

用外加电源式定子接地保护提高保护灵敏度的研究

季克勤, 房鑫炎

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 定子绕组单相接地故障是发电机最常见的故障之一, 且其他故障大多由定子单相接地引发。传统大型机组基于纵向零序电压三次谐波的100%定子接地保护存在灵敏度较低的缺点。外加电源式定子接地保护灵敏度较高, 但随着单机容量越来越大, 其灵敏度还是不能满足要求。借助现代的电气控制技术, 对其进行改进, 在原有的外加电源式定子接地保护中引入反馈量, 从而提出了一种新的保护模式, 仿真计算表明它可以有很高的灵敏度并具有很高的可靠性, 能够满足现代大型机组对接地保护的要求。

关键词: 定子接地保护; 大型机组; 灵敏度; 反馈量; 三次谐波; 外加电源式

Study of improving sensitivity of stator ground fault protection by injecting external voltage

JI Ke-qin, FANG Xin-yan

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In electric power system it is always significant to improve the performance and credibility of large generator. Protection is an important equipment to achieve those purpose. Stator single phase ground fault is one of the most vulgar faults. Further it is the occasion of other generator faults. Traditional protection for large-scale generator third harmonic 100% stator ground fault is with low sensitivity. Injecting external voltage stator ground fault protection relatively has a high sensitivity. With the large-scale generators coming, the sensitivity of protection is expected to be higher and higher. With the development of modern electronic controls, adding a feedback heft to the original injecting extern voltage stator ground fault protection, this paper introduces a new scheme to improve sensitivity. The analysis and experiment result proves that these protections are with high sensitivity and reliability. It can satisfy the protection requirement of large modern generators.

Key words: stator ground protection; large-scale generator; sensitivity; feedback; third harmonic; injecting external voltage

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)09-0005-05

0 引言

发电机定子单相接地故障具有很大的潜在危害性, 可能导致更为严重的绕组短路故障。目前基于稳态量的基波零序电压和三次谐波电压保护组合实现100%定子绕组接地保护得到广泛的应用。基波零序电压保护简单可靠, 但在发电机中性点附近存在死区。传统的三次谐波电压保护在运行中容易误动, 并且随着定子绕组对地电容的增加, 灵敏度降低。由于大型水轮发电机定子绕组对地电容较大, 这种情况下三次谐波保护很难同时满足不误动和高灵敏度的要求。采用计算机技术实现的自适应三次谐波原理定子接地保护的性有所提高, 但仍需继续改进和完善。

外加电源方式定子接地保护通过采取适当的注入附加电压的方式, 能够单独实现发电机定子绕

组100%的保护范围, 在停机和启机过程中也能检测出定子接地故障。外加电源式定子接地保护主要采用比较注入信号电压和电流大小的方法, 如测量发电机定子回路的零序阻抗、零序导纳、注入信号的能量损耗等。这种保护原理完善、可靠, 其整定值受发电机正常运行绝缘水平均匀下降的影响较小, 是一种较理想的定子接地保护。本文将对其进行分析并提出一些看法。

1 传统的三次谐波定子接地保护

就我国现已运行的进口发电机保护, 主要有GE、SIEMENS、ABB等, 这里我们讨论分析一下某系列的保护产品, 其三次谐波100%定子接地保护方案差别较大。保护方案为:

1) 微机型保护方案 1

保护判据为
$$\frac{U_N}{\left(\frac{U_S}{3}\right) + U_N} \leq 0.15 \quad (1)$$

其中： U_N 和 U_S 分别为中性点和机端三次谐波电压。

化简可得
$$\frac{U_S}{U_N} \geq 17.0 \quad (2)$$

2) 微机型保护方案 2
保护判据为

$$\frac{U_N}{U_S + U_N} \leq pickup \text{ 和 } \frac{U_S}{U_S + U_N} \geq 1 - pickup \quad (3)$$

简化得
$$\frac{U_S}{U_N} \geq \left(\frac{1}{pickup} - 1\right) \quad (4)$$

$pickup$ 的取值范围为 0.00~0.25,

则判据最小值为
$$\frac{U_S}{U_N} \geq 3.0 \quad (5)$$

例如, 某已运行 4 年的国产 600 MW 机组, 型号为 QSFN-600-2, 额定电压 20 kV, 发电机定子绕组每相电容 (含主变低压侧、厂变高压侧) 为 $C_g = 0.238 \mu\text{F}$, 中性点经配电变压器电阻接地。接地变压器 $S_N = 40 \text{ kVA}$, 变压比为 20000/230 V, 以动态过电压不超过 2.6 倍额定相电压选择接地电阻, 二次侧电阻为 $R_N = 0.5586 \Omega$ 。由于中性点配变与机端 PT 存在变比差, 则选择中性点电压抽头为接地电阻的 1/2.3 处。系统如图 1 所示。

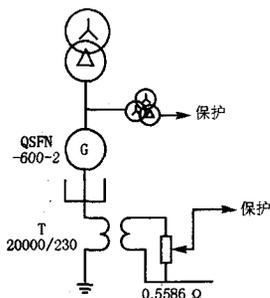


图 1 三次谐波保护原理图

Fig.1 Principle of third harmonic protection

中性点接地电阻的一次值为： $R'_N = R_N \cdot N^2 = 4.228 \text{ k}\Omega$ 。

中性点发生经 R_f 接地故障时, 三次谐波等效电路如图 2 所示。三次谐波电压 U_S 和 U_N 由三次谐波电动势 E_3 在机端对地导纳 y_s 和中性点对地导纳 y_N 上的压降形成。

正常运行时, 有:

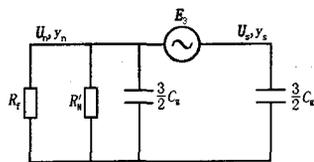


图 2 发生经 R_f 接地故障时三次谐波等效图

Fig.2 Third harmonic diagram with earth fault

$$|y_{s0}| = 3\omega g \frac{3C_g}{2} = 3.36 \times 10^{-4}$$

$$|y_{N0}| = \left[(1/R'_N)^2 + (3.36 \times 10^{-4})^2 \right]^{1/2} = 4.11 \times 10^{-4}$$

此时有：
$$\frac{|U_{s0}|}{|U_{N0}|} = \frac{|y_{N0}|}{|y_{s0}|} = 1.22 > 1.0$$

在中性点经 R_f 接地故障情况时, 两侧导纳情况为:

$$|y_s| = 3\omega g \frac{3C_g}{2} = 3.36 \times 10^{-4}$$

$$|y_N| = \left[(1/R_f + 1/R'_N)^2 + (3.36 \times 10^{-4})^2 \right]^{1/2}$$

将上两式代入保护判据 (2)、(5), 可解得以下结果:

对于保护方案 1 有： $R_f \leq 0.183 \text{ k}\Omega$

对于保护方案 2 有： $R_f \leq 1.4 \text{ k}\Omega$

由以上分析可知: 前面计算没有考虑影响保护动作的各种因素, 是比较理想的情况, 但从结果来看, 这两种保护对于接地故障的灵敏度较低。尤其是保护方案 1, 几乎很难使其动作, 这与现场的试验情况比较相符。根据三次谐波等效模型分析, 定子绕组的接地点越深入发电机, 保护的灵敏度越低。即便是保护方案 2, 也很难有效起到 100% 定子接地保护的应有作用。

2 外加电源式定子接地保护分析

在正常情况下, 发电机对地容抗很大, 因此注入电源输出的电流很小。而发生接地故障后, 对地阻抗减小, 使得注入电流增加。因此传统外加电源式定子接地保护利用注入电流的大小, 可以判别定子是否发生接地故障。此外保护通过测量接地配电变压器两端电压, 可以方便地计算接地变压器一次侧折算过来的相对于外加电源频率的阻抗、阻抗相角及消耗的有功功率 P 等变化来反应接地故障。

我们以注入信号源与接地电阻并联来讨论保

护的特性。如图3所示, 外加20 Hz电压源并联在中性点接地电阻上。保护利用测量注入接地变压器的电流及接地变压器两端电压, 可以方便地计算接地变压器一次侧折算过来的相对于外加电源频率的阻抗和接地电阻消耗的有功功率。

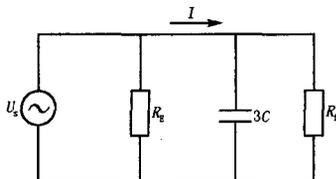
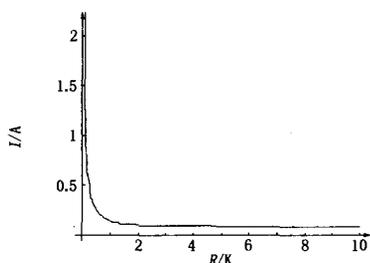
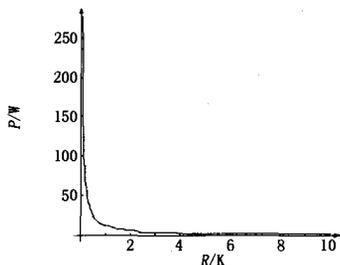


图3 并联电压源型定子接地保护等效电路

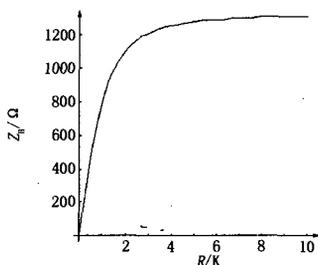
Fig.3 Equivalent circuit of parallel VS stator ground fault protection



(a) 注入电源电流



(b) 注入电源有功功率



(c) 注入电源端口等效阻抗

图4 并联电压源型定子接地保护的各种算法动作曲线

Fig.4 Operation curve of several stator ground fault

不妨以一大型水轮发电机为例进行分析, 设定子绕组每相对地电容 $2.01 \mu\text{F}$, 额定线电压为20 kV, 接地变压器变比 $K_n = 23.1$, 副方并联接地电阻 $R_E = 1.1 \Omega$, 注入电压幅值为110 V。简单分析忽略注入电源的内阻和配电变压器的阻抗, 则注入电流 I 、注入电源输出的有功功率 P 及注入电源端口的

等值阻抗 Z_B 与故障接地电阻 R_f 的关系见图4(a、b、c)。

由图可以看出: 受定子绕组对地电容的影响, 当接地故障电阻 R_f 大于1 k Ω 时, 注入电源输出的有功功率和注入电流变化平缓; 而测量阻抗精度有所提高, 但高阻接地故障时, 变化平缓, 仍难以满足大型水轮发电机组定子高阻接地保护的要求。另一方面在接地电阻不大的情况下, 中性点的配电变压器的阻抗及注入电源的内阻不可忽略。则注入式保护的灵敏度会进一步降低。

以上分析是没有考虑误差对保护灵敏度的影响的。实际上在工程应用时, 动作整定值必须考虑测量误差。规程规定: 保护用电流互感器5P在额定一次电流时的误差极限: 幅值误差 $\pm 1\%$, 相角差 $\pm 60'$; 保护用电压互感器3P在额定一次电流时的误差极限: 幅值误差 $\pm 3\%$, 相角差 $\pm 120'$ 。则正常运行时由互感器带来的误差, 使得注入电流 I 、注入电源输出的有功功率 P 及注入电源端口的等值阻抗 Z_B , 最大可能输出为:

$$I_{\max} = (1 + 0.01) I_e = 1.01 I_e$$

$$Z_{B\max} = \frac{U}{I} = \frac{(1 - 0.03) U_e}{(1 + 0.01) I_e} = 0.96 Z_{eq}$$

$$\begin{aligned} P_{\max} &= \text{Re}(UI^*) \\ &= 1.04 (P_e^* \cos 3^\circ + Q_e^* \sin 3^\circ) \\ &= 1.04 P_e + 0.06 Q_e \end{aligned}$$

其中: Re 为取实部, Z_{eq} 为等效阻抗。 I_e 、 U_e 、 P_e 、 Q_e 为正常运行时不计互感器误差的注入电流、电压及注入电源输出的有功和无功。

考虑留一定的裕度(不妨取为1.2倍), 则动作门槛定值为: 注入电流 $I > 1.2 I_e$, 注入电源输出的有功功率 $P > (1.2 P_e + 0.08 Q_e)$, 注入电源端口的等值阻抗 $Z_B < 0.8 Z_{eq}$ 。仍按以上参数为例进行分析, 结果如表1。

表1 并联电压源型注入式定子接地保护方案算法灵敏度

Tab.1 Sensitivity of parallel VS injecting stator ground fault

整定值	$R_f=1 \text{ K}$	$R_f=2 \text{ K}$	$R_f=3 \text{ K}$	$R_f=4 \text{ K}$	$R_f=5 \text{ K}$	$R_f=6 \text{ K}$
I/A	0.1002	0.1393	0.1008	0.0919	0.0886	0.0870
P/W	0.880	13.134	6.84213	4.74479	3.6961	3.06693
Z/Ω	1055.7	765.1	1057.5	1159.7	1203.1	1224.9

从表1可以看出: 在考虑误差因素后, 并联电压源型注入式定子接地保护三种方案的灵敏度

$K_{sen}(P) \gg K_{sen}(I) \approx K_{sen}(Z_B)$ 。从仿真分析知：按照以上整定取值情况，有功功率判别可以反应大约35 kΩ左右的接地电阻，注入电流判别可以反应大约2.1 kΩ左右的接地电阻，而阻抗判别可以反应大约1.9 kΩ左右的接地电阻。以上分析表明：利用有功功率变化的保护，能够反应很高的接地电阻。但在工程应用中有功功率的输出对测量误差特别是角误差敏感，计及注入电源内阻和配电变压器的阻抗，其灵敏度有所下降。当注入电源含有谐波分量，将严重影响保护计算结果。所以有功功率保护达不到计算所得到的灵敏度。

3 改进外加电源定子接地保护

随着发电机容量的增大，定子接地保护的重要性越来越大，因此对于大型发电机提出了装设100%范围的定子接地保护，并要求在保护范围内可以反映一定的接地电阻。传统的外加电源定子接地保护的灵敏度比较高，但在某些情况下仍不能满足实际需求，所以有必要对其改进以提高灵敏度。对于外加电源式保护，原则上只要外加电势越高，保护就可以做到越灵敏，但是人们又希望在正常运行时保护注入的电流越小越好，这就是一个矛盾，本文对定子接地保护的改进是基于这样的观点：在正常运行时，外加电势维持在一个较低的水平，当发生定子接地故障时，系统抬高外加电势以提高保护灵敏度。

从注入电流端看，发电机可以等效为一个阻抗 Z_{eq} 。对于注入电势 E 和注入电流 I 我们有：

$$E = I Z_{eq} \quad (6)$$

在正常运行时发电机有等效阻抗 Z_{eq0} 。

我们定义电压差：

$$U' = E - I Z_{eq0} \quad (7)$$

显然对于式(7)，当发电机正常运行时候有 $U' = 0$ ，当发电机发生定子接地故障时 I 增大，这时 $U' \neq 0$ ，所以， U' 可以作为定子接地保护的判据，下面我们讨论一下 U' 作为判据的定子接地保护是否可以做到比传统保护灵敏度高。

我们有

$$U' = \frac{E}{Z_{eq}} (Z_{eq} - Z_{eq0}) \quad (8)$$

由于计算机和电力电子技术的迅速发展，控制 E 的大小较容易实现，我们把

$$\Delta Z_{eq} = Z_{eq0} - Z_{eq}$$

作为 E 的反馈量，使 E 随着 ΔZ_{eq} 的增加而增加，对于具体的保护配置他们之间的关系可以多种多样，为讨论简便起见，这里设他们为一次函数关系。即：

$$E = E_0 + k \Delta Z_{eq} \quad (9)$$

其中 E_0 为正常情况下的注入电势， k 为有电流纲量的比例系数，可以按实际情况选取。

显然当正常运行时 U' 仍旧为零。当定子接地故障时， Z_{eq} 减小， ΔZ_{eq} 增大， E 也随 ΔZ_{eq} 增大而增大，所以 U' 的增大有超线性的特性。可以预见，以 U' 为判据的定子接地保护将具有很高的灵敏度。

$$\text{令 } k = \frac{E_0}{\Delta Z_{R_f=12k}}, \text{ 即当定子接地电阻为 } 12 \text{ k}\Omega$$

时，注入电势为正常情况下的两倍。

按保护规程规定的电压和电流互感器误差，正常运行时 U' 的最大可能误差为

$$U' = \left| E_0 \left(1 + \frac{\Delta Z_{eq}}{\Delta Z_{R_f=12k}} \right) - I \cdot Z_{eq} \right| \approx 0.88 E_0$$

考虑一定的裕度（可以取1.7），可取动作值为： $U' > 0.15 E_0$

仍以上面算例的参数计算，结果如表2。

表2 并联电压源型外加电源式定子保护新方案灵敏度
Tab.2 Sensitivity of new model parallel VS injecting

		stator ground fault					
整定值		$R_f=2 \text{ k}$	$R_f=4 \text{ k}$	$R_f=6 \text{ k}$	$R_f=8 \text{ k}$	$R_f=10 \text{ k}$	$R_f=12 \text{ k}$
U' / V	16.5	76.98	43.98	33.01	27.49	24.19	22.00

其动作特性如图5所示。

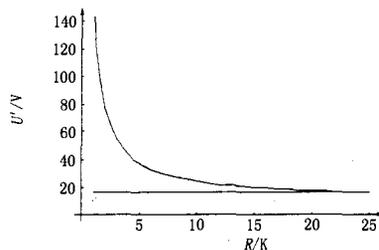


图5 新型保护动作特性

Fig.5 Operation characteristic of new protection

在考虑误差因素后，即便是取较大的裕度系数，灵敏度较常规方案有较大的提高。从仿真分析知：对于并联电压源型外加电源式定子接地保护可以反映10 kΩ以上左右的接地电阻。利用已经测量的电量和反馈，对原有方案进行改进。理论分析表

明:即便在整定取值较大(误差允许裕度大)的情况,新方案较常规注入电流、测量阻抗方案对接地电阻反应能力有了明显的提高,并且对电源内阻等误差因素具有较好的鲁棒性。新方案在正常运行时还可以采用自动跟踪的方法,进一步提高保护灵敏度。

4 结论

由于大型机组对保护的要求高,而传统的保护灵敏度往往达不到要求。本文对三次谐波和外加电源式保护进行了分析,并在此基础上提出了改进的外加电源式定子接地保护。通过计算表明其较传统定子接地保护灵敏度高。而在正常情况下注入电流和传统的保护一样不太大,可以满足系统长期运行的要求。

参考文献

- [1] 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, 1998.
WANG Wei-jian. Principle and Application of Major Electrical Equipment Protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [2] 苏洪波, 尹项根, 陈德树. 微机自适应式发电机定子接地保护的研究[J]. 电网技术, 1996, 20(11): 59-61, 67.
SU Hong-bo, YIN Xiang-gen, CHEN De-shu. Research of Microcomputer Automatic Adaption Generator Stator Ground Fault[J]. Power System Technology, 1996, 20(11): 59-61, 67.
- [3] 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-hang, WANG Wei-jian. Protection of Stator Single Phase Ground Fault Based on Third Harmonic Voltage Fault Transient Heft [J]. Automation of Power Electric Systems, 2003, 27(13):

45-49.

- [4] 李晓华, 尹项根, 张哲. 大型水电厂主设备保护关键技术研究(博士学位论文)[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
LI Xiao-hua, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe. Key Technology Research of Large Hydropower Plant Major Equipment Protection, Doctoral Dissertation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.
- [5] 邵能灵, 吴宏晓. 基于小波变换的选择性发电机100%定子单相接地保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 12-16.
TAI Neng-ling, WU Hong-xiao. Generator 100% Stator Ground Fault Protection Scheme Based on the Selection of Small Wave Transform [J]. Proceeding of the CSEE, 2004, 24(11): 12-16.
- [6] 毕大强, 王祥珩, 桂林, 等. 基于零序电压故障暂态分量的发电机定子单相接地保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 39-44.
BI Da-qiang, WANG Xiang-hang, GUI Lin, et al. Protection Research of Stator Single Phase Ground Fault Based on Zero Sequence Voltage Fault Transient Heft [J]. Proceeding of the CSEE, 2003, 23(11): 39-44.
- [7] 邵能灵, 尹项根. 大型水轮发电机定子接地保护方案及灵敏度分析[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(10): 41-45.
TAI Neng-ling, YIN Xiang-gen. Scheme and Its Sensitivity Analysis of Large Hydropower Stator Ground Fault Protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(10): 41-45.

收稿日期: 2006-11-28; 修回日期: 2006-12-12

作者简介:

季克勤(1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统继电保护方向研究; E-mail: jikq_ren@sjtu.edu.cn

房鑫炎(1963-), 男, 副教授, 从事电力系统继电保护与自动化的教学与研究。

西北电网公司开展关键技术攻关

为适应“外向型、送出型、规模型”坚强送端西北电网建设发展的需要,西北电网公司加快技术创新和科技进步,认真开展电网关键技术科技攻关,为西北750 kV骨干网架建设和外送通道建设提供技术支持和服务。

今年以来,公司列出1000万元专项费用,用于750 kV电网设计、建设、运行等关键技术的科研攻关,提高西北750 kV电网安全稳定水平,促进750 kV后续工程安全、科学、经济、规范建设。同时,公司积极与陕西省科技厅联系沟通,日前获准成为陕西省科学技术奖励推荐单位,具备了向陕西省推荐省部级科技进步奖项的资格,为公司推荐更高等级科技进步奖项进一步拓宽了渠道,创造了有利条件,必将促进公司科技成果奖励、转化、推广应用等科技管理工作的深入开展。