

交流励磁发电机转子绕组一点接地保护

卢继平¹, 张向军¹, 王晓健², 喻明²

(1. 输配电装备及系统与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044; 2. 三峡水力发电厂, 湖北 宜昌 443000)

摘要: 交流励磁发电机(ACEG)转子采用对称三相交流电励磁,能够实现有功、无功和转速的独立调节,在改善超高压电力系统的稳定性及变速恒频发电等领域有着广泛的应用前景。转子绕组一点接地是交流励磁发电机常见的一种故障,提出了采用外加直流电源的方法来检测三相励磁的交流励磁发电机转子一点接地,并分析了外加电源对原有励磁系统的影响。由于采用外加直流电源,所以此方法检测结果不受发电机运行状态的影响,可以对转子一点接地进行100%的保护,且灵敏度与接地位置无关。

关键词: 交流励磁发电机; 转子一点接地; 外加电源; 灵敏度; 接地保护

Rotor winding one point to ground fault protection for AC-excited generators

LU Ji-ping¹, ZHANG Xiang-jun¹, WANG Xiao-jian², YU Ming²

(1.State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,Chongqing University,Chongqing 40044,China; 2.Three Gorges Hydraulic and Electric Power Plant,Yichang 443000,China)

Abstract: There is a broad prospect for Alternating Current Excitation Generator (ACEG) in improving the stabilities of extra-high voltage power system and in constant frequency generation with variable speed, by using the three-phase alternating current excitation and realizing independent regulation of active power, reactive power and rotate speed. Rotor one point to ground fault is a common kind of faults of ACEG. This paper uses 100% rotor earth fault protection with DC voltage injection and analyses the influence of DC voltage injection on AC-excited system. By adopting DC voltage injection, the result of this scheme is free of operation state of the generator. The scheme can protect the 100% coverage generator rotor one point earth fault and the sensitivity has no relationship with the fault location.

Key words: AC-excited generator; rotor one point to ground fault; DC voltage injection; sensitivity; ground fault protection

中图分类号: TM772 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)01-0005-04

0 引言

交流励磁发电机的基本结构与绕线式异步电机相同,定子侧接电网,转子上采用两相或三相对称交流励磁。转子多相励磁的频率、幅值、相位及相序都可以根据系统要求加以控制,使其具有传统同步发电机无法相比的优点:有功、无功及转速(在交流励磁时)可以独立调节;大量吸收无功运行时电机不会失去稳定;可以实现变速恒频发电。其与同步发电机最大区别在于其励磁绕组为对称三相绕组,励磁电流采用交流励磁^[1,2]。图1即为双PMW变换器励磁的交流励磁发电机系统总体结构图。

交流励磁发电机在运行过程中,转子一点接地是比较常见的不正常运行状态。当发电机转子发生一点接地之后,励磁电源对地并不构成电流回路,故无电流流过故障点,只是加在对地绝缘介质上的电压有所增加,对机组本身并无直接危害,发电机仍能继续运行。当转子一点接地后,若未能得到及时有效的处理而继续运行,就有可能发生另一起一点接地故障,这时就构成了转子两点接地,这是一种十分严重的短路事故^[3~5]。本文提出在转子绕组任一相端口处外加直流电源的方法来检测转子绕组一点接地故障。

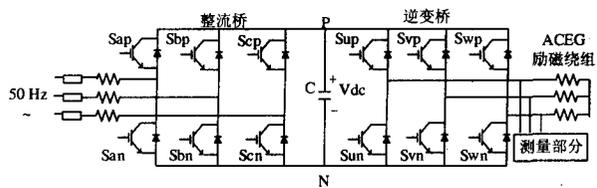


图1 双PMW变换器励磁的交流励磁发电机系统结构图

Fig.1 The systematic structure chart of AC excitation generator of double PMW converter excitation

1 一点接地的保护原理

将一直流电压和限流电阻加到励磁绕组A相的入端与地之间则构成了外加直流电压式一点接地保护，如图2所示， U_a, U_b, U_c 为交流励磁电压， U 为外加直流电压源， R_1 为限流电阻，励磁绕组每相对地绝缘电阻为 R_y 并集中于励磁绕组的中点。由于 R_1 的阻值要远大于励磁绕组的直流电阻值，所以可以忽略励磁绕组中产生的直流压降。图3为正常情况下直流系统等效图，由图3可得出正常运行时通过限流电阻 R_1 的直流电流为

$$I_0 = \frac{U}{R_1 + \frac{R_y}{3}} \quad (1)$$

图4为转子绕组一点经电阻 R_x 接地的直流系统等效图，由图4可得出此时通过限流电阻 R_1 的直流电流为

$$I_1 = \frac{U}{R_1 + \frac{R_x R_y}{3R_x + R_y}} \quad (2)$$

所以一点接地动作判据为

$$I_1 \geq K_k I_0 \quad (3)$$

式中： K_k 为保护动作的可靠系数。

把式(1)和式(2)带入式(3)得

$$\frac{U}{R_1 + \frac{R_x R_y}{3R_x + R_y}} \geq \frac{K_k U}{R_1 + \frac{R_y}{3}}$$

整理后得

$$R_x \geq \frac{R_y}{\frac{3K_k R_y}{3(K_k - 1)R_1 + R_y} - 3} \quad (4)$$

设置保护定值

$$R_{ef} = \frac{R_y}{\frac{3K_k R_y}{3(K_k - 1)R_1 + R_y} - 3} \quad (5)$$

在保持灵敏度 K_k 的情况下，该判据可以判断接地电阻小于 R_{ef} 的一点接地故障。

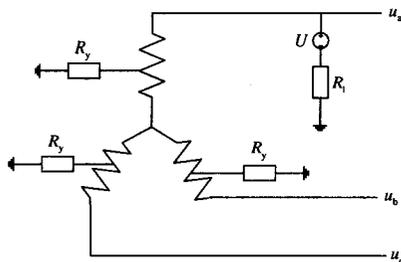


图2 外加直流电源保护原理图

Fig.2 The principle picture of protection with DC voltage injection

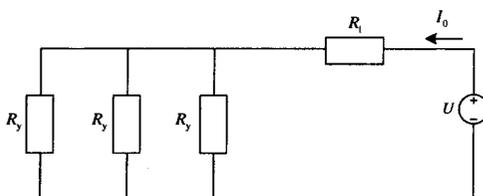


图3 正常运行的等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of normal running

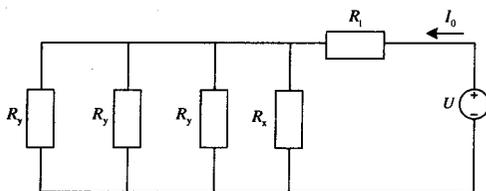


图4 经过渡电阻 R_x 接地的等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of crossing the resistance R_x earth fault

2 外加直流电源和限流电阻对励磁系统的影响

正常运行时，不考虑励磁绕组的电阻值和励磁电源的内阻，直流等效图如图5所示，此时流入A相励磁电源的直流电流最大，为 $I_0/2$ ，流入B相和C相励磁电源的直流电流为 $I_0/4$ 。由式(1)得流入A相励磁电源的直流电流为 $\frac{U}{2R_1 + 2R_y/3}$ ，流入B相和C相励磁电源的直流电流为 $\frac{U}{4R_1 + 4R_y/3}$ 。由于正常运行对地绝缘电阻为兆欧级，所以流入A相

励磁电源的直流电流为微安级, 对原有的双 PMW 变换器励磁系统没有影响。

当励磁绕组发生一点接地时, 不考虑励磁绕组的电阻值和励磁电源的内阻, 由图 4 可知流过限流电阻 R_1 的电流为 I_1 , 流过绝缘电阻 R_y 总的电流

$$I_0' = \frac{R_x}{R_x + \frac{R_y}{3}} I_1$$

流过接地电阻 R_x 的电流

$$I_1 = \frac{R_y}{3R_x + R_y} I_1$$

$I_1 = I_1' + I_0'$, 把此时的电路网络分成两部分, 一部分是电流 I_0' 的等效网络, 此部分的等效网络如正常运行时的等效图相同, 如图 5。另外一部分是电流 I_1' 的等效网络, 如图 6 所示。所以在发生一点经电阻 R_x 接地的情况下, 流过 A 相励磁电源的直流电流为 $I_0'/2 + 2 I_1'/3$, 流过 B 相和 C 相励磁电源的直流电流为 $I_0'/4 + I_1'/3$ 。当发生一点金属性接地时($R_x=0$), 流过 A 相的直流电流最大, 最大值为 $2U/3R_1$, 此时流过 A 相的不平衡交流电流也最大, 最大值为 u_{ab}/R_1 。如果直流电压选择为 100 V, 交流电压 u_{ab} 为 207 V, 限流电阻 R_1 为 10 k Ω , 得出直流电流为 0.0067 A, 不平衡交流电流为 0.0207 A。通过仿真, 在此种情况下, 双 PMW 变换器励磁系统输出正常。

当接地点发生在励磁绕组的中性点处时, 此时励磁绕组 A 相阻抗值发生偏移, 而且偏移最大。假设偏移前的阻值为 $R+jX$, 当发生最大偏移时(在励磁绕组中性点处金属性接地), A 相的等效阻抗为

$$\frac{R_1 \cdot (R + jX)}{R_1 + R + jX}$$

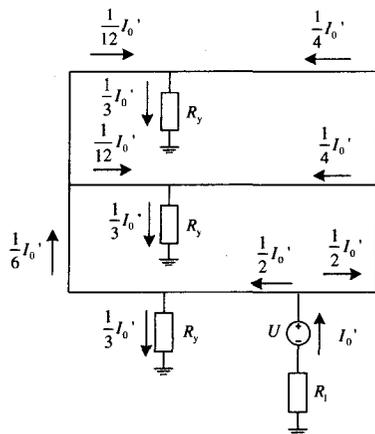


图 5 正常运行时直流电流分布图

Fig. 5 Distribution map of the DC of normal running

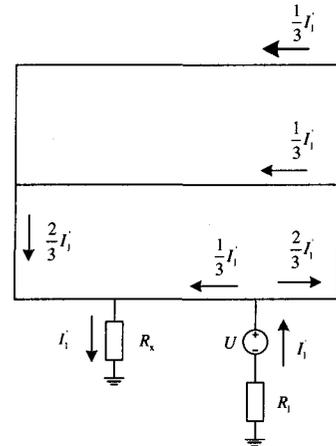


图 6 流过接地电阻 R_x 的电流分布图

Fig.6 Distribution map of the DC flowing through the resistance R_x earth fault

由于 $R_1 \gg |R+jX|$, A 相等效阻抗仍然可以等效为 $R+jX$, 从而三相绕组阻值相等, 不影响系统的正常运行。

3 算例

等效电路图如图 4, 直流电压 $U = 100$ V, 限流电阻 $R_1 = 10$ k Ω , 绕组对地绝缘电阻 $R_y = 20$ M Ω , 直流电源加在 A 相励磁绕组端口。I 为仿真得到的直流电流, 由于电流为毫安级, 给实际检测带来一点麻烦, 所以可以检测限流电阻 R_1 上的直流电压 U_{R1} , R_x 为接地电阻, R_x' 为算法求出的值, 如表 1 所示。

表 1 励磁回路一点接地计算结果

Tab.1 The calculated results of the excitation windings earth fault

	$R_x/k\Omega$	U/V	I/mA	U_{R1}/V	$R_x' /k\Omega$
A 相绕组接地	30	100	2.5	25	30.000
B 相绕组接地	30	100	2.5	25	30.000
A 相绕组接地	2	100	8.3	83	2.050
B 相绕组接地	2	100	8.3	83	2.050
A 相绕组接地	0.2	100	9.8	98	0.204
B 相绕组接地	0.2	100	9.8	98	0.204
A 相绕组接地	0	100	10	100	0
B 相绕组接地	0	100	10	100	0

从表 1 可以看出, 外加直流检测交流励磁绕组一点接地的结果不随绕组接地位置的变化而变化, 且精度非常高。

4 结束语

理论分析和大量的仿真结果表明, 外加直流法在正常运行和一点接地故障时, 对于交流励磁发电

机的励磁系统和运行状况没有影响。而且对于三相绕组任一点接地故障具有相同的灵敏度。

外加直流电源法的优点:

- 1) 算法简单, 可靠性高。
- 2) 由于是采用直流检测, 所以不受绕组分布电容和交流励磁电流频率的影响, 精度非常高。
- 3) 实现对转子绕组 100% 接地保护, 且任何一点接地, 保护的灵敏度一样。
- 4) 对转子绕组的绝缘情况进行监测。

外加直流电源法的主要缺点:

- 1) 保护的二次回路与转子绕组一次回路直接相连, 给安全生产带来潜在的威胁。
- 2) 正常运行时, 在励磁绕组与地之间始终有一个外加的直流电压, 给绕组绝缘性能带来额外的压力。

参考文献

- [1] 杨顺昌, 廖勇, 李辉. 异步化同步发电机[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
YANG Shun-chang, LIAO Yong, LI Hui. Asynchronized Synchronous Generator[D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.
- [2] 廖勇, 杨顺昌. 交流励磁发电机励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(2): 87-90.
LIAO Yong, YANG Shun-chang. Excitation Control of Alternating Current Excitation Generators[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(2): 87-90.

(上接第 4 页 continued from page 4)

- [7] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1985.
CHEN Heng. Static Analysis of Power System [M]. Beijing: China Water Conservancy and Electric Power Press, 1985.
- [8] 刘春风. 应用数值分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
LIU Chun-feng. Numerical Value Analysis[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005.
- [9] 姚李孝, 姚金雄, 安源. 基于 Matlab/Simulink 的高压输电线路故障定位的仿真研究[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 53-56.

- [3] 郭光荣. 发电机转子绕组接地保护[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.
- [4] 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.
- [5] 王维俭, 侯炳蕴. 大型机组继电保护理论基[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
WANG Wei-jian, HOU Bing-yun. The Theoretical Foundation of Large Scale Generator-transformer Set Relay Protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1997.

收稿日期: 2007-07-09; 修回日期: 2007-08-09

作者简介:

卢继平 (1960-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统自动化和电力系统继电保护; E-mail: lujiping@cqu.edu.cn

张向军 (1980-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护;

王晓健 (1964-), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事发电厂电气设备检修和管理。

YAO Li-xiao, YAO Jin-xiong, AN Yuan. Fault Location Simulation for High Voltage Power Transmission Line Based on Matlab/Simulink[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 53-56.

收稿日期: 2007-06-05; 修回日期: 2007-07-24

作者简介:

蒋春芳 (1978-), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护、控制与自动化; E-mail: jiang_cf.hcg@gxep.com.cn

王克英 (1963-), 男, 博士, 教授, 从事微型计算机在电力系统测量和控制中的应用研究。