

大型发电机中性点组合型接地方式的分析与探讨

张琦雪¹, 曾祥君², 徐金¹, 陈佳胜¹, 徐天乐¹, 戴建民¹, 王光¹, 陈俊¹

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102;

2. 长沙理工大学 智能电网运行与控制湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410014)

摘要:为限制接地故障电流,同时方便应用定子接地保护,大型发电机上采用了一种折中的组合型接地方式:在接地变压器低压侧负载电阻两端并联一个电感。给出了组合型接地方式的等值电路;对组合型接地方式进行选型计算,原则是电阻电流等于补偿后的电容电流,并将故障电流限制在 10~25 A 范围内。将组合型接地方式和常规的高阻接地方式进行了对比,对比结果表明组合型接地方式的并联电感值越小,越能有效地限制接地故障电流,但是采用组合型接地方式后失谐度、阻尼率会减小,进而导致传递过电压、位移电压有所增大。希望分析及探讨有助于组合型接地方式的选型设计及推广应用。

关键词:大型发电机;单相接地故障;高阻接地;谐振接地;定子接地保护

中图分类号:TM 77

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.11.032

0 引言

中性点接地方式的选择是涉及发电机安全运行的一个重要方面,按照其发展历程,大致可分为直接接地、低阻抗接地、不接地、高阻接地和消弧线圈接地方式^[1-2]。大型发电机主要应用高阻接地和消弧线圈接地 2 种方式。其中,高阻接地方式主要是经单相配电变压器的电阻接地,等值为“高阻值”的电阻接地;消弧线圈接地又称为谐振接地,消弧线圈为参数合适的电感。

国内的大型发电机在 20 世纪 90 年代前主要采用谐振接地方式,之后逐渐全面转向高阻接地方式。这 2 种接地方式已有许多文献进行了讨论,孰优孰劣早已不再争论,目前是高阻接地方式“一统天下”。已有的分析探讨主要涉及 3 个方面:①单相接地故障的暂态过电压^[3-8],主要通过暂态分析仪 TNA^[3-4]、准分布电容参数模型^[5-6]或者多回路分析方法^[7-8]研究不同接地方式下暂态过电压的规律;②接地故障电流^[7-11],主要结论为消弧线圈可以补偿电容电流、减小接地故障电流;③对定子接地保护的影响^[2,12-14],主要结论是消弧线圈接地方式有利于提高 3 次谐波电压比率判据的灵敏度,但是存在传递过电压导致保护误动的风险以及位移电压比较高的可能,也不利于注入式定子接地保护的应用。此外文献[2,10,11,15-17]对接地设备选型设计进行了探讨,得到了一些有益的结果。

众所周知,为了减少接地故障电流,理应采用谐振接地方式;然而为了便于定子接地保护,尤其是注入式定子接地保护^[2,14,17-19]的应用,设计院及电厂用户仍希望采用高阻接地方式。近年来,一些水轮发电机(如二滩、铜街子水电站的发电机)应用了一种折中的接地方案,即在配电变压器低压侧负载电阻

上并联 1 个小电感。该方案借鉴谐振接地的优点,利用小电感补偿了一部分电容电流,同时保留了高阻接地方式,所以可以称为电阻电抗组合型接地方式(以下简称组合型接地方式)。

目前组合型接地方式引起了设计院及电厂用户的关注,正在建设的白鹤滩水电站的 1 000 MW 特大型水轮发电机也有意向采用。虽然组合型接地方式已在工程上尝试应用,但是目前还没有文献对其进行详细分析,如何进行选型计算,设计上、应用上需要注意哪些问题,都值得探讨。本文尝试给出组合型接地方式的等值电路和选型计算的方法,计算了并联电感对故障电流、传递过电压、位移电压的影响,并与常规的高阻接地方式进行了对比,希望有助于组合型接地方式的选型设计及推广应用。

1 大型水轮发电机的对地电容电流

大型汽轮发电机定子绕组线圈数较少,相应的每相对地电容不是很大,一般为 0.2~0.4 μF ;相比之下,大型水轮发电机定子绕组线圈数量较多,每相对地电容通常要高 1 个数量级。本文调查统计了部分大型水轮发电机的对地电容电流,如表 1 所示。表

表 1 部分大型水轮发电机的电容电流

Table 1 Capacitive currents of some large-sized hydro-generators

电站/机组	P_n/MW	$U_{\text{rated}}/\text{kV}$	$C_{\Sigma}/\mu\text{F}$	$I_{3C\Sigma}/\text{A}$
二滩/GE	550	18	2.538	24.86
三峡右岸/东电	700	20	1.980	21.55
三峡右岸/TAH	700	20	2.800	30.47
三峡右岸/哈电	700	20	3.680	40.05
龙滩电站/哈电	700	18	3.820	37.42
小湾电站/哈电	700	18	3.200	31.34
向家坝右岸/TAH	800	23	3.922	49.08
溪洛渡右岸/东电	770	20	3.441	37.45
乌东德/GE	850	22	3.387	40.55
乌东德/福伊特	850	22	4.617	55.27
白鹤滩右岸/哈电	1 000	24	3.438	44.90

收稿日期:2017-11-12;修回日期:2018-10-19

中, P_n 为发电机额定有功功率; U_{rated} 为发电机额定电压; C_Σ 为每相对地电容; $I_{3C\Sigma}$ 为发电机机端发生金属性接地故障时的三相对地电容电流。

C_Σ 除了计及发电机定子绕组对地电容外, 还计及了发电机出口断路器 (GCB) 两侧、主变低压侧绕组、厂变高压侧绕组、封闭母线等与定子绕组有直接电气连接的部分。显然, 电容越大、发电机额定电压越高, 对地电容电流也就越大。

根据 IEEE Std C37.101—2006《IEEE guide for generator ground protection》^[11], 建议将发生高阻接地故障时的故障点电流限制在 10~25 A。然而表 1 中所列的电容电流均超过了 20 A, 最大的电容电流接近 60 A; 当发电机机端发生金属性接地故障时, 产生的故障电流是电容电流与发电机中性点接地电阻的电阻电流的相量和, 显然无法满足导则的要求, 因此需要采用合适的方式补偿部分电容电流。

2 组合型接地方式

2.1 方式介绍

发电机中性点如果采用消弧线圈接地, 且消弧线圈电感感抗与电容容抗相等 (完全谐振), 或者略大于电抗容抗 (欠补偿), 可以有效补偿发生单相接地故障时电容电流的基波分量, 降低故障电流。借鉴这个思路, 组合型接地方式保留了发电机中性点配电变压器及其负载电阻, 但是在负载电阻的两端并联 1 个小电感, 利用该电感的电感电流抵消部分电容电流, 将故障点电流限制在 10~25 A 范围内。

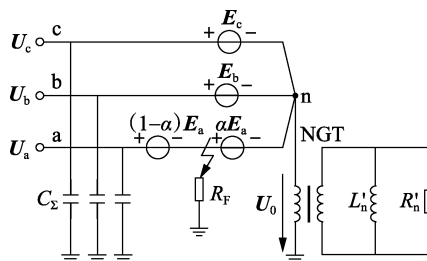
2.2 单相接地故障的基波等值电路

单相接地故障的基波等值电路如图 1(a) 所示, 发电机中性点经过 1 台接地变压器 NGT (Neutral Grounding Transformer) 接地, 低压侧负载电阻 R'_n 上并联 1 个小电感 L'_n ; 发电机每相对地的分布电容等效为集中电容 C_Σ 放置在机端; 假设 a 相内部发生接地故障, 接地故障的过渡电阻为 R_F , 故障相 a 相电压拆解成 αE_a 和 $(1-\alpha)E_a$ 。

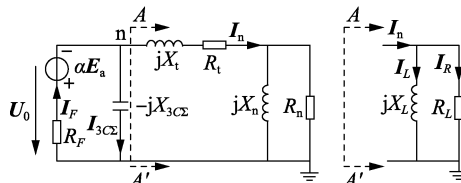
进一步地, 可以将 R'_n 、 L'_n 折算到接地变压器高压侧; 接地变压器采用 T 型等值电路, 如果接地变压器的激磁阻抗很大, 亦可忽略激磁阻抗。此外, 如果实际电感器的品质因数 Q 较低, 则将其等效为理想电感与电阻的串联; 如果 Q 较高, 则忽略电感器的电阻。等效后的等值电路如图 1(b) 所示。

2.3 选型计算的一般方法

对于组合型接地方式的选型, 国内外尚无明确的技术规范。笔者认为从等值的效果看, 发生定子接地故障时, 并联电感并没有完全 (或者近似完全) 补偿电容电流, 组合型接地方式有明显的电阻电流分量, 至少在稳态上等同于高阻接地方式, 所以应当按照配电变压器高阻接地方式进行选型计算^[11,17],



(a) a 相内部接地故障基波电路图



(b) 中性点接地设备的等值变换图

图 1 单相接地故障的基波等值电路

Fig.1 Fundamental component equivalent circuit of stator grounding fault

核心的原则是电阻电流不应超过补偿后的电容电流。具体计算步骤如下。

a. 估算电容电流 $I_{3C\Sigma}$ 。电容参数包括发电机定子绕组、GCB 两侧、主变低压侧绕组、厂变高压侧绕组、封闭母线的对地分布电容数值, 电容电流为:

$$I_{3C\Sigma} = K_c \omega (3C_\Sigma) U_g / \sqrt{3} \quad (1)$$

其中, ω 为额定角频率; U_g 为发电机额定电压; K_c 为裕度系数, 可取为 1.10 或 1.15。

b. 估算电阻电流 I_R 、电感电流 I_L 。通常希望 I_R 等于补偿后的电容电流 $I_{3C\Sigma} - I_L$; 根据设计目标, I_F 可选取为一个具体的值, 如 25 A。估算公式为:

$$\begin{cases} I_R = I_F / \sqrt{2} \\ I_L = I_{3C\Sigma} - I_F / \sqrt{2} \end{cases} \quad (2)$$

c. 选择接地变压器电压^[17]。一次线圈的最高运行电压为发生发电机单相接地短路故障时中性点的对地电压, 即等于发电机相电压的 1.05 倍; 为留有裕度, 一般一次线圈标称电压 U_1 可按发电机额定线电压选定; 二次侧额定电压 U_2 根据国家标称电压的标准可选为 0.4 kV 或 0.23 kV。但是需要注意, 负载电阻 R'_n 的阻值如果非常小, 则有可能影响注入式定子接地保护的应用, 在这种情况下, 需要适当提高 U_2 , 以提高 R'_n 的阻值。

d. 选择接地变压器的额定容量。发电机正常运行时, 中性点对地的基波电压基本为 0, 3 次谐波电压也不大; 发电机机端发生金属性单相接地故障时, 中性点对地工频电压 U_0 将等于发电机的相电压; 由于定子接地保护均快速动作, 接地变压器的容量 S 可以按短时过负荷情况进行估算, 再按电力变压器 R10 容量系列确定 S 最终的取值。

$$S = \frac{U_1 I_{3C\Sigma}}{K_0} \quad (3)$$

其中, U_1 已按发电机额定线电压选定, 实际已有 $\sqrt{3}$ 的裕量; K_0 为过负荷系数, 通常按过负荷持续 1 min 确定, 一般为 4.7。

e. 估算负载电阻和并联电感。

参考图 1(b), 先计算接地变压器的短路阻抗值 $Z'_l = R'_l + jX'_l$, 直接折算至低压侧:

$$\begin{cases} |Z'_l| = \frac{U_k \% U_2^2}{S} \\ R'_l = \frac{P_k}{(S/U_2)^2} \\ X'_l = \sqrt{|Z'_l|^2 - (R'_l)^2} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $U_k \%$ 为接地变压器的短路电压百分比, 一般取为 4%~10%; P_k 为接地变压器的铜损, 一般不超过额定容量的 2%。

然后计算负载电阻与并联电感。设发电机机端发生金属性接地故障, 参考图 1(b) 和式(2), 则有:

$$Z'_n = \frac{U_2 / \sqrt{3}}{n_l (I_{R_n} - jI_{L_n})} - (R'_l + jX'_l) \quad (5)$$

其中, n_l 为接地变压器的高低电压侧线圈的匝比。由此可得:

$$\begin{cases} R'_n = \frac{1}{\operatorname{Re}(1/Z'_n)} \\ X'_n = \frac{-1}{\operatorname{Im}(1/Z'_n)} \end{cases} \quad (6)$$

将 X'_n 除以额定角频率 ω 即可得到电感值 L'_n 。电阻、电感的容量按发电机机端发生金属性接地故障后的电流计算, 并考虑一定裕量, 要求能够满足过负荷持续 1 min 的要求。

3 并联电感的影响

组合型接地方式中, 并联的小电感用于补偿部分电容电流, 感抗在一定范围内的变化将直接影响单相接地故障电流、传递过电压以及位移电压。从稳态电路的角度, 这些影响实质上类似于消弧线圈接地方式下的失谐度与阻尼率的影响。为此, 本文首先定义等效的失谐度和阻尼率, 然后通过 1 个实例计算并联电感的影响。

3.1 等效的失谐度与阻尼率

从发电机中性点接地变压器高压侧端口向低压侧看进去, 其端口阻抗等效为电阻 R_l 与电抗 jX_l 并联, 则定义失谐度 $\nu = \left(1 - \frac{X_{3C\Sigma}}{X_l}\right) \times 100\%$, 它表示经过电感电流补偿后的电流占电容电流的百分比。定义

$d = \frac{X_{3C\Sigma}}{R_l} \times 100\%$ 为阻尼率, 它表示电阻电流占电容电流的百分比。

3.2 设计计算实例

以 1 台 1 000 MW 的水轮发电机为例进行分析计算, 额定电压 $U_g = 24$ kV, 每相对地电容 $C_\Sigma = 3.438$ μ F。取 $K_c = 1.10$, $U_1 = U_g = 24$ kV, $U_2 = 866$ V, $K_0 = 4.7$, $U_k \% = 6\%$, $P_k = 2\% \times S$ 。此外, 主变压器高压侧电压 $U_H = 550$ kV, 高低压绕组之间的每相耦合电容 $C_M \approx 8.0$ nF。参照第 2.3 节的选型计算方法, 可确定: $I_{3C\Sigma} = 49.39$ A, $S = 250$ kV · A, $R'_l = 0.06$ Ω , $X'_l = 0.17$ Ω 。

为将接地故障电流限制在 10~25 A 范围内, 并联电感值为 0.78~1.24 mH 时的设计结果如图 2 所示。

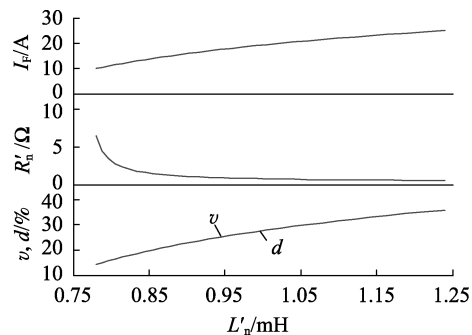


图 2 不同并联电感值下的设计计算结果

Fig.2 Design results under different shunt inductances

由图 2 可见, 并联电感值越小, 其对应的电感电流就越大、失谐度就越小, 补偿效果就越好, 所以故障电流就越小。由于第 2.3 节设定了约束条件: $I_R = I_{3C\Sigma} - I_L$, 所以图 2 中计算的失谐度 ν 和阻尼率 d 完全相同; 随着并联电感值的减小, I_R 减小, 负载电阻自然要求变大; 极端情况下, 去掉负载电阻, 只剩下电感, 此时相当于消弧线圈, 其补偿的效果取决于接地变压器的短路阻抗和电感本身的感抗与品质因数。

3.3 对传递过电压的影响

系统高压侧因接地故障而产生对地零序电压 U_{H0} , 通过主变压器高压与低压绕组之间的耦合电容传递到发电机侧, 产生零序电压 U_{L0} , 可能影响发电机定子单相接地故障保护。计算传递过电压的等效电路如图 3 所示。

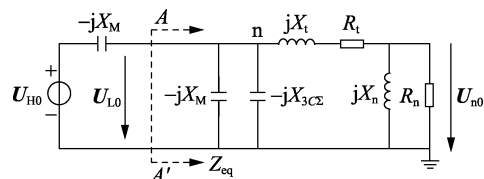


图 3 计算传递过电压等效电路

Fig.3 Equivalent circuit for calculate transfer over-voltage

因主变高压侧 Y 绕组中性点直接接地, 图 3 中,

耦合电容容抗被分成2个 $-jX_M$ (其中 $X_M = 1/[\omega(3C_M/2)]$),一个接地,另一个与电压源 U_{H0} 串联。设主变高压侧发生接地故障时产生的对地零序电压值为 $U_{H0} = \frac{550}{\sqrt{3}} \times 50\% = 158.77(\text{kV})$,计算并联电感为 $0.78 \sim 1.24 \text{ mH}$ (对应故障电流为 $10 \sim 25 \text{ A}$)时的传递过电压,结果如图4所示。

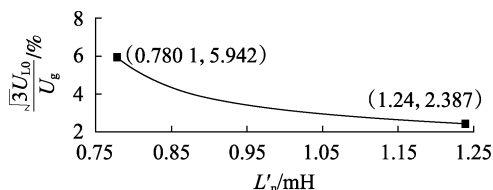


图4 不同并联电感值下的传递过电压

Fig.4 Transfer over-voltage under different shunt inductances

由图4可见,并联电感值越小,传递过电压就越大,这是因为电感值的变化会影响图3中端口AA'的等值阻抗 Z_{eq} 。但是相比单纯的消弧线圈接地方式而言,传递过电压不是很大,受电感值的影响较小,这是因为组合型接地方式下, $|Z_{eq}|$ 的值相对于 X_M 很小,因而分得的电压也就很小。如本节计算的实例中 $X_M = 265 \text{ k}\Omega$,而 $|Z_{eq}|$ 为 $1.381 \sim 553.5 \Omega$,相差若干数量级。显然, U_{H0} 、 X_M 对传递过电压的影响更大。

3.4 对位移电压的影响

实际正常运行的发电机由于定子绕组侧三相对地电容不完全相等,发电机中性点对地会出现位移电压。电路图参照图1(a),去掉接地故障支路;设三相对地电容分别为 C_a 、 C_b 、 C_c ,且彼此不完全相等;设发电机三相电压 E_a 、 E_b 、 E_c 完全对称。由电路原理可计算出位移电压为:

$$U_{\text{disp0}} = \frac{-\rho E_a}{v - jd} \quad (6)$$

$$\rho = \frac{C_a + e^{j\frac{4\pi}{3}} C_b + e^{j\frac{2\pi}{3}} C_c}{C_a + C_b + C_c} \quad (7)$$

其中, ρ 为电容不对称度。

设A相电容不变,B相电容增加10%,C相电容减少10%,则电容不对称度大小 $|\rho| = 5.8\%$ 。计算并联电感在 $0.78 \sim 1.24 \text{ mH}$ (对应的故障电流为 $10 \sim 25 \text{ A}$)范围内的位移电压,结果如图5所示。

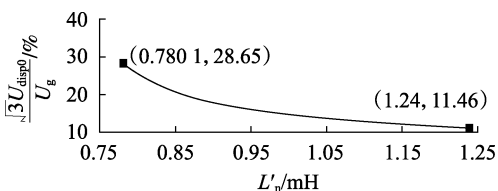


图5 不同并联电感值下的位移电压

Fig.5 Displacement voltages under different shunt inductances

由图5可见,位移电压随着并联电感值的增加而降低,位移电压比较高时,可能需要被迫抬高定子接地保护基波零序电压的定值,保护动作区会有所缩减。对于实际运行的发电机,其三相电容的不平衡度应该不会很大,现场应注意实测位移电压的结果。必要时,可以通过调整并联电感或者负载电阻的抽头,改变参数,适当提高失谐度或者阻尼率降低位移电压。

4 暂态过电压

定子接地单次燃弧时会出现暂态过电压,熄弧恢复过程中再次燃弧,有可能导致更大的暂态过电压,称为重燃弧过电压^[3-8]。目前定子接地保护大多推荐 $0.3 \sim 0.5 \text{ s}$ 保护跳闸,等不到重燃,所以电厂用户及设计院对暂态过电压问题关注度不高。另外,相关研究需要采用准分布电容参数模型或者多回路分析模型进行定量计算,限于篇幅,只能另文探讨。考虑到组合型接地方式从等值电路上更加接近高阻接地方式,所以可以定性地认为其重燃弧暂态过电压的程度应该和高阻接地方式相当。

5 与常规方式的对比

为了对比组合型接地与常规高阻接地方式,组合型接地方式使用3.2节的实例参数,并联电感取 1.24 mH ,将补偿后的故障电流限制在 25 A ;对应设计高阻接地方式的参数,其设计原则为电阻电流与等值后的电容电流相等,具体设计计算过程省略。2种接地方式采用相同的接地变压器,对比的结果如表2所示。

表2 2种接地方式的对比

Table 2 Comparison between two kinds of grounding modes

对比参数	参数值	
	组合型接地	高阻接地
负载电阻/ Ω	0.566	0.381
并联电感/ mH	1.24	—
电容电流/ A	49.39	49.39
电感电流/ A	30.71	13.73
电阻电流/ A	17.68	35.62
故障电流/ A	25.00	50.40
失谐度/ $\%$	35.8	72.2
阻尼率/ $\%$	35.8	72.1
传递过电压/ $\%$	2.39	1.19
位移电压/ $\%$	11.46	5.68

从算例对比的结果看,相比常规的高阻接地方式,组合型接地方式有以下优缺点:

- 故障电流得到有效限制,定子铁芯烧损的可能性大幅降低,有利于定子铁芯安全;
- 但是由于失谐度、阻尼率相对较小,传递过电压、位移电压提高了1倍左右,这是不利的,有可

能导致定子接地保护误动,为此,应在现场实测位移电压,适当调高定子接地保护基波零序电压的定值,留有一定的安全裕度,同时校核传递过电压的大小,保证其不超过保护定值,或者通过定子接地保护引入主变高压侧接地故障的标志来闭锁保护,防止误动;

c. 组合型接地方式会恶化注入式定子接地保护的性能,限于篇幅,将后续进一步探讨;

d. 组合型接地方式将增加一次设备投资,但是增加的并联电感安装在接地变压器的低压侧,电压等级低,额定容量也不是很大,投资不算高,在发电机定子绕组侧电容电流比较大的场合,这种投资是值得的。

另外值得注意的是,表 2 中常规的高阻接地方式虽然没有并联的电感,但是接地变压器短路阻抗存在电感分量,使得实际的中性点接地电流中存在电感分量,可以少量地补偿电容电流,但是补偿能力有限。

6 结论

组合型接地方式借鉴了谐振接地的优点,利用小电感补偿了部分电容电流,同时保留了高阻接地的特点。本文对组合型接地方式进行了分析和探讨,主要进行了以下工作:

a. 给出组合型接地方式的等值电路和选型计算的方法,设计原则是电阻电流等于补偿后的电容电流,并将故障电流限制在规定的范围内;

b. 计算了并联电感对故障电流、传递过电压、位移电压的影响:并联电感越小,对应的电感电流就越大,失谐度、阻尼率相应降低,一方面限制了故障电流,但另一方面增大了传递过电压和位移电压,不利于定子接地保护;

c. 与常规的高阻接地方式相比,组合型接地方式有效限制了故障电流,但是传递过电压、位移电压会增加。

本文抛砖引玉,希望文中的分析方法和探讨内容有助于已有工程(二滩、铜街子水电站)的参数优化、未来工程(白鹤滩水电站等)的选型设计和组合型接地方式的推广应用。

参考文献:

- [1] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 2 版. 北京:中国电力出版社,2009:184-187.
- [2] 王维俭,王祥珩,王赞基. 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,2006:101-103,151-194.
- [3] BROWN P G, JOHNSON I B, STEVENSON J R. Generator neutral grounding some aspects of application for distribution transformer with secondary resistor and resonant types[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978, 97(3): 683-694.
- [4] KHUNKHUN K J S, KOEPFINGER J L, HADDAD M V. Resonant

grounding (grounding fault neutralizer) of a unit connected generator[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(2): 550-559.

- [5] 李汝良,李义翔,王祥珩. 大型发电机定子中性点接地暂态研究[J]. 电力自动化设备,1999,19(4):1-5.
LI Ruliang, LI Yixiang, WANG Xiangheng. The transient state research of generator stator neutral grounding schemes[J]. Electric Power Automation Equipment, 1999, 19(4): 1-5.
- [6] 汪雁,钱冠军,王晓瑜,等. 水轮发电机中性点经消弧线圈接地暂态过电压的研究[J]. 电网技术,2000,24(2):14-19.
WANG Yan, QIAN Guanjin, WANG Xiaoyu, et al. Transient over-voltage of hydrogenerator with resonant grounding neutral[J]. Power System Technology, 2000, 24(2): 14-19.
- [7] 张琦雪,王祥珩,王维俭. 大型水轮发电机中性点消弧线圈接地暂态分析[J]. 电力系统自动化,2003,27(23):74-78.
ZHANG Qixue, WANG Xiangheng, WANG Weijian. Transient analysis on large hydro-generator with resonant neutral grounding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(23): 74-78.
- [8] 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):30-33,37.
ZHANG Qixue, WANG Xiangheng, WANG Weijian. Transient analysis on large hydro-generator with high resistance grounding[J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 30-33, 37.
- [9] FULCZYK M, BERTSCH J. Ground-fault currents in unit-connected generators with different elements grounding neutral[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17(1): 61-66.
- [10] Surge Protective Devices Committee. IEEE guide for the application of neutral grounding in electrical utility systems part II: grounding of synchronous generator systems: IEEE Std C62.92.2-1989(R2005)[S]. New York, USA: IEEE Power Engineering Society, 2005.
- [11] Power System Relay Committee. IEEE guide for generator ground protection: IEEE Std C37.101-2006[S]. New York, USA: IEEE Power Engineering Society, 2006.
- [12] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 2 版. 北京:中国电力出版社,2002:201-204.
- [13] 毕大强,王祥珩,王维俭. 发电机中性点经消弧线圈谐振方式接地中串联电阻对定子单相接地保护的影响[J]. 继电器,2001,29(11):5-8.
BI Daqiang, WANG Xiangheng, WANG Weijian. Effects of series resistance on stator ground fault protection of large-capacity generator by resonant neutral grounding[J]. Relays, 2001, 29(11): 5-8.
- [14] 毕大强,王祥珩,余高旺,等. 消弧线圈接地方式下外加 20 Hz 电源定子接地保护的应用分析[J]. 电力系统自动化,2005,29(4):82-84.
BI Daqiang, WANG Xiangheng, YU Gaowang, 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.
- [15] 殷建刚,彭丰,王维俭. 合理配置发电机中性点接地方式[J]. 电力设备,2001,2(4):67-70.
YIN Jiangang, PENG Feng, WANG Weijian. Rational selection of generator neutral grounding scheme[J]. Electric Equipment, 2001, 2(4): 67-70.
- [16] 张琦雪,陈佳胜,沈全荣. 大型发电机中性点配电变压器电阻接地选型设计[J]. 中国电机工程学报,2007,27(增刊):89-93.
ZHANG Qixue, CHEN Jiangsheng, SHEN Quanrong. Lectotype and design of neutral grounding transformer and load resistor for large-sized generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(Supplement): 89-93.

- [17] 薛紫球. 大型发电机中性点接地装置的研制[J]. 人民长江, 1995, 26(3): 16-21, 61.
XUE Ziqiu. Development of neutral earthing devices for large generators[J]. Yangtze River, 1995, 26(3): 16-21, 61.
- [18] 毕大强, 王祥珩, 余高旺, 等. 高准确度外加 20 Hz 电源定子单相接地保护的研制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 75-78.
BI Daqiang, WANG Xiangheng, YU Gaowang, et al. Development of a high accuracy stator ground fault protection by injecting 20 Hz voltage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 75-78.
- [19] 张琦雪, 陈佳胜, 陈俊, 等. 大型发电机注入式定子接地保护判据的改进[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 66-69.
ZHANG Qixue, CHEN Jiangsheng, CHEN Jun, et al. Improvement on criterions of stator earth fault protection with voltage injection for large-sized generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 66-69.

作者简介:



张琦雪

张琦雪(1974—), 男, 江苏沭阳人, 研究员级高级工程师, 博士, 从事电厂继电保护及自动化装置研发工作(E-mail: zhangqx@nrec.com);

曾祥君(1972—), 男, 湖南邵阳人, 教授, 博士, 主要从事电力系统微机保护与控制的教学和研发工作(E-mail: eexjzeng@qq.com);

com);

徐金(1979—), 男, 山东烟台人, 工程师, 从事电厂继电保护及自动化装置技术方面的研发工作;

陈佳胜(1975—), 男, 湖北大冶人, 研究员级高级工程师, 硕士, 从事电厂继电保护及自动化装置研发工作。

Analysis and discussion on combination-type grounding scheme for large-sized generator

ZHANG Qixue¹, ZENG Xiangjun², XU Jin¹, CHEN Jiasheng¹,

XU Tianle¹, DAI Jianmin¹, WANG Guang¹, CHEN Jun¹

(1. Nanjing NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 2. Hunan Province Key Laboratory of Smart Grids Operation and Control, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410014, China)

Abstract: In order to limit the grounding fault current and facilitate the application of stator grounding fault protection, a compromise combination-type grounding scheme is adopted for large-sized generators, which installs an inductor in parallel with the load resistor at the low voltage side of neutral grounding transformer. The equivalent circuit of combination-type grounding scheme is given. The design calculation of combination-type grounding scheme is carried out, and the design principle is that the resistance current should be equal to the compensated capacitive current and the grounding fault current should be limited within the interval of 10~25A. The combination-type grounding scheme is compared with the conventional high-resistance grounding scheme, and the comparative results show that the smaller the shunt inductor value of the combination-type grounding scheme is, the more effectively the grounding fault currents can be limited, but the detuning degree and damping rate will be decreased after the combination-type grounding is adopted, which leads to the increase of transfer over-voltage and displacement voltage. It is hoped that the above analysis and discussion would be helpful to the design and promotion of the combination-type grounding scheme.

Key words: large-sized generator; single-phase grounding fault; high-resistance grounding; resonant grounding; stator grounding fault protection

(上接第 216 页 continued from page 216)

Study and practice of islanding operation of Jinzhong HVDC sending end system

XIE Huifan, MEI Yong, ZHOU Jian, HUANG He, LI Peng, LIU Hongtao

(Power Dispatch and Control Center of China Southern Power Grid, Guangzhou 510623, China)

Abstract: In order to guarantee the stability of northwest region of Yunnan Power Grid and reduce the surplus water quantity of Liyuan and Ahai power plants, the islanding operation mode of Jinzhong HVDC sending end system is studied during the maintenance period of Huangtai double lines. The feasibility of islanding operation of Jinzhong HVDC is studied, the islanding operation stability of sending end system is verified, the principles and requirements of islanding operation are proposed, the debugging and actual operation of the DC islands are analyzed, and the suggestions for abnormal accident treatment of islanding operation are proposed. Practical operation shows that the island system is stable under various operating conditions with frequency and voltage both meeting the specification requirements, and the primary and secondary equipments both behave normally. The successful islanding operation of Jinzhong HVDC improves the stability of northwest region of Yunnan Power Grid and the transmission capacity of Jinzhong HVDC. The surplus water quantity of power plants at the sending end reduces by about 6.9×10^8 kW·h in 15 days of islanding operation, and the social and economic benefits are remarkable.

Key words: HVDC power transmission; islanding operation; frequency limit control; overvoltage control