

大型发电机组定子接地保护 $3U_0$ 定值整定的探讨

杨文超¹, 张立港², 李红军³

(1. 北京国华电力技术研究中心, 河北 廊坊 065201; 2. 北京圣海汇泉电力科技发展有限公司, 北京 100069;
3. 河北国华定洲发电有限责任公司, 河北 定洲 073000)

摘要: 通过对大型发电机组定子接地保护的作用和目前所使用的定子接地保护整定方法进行了介绍, 分析计算了中性点经配电变压器接地的发电机接地电流大小与保护范围之间的关系, 结合《导则》规定的动作整定原则, 提出了发电机定子接地保护 $3U_0$ 定值与出口时限的选择方法, 并通过实例计算主变高压侧单相接地故障产生的传递电压对定子接地保护的影响, 最后给出了三段式定子接地保护的整定建议。

关键词: 发电机组; 定子接地保护; $3U_0$; 定值

Discussion about stator grounded protection $3U_0$ setting in large power plant

YANG Wen-chao¹, ZHANG Li-gang², LI Hong-jun³

(1. Beijing Guohua Electric Power Technology Research Center, Langfang 065201, China;
2. Beijing Shenghaihuiquan Electric Technology Development Co., Ltd., Beijing 100069, China)
3. Hebei Guohua Dingzhou Generation Co., Ltd., Dingzhou 073000, China

Abstract: By introducing stator grounded protection and setting method used in large power plant, this paper analyzes and calculates the relationship between current value while grounded fault and range of protection by single transformer at neutral point. Combined with the principle of settings, it firstly provides the selectable method of generator grounding fault protection with operative time, and then calculates the influence to the stator grounded protection by transferred voltage when single phase grounded fault occurs in the main transformer high-voltage side, at last puts forward a setting suggestion about 3-step stator grounded protection.

Key words: generator unit; stator grounded protection; $3U_0$; settings

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)04-0018-04

1 定子接地保护在大型汽轮发电机组保护中的地位

发电机是电力系统中最重要设备之一, 其外壳完全接地。当发电机定子绕组与铁心之间的绝缘被破坏时, 就形成了定子单相接地故障。发电机定子绕组发生单相接地故障时, 中性点流过的接地故障电流与中性点接地方式有关, 发电机中性点接地方式的不同, 对发电机定子接地保护的出口方式要求也不同, 而且动作时限也是长短不一。

由于现代大型发电机组在电力系统的重要性, 单机容量的增大, 又多采用单元接线, 一般使三相定子绕组对地电容增加且相对固定, 相应的单相接地电流增大, 而定子铁心又是在数百吨的压力下锻压形成的单一整体, 检修很困难, 停机时间长, 造

成相当大的直接损失和间接经济损失, 所以大型发电机一般都装设作为发电机主要保护的 100%定子接地保护, 并保证该保护能够可靠正确动作, 确保小异常不酿成重大事故。

2 大型发电机组定子接地保护的构成

我国大型发电机组大都采用单元接线方式, 中性点接地方式主要采用中性点经配电变压器(二次侧接电阻)接地, 电阻值较大, 取为高阻接地, 其电阻吸收功率大于或等于三相对地电容的无功伏安。为限制动态过电压不超过 2.6 倍额定相电压, 接地电阻(一次值) $R_N \leq 1/3\omega C_g$ 。(C_g 为发电机每相对地耦合电容)

国内目前采用较多的定子接地保护装置, 常采

用基波零序电压元件 (简称 $3U_0$) 和三次谐波电压元件 (简称 3ω) 两部分组成, 其中 $3U_0$ 元件用于反应发电机定子绕组机端部分的单相接地故障, 保护范围从机端至中性点 85%~95% 绕组, 出口方式为经延时跳闸, 而 3ω 元件主要用于保护中性点侧的绕组, 保护范围从中性点至机端 5%~15% 绕组, 出口方式为发信, 两者共同构成 100% 定子接地保护。

3 现行发电机定子接地保护的整定原则

《大型发变组保护整定计算导则》(DL/T684-1999) 中规定发电机定子接地保护 $3U_0$

的整定原则为: $U_{op} = K_{rel} U_{unb.max}$

式中: K_{rel} 为可靠系数, 取 1.2~1.3; $U_{unb.max}$ 为实测不平衡电压, 应为滤除三次谐波后的基波电压值。

该值应该用高压侧单相接地故障时通过升压变压器高低压绕组间的每相耦合电容 C_M 传递到发电机侧的零序电压来校核, 保护动作时限要与系统侧接地保护的时限配合。但《导则》没有明确是与哪段的时限配合。

按照 DL/T684-1999《大型发电机变压器继电保护整定计算导则》规定, 动作时间应与系统接地保护相配合。实际上, 由于发电机中性点接地方式的不同, 关于发电机定子接地保护的时限选择也没有明确的规定。有的电网公司规定发电机定子接地保护的延时时限必须和高压电网的零序保护时限相配合, 也有的要求必须躲开线路保护重合闸的时间, 主要考虑线路瞬时故障而重合成功, 避免不必要的停机; 而国外有些国家由于电网容量储备大, 定子接地保护大多为发电机的主保护, 一旦绝缘下降到规定值以内, 便在短时间内切机, 避免事故扩大造成机组严重损坏, 这是国外继电保护的设计理念。这样就造成国内发电厂在整定过程中有的机组定子接地保护时限整定为 1 s 或 0.5 s, 有的却整定为延时 5~6 s, 由于整定计算人员对《导则》该部分内容理解上的偏差, 因此造成了该保护时限定值的较大偏差。在实际运行中也出现了问题。有的电厂就发生过当发电机机端单相接地故障时, 定子接地保护虽然启动, 但动作出口的却是其他保护, 定子接地保护不能正确动作。

4 中性点经配电变压器 (二次接电阻 R_N) 接地时的故障电流计算

《继电保护和安全自动装置技术规程》(GB14285-93) 中规定: 对于发电机额定电压在 18~20 kV, 额定容量在 300~600 MW 的机组, 其接地电流允许值为 1 A。

这条规定可以这样理解, 当接地电流大于 1 A 时, 定子接地保护必须立即无延时跳闸, 以免损坏发电机, 而当接地电流在 1 A 以内时, 则定子接地保护可只动作于信号。

下面讨论发电机中性点经配电变压器 (二次接电阻 R_N) 接地时的故障电流。当发电机定子绕组发生金属性单相接地故障时, 其等效电路如图 1 所示。

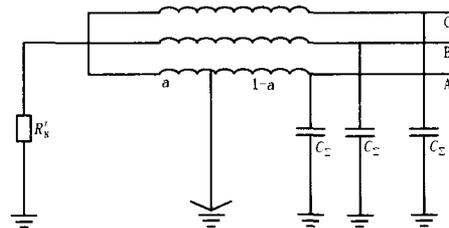


图 1 单相接地三相等效电路

Fig.1 Three-phase equivalent circuit when single-phase grounded

图中 C_Σ 为发电机及机端外接元件每相对地总电容, R_N 为折算到配电变压器一次侧的等效电阻, α 为由中性点到故障点的绕组占一相每分支全部绕组匝数的百分比。通过计算可得故障点的零序电压为: $U_{d0(\alpha)} = -\alpha E_A$ 。表明故障点零序电压将随着故障点位置的不同而改变, 据此可作出发电机内部单相接地的零序等效网络如图 2 所示。

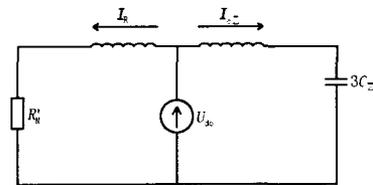


图 2 计算发电机单相接地电流的等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit for calculating single-phase grounded current

由此可计算出

$$I_R = \frac{U_{d0}}{R_N} \quad (1)$$

$$I_{C\Sigma} = \frac{U_{d0}}{1} \quad (2)$$

$3\omega C_\Sigma$

$$I_{\Sigma} = \sqrt{I_R^2 + I_{C\Sigma}^2} \quad (3)$$

式中： I_{Σ} 为故障点总的单相接地电流。

将 $U_{d0(\alpha)} = -\alpha E_A$ 带入上述式中，可得出

$$\alpha = \frac{I_{\Sigma}}{E_A \sqrt{\frac{1}{R_N'^2} + (3\omega C_{\Sigma})^2}} \quad (4)$$

式(4)表明了总故障电流与中性点至故障绕组百分比之间的关系。这样，可求出当接地电流为 1 A 时，也就是定子接地保护无条件跳闸时的定子接地保护的范 围，以及基波零序电压保护动作值 $U_{op} = \alpha \cdot 100 \text{ V}$ 。例如，某 600 MW 发电机，发电机中性点电阻为 3.67 kΩ，机端总对地电容为 0.84 μF，发电机电势为 $20/\sqrt{3} \text{ kV}$ 。带入式(4)可得 $\alpha \approx 0.32$ ，因此 $U_{op} = 32 \text{ V}$ ，发电机应无延时跳闸。即保护范围在中性点至故障点 32%范围时，保护应立即跳闸，而在小于 32%范围内发生接地故障时，则接地电流不会大于 1 A。该值与《导则》中规定的整定值相比，从机端至中性点的保护范围不到 80%，若按该值整定 $3U_0$ ，则在靠近中性点发生金属性接地故障时保护死区较大，若发生经过渡电阻的一点接地情况，则对大型发电机的安全运行造成巨大威胁。

5 定子接地保护 $3U_0$ 的整定方法

5.1 发电机定子接地保护 $3U_0$ 的获取

当发电机内部单相接地时，实际上无法直接获得故障点的零序电压 $U_{d0(\alpha)}$ ，只能借助于机端（或中性点）的电压互感器来进行测量。工程中为防止机端 PT 一次熔断器发生意外熔断而对定子接地保护造成影响，引起保护误动，通常取中性点单相 PT 来获得零序电压。图 3 是发电机内部单相接地时机端的电压矢量图。

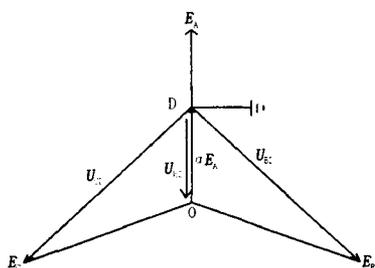


图 3 发电机内部单相接地时机端的电压矢量图

Fig.3 Voltage sector for single-phase grounded in generator

由图 3 的矢量关系，当忽略各相电流在发电机

内阻抗上的压降时，机端各相的对地电压分别为：

$$U_{AD} = (1-\alpha)E_A, \quad U_{BD} = E_B - \alpha E_A,$$

$$U_{CD} = E_C - \alpha E_A$$

可求得机端的零序电压为

$$U_{k0} = \frac{1}{3}(U_{AD} + U_{BD} + U_{CD}) = -\alpha E_A, \text{ 该值和故障点的零序电压相等。}$$

因此，发电机定子接地保护的 $3U_0$ 可从机端 PT 获取。

5.2 定子接地保护 $3U_0$ 的整定

从故障电流的计算中可看出，按照允许接地电流 1 A 考虑，则在中性点至故障点大约 30% 的范围内发生单相接地时，不需要将发电机跳闸退出运行，这是从理论上分析得到的；同时，从某电厂的试验中也验证了这一点（在保护定值整定为 20 V 时，机端单相接地试验，在中性点测量的电流为 0.43 A），但考虑主变高压侧单相接地和高厂变低压侧单相接地时的传递电压影响，以及《导则》的要求，将定子接地保护整定为三段。I 段按接地电流大于允许值 1 A 跳闸来整定，考虑非金属性接地故障，增加一定的裕度，建议 $U_I = 15 \sim 20 \text{ V}$ ，保护范围最低为 85%，动作时限取 $T_I = 0.5 \sim 1 \text{ s}$ ，出口方式为跳闸；II 段按躲 6 kV 侧接地故障来整定， $U_{II} = 10 \sim 15 \text{ V}$ ，保护范围约 90%，动作方式为跳闸或发信，动作延时取 $T_{II} = 2 \sim 3 \text{ s}$ ，III 段按躲系统侧接地故障来整定， $U_{III} = 5 \sim 7 \text{ V}$ ，保护范围约 95%，动作时限取 $T_{III} = 5 \sim 6 \text{ s}$ ，出口方式为发信。

6 发电机定子接地保护的校验

根据《导则》，应校验主变高压侧接地短路时，通过变压器高低压绕组间的每相耦合电容 C_M 传递到发电机侧的零序电压 U_{g0} 的大小。但同时也应校验高厂变低压侧单相接地对该保护的影响。

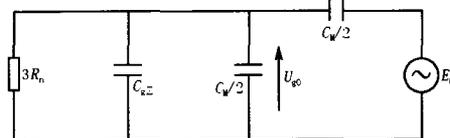


图 4 传递电压的等值分析电路

Fig.4 Equivalent circuit for analysing transferred voltage

E_0 为系统侧（或高厂变低压侧）接地短路时产生的基波零序电动势； C_M 为主变压器（或高厂变）高低压绕组间的每相耦合电容； $C_{g\Sigma}$ 为发电机及机端外接元件每相对地总电容。

当变压器高压侧（或厂变低压侧）发生短路时，

传递到发电机端的基波零序电压为

$$U_{g0} \approx \frac{C_M/2}{C_{g\Sigma} + C_M} \times E_0, \text{ 将此值折算到中性点二次}$$

侧, 与保护定值比较, 即可得出是否会引起保护误动, 否则应采取增加延时的措施躲开该值对保护的影响。

下面为某厂对高压侧单相接地时传递电压核算的实例: 根据图 4 的等效电路, E_0 为系统侧接地短路时产生的基波零序电动势。通常

$$E_0 \approx (0.33 \sim 0.60)U_{\text{In}} / \sqrt{3}, \text{ 取}$$

$$E_0 \approx 0.5 \times U_{\text{In}} / \sqrt{3} = 0.5 \times 230 / \sqrt{3} = 66.4 \text{ kV}$$

C_M 为主变压器高低压绕组间的每相耦合电容。据厂家提供数据为

$$C_M = 0.007343 \text{ } \mu\text{F/ph}$$

$C_{g\Sigma}$ 为发电机及机端外接元件每相对地总电容。

$$C_{g\Sigma} = 0.21 + 0.01243 + 3 \times 0.02 = 0.282 \text{ } \mu\text{F/ph}$$

$R_0 = 0.49 \text{ } \Omega$ 转换高压侧 $4050 \text{ } \Omega$, 发电机最大接地电流为 2.85 A 。

变压器高压侧发生短路时, 传递到发电机端的基波零序电压为

$$U_{g0} = \left(\frac{C_M/2}{C_{g\Sigma} + C_M} \times E_0 \right) / n_v =$$

$$\left(\frac{0.007343/2}{0.282 + 0.007342} \times 66400 \right) / (20/0.22) = 9.6 \text{ V}$$

该值与保护整定值 I、II 段进行比较, 可得到是否造成保护误动作。

按照《火电机组启动规程》中的相关规定, 应对机组的有关继电保护进行校验, 必要时可进行一次试验。同时, 为了验证 6 kV 接地故障和主变高压侧单相接地故障对定子接地保护的影响, 也需进行一次试验, 验证该保护正确。但由于一次试验存在风险, 所以不主张做 6 kV 侧单相接地试验。如果认为有必要做该试验, 则应注意: 6 kV 侧单相接地试验由于厂变中性点接地电阻的容量限制和接地电流的限制, 试验前应充分考虑清楚, 核算一次接地电流, 避免损坏一次设备, 试验中应采取降低保护定值的措施, 并尽量缩短试验时间。

7 结论和建议

考虑上述因素, 从满足《继电保护和安全自动

装置技术规程》接地电流小于 1 A 的要求出发, 可将定子接地保护 $3U_0$ 元件分别设置不同的 3 段定值, 即 I 段按接地电流大于允许值 1 A 跳闸来整定, 考虑非金属性接地故障, 增加一定的裕度, 建议保护范围最低为 85% , 动作时限取 $T_1 = 0.5 \sim 1 \text{ s}$; II 段按躲 6 kV 侧接地故障来整定, $U_{\text{II}} = 15 \text{ V}$, 保护范围约 90% , 动作方式为跳闸或发信, 动作延时取 $T_2 = 2 \sim 3 \text{ s}$; III 段按躲系统侧接地故障来整定, $U_{\text{III}} = 5 \text{ V}$, 保护范围约 95% , 动作时限取 $T_3 = 5 \sim 6 \text{ s}$, 出口方式为发信。

上述整定原则在大型发电机组上得到了很好的应用, 国内使用的发变组保护装置有些可实现上述整定内容, 建议推广使用这种整定方法, 以避免执行《导则》中的困难之处。

参考文献

- [1] GB14285-93, 继电保护和安全自动装置技术规程[S]. GB14285-93, Technical Code for Relaying Protection and Security Automatic Equipment[S].
- [2] DL/T684-1999, 大型发变组保护整定计算导则[S]. DL/T684-1999, Guide of Calculating Settings of Relay Protection for Large Generator and Transformer[S].
- [3] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理(增订版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004. HE Jia-li, SONG Cong-ju. Power System Relaying Protection Principle[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [4] 王维俭. 发电机变压器继电保护应用(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003. WANG Wei-jian. Generator & Transformer Relaying Protection Application(Second Edition)[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [5] 李晋民. 100%定子接地保护改进方案的研究[J]. 电网技术, 1998, 22(9): 48-50. LI Jin-min. Improvement on the 100% Stator Ground Protection[J]. Power System Technology, 1998, 22(9): 48-50.

收稿日期: 2006-09-04; 修回日期: 2006-09-26

作者简介:

杨文超(1965-), 男, 学士, 高级工程师, 曾从事发变组和系统保护的试验和调试工作, 目前主要从事继电保护管理、事故分析及研究工作。E-mail: ywchao@dys.hbpc.com.cn