

大型水电机组合型接地方式参数优化设计

贾文超, 曹 嵩

(华北电力大学 电力工程系, 河北 保定 071003)

摘要:为了限制单相接地故障电流,部分大型水电机组合型接地方式,但接地电阻和电感的参数选取对接地故障电流、传递过电压、中性点位移电压、零序电压保护灵敏度有影响。综合考虑组合型接地方式下的接地故障电流、传递过电压、中性点位移电压、零序电压保护灵敏度指标,建立了针对水电机组合型接地参数设计的综合评价体系,并利用实际水电机组合型参数进行了分析计算。分析结果表明:选取合适的参数可以有效降低接地故障电流和提高保护灵敏度,同时传递过电压和中性点位移电压也不会过大。给出了参数选型的方案,希望能为组合型接地方式的参数选取提供借鉴。

关键词:大型水电机组合;单相接地故障;定子接地保护;组合型接地;高阻接地故障

中图分类号:TM 772

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202112032

0 引言

大型发电机中性点接地方式主要有中性点不接地、经消弧线圈接地、经高阻接地3种方式^[1-2]。在20世纪80年代,我国大中型水电机组合普遍采用消弧线圈接地方式,消弧线圈接地可以有效降低故障电流,提高零序电压保护的灵敏度,但存在暂态过电压问题。目前国内大型水电机组合普遍采用高阻接地方式,接地电阻按照不大于发电机定子侧总对地容抗来选择。高阻接地可以有效抑制定子发生单相接地故障时的暂态过电压,同时由于采用的是经接地变压器的电阻接地,这也便于注入式定子接地保护的使用^[3-4]。但是,高阻接地方式下故障电流无法得到补偿,尤其是对于大型水电机组合,定子绕组多、对地电容大,根据文献[5]可知,部分水电机组合仅是电容电流就能达到25~40 A,一旦发生接地故障会对定子铁芯造成严重损伤。

近年来,国内部分水电机组合开始采用接地电阻旁并联电感的组合型接地方式,用电感电流补偿部分电容电流。相较于高阻接地方式,组合型接地方式可降低接地故障电流,提高基波零序电压保护灵敏度,但也会提高传递过电压和中性点位移电压,可能造成保护误动,并影响发电机的安全运行^[6]。

对于组合型接地方式,目前参数设计的大致原则是补偿后的电容电流等于电阻电流,并将故障电流减小到10~25 A以内^[5,7]。然而接地装置参数的改变不仅会影响故障电流,同时会对传递过电压、保护灵敏度、中性点位移电压产生影响,因此将故障电流作为单一的考虑因素来选型并不全面。本文将在综

合考虑故障电流、传递过电压、中性点位移电压、基波零序电压保护灵敏度的情况下,给出具体的参数设计方案,希望对组合型接地方式的参数选取提供帮助。

1 组合型接地方式评价指标的确立

大型水电机组合中性点接地方式和定子接地保护应满足以下要求:接地故障电流不超过规定值;保护区能覆盖整个绕组,且有足够高的灵敏度;暂态过电压不能威胁发电机的安全运行^[1]。

1.1 故障电流

组合型接地方式下的定子单相接地故障等值电路如图1所示^[8-9]。图中, C_A 、 C_B 、 C_C 为三相对地电容(包括定子绕组对地电容和母线所连设备的对地电容); I_A 、 I_B 、 I_C 为三相对地电容电流; R_n 、 L_n 分别为中性点所接对地电阻、并联电感; I_f 为接地故障电流; R_f 为过渡电阻; I_n 为中性点对地电流; U_0 为中性点电压; E_A 、 E_B 、 E_C 为故障前发电机的三相基波电动势,A相机端电压 $U_A = U_0 + E_A$ 。考虑机端发生金属性接地故障时故障电流最大,由图1可得:

$$I_f = -[j(U_A \omega C_A + U_B \omega C_B + U_C \omega C_C) + U_0 / Z] \quad (1)$$

式中: ω 为角频率; Z 为中性点接地阻抗; U_B 、 U_C 分别为B、C相机端电压。

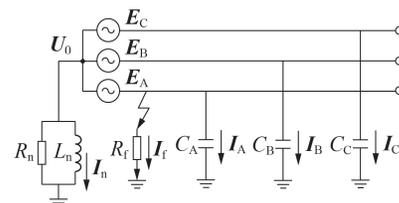


图1 发电机定子单相接地故障原理图

Fig.1 Principle diagram of stator single-phase grounding fault of generator

设发电机三相对地总电容为 C_Σ ,三相对地总容

收稿日期:2021-04-25;修回日期:2021-11-05

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2019502163)

Project supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province(E2019502163)

抗为 $X_{c\Sigma}$, 并联电抗感抗为 X_L , 由式(1)可得接地故障电流大小 I_f 为:

$$I_f = E_A \sqrt{\frac{1}{R_n^2} + \left(\frac{1}{X_{c\Sigma}} - \frac{1}{X_L}\right)^2} \quad (2)$$

式中: E_A 为 E_A 的大小。

定义阻尼率 $d = X_{c\Sigma}/R_n$ 和调谐度 $K = X_{c\Sigma}/X_L$, 分别表示电阻电流和电感电流占电容电流的比值, 代入式(2)可得:

$$I_f = \sqrt{d^2 + (1-K)^2} \frac{E_A}{X_{c\Sigma}} \quad (3)$$

对于某一特定的机组, E_A 和三相对地总容抗 $X_{c\Sigma}$ 是定值, 从式(3)可以看出, 接地故障电流的大小只与 d 和 K 有关, 定义 $\sqrt{d^2 + (1-K)^2}$ 为故障电流倍数。传统高阻接地方式下, 为限制暂态过电压倍数一般取 $d=1$, 组合型接地方式考虑限制短路电流, 增大了中性点的接地电阻。综合考虑限制短路电流和兼顾暂态过电压倍数, 本文分别取 d 值为 1、1/2、1/3, 可得故障电流倍数与调谐度的关系图如图2所示。

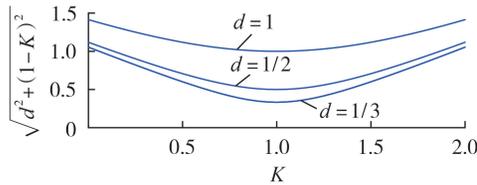


图2 故障电流倍数与调谐度的关系图

Fig.2 Diagram of relation between $\sqrt{d^2 + (1-K)^2}$ and K

由图2可以看出, 阻尼率 d 越小, 调谐度 K 越接近 1, 接地故障电流越小。考虑目前大型水电机组额定电压都在 20 kV 以上, 对地电容为每相 2 μ F 甚至更大, 在全补偿 ($K=1$) 的情况下取 d 值为 1、1/2、1/3, 得到接地故障电流的最小值如表1所示。

表1 接地故障电流的最小值

Table 1 Minimum value of grounding

fault current	
d	I_f 最小值 / A
1	21.77
1/2	10.88
1/3	7.26

从表1可以看出, 对于大型水电机组, 当 $d=1$ 时, 即使电感电流能完全补偿电容电流, I_f 最小值也将达到 21.77 A, 而 $d=1/2$ 时 I_f 最小值只有 10.88 A, 因此合理提高接地电阻能有效降低接地故障电流。

1.2 基波零序电压保护灵敏度

基波零序电压保护灵敏度可以用定子绕组任一位置发生单相接地故障时保护所允许的最大过渡电阻来表示。设基波零序电压保护动作值(一次值)为 mE_A , 故障发生在距中性点 α 处, 其中 α 为故障点到

中性点的绕组匝数占总匝数的百分比。则保护允许的最大过渡电阻 R_M 为:

$$R_M = \frac{\sqrt{(\alpha^2/m^2 - 1) [d^2 + (1-K)^2] + d^2 - d}}{d^2 + (1-K)^2} X_{c\Sigma} \quad (4)$$

式(4)的详细推导过程见附录A。

考虑到基波零序电压保护要求能保护定子从机端开始到中性点 90%~95% 的区域, 因此 m 一般设定为 0.05~0.1 (本文取 0.05)。

定义基波零序电压保护允许的最大过渡电阻倍数 $B_{Rf} = R_M/X_{c\Sigma}$ 。对于某一特定的机组, 对地容抗和保护动作值是固定的, 由式(4)可知, 基波零序电压保护所允许的最大过渡电阻倍数取决于 d 、 K 和故障位置 α 。以机端发生单相接地故障为例, 取 d 值为 1、1/2、1/3, 得到最大过渡电阻倍数和调谐度的关系曲线如图3所示。

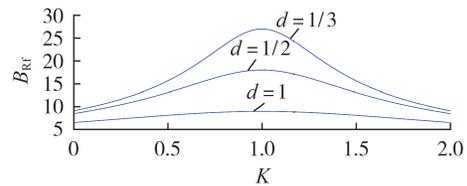


图3 保护允许的最大过渡电阻倍数与调谐度的关系图

Fig.3 Diagram of relation between B_{Rf} and K

由图3可知, 随着 d 的减小和 K 接近于 1, 基波零序电压保护所允许的最大过渡电阻会增加。

当中性点接地方式确定, 即 d 和 K 确定后, 由式(4)可知, 保护允许的最大过渡电阻倍数与故障位置 α 有关。取 $d=1$ 、 $K=0$ 和 $d=1$ 、 $K=0.5$, 绘制最大过渡电阻倍数 B_{Rf} 与故障位置关系图, 如图4所示。

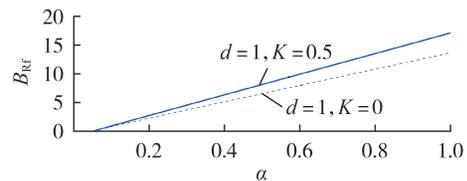


图4 保护允许的最大过渡电阻倍数与故障位置的关系图

Fig.4 Diagram of relation between B_{Rf} and α

由图4可知, 当 $\alpha \geq 0.2$ 时, 保护所允许的最大过渡电阻倍数与故障位置近似呈线性关系, 利用保护所允许的最大过渡电阻倍数可以作为衡量保护灵敏性的指标。

1.3 传递过电压

当系统高压侧发生不对称接地故障时, 故障点会产生零序电压, 通过变压器耦合电容 C_M 传递到发电机侧, 有可能破坏定子绝缘或造成定子接地保护误动。当变压器高压侧发生单相接地故障时, 根据对称分量法, 可以得到故障点零序电压 U_{H0} 的大小 U_{H0} 与高压侧相电压 U_{ph} 的关系为^[10]:

$$U_{H0} = X_0 U_{ph} / (X_0 + X_1 + X_2) \quad (5)$$

式中: X_0 为系统零序电抗; X_1 为系统正序电抗; X_2 为系统负序电抗。

对于高压侧系统, 近似认为 $X_1 = X_2$, $1 \leq X_0/X_1 \leq 3$, 则可以得到 $U_{H0} \in (0.33U_{ph}, 0.6U_{ph})^{[11]}$, 一般考虑最恶劣的情况取 $U_{H0} = 0.6U_{ph}$ 。传递过电压等效电路图如图5所示^[12-13]。

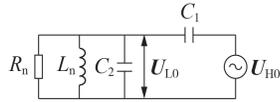


图5 传递过电压等效电路图

Fig.5 Equivalent diagram of transfer over-voltage

由图5可以推出传递过电压 U_{L0} 的表达式为:

$$U_{L0} = \frac{Z // -jX_{C_2}}{(Z // -jX_{C_2}) - jX_{C_1}} U_{H0} \quad (6)$$

式中: X_{C_1} 、 X_{C_2} 分别为 C_1 、 C_2 的容抗。

当高压侧中性点接地时, $C_1 = \frac{3C_M}{2}$, $C_2 = \frac{3C_M}{2} // C_\Sigma$;

当高压侧中性点不接地时, $C_1 = 3C_M$, $C_2 = C_\Sigma$ 。考虑高压侧中性点不接地时传递过电压更恶劣, 由式(6)可以得到传递过电压大小 U_{L0} 为:

$$U_{L0} = \frac{X_{C_\Sigma} U_{H0}}{\sqrt{\left(X_{C_\Sigma} + X_{C_M} - \frac{X_{C_\Sigma} X_{C_M}}{X_L}\right)^2 + \left(\frac{X_{C_\Sigma} X_{C_M}}{R_n}\right)^2}} = \frac{X_{C_\Sigma} U_{H0}}{\sqrt{(X_{C_\Sigma} + X_{C_M} - X_{C_M} K)^2 + (X_{C_M} d)^2}} \quad (7)$$

式中: X_{C_M} 为耦合电容的容抗, $X_{C_M} = \frac{1}{3\omega C_M}$ 。

由于一般发电机定子对地电容为 μF 级别, 耦合电容为 nF 级别, 所以 X_{C_Σ} 远小于 X_{C_M} , 式(7)可近似为:

$$U_{L0} = \frac{X_{C_\Sigma} U_{H0}}{X_{C_M} \sqrt{(1-K)^2 + d^2}} \quad (8)$$

由式(8)可以看出, 对于某一特定机组, U_{H0} 、 X_{C_M} 、 X_{C_Σ} 都是定值, 传递过电压的大小由 K 和 d 决定, 随着 d 的减小和 K 接近于1, 传递过电压会增大。

考虑最不利的情况, 取大型水电机组额定相电压 $U_N = 20/\sqrt{3} \text{ kV}$, 容量为 700~800 MW, 高压侧为 500 kV 系统, 耦合电容估算为每相 0.006 85 μF , 定子绕组每相对地电容为 2~3.5 μF 。当 $d=1/3$ 、 $K=1$ 时计算可得传递过电压大小能达到 1.12~1.96 kV。虽然这种等级的传递过电压被限制在最大允许值内, 满足 $U_N + U_{L0} \leq \sqrt{3} U_N^{[1]}$, 但可能造成发电机基波零序电压保护的误动。

1.4 中性点位移电压

由于实际情况下发电机的三相对地电容并不完

全相等, 发电机中性点会产生位移电压。设三相电压完全对称, 位移电压 $U_{\text{disp}0}$ 的大小 $U_{\text{disp}0}$ 为:

$$U_{\text{disp}0} = \frac{|\rho| E_A}{\sqrt{(1-K)^2 + d^2}} \quad (9)$$

$$\rho = \frac{C_A + e^{j\frac{4\pi}{3}} C_B + e^{j\frac{2\pi}{3}} C_C}{C_A + C_B + C_C} \quad (10)$$

式中: ρ 为电容不对称度。

由式(9)可以看出, 随着 d 的减小和 K 接近于1, 中性点位移电压会增大。设发电机 A 相电容不变, B 相电容减小 10%, C 相电容增大 10%, 则可得出电容不对称度大小为 5.8%。规程规定正常情况下, 发电机中性点长时间位移电压不应超过额定相电压 U_N 的 10%, 即 $U_{\text{disp}0} \leq 0.1 U_N^{[14]}$ 。考虑最严重的情况, 当 $d=1/3$ 、 $K=1$ 时计算可得 $U_{\text{disp}0}$ 能达到 0.174 U_N , 因此要将中性点位移电压作为约束条件。此外, 中性点位移电压过高会影响基波零序电压保护的保护区。

1.5 暂态过电压

高阻接地相对于消弧线圈接地的优势是可以限制定子发生单相接地故障时的暂态过电压, 防止绕组损坏^[15]。一般认为接地电阻小于发电机三相对地总容抗时可以有效地将暂态过电压限制在 2.6 倍相电压以下, 这源于 AIEE 在 1953 年利用暂态网络分析仪(TNA)得出的报告。组合型接地方式的基本思路是在提高接地电阻的同时并联电感, 因此接地电阻必然会超过三相对地容抗, 这违反了传统的接地电阻参数选取原则。

然而实际中已有大型发电机不按小于三相对地容抗原则来选取中性点接地电阻, 以二滩水电站为例, 三相对地容抗为 628 Ω , 而接地电阻为 1.43 k Ω , 是容抗的 2.28 倍。此外, 文献[16]也通过电机多回路模型进行计算, 结果显示即使接地电阻达到 3 倍的对地总容抗, 暂态过电压也不会超过 3 倍的相电压, TNA 模型过高地估计了暂态过电压。

回归到组合型接地方式的暂态过电压, 文献[5]认为该接地方式从等值电路上更加接近高阻接地方式, 所以可以定性认为其暂态过电压的大小应该和高阻接地方式相当。此外通过 PSPICE 对准分布电容参数模型进行仿真, 可以验证在高阻接地方式下并联电感对暂态过电压的影响甚微。

因此, 组合型接地方式下只要接地电阻参数小于 3 倍的对地容抗值, 暂态过电压不会威胁发电机的安全。在本文评价体系中, 暂态过电压作为隐藏的约束条件而非评价指标来考虑。

1.6 综合分析

通过增大接地电阻 R_n 或调整并联电感 L_n 使其感抗接近三相对地容抗可以降低故障电流, 提高基波零序电压保护灵敏度, 但是同时这也会致使传递

过电压和中性点位移电压增大,进而造成保护误动。本节确定接地故障电流、基波零序电压保护灵敏度、传递过电压和中性点位移电压作为参数选择的评价指标。

2 综合评价体系的设计

由于组合型接地方式的影响涉及多个方面,仅根据单一的指标要求进行参数选取显然不合适,因此可以借鉴模糊综合评价法思想,将故障电流、传递过电压、中性点位移电压、基波零序电压保护灵敏度这4个指标融合成一个综合的评价体系。

2.1 评分体系

由于每个评价因素的量纲不同,所以针对指标建立评分体系来量化评价因素的好坏。本文采用百分制评分体系,100分为最优,0分为最劣。

2.1.1 接地故障电流

接地故障电流的评分主要是从其对发电机铁芯的损害程度出发,由于电流对铁芯的损坏与电流值的平方值成正比^[17],所以用二次函数来描述分数与电流的关系。考虑发电机定子机端发生金属性接地故障时接地故障电流最大,按照此条件,接地故障电流评分体系如式(11)所示。

$$S(I_f) = \begin{cases} 100 & I_f \leq I_{f1} \\ \frac{100(I_f^2 - I_{f2}^2)}{I_{f1}^2 - I_{f2}^2} & I_{f1} < I_f \leq I_{f2} \\ 0 & I_f > I_{f2} \end{cases} \quad (11)$$

IEEE Std C37.101—2006标准建议高阻接地方式下发生单相接地故障时的故障电流应限制在10~25 A^[18],因此将接地故障电流小于10 A时定为100分(即 $I_{f1}=10$ A),将接地故障电流达到25 A时定为60分,再代入式(11)即可得到 I_{f2} 。

2.1.2 基波零序电压保护灵敏度

本文以过渡电阻倍数 B_{Rf} 作为灵敏度的衡量指标,以梯形函数描述基波零序电压保护灵敏度评分体系,如式(12)所示。

$$S(B_{Rf}) = \begin{cases} 100 & B_{Rf} > B_{Rf1} \\ \frac{100B_{Rf}}{B_{Rf1}} & 0 \leq B_{Rf} \leq B_{Rf1} \end{cases} \quad (12)$$

三峡水电站对于保护的要求为:定子绕组经过8 kΩ过渡电阻接地保护仍能动作^[3],取每相对地电容为2 μF,将对应的过渡电阻倍数,即 $B_{Rf1}=15.08$ 定为100分。由1.2节分析可知,基波零序电压保护耐过渡电阻能力与故障点位置有关。考虑到基波零序电压保护对靠近机端侧故障有更高的耐过渡电阻能力,且为了综合反映零序电压保护的灵敏度,本文利用平均指标:分别取 α 值为50%、80%、100%,代入式(12)得到3处故障位置耐过渡电阻能力的评分,将3处故障位置耐过渡电阻能力的平均值作为衡量

保护灵敏度的最终评分。

2.1.3 传递过电压和中性点位移电压

由上文分析可知,组合型接地方式下的传递过电压和中性点位移电压会增大,可能造成基波零序电压保护的误动,若保护整定时躲过传递过电压和中性点位移电压最大值,又会对保护的的范围产生影响。本文从这一角度考虑,记 U_M 为 U_{L0} 和 U_{disp0} 中的较大者,采用梯形函数描绘评分体系,如式(13)所示。

$$S(U'_M) = \begin{cases} 100 & U'_M < U'_{M1} \\ \frac{100(U'_M - U'_{M2})}{U'_{M1} - U'_{M2}} & U'_{M1} \leq U'_M < U'_{M2} \\ 0 & U'_M \geq U'_{M2} \end{cases} \quad (13)$$

式中: U'_M 为 U_M 与 U_N 之比。

在实际工程应用中,一般要求基波零序电压保护动作值为 $0.05 U_N \sim 0.1 U_N$,能保护定子从机端开始到中性点90%~95%的区域。因此设定 $U'_M < 0.05$ 时为100分(即 $U'_{M1}=0.05$),将 $U'_M=0.1$ 时设定为60分,再代入式(13)即可得到 U'_{M2} 。

2.1.4 综合评价体系

综合以上3个指标对水电机组安全运行的影响,建立综合评价函数为:

$$S_{SUM} = c_1 S(I_f) + c_2 S(B_{Rf}) + c_3 S(U'_M) \quad (14)$$

式中: c_1 、 c_2 、 c_3 分别为3个评价指标的权重。

通过求解式(15)所示的目标函数即可得到组合型接地方式参数设计的最优解。

$$\begin{cases} \max S_{SUM}(K, d) \\ \text{s.t.} \begin{cases} U_{disp0} \leq 0.1 U_N \\ 0 \leq K \leq 2, \frac{1}{3} \leq d \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (15)$$

2.2 评价指标权重

在确定指标权重时,若采用专家打分法或者直接定性地给出权重,则评价结果易带有主观性。为了提高决策的科学性、合理性,本文引入一致矩阵法。

2.2.1 一致矩阵法

美国学者T. L. Saaty提出一致矩阵法,即不直接将所有因素放在一起比较,而是通过两两相互对比,得到各个指标的权重^[19]。Saaty给出的9个重要性等级及其赋值如表2所示,其中 p_{ij} 为因素 p_i 与因素 p_j 的重要性比较结果。按两两比较结果构成的矩

表2 重要性等级指标

p_i 相对 p_j 的重要程度	p_{ij}
同等重要	1
稍微重要	3
较强重要	5
强烈重要	7
极端重要	9
两相邻判断的中间值	2,4,6,8

阵 P 称为判断矩阵,判断矩阵具有如下性质:

$$p_{ij} = \frac{1}{p_{ji}} \quad (16)$$

判断矩阵 P 的最大特征根 λ_{\max} 所对应的特征向量,经归一化后记为 W , W 中元素即为各因素的权重。

为了避免判断矩阵出现逻辑混乱,即出现指标 A_1 比 A_2 重要, A_2 比 A_3 重要,但 A_3 又比 A_1 重要这样的评判情况,需要对判断矩阵进行一致性检验。为此, Satty 定义了一致性指标 C_1 如式(17)所示。

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (17)$$

式中: n 为判断矩阵 P 的阶数。

然后按表3取平均一致性指标 R_1 , 令 $C_R = C_1/R_1$, 如果 $C_R < 0.1$, 则认为判断矩阵具有一致性, 可以使用^[20]。

表3 平均一致性指标

n	R_1	n	R_1
1	0	5	1.12
2	0	6	1.24
3	0.58	7	1.32
4	0.90		

2.2.2 评价指标权重的确立

本文的评价体系中有3个评价指标:接地故障电流、基波零序电压保护灵敏度、传递过电压和中性点位移电压两者的较大值,分别记为 p_1 、 p_2 、 p_3 。组合型接地的目的就是为了限制接地故障电流,防止发电机定子铁芯被烧伤,本文将接地故障电流作为权重最高的评价指标;考虑实际中传递过电压造成多起保护误动的实例,确定其重要性仅次于故障电流;而基波零序电压保护灵敏度重要性为三者中最低。

确定重要性排序后,判断矩阵 P 有一条重要的性质:重要性应该具有传递性,即 p_{ij} 要接近于 $p_{ik} p_{kj}$ 。参考表2所列的评价等级指标,本文的判断矩阵选择 $p_{12} = 3$ 、 $p_{32} = 2$ 、 $p_{13} = 2$, 得到判断矩阵 P 为:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 \\ 1/3 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

将判断矩阵 P 的最大特征根 λ_{\max} 对应的特征向量归一化后得到各指标的权重,如表4所示。

表4 指标层权重值

指标项	权重值
$S(I_f)$	0.55
$S(B_{Rf})$	0.19
$S(U'_M)$	0.26

3 实例计算

以三峡右岸电站东电机组为例,其参数如下:额

定相电压 $U_N = 20/\sqrt{3}$ kV, 每相对地电容 $C_g = 1.98 \mu F$, 升压变压器高压侧电压为 550 kV, 每相耦合电容 $C_M = 0.00685 \mu F$ 。

当 d 取 1/3~1、 K 取 0~2 时,通过 MATLAB 运算求解式(15)得到图6,结果显示在 $d=0.53$ 、 $K=0.70$, 即接地电阻 $R_n = 1\ 011.1 \Omega$ 、并联电感 $L_n = 2.4$ H 时取得最优解。

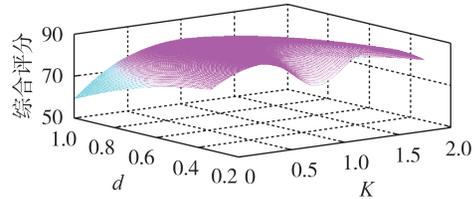


图6 综合评分

Fig.6 Comprehensive rating

将优化组合型接地方式与高阻接地方式 ($R_n = 1/(3\omega C_g)$) 以及只计及电流的组合型接地方式进行参数对比,对比结果如表5所示,表中暂态过电压为标么值。

表5 3种接地方式的对比

Table 5 Comparison between three kinds of grounding modes

对比参数	参数值		
	高阻接地	只计及电流的组合型接地	优化组合型接地
负载电阻 / Ω	535.9	652.3	1 011.1
并联电感 / H	—	9.5	2.4
电容电流 / A	21.5	21.5	21.5
电感电流 / A	—	3.8	15.3
电阻电流 / A	21.5	17.7	11.4
故障电流 / A	30.5	25.0	13.1
传递过电压 / %	4.0	4.9	9.3
中性点位移电压 / %	4.1	5.0	9.5
暂态过电压	2.66	2.72	2.76
基波零序电压保护灵敏度评分	68.5	80.1	99.8
综合评分	59.4	74.3	87.5

从算例的结果来看,选取合适的组合型接地方式参数相比于只计及电流的组合型接地方式有以下优缺点:

- 1)有效降低了接地故障电流,减小了对定子铁芯的危害;
- 2)提高了保护动作所能允许的最大过渡电阻,增大了基波零序电压保护的灵敏度;
- 3)采用优化组合型接地方式会增加传递过电压和中性点位移电压,但 $U_{L0} + U_N = 1.093U_N < \sqrt{3}U_N$, $U_{\text{disp}0} < 0.1U_N$, 满足电力系统的规程规定。

4 结论

本文对发电机组组合型接地方式的参数优化设计进行了分析探讨,主要做了以下工作:

1)对组合型接地方式下的单相接地故障电流、传递过电压、中性点位移电压、基波零序电压保护灵敏度进行了理论分析,建立了评价指标;

2)计及3个评价指标,利用一致矩阵法建立了组合型接地方式综合评价体系,但指标的评分标准仅为初步探索,还需进一步研究;

3)利用实际算例进行了分析计算,计算结果表明参数的选取结果能有效降低接地故障电流,提高保护灵敏度,同时兼顾了保护对传递过电压和中性点位移电压的要求。

除了本文所分析的内容以外,组合型接地方式也会对注入式保护的误差产生影响,且其参数设计还有更多需要探讨的地方。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 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,2002:186-195.
- [2] OWEN E L. The historical development of neutral-grounding practices[J]. IEEE Industry Applications Magazine,1997,3(2):10-18.
- [3] 毕大强. 大型水轮发电机定子绕组单相接地故障及保护方案的研究[D]. 北京:清华大学,2003.
BI Daqiang. Studies on stator ground fault and its protection for large-sized hydro-generators[D]. Beijing: Tsinghua University,2003.
- [4] 党晓强,郇能灵,王海田,等. 大型水轮发电机定子接地方式及其继电保护的相关问题分析[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):25-29.
DANG Xiaoliang, TAI Nengling, WANG Haitian, et al. Analysis of stator grounding modes of large-scale hydro-generator and its protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012,32(7):25-29.
- [5] 张琦雪,曾祥君,徐金,等. 大型发电机中性点组合型接地方式的分析与探讨[J]. 电力自动化设备,2018,38(11):217-222.
ZHANG Qixue, ZENG Xiangjun, XU Jin, et al. Analysis and discussion on combination-type grounding scheme for large-sized generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(11):217-222.
- [6] 刘亚青,张丹丹,朱钊,等. 巨型水轮发电机中性点接地装置加电抗对中性点位移电压影响的研究[J]. 大电机技术,2020(3):47-50.
LIU Yaqing, ZHANG Dandan, ZHU Zhao, et al. Study of neutral displacement voltage variation caused by the reactor component in giant hydropower generator neutral grounding equipment[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2020(3):47-50.
- [7] 沈兵,关鹤,刘祖高. 大型水轮发电机中性点接地变压器二次侧电阻并联电抗器的探讨[J]. 电工技术,2018(9):139-140,143.
SHEN Bing, GUAN He, LIU Zugao. Discussion on secondary side resistance shunt reactor of neutral grounding transformer of large hydro-generator[J]. Electric Engineering, 2018(9):139-140,143.
- [8] 殷林鹏,桂林,张琦雪,等. 基于基波电势分布特征的大型发电机定子接地故障定位方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(7):141-146.
YIN Linpeng, GUI Lin, ZHANG Qixue, et al. Stator grounding fault location method based on distribution characteristics of fundamental wave potential[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019,39(7):141-146.
- [9] 贾文超,黄少锋. 水轮发电机定子单相接地故障定位新方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(2):134-139.
JIA Wenchao, HUANG Shaofeng. Stator single-phase grounding fault location for hydro-generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,37(2):134-139.
- [10] 贾科,汪执雅,戴明,等. 分布式光伏接入对110kV主变中性点电压的影响分析[J]. 电力自动化设备,2018,38(11):181-186.
JIA Ke, WANG Zhiya, DAI Ming, et al. Influence of distributed PV integration on neutral point voltage of 110 kV main transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(11):181-186.
- [11] 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,2009:9-12.
- [12] 刘念,谢驰,滕福生. 超高压输电系统传递过电压的电磁暂态过程及特性分析[J]. 电力自动化设备,2006,26(9):5-7,11.
LIU Nian, XIE Chi, TENG Fusheng. Electromagnetic transient process and characteristic analysis for over-voltage transferred from extra-high voltage power transmission systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006,26(9):5-7,11.
- [13] International Electrotechnical Commission. Insulation coordination-part 2: application guidelines; IEC60071[S]. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2018.
- [14] 戈东方,钟大文. 电力工程电气设计手册(电气一次部分)[M]. 1版. 北京:水利电力出版社,1989:263.
- [15] NELSON J. Improved electrical safety through high resistance grounding[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015,51(6):5198-5203.
- [16] 张琦雪,王维俭,王祥珩. 三峡大型发电机中性点接地电阻的合理选择[J]. 继电器,2005,33(15):5-8.
ZHANG Qixue, WANG Weijian, WANG Xiangheng. Proper selection of neutral grounding resistor of the large-sized hydro-generator in Three Gorges Power Plant[J]. Relay, 2005,33(15):5-8.
- [17] ZHANG Guodong, GUI Lin, WANG Xiangheng, et al. Experimental study on single-phase grounding fault safety current of large generators[C]//2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe). Palermo, Italy: IEEE, 2018:1-6.
- [18] Power System Relay Committee. IEEE guide for generator ground protection; IEEE Std C37.101-2006[S]. New York, USA: IEEE Power Engineering Society, 2006.
- [19] FU Chaoyang, ZHENG Jiasheng, ZHAO Jingmao, et al. Application of grey relational analysis for corrosion failure of oil tubes[J]. Corrosion Science, 2001,43(5):881-889.
- [20] SUN Jiangguo, GE Peiqi, LIU Zhenchang, et al. Two-grade fuzzy synthetic decision-making system with use of an analytic hierarchy process for performance evaluation of grinding fluids[J]. Tribology International, 2001,34(10):683-688.

作者简介:



贾文超

贾文超(1984—),男,讲师,博士,主要从事电力系统保护与控制方面的研究工作(E-mail:jiawenchao_snow@163.com);

曹嵩(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail:1277471387@qq.com)。

(编辑 任思思)

Parameter optimization design of combination-type grounding mode for large-sized hydropower units

JIA Wenchao, CAO Song

(Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In order to limit the single-phase grounding fault current, some large-sized hydropower units adopt the combination-type grounding mode of grounding resistance and parallel inductance, but the parameter selection of grounding resistance and inductance has an impact on the grounding fault current, transfer over-voltage, neutral point displacement voltage and sensitivity of zero-sequence voltage protection. Comprehensively considering the grounding fault current index, transfer over-voltage index, neutral point displacement voltage index and sensitivity index of zero-sequence voltage protection, the evaluation system for combination-type grounding parameter design of hydropower units is established. The analytical calculation is carried out with the parameters of actual hydropower units. The analytical results show that selecting appropriate parameters can effectively reduce the grounding fault current and improve the protection sensitivity, meanwhile the transfer over-voltage and displacement voltage will not be too large. The scheme for parameter selection is given, hoping to provide a reference for the parameter selection of combination-type grounding mode.

Key words: large-sized hydropower units; single-phase grounding fault; stator grounding fault protection; combination-type grounding; high-resistance grounding fault

(上接第33页 continued from page 33)

Coordinated scheduling strategy of electric vehicles for peak shaving considering V2G price incentive

WANG Min, LÜ Lin, XIANG Yue

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to improve the influence of the increase of peak-valley difference of urban power load on the stable and economic operation of distribution system, a coordinated scheduling strategy of EVs (Electric Vehicles) for peak shaving is proposed. The new-type flexible resources such as EVs are guided to participate in auxiliary services through price signals, so as to smooth the system load curve and reduce the electricity cost of EV users. Firstly, the V2G (Vehicle to Grid) incentive price mechanism is proposed according to the peak shaving demand of the system. Then, the EV travel demand model based on travel chain and the power consumption model based on travel demand are constructed. On this basis, considering the actual travel demand constraints of EV users, a multi-objective coordinated scheduling model is established to minimize the mean square error of system load curve and minimize the electricity cost of EV users. Finally, the simulative results of example show that the proposed coordinated scheduling strategy of EVs for peak shaving can smooth the system load curve and reduce the electricity cost of EV users, thus improving the operation economy of distribution network.

Key words: electric vehicles; V2G; price incentive; peak shaving; travel chain; multi-objective coordinated scheduling; auxiliary service

附录 A

基波零序电压保护灵敏度推导过程如下。

设发电机 A、B、C 三相对地电容大小相等，值为 C_g ，故障发生在距中性点 α 处，由图 1 经过渡电阻 R_f 接地的原理

图可得：

$$I_f = -[j(U_A \omega C_A + U_B \omega C_B + U_C \omega C_C) + \frac{U_0}{Z}] \quad (A1)$$

$$U_0 + \alpha E_A = I_f R_f \quad (A2)$$

根据式 (A1)、(A2) 可解得：

$$U_0 = -\frac{\alpha E_A}{\frac{R_f}{Z} + 1 + j3\omega C_g R_f} \quad (A3)$$

由式 (A3) 可得零序电压数值大小为：

$$U_0 = \frac{\alpha E_A}{\sqrt{\left(\frac{R_f}{R_n} + 1\right)^2 + \left(3\omega C_g R_f - \frac{R_f}{X_L}\right)^2}} \quad (A4)$$

设基波零序电压保护的动作为 mE_A ，若要保护动作应满足如下条件：

$$\frac{\alpha E_A}{\sqrt{\left(\frac{R_f}{R_n} + 1\right)^2 + \left(3\omega C_g R_f - \frac{R_f}{X_L}\right)^2}} \geq mE_A \quad (A5)$$

两边消去 E_A 可得：

$$\sqrt{\left(\frac{R_f}{R_n} + 1\right)^2 + \left(3\omega C_g R_f - \frac{R_f}{X_L}\right)^2} \leq \frac{\alpha}{m} \quad (A6)$$

将公式展开可得：

$$\left[\frac{1}{R_n^2} + \left(3\omega C_g - \frac{1}{X_L}\right)^2 \right] R_f^2 + \frac{2R_f}{R_n} + 1 - \frac{\alpha^2}{m^2} \leq 0 \quad (A7)$$

利用求根公式可得最大过渡电阻 R_{fM} 为：

$$\begin{aligned} R_{fM} &= \frac{\sqrt{\frac{4}{R_n^2} - 4\left(1 - \frac{\alpha^2}{m^2}\right)\left[\frac{1}{R_n^2} + \left(3\omega C_g - \frac{1}{X_L}\right)^2\right]} - \frac{2}{R_n}}{2\left[\frac{1}{R_n^2} + \left(3\omega C_g - \frac{1}{X_L}\right)^2\right]} \\ &= \frac{\sqrt{\frac{1}{R_n^2} + \left(\frac{\alpha^2}{m^2} - 1\right)\left[\frac{1}{R_n^2} + \left(\frac{1}{X_{C\Sigma}} - \frac{1}{X_L}\right)^2\right]} - \frac{1}{R_n}}{\frac{1}{R_n^2} + \left(\frac{1}{X_{C\Sigma}} - \frac{1}{X_L}\right)^2} \end{aligned} \quad (A8)$$

代入 $d = \frac{X_{C\Sigma}}{R_n}$ ， $K = \frac{X_{C\Sigma}}{X_L}$ 可得：

$$R_{fM} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\alpha^2}{m^2} - 1\right)[d^2 + (1-K)^2] + d^2} - d}{d^2 + (1-K)^2} X_{C\Sigma} \quad (A9)$$