoring online and the supposed value ($R_g=1\ 000\& 8000 \Omega$)

表 3 在线监测计算电阻值与真值的对比

Tab.3 Relationship between the resistance calculation with monitoring online and the real value

在线监测值 R / Ω / 真值 R_g / Ω	α							
	0	0.167	0.333	0.5	0.667	0.833	1.0	
0.001	16.30	18.49	44.87	45.67	47.14	18.13	48.06	
100	99.54	109.31	122.37	117.81	124.66	107.43	141.51	
1 000	911.36	920.83	898.56	996.32	997.50	958.32	996.32	
8 000	7 867.85	7 558.83	7 521.82	7 659.22	7 661.20	7 606.60	7 659.82	

5 结论

定子绕组与铁心之间的绝缘破坏就会发生定子绕组单相接地故障,这是发电机最常见的一种故障,随着发电机容量的增大,由于定子绕组对地电容增大

和新型冷却技术的应用,定子绕组的危害更加严重,接地故障的可能性也增加。针对这种情况,本文提出了一种在线实时监测定子单相接地电阻值的方法。

本文尝试运用基波零序网络原理来计算接地电阻值,分析可知中性点存在死区问题。鉴于三次谐

波分量在中性点附近随着故障的发生变化很大的情况, 本文采用三次谐波的方法解决了基波算法在中性点附近存在死区的问题。通过对某大型发电机的仿真计算, 验证了本方法的可行性。

运用本文提出的在线监测定子单相接地电阻的方法, 加上目前成熟的发电机定子单相接地保护算法, 可以保证发电机更加安全、可靠地运行, 从而减少由于发电机故障给电力系统带来的经济损失。

参考文献

- [1] Bartnikas R. Detection of partial discharge in electrical apparatus[J]. IEEE Trans on Electrical Insulation, 1990, 25 (1): 111-120.
- [2] Kurtz M, Lyles J F, Stone G C. Application of partial discharge testing to hydro-generator maintenance[J]. IEEE Trans on P A&S, 1984, 103 (8): 2148-2157.
- [3] 姚晴林, 郭宝甫, 解波, 等. 大型发电机基波零序过流过压保护新方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (14): 1-4.
YAO Qing-lin, GUO Bao-fu, XIE Bo, et al. Research on zero-sequence fundamental over-current and over-voltage protection of large generator[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (14): 1-4.
- [4] 毕大强, 王祥珩, 王维俭. 基于 3 次谐波电压故障暂态分量的定子单相接地保护[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (13): 45-49.
BI Da-qiang, WANG Xiang-heng, WANG Wei-jian. Protection scheme on fult transient component of third harmonic voltage for state ground fault of generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (13): 45-49.
- [5] 曾祥君, 尹项根, 陈德树, 等. 注入信号法补偿式高灵敏度发电机定子接地保护[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (11): 51-55.
ZENG Xiang-jun, YIN Xiang-gen, CHEN De-shu, et al. Ground fault protection for generation stator windings with inductance compensating based on injecting signal[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20 (11): 51-55.
- [6] 毕大强, 王祥珩, 余高旺, 等. 消弧线圈接地方式下外加 20 Hz 电源定子接地保护应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (4): 82-84.
BI Da-qiang, WANG Xiang-heng, YU Gao-wang, et al. Application of injecting 20 Hz voltage based ground fault protection for generators grounded via petersen-coil[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (4): 82-84.
- [7] 姚晴林, 赵斌, 郭宝甫. 自适应 20 Hz 电源注入式定子接地保护[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (18): 71-73.
YAO Qing-lin, ZHAO Bin, GUO Bao-fu. Self adaptive stator grounding protection based on injecting 20 Hz electric source signal[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (18): 71-73.
- [8] 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.
WANG Wei-jian. Principle and application of electric power equipment protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [9] 党晓强, 刘俊勇, 杨可, 等. 水轮发电机定子单相接地故障行波定位[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (23): 74-78.
DANG Xiao-qiang, LIU Jun-yong, YANG Ke, et al. Location for stator single phase to ground of hydro-generators based on fault traveling waves[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (23): 74-78.
- [10] 陈生贵, 卢继平, 等. 电力系统继电保护[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2003.
CHEN Sheng-gui, LU Ji-ping, et al. The relay protection of power system[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2003.
- [11] 王维俭, 王祥珩. 大型发电机变压器内部故障分析与继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
WANG Wei-jiang, WANG Xiang-heng. Study on relay protection of internal faults for large power generators and transformers[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [12] 张琦雪, 王祥珩. 大型同步发电机单相接地故障的暂态多回路分析——数学模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (6): 59-65.
ZHANG Qi-xue, WANG Xiang-heng. Transient multi-loop analysis on the stator ground fault of large synchronous generator—mathematic model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (6): 59-65.
- [13] 张琦雪, 王祥珩, 毕大强. 大型同步发电机单相接地故障的暂态多回路分析——实验验证[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2003, 43 (9): 1157-1160.
ZHANG Qi-xue, WANG Xiang-heng, BI Da-qiang. Transient multi-loop analysis on the stator ground fault of large synchronous generator—experimental verification[J]. Journal of Tsinghua Univ: Sci& Tech, 2003, 43 (9): 1157-1160.
- [14] 毕大强. 大型水轮发电机定子绕组单相接地故障及保护方案的研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.
BI Da-qiang. Studies on stator ground fault and its protection for large-size hydro-generator[D]. Beijing: Tsinghua University, 2003.

收稿日期: 2009-10-24; 修回日期: 2009-11-08

作者简介:

罗建(1960-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护和电力系统自动化; E-mail: luojiang10000@x263.net

熊再豹(1979-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。