

# 三峡大型发电机中性点接地电阻的合理选择

张琦雪<sup>1</sup>, 王维俭<sup>2</sup>, 王祥珩<sup>2</sup>

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211100; 2. 清华大学电机系, 北京 100084)

**摘要:** 通过分析中性点接地电阻对定子绕组单相接地保护、重燃弧过电压以及接地故障电流的影响, 认为适当地提高中性点接地电阻有助于提高外加 20 Hz 电源定子单相接地保护的灵敏度、有利于减小接地故障电流和中性点接地电流, 且不会带来威胁发电机安全的过电压。结合三峡发电机的特点——定子绕组绝缘等级高、定子绕组对地电容大, 认为中性点接地电阻取 3~5 倍的对地容抗值比较合适。

**关键词:** 水轮发电机; 中性点接地; 高阻接地

**中图分类号:** TM77 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)15-0005-04

## 0 引言

三峡左岸电厂的大型发电机中性点采用配电变压器电阻(高阻)接地方式, 而未采用消弧线圈接地方式(该接地方式不在本文讨论范围之内)。一般认为, 根据理论分析计算, 当发电机中性点接地电阻  $R_n$  (一次值) 小于或者等于从发电机中性点看入的对地容抗值  $X_C$ , 即  $R_n \leq X_C$  时, 限制定子绕组一点接地故障时的弧光暂态过电压和接地故障电流的综合性能比较好<sup>[1]</sup>。另外, 按照 IEEE 的相关标准<sup>[2]</sup>, 为限制定子绕组单相接地重燃弧过电压小于  $2.6 p.u$  (标么值的基值取发电机额定相电压的峰值, 以下同), 通常选取中性点接地电阻时要求阻抗比  $K_R = R_n / X_C \leq 1.0$ 。根据相关资料提供的数据, 三峡大型发电机 #2 机和 #5 机中性点接地电阻的阻抗比虽然大于 1.0, 但是都在 1.0 附近, 说明还是按照通行的做法选择电阻参数的。

但是, 三峡大型发电机组一方面定子绕组主绝缘等级高, 另一方面定子绕组对地电容大, 换言之, 定子绕组单相接地故障引起的危害, 过电压为次要因素, 故障电流为主要因素。

鉴于三峡机组自身的特点, 以及中性点接地电阻的合理取值是涉及机组安全、经济运行的一个重要技术问题, 当前三峡大型发电机中性点接地电阻的取值是否合理便值得商榷。

从安全运行的角度出发, 本文综合考虑和分析了中性点接地电阻对定子绕组单相接地保护、对重燃弧过电压以及接地故障电流的影响, 给出了中性点接地电阻的合理取值范围。

## 1 当前三峡机组中性点接地方案

根据相关资料提供的数据, 以三峡 #2 发电机为例, 其额定电压  $U_N = 20$  kV, 容量为 700 MW, 发电机中性点接地方案及相关参数如下:

1) 接地变压器参数

$$\text{变比: } n = \frac{20 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 480 \text{ V}$$

二次侧电阻值:  $R_n = 0.963$

折算至一次侧的电阻值:  $R_n = 557.3$

额定容量:  $S_N = 51$  kVA

过载倍数: 4.7 倍 (60 s)

2) 发电机电容参数

定子绕组每相对地电容:  $C_g = 2.03 \mu\text{F}$

机端外部每相对地电容:  $C_t = 0.2 \mu\text{F}$  (估计值)

总的每相对地电容:  $C = C_g + C_t = 2.23 \mu\text{F}$

其中, 机端外部每相对地电容  $C_t$  是指发电机机端与主变之间的设备(包括主变低压绕组)一次侧对地电容。不难计算得到中性点接地电阻与系统对地容抗的阻抗比为  $K_R = R_n / X_C = R_n / (3C)^{-1} = 1.17$ 。

## 2 中性点接地电阻选择分析

### 2.1 提高定子绕组单相接地保护的灵敏度

三峡 #2 发电机定子单相接地保护最终选择了西门子公司的外加 20 Hz 电源的保护方案。这种保护方案是将 20 Hz 电源信号加在中性点接地的配电变压器二次侧, 当定子绕组发生单相接地故障时, 20 Hz 电源注入信号通过故障点产生较大的电流, 从而使保护动作。从原理上看, 这种保护不仅可以检测绝缘短时间内遭到破坏的定子绕组单相接地故障,

还可以检测绝缘强度缓慢的下降,而且和故障位置无关;另外,这种保护方式的动作特性对发电机运行频率(转速)不敏感,因此,发电机处于停机、启动、甩负荷等各种工况,该保护均可应用<sup>[3]</sup>。

从发电机中性点看进去,仅考虑 20 Hz 交流分量,得到简化的等效电路(折算到发电机侧),如图 1 所示,其中接地故障点经过渡电阻  $R_F$  接地。

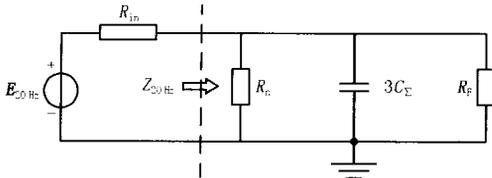


图 1 外加 20 Hz 电源定子单相接地保护等效电路

Fig 1 Equivalent circuit of stator grounding fault protection with 20 Hz voltage source

以工频下系统对地电容的容抗为基值,不难得到电阻  $R_n$ 、 $R_F$  的标么值分别为:

$$R_n^* = R_n / X_C = R_n / (3 C_{\Sigma})^{-1} = K_R$$

$$R_F^* = R_F / X_C$$

而 20 Hz 频率下  $3C$  的导纳的标么值为:

$$Y_{C,20Hz}^* = Y_{C,20Hz} / Y_C = (j_{20Hz} \cdot 3C) / (j_{50Hz} \cdot 3C) = j0.4$$

图 2 为同一接地过渡电阻情况下,不同中性点接地电阻时,故障前后相应的导纳相量图。

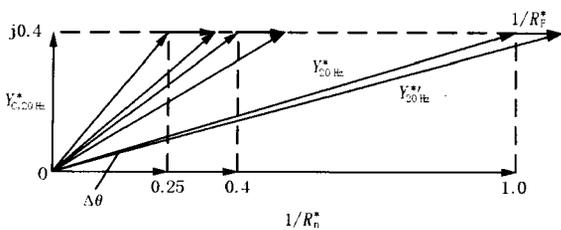


图 2 导纳相量图

Fig 2 Phasor diagram of the admittances

由图 2 不难得到对应于 20 Hz 的从中性点看进去的等值导纳,故障前为:  $Y_{20Hz}^* = 1/K_R + j0.4$ ; 故障后为:  $Y_{20Hz}^{*'} = 1/K_R + 1/R_F^* + j0.4$ 。

注意,当  $K_R = 50/20 = 2.5$  时,故障前阻抗  $Z_{20Hz}$  的阻抗角正好是  $45^\circ$ 。

对于 20 Hz 外加电源的定子接地保护,不管采用电流判据、阻抗判据,还是相角判据,其灵敏度的高低取决于 20 Hz 电压、电流信号的检测准确度和故障前后 20 Hz 电压、电流信号发生变化的程度。

有图 2 的相量图可知,故障前后等值阻抗大小的变化为:

$$|Z_{20Hz}| = \frac{1}{\sqrt{(1/K_R)^2 + 0.16}} - \frac{1}{\sqrt{(1/K_R + 1/R_F^*)^2 + 0.16}} \quad (1)$$

等值阻抗相角的变化为:

$$|\theta| = \arctan(0.4 K_R) - \arctan[0.4 K_R R_F^* / (K_R + R_F^*)] \quad (2)$$

分别取故障处过渡电阻  $R_F = 8000, 7000, 5000$ , 即  $R_F^* = 16.81, 14.71, 10.51$ , 计算得到随中性点接地电阻(阻抗比)变化的  $|Z_{20Hz}|$  和  $|\theta|$ , 如图 3、图 4 所示。

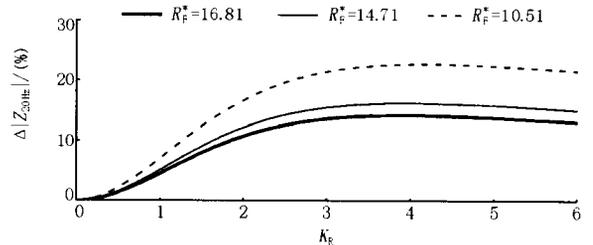


图 3  $|Z_{20Hz}|$  与  $K_R$  的关系曲线

Fig 3 Relationship between  $|Z_{20Hz}|$  and  $K_R$

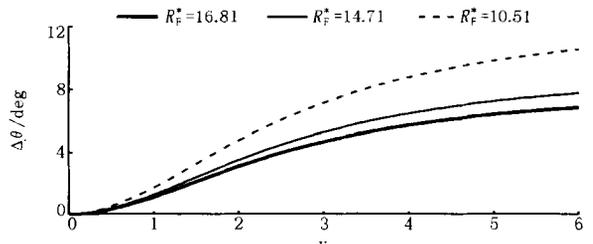


图 4  $|\theta|$  与  $K_R$  的关系曲线

Fig 4 Relationship between  $|\theta|$  and  $K_R$

显然,在同样接地故障情况下,增大中性点接地电阻阻值,故障前后等值阻抗大小和相角的变化都会增大,因此更加便于定子接地保护判别故障,保护的灵敏度增加了。值得注意的是,当  $K_R > 3$  之后,  $|Z_{20Hz}|$  的增加开始趋缓。

灵敏度能够提高的本质是增大中性点接地电阻后,外加 20 Hz 注入信号相对更多地流过故障点。

## 2.2 抑制重燃弧暂态过电压

发电机中性点采用电阻接地方式的初衷就是为了限制定子绕组单相接地引起的重燃弧过电压。美国曾用暂态网络分析仪(TNA)分析过重燃弧过电压问题,A IEE 早在 1953 年的报告<sup>[4]</sup>中就给出了重燃弧过电压与中性点接地电阻之间的关系曲线,IEEE 的相关标准<sup>[2]</sup>也一直沿用这个结果。文献 [1] 在讨论中性点接地方式选型时也用了 A IEE 的结果。若采用电机多回路方法计算重燃弧过电压可

得如图 5 所示的关系曲线<sup>[5]</sup>。

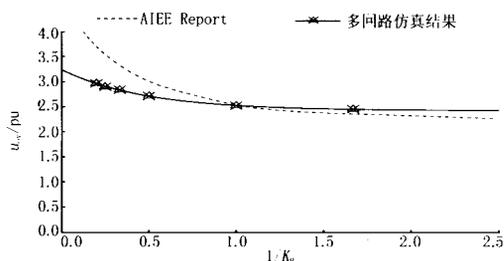


图 5 重燃弧暂态过电压与中性点接地电阻的关系  
Fig 5 Relationship between the transient over voltage and the neutral grounding resistor during restriking

对比两条曲线发现,在中性点接地电阻比较小( $K_R$  比较小)的情况下,两者基本吻合;在电阻比较大时,TNA 模型仿真的结果比多回路仿真结果要大。实际上,根据国内外多年来对定子单相接地重燃弧过电压的研究,文献[6]明确指出美国 TNA 的结果过高地估计了暂态过电压,对于不接地的系统过电压最高不超过 3.5 p.u。考虑到多回路模型<sup>[5]</sup>比较精细,且结果接近于实际情况,因此可作为选择中性点接地电阻的参考依据。

根据相关资料提供的数据,三峡 #2 发电机定子绕组绝缘为 IEC 标准规定的 F 级绝缘,线棒主绝缘工频耐压 61.5 kV(有效值),持续 1 min;击穿耐压 110 kV(峰值),即可承受 6.74 p.u 的冲击电压。这个电压大大超过了定子单相接地故障可能产生的重燃弧过电压。另外,由于发电机为防止雷电过电压损坏设备,通常在发电机机端以及中性点处都装设避雷器,这些装置同样可以限制定子单相接地重燃弧暂态过电压。

考虑到三峡电机绝缘等级高的特点,中性点接地电阻可以在较宽的范围内取值。结合多回路仿真计算的结果,可将中性点接地电阻的  $K_R$  限制在 5.0 以下是合适的。注意,从图 5 上看,中性点接地电阻低到一定程度对进一步限制过电压效果已不明显。

### 2.3 限制中性点电流及接地故障电流

根据 IEEE 的相关标准<sup>[2]</sup>,发电机中性点高阻接地时,应当将接地故障电流限制在 3~25 A 之间,而流过中性点接地电阻的电流(配电变压器一次值)不超过 5 A。

参考文献[7],取配电变压器短路电压百分比  $U_K\% = 5.8\%$ ,忽略变压器电阻,则变压器短路电抗  $X_T = 151.6$ 。当发电机机端发生金属性单相接地故障时,仅考虑基波情况下,则流过中性点接地电阻的电流  $I_n$  与故障点接地电流  $I_f$  分别为:

$$I_n = U_{ph} / (R_n + jX_T) \quad (3)$$

$$I_f = U_{ph} / (R_n + jX_T) + U_{ph} / (-jX_C) \quad (4)$$

当前三峡 #2 机组中性点接地装置配置情况下,  $I_n = 20$  A、 $I_f = 26$  A,这不满足 IEEE 的相关要求。

根据式(3)、(4)不难得到中性点接地电流  $I_n$ 、接地故障电流  $I_f$  与中性点电阻的关系曲线,如图 6 所示。

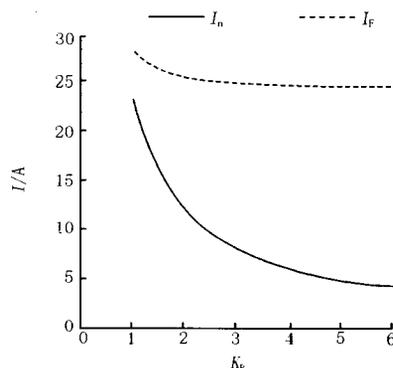


图 6 中性点电流、接地故障电流与中性点接地电阻的关系

Fig 6 Relationship between the neutral grounding current, the grounding fault current and the neutral grounding resistor when line-to-ground fault occurs

显然,随着中性点接地电阻的增大,中性点电流可大幅度下降,故障点的接地电流开始有比较明显的下降,随后下降的程度则趋缓。

单从限制电流的角度看,提高中性点接地电阻是有好处的。针对三峡 #2 发电机,当  $K_R > 2.4$  时,接地故障电流  $I_f$  可限制在 25 A 以下;当  $K_R > 4.8$  时,中性点接地电流  $I_n$  可限制在 5 A 以下。可见,只有取较大中性点接地电阻才有可能满足 IEEE 的相关标准。

增大中性点接地电阻的另一个好处是可以减轻配电变压器的负荷。比如,若配电变压器参数不变,当提高中性点接地电阻至  $K_R = 4.8$ ,则当发电机机端发生金属性单相接地故障时,流过中性点配电变压器的接地电流  $I_n = 5$  A,则配电变压器的过载倍数为  $\frac{U_N I_n}{S_N} = \frac{20/\sqrt{3} \times 5}{51} = 1.13$ ,明显小于设备的过载倍数 4.7。因此,提高中性点接地电阻可以降低配电变压器的过载倍数(若过载倍数不变,则可降低容量),从而降低配电变压器的制造成本。

## 3 结论

三峡发电机的特点是“定子绕组主绝缘等级

高,且定子绕组对地电容大、单相接地故障时的电容电流比较大”,因此,定子绕组单相接地故障引起的危害,过电压是次要的,故障电流是主要的。选取发电机中性点接地电阻大小时应适当放宽对过电压的限制。

通过分析可知,应当突破传统的做法(中性点接地电阻的阻抗比  $K_R = 1.0$ ),适当地增大中性点接地电阻的阻值,不仅可以提高外加 20 Hz 电源定子单相接地保护的灵敏度,而且可以减小接地故障电流和中性点接地电流、降低中性点接地配电变压器的容量和成本,与此同时,定子单相接地重燃弧过电压完全在电机安全运行范围内。

综合以上多种因素,三峡发电机中性点接地电阻的阻抗比  $K_R$  取值在 3~5 之间是合理的。而对于定子绕组绝缘等级稍低的大型发电机,可以考虑选取  $K_R$  在 2~3 之间。

以上分析和结论,同样适用于采用外加 12.5 Hz 的定子单相接地保护方案的发电机。

#### 参考文献:

- [1] 李毅军. 三峡左岸电站发电机中性点接地方式的选型与计算 [J]. 水力发电, 1999, (4): 48-50.  
LI Yi-jun. Selection and Calculation of the Neutral Earthing Method of Generator in Three-gorges Power Plant [J]. Water Power Generation, 1999, (4): 48-50.
- [2] IEEE Standards Board C37. 102-1995, IEEE Guide for Generator Ground Protection [Z]. New York: IEEE Std C37. 101-1993.
- [3] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用(第二版)

[M]. 北京:中国电力出版社, 2002.

WANG Wei-jian. Principle and Application of Electric Power Equipment Protection, Second Edition [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.

- [4] A IEE Committee Report Application Guide for Grounding of Synchronous Generator Systems [J]. A IEE Trans, 1953: 517-530.
- [5] 张琦雪, 王祥珩, 王维俭. 大型水轮发电机定子中性点高阻接地暂态分析 [J]. 电网技术, 2004, 28 (1): 30-33.  
ZHANG Qi-xue, WANG Xiang-heng, WANG Wei-jian. Transient Analysis on Large Hydro-generator with High Resistance Grounding [J]. Power System Technology, 2004, 28 (1): 30-33.
- [6] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.  
YAO Huan-nian, CAO Mei-yue. Resonance Neutral Earthing of Power System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.
- [7] 殷建刚, 蔡敏, 彭丰, 等. 发电机中性点经配电变压器接地的配置方法 [J]. 湖北电力, 2002, 26 (3): 28-30.  
YN Jian-gang, CAI Min, PENG Feng, et al. The Way to Configure the Distribution Transformer for Generator Neutral Grounding [J]. Hubei Electric Power, 2002, 26 (3): 28-30.

收稿日期: 2004-11-10

作者简介:

张琦雪(1974-),男,博士,工程师,从事电厂自动化、发电厂励磁的研发工作。E-mail: zhangqx@nari-relays.com

### Proper selection of neutral grounding resistor of the large-sized hydro-generator in Three Gorges Power Plant

ZHANG Qi-xue<sup>1</sup>, WANG Wei-jian<sup>2</sup>, WANG Xiang-heng<sup>2</sup>

(1. NARI Relays Electric Co., Ltd, Nanjing 211100, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The grounding method of distribution transformer with secondary resistor, high resistance grounding method, is used on the large-sized hydro-generators in Three Gorges Power Plant. However, the value of the grounding resistor is not proper. This paper analyzes the effects of neutral grounding resistor on the ground fault protection, on the transient over voltage caused by arcing restrike, and on the ground fault current. Studies show that properly increasing resistor is better for increasing the sensitivity of ground fault protection with 20Hz voltage source, better for limiting ground fault current and neutral grounding current. In addition, it will not bring any very high overvoltage. Considering that the generator in Three Gorges Power Plant has high insulation level and high single-phase to ground capacitance, it should be proper that the primary value of neutral resistance is 3 to 5 times of the system to ground capacitive reactance.

**Key words:** hydro-generator; neutral grounding; high resistance grounding