2022年4月

海洋核动力平台发电机定子绕组单相接地故障 风险分析与实时定位

王义凯,尹项根,乔 健,谭力铭,徐 (华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘要:海洋核动力平台发电机不同运行工况下直连线路对地电容的变化将影响接地故障电流,基于发电机3 次谐波电压特征,提出一种无需外加设备的直连线路对地电容实时求解方法。利用故障分量原理在计及基 波和3次谐波情况下求解接地故障电流,并依据实时故障风险自适应决定保护出口方式。为缩短故障检修 排查时间,构建故障绕组电势与故障相电势满足的几何关系式及其与零序电压满足的幅值相位方程,通过解 析计算准确定位故障点与中性点间线圈占完整分支的匝数比,实现接地故障定位。PSCAD/EMTDC仿真分 析表明,所提方法具有较高的准确性。

关键词:海洋核动力平台;发电机定子绕组单相接地故障;故障风险分析;接地故障定位

中图分类号:TM 77

文献标志码:A

DOI: 10.16081/j.epae.202111024

0 引言

海洋核动力平台是海上移动式供电平台,可用 于海上工程作业供电、远洋海岛供电、海水淡化 等[1-2]。海洋核动力平台主发电机正常工况下外送 电能,但站内辅发电机停机时,站内系统需切换至主 发电机供电方式,保证核反应堆敏感负荷持续供 电[3],由发电机直连线路断路器实现多种运行工况 的切换。由于发电机定子绕组单相接地故障在所有 故障类型中占比最高[4],因此海洋核动力平台发电 机定子绕组单相接地故障风险分析与实时诊断问题 亟待解决。

海洋核动力平台空间紧凑,无法配置注入式保 护设备,目前采用基波零序电压判据与3次谐波电 压比值判据构成定子接地保护。但上述保护判据均 无法直接反映接地故障的危害风险,保护无法依据 故障风险决定出口方式。发电机定子绕组单相接地 故障风险分析与实时诊断包括分析接地故障对发电 机安全运行的危害程度并诊断接地故障位置。其 中,接地故障风险是指故障支路的接地故障电流,发 电机定子接地保护可依据故障风险自适应决定出口 方式;通过诊断接地故障位置,可缩短故障排查时 间,并为故障检修过程提供人力物力上的准备参考, 提高检修效率。

接地故障电流能够反映故障对发电机安全运行 的危害风险。海洋核动力平台主发电机直连线路在

收稿日期:2021-03-29;修回日期:2021-10-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877089)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877089)

专利:中华人民共和国发明专利(202110481132.0, 202110517406.7)

不同运行工况下的对地电容之和不同,为保证接地 故障电流计算的准确性,需要实时测量直连线路的 对地电容参数。文献[5]提出一种基于注入式设备 的对地电容实时计算方法,但海洋核动力平台空间 紧凑,无法装设该设备。此外,该文献中提及的接地 故障电流计算方法仅考虑基波分量。文献[6]中的 仿真分析结果表明,接地故障靠近发电机中性点时, 故障电流中含有较高的3次谐波分量。文献[7]中 给出了接地故障电流3次谐波的计算方法,但该方 法需依据接地故障定位结果进行计算,误差较大,无 法真实反映接地故障风险。

针对故障绕组定位问题,大型发电机通常利用 注入式定子接地保护装置测量接地过渡电阻阻值, 再基于故障绕组电势、零序电压、相电势间的关系定 位故障绕组[8-9]。但海洋核动力平台未装设注入式 保护装置,此类方法无法应用。文献[10]根据发电 机机端三相电压偏移与接地过渡电阻间的关系,提 出接地过渡电阻的计算方法及故障定位方案,可用 于未安装注入式保护的发电机。但该方法未考虑发 电机定子绕组电势分布的相位特征,故障定位结果 存在理论误差。文献[11]在文献[10]方法的基础上 考虑了绕组电势分布的相位特征,但认为故障绕组 电势在故障相电动势上的投影等于不考虑相位特征 时的故障绕组电势。然而,定子绕组各线圈电势幅 值相等,但相位不等,该几何关系存在误差,导致故 障绕组定位结果准确度不足。

基于海洋核动力平台的安全需求,本文提出一 种发电机定子绕组单相接地故障风险分析与实时诊 断方法。首先基于发电机3次谐波电压特征,提出 一种无需注入式保护装置的对地电容实时求解方 法。根据故障分量原理,在求解接地故障电流时计



及基波和3次谐波分量。利用故障支路的接地故障电流反映接地故障对发电机安全运行的危害风险,并依据故障风险自适应决定保护出口方式。基于海洋核动力平台发电机60°相带分布特点,构建故障绕组电势满足的几何关系式与幅值相位方程,通过解析计算准确实现故障定位。仿真结果表明,本文方法具有较高的计算精度,满足海洋核动力平台发电机的工程应用需求。

1 基于3次谐波电压实时求解对地电容

发电机定子接地故障电流与定子绕组和直连线路对地电容参数相关。海洋核动力平台电网存在不同形式的运行工况,如为海上外系统供电及作为站内系统紧急备用电源等。不同工况下,与主发电机直连的线路需要切换,导致直连线路对地电容并非固定值,因此需要对其进行实时测量以保证接地故障电流计算结果及故障定位结果的准确性。

海洋核动力平台主发电机为三相两分支汽轮发电机,采用中性点经高阻接地方式[1],其3次谐波等值电路如图1所示。图中:f为接地故障点; $R_{\rm N}$ 为发电机中性点接地电阻; $R_{\rm g}$ 为接地过渡电阻; $C_{\rm f}$ 为定子绕组每相对地电容; $C_{\rm o}$ 为直连线路每相对地电容之和; $E_{\rm 3}$ 为发电机3次谐波相电动势; α 为故障点到中性点所包含的线圈数在故障分支全部串联线圈匝数中的占比,本文将其定义为故障位置; $E_{\rm 3\alpha}$ 为故障点到发电机中性点的3次谐波电动势; $E_{\rm 3(1-\alpha)}$ 为故障点到发电机机端的3次谐波电动势。

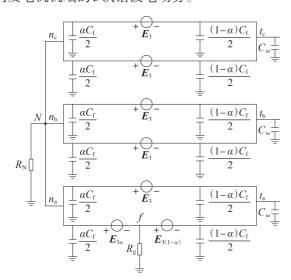


图1 发电机定子绕组3次谐波等值电路

Fig.1 Third-order harmonic equivalent circuit of generator stator windings

发电机正常运行时无故障支路,认为正常运行情况下发电机定子绕组两侧对地电容平均分布^[12], α =0.5。正常运行时三相完全对称,图1中的中性点侧 n_a , n_b , n_c 3点等电位,机端 t_a , t_b , t_c 3点等电位。为

便于分析,将 n_a 、 n_b 、 n_c 合并为点N, t_a 、 t_b 、 t_c 合并为点T,得到简化的等值电路如图2所示。图中, U_{N3} 、 U_{T3} 分别为发电机中性点、机端3次谐波电压。

$$R_{N} \underbrace{ \begin{bmatrix} N & E_{3} & T \\ \frac{3C_{f}}{2} & \frac{1}{2} & V_{N3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & \frac{1}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & \frac{1}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & \frac{1}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & \frac{1}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & \frac{1}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & \frac{1}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & \frac{1}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & \frac{1}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & \frac{1}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & \frac{1}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & \frac{1}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & \frac{1}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & \frac{1}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & \frac{1}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & \frac{1}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & \frac{1}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & \frac{1}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & \frac{1}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & \frac{1}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C_{3} & C_{f} & 1 \\ \frac{3C_{f}}{2} & V_{T3} \end{bmatrix}}_{P} \underbrace{ \begin{bmatrix} C$$

图2 正常运行时发电机的3次谐波简化等值电路

Fig.2 Simplified third-order harmonic equivalent circuit of normally operating generator

根据基尔霍夫定律可得:

$$\left(\frac{9}{2} j\omega C_{\rm f} + \frac{1}{R_{\rm N}}\right) U_{\rm N3} + U_{\rm T3} \left(\frac{9}{2} j\omega C_{\rm f} + 9j\omega C_{\omega}\right) = 0 \quad (1)$$

式中: ω 为系统角频率。通过式(1)得到 C_{α} 的计算式为:

$$C_{\omega} = \left| \left(\frac{C_{\rm f}}{2} + \frac{1}{9j\omega R_{\rm N}} \right) \frac{U_{\rm N3}}{U_{\rm T3}} + \frac{C_{\rm f}}{2} \right| \tag{2}$$

式中: $C_{\rm r}$ 和 $R_{\rm N}$ 为发电机固有参数; $U_{\rm N3}$ 和 $U_{\rm T3}$ 可通过测量得到。利用 PSCAD / EMTDC 软件,基于海洋核动力平台发电机定子绕组分布系数及短距系数计算每匝线圈对应的基波和3次谐波电势,并建立准分布参数模型。附录A图A1为海洋核动力平台发电机正常运行工况下的3次谐波电压波形,仿真条件详见第5节。分析可知,机端3次谐波电压幅值为额定相电压的2.56%,中性点3次谐波电压幅值为额定相电压的5.29%,现有电压互感器精度能够满足准确测量要求。

文献[12-13]中指出,机端3次谐波电压与中性点3次谐波电压的比值及二者的相位差与无功功率关系不大,随有功功率变化很小,基本可认为是一个常数。文献[12]中指出的升压变高压绕组3次谐波电压的影响是由于在设计变压器时为节省其体积与重量,减小了铁芯的体积及截面积,导致变压器在空载情况下运行在膝点附近,此时变压器运行在非线性区,铁芯饱和,因此产生零序性质的3次谐波电势。但在变压器正常带载运行工况下,系统中通常带有一定的感性负荷,由于其去磁作用,变压器带载后将运行在线性区,铁芯不会饱和,不会产生3次谐波电势,因此本文忽略升压变高压绕组3次谐波电压的影响。基于式(2)在发电机正常运行时实时跟踪计算直连线路对地电容参数,取最接近故障时刻的未突变值作为测量结果。

2 发电机定子绕组单相接地故障风险分析

海洋核动力平台发电机定子绕组发生单相接地故障后,接地故障电流将在故障点大量放热烧毁线圈绝缘,威胁铁芯安全,严重时将烧毁发电机,因此流过故障点的接地故障电流能够反映故障对发电机运行安全的危害风险。图3为海洋核动力平台发电

机在不同接地过渡电阻及不同故障位置下的定子绕组单相接地故障电流仿真结果,具体仿真参数见第5节。

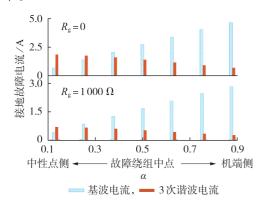


图 3 发电机定子绕组单相接地故障电流仿真结果

Fig.3 Simulative results of fault current of generator stator winding grounding fault

分析可知,由于基波故障电流与零序电压成正比,故障点越靠近机端,基波故障电流越大。但当故障点靠近中性点侧时,3次谐波含量较高,甚至超过基波分量。为准确反映接地故障风险,计算接地故障电流时应该包括基波和3次谐波分量。

建立发电机定子绕组单相接地故障时的基波零序等值电路如图 4 所示。图中: U_0 为零序电压; E_i 为故障点到中性点间的基波电动势; I_0 为零序电流。

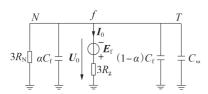


图 4 基波零序等值电路

Fig.4 Fundamental zero-sequence equivalent circuit 分析图4可得基波接地故障电流 *I*₁ 为:

$$I_{\rm fl} = 3I_0 = -\left[j3\omega (C_{\rm f} + C_{\omega}) + \frac{1}{R_{\rm N}}\right]U_0$$
 (3)

发电机定子绕组 A 相 α 处发生单相接地故障时,3 次谐波等值电路如图 1 所示。进行机端、中性点等电位点合并,得到简化等值电路如图 5 所示。

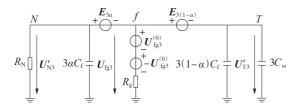


图 5 发电机发生定子绕组单相接地故障时的 简化 3 次谐波等值电路

Fig.5 Simplified third-order harmonic equivalent circuit under single-phase grounding fault of generator stator winding

图中: U'_{N3} 、 U'_{T3} 分别为故障后发电机中性点、机端3次谐波对地电压; U'_{ig3} 、 U_{ig3} 分别为故障前、后故障点3次谐波对地电压。

基于故障分量原理,建立发生定子绕组单相接地故障时的 3 次谐波故障分量等值电路,如图 6 所示。图中: ΔU_{g3} 为故障点 3 次谐波电压故障分量; ΔI_{B} 为 3 次谐波接地故障电流分量,由于故障前无故障电流,可近似认为 3 次谐波接地故障电流 $I_{\text{B}} = \Delta I_{\text{B}}$; ΔU_{N3} 为中性点 3 次谐波电压故障分量,可通过故障前、后中性点 3 次谐波电压相减求解; ΔU_{T3} 为机端 3 次谐波电压故障分量,可通过故障 波电压相减求解。

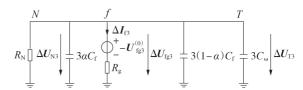


图 6 3次谐波故障分量等值电路

Fig.6 Third-order harmonic equivalent circuit of fault component

分析可知,3次谐波接地故障电流为:

$$I_{\rm f3} = -\left[j3\omega \left(3C_{\rm f} + 3C_{\rm \omega}\right) + \frac{1}{R_{\rm N}}\right] \Delta U_{\rm fg3} \tag{4}$$

式(4)中的 ΔU_{g3} 无法直接测量得到,但根据文献[13]中的动态模拟实验数据结果可知:

$$\Delta U_{\rm fg3} = \Delta U_{\rm N3} = \Delta U_{\rm T3} \tag{5}$$

因此式(4)可改写为:

$$I_{\rm f3} = -\left[j3\omega(3C_{\rm f} + 3C_{\rm \omega}) + \frac{1}{R_{\rm N}}\right] \Delta U_{\rm N3} \tag{6}$$

综合基波接地故障电流与3次谐波接地故障电流,可求得流过故障点的接地故障全电流*I*,为:

$$I_{\rm f} = \sqrt{\left| I_{\rm fl} \right|^2 + \left| I_{\rm fl} \right|^2} \tag{7}$$

10.5 kV 发电机接地故障电流允许值为 3 A^[12], 当实测接地故障电流大于安全允许值时,定子接地 保护应快速出口切机,保证发电机的运行安全;当实 测接地故障电流小于安全允许值时,定子接地保护 可发出告警信号,由运行人员根据系统供电需求、发 电机运行安全风险程度进一步决定是否切机。

3 基于绕组电势分布的定子绕组单相接地 故障定位

海洋核动力平台发电机定子绕组单相接地故障 切除后,为提高检修效率,快速恢复系统正常运行, 需要精确诊断故障绕组位置,即确定故障部分线圈 占完整分支的匝比。

海洋核动力平台发电机为汽轮发电机,其定子绕组的连接及分布采用60°相带方式。定子绕组发



生单相接地故障时,故障相绕组感应电势分布情况如附录 A 图 A2 所示。由于工程中部分发电机 2 分支电势分布完全相同,在此仅对图 A2 所示故障分支进行分析。以 A 相定子绕组于点 f 发生单相接地故障为例。

基于绕组电势相带分布特点,图 A2 中各条虚线 长度相等且均等于相电势幅值,因此图中红色线构 成等腰三角形。由几何关系可知,故障部分绕组对 应相带角度占完整 60°相带角度的百分比也为α。 故障绕组感应电势满足的几何关系为:

$$\left| E_{A\alpha} \right| = 2 \sin \left(\frac{\pi \alpha}{6} \right) \left| E_{A} \right| \tag{8}$$

$$\theta_{A} = \frac{\pi}{6} (1 - \alpha) \tag{9}$$

式中: θ_{Λ} 为故障绕组电势 $E_{\Lambda\alpha}$ 与故障相电势 E_{Λ} 间的夹角。

在考虑绕组电势相位分布的情况下,发电机定子绕组单相接地故障时的电压相量图如图 7 所示。图中:g 为零电位接地点; C_{Σ} 为发电机定子绕组与直连线路对地电容之和,其中直连线路对地电容可由式(2)实时计算得到; U_{Ng} 和 U_{A} 、 U_{B} 、 U_{C} 分别为发电机中性点和三相机端对地电压,可通过电压互感器直接测量得到;相电势 E_{A} 虽不能直接测量得到,但可由机端对地电压和中性点电压作差得到;根据傅里叶分析,可确定 E_{A} 与 U_{Ng} 之间的相角差 δ 。结合各电气量间的幅值及相位关系,可得:

$$\left| \boldsymbol{E}_{A\alpha} \right| = \left| \boldsymbol{U}_{Ng} \right| \sqrt{(1 + R_{g}/R_{N})^{2} + (\omega C_{\Sigma} R_{g})^{2}}$$
 (10)

$$\tan\left(\delta - \theta_{\rm A}\right) = \frac{\omega C_{\Sigma} R_{\rm g}}{1 + R_{\perp} / R_{\rm N}} \tag{11}$$

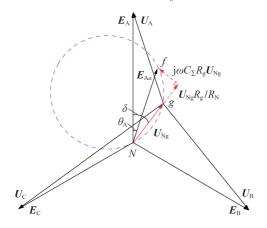


图 7 考虑绕组电势分布的定子绕组 单相接地故障电压相量图

Fig.7 Voltage phasor diagram under single-phase grounding fault of generator stator winding considering winding electric potential distribution

式(8)—(11)中包含变量为: $|E_{A\alpha}|$ 、 α 、 θ_A 和 R_g 。在 $\alpha \in (0,1)$ 范围内通过对上述方程组进行解析计算,即可确定 α ,实现故障定位。上述方法利用基波零序电压和故障相电势实现故障定位,文献[14]中指

出在发生高过渡电阻接地故障时,易出现故障定位多解情况。由于海洋核动力平台空间紧凑,无法利用注入式保护设备测量接地过渡电阻实现故障定位结果的校核,因此将多个定位解均作为备查故障位置。

4 故障风险分析及实时诊断流程

海洋核动力平台主发电机定子绕组单相接地故障故障风险分析及实时诊断流程如下。

- 1)实时检测系统对地电容参数。发电机正常运行时,实时测量机端和中性点的3次谐波电压,利用式(2)求解当前运行方式下发电机直连线路的对地电容参数。
- 2)启动接地故障诊断。根据零序电压判据判别系统是否发生接地故障,并确定故障相。基于机端与中性点3次谐波电压比值判据和机端零序电流方向判据判别是否为发电机定子绕组单相接地故障。
- 3)诊断故障风险。综合基波分量和3次谐波分量,利用式(3)、(6)、(7)求解定子绕组单相接地故障电流,根据故障风险程度自适应决定发电机定子接地保护的出口方式。
- 4)诊断故障线圈位置。基于式(8)—(11)计算接地故障点与发电机中性点间的线圈匝数在完整串联分支匝数中的占比,确定故障的具体位置,为故障检修过程提供人力、物力上的准备参考。

5 仿真分析

仿真分析采用的海洋核动力平台主发电机参数为:2分支绕组结构,极对数为1,总槽数为48,对应的槽距电角度为7.5°;额定电压为10.5 kV;每相定子绕组的电阻、漏电感、电容分别为1.528 m Ω 、2.84 mH、0.397 μ F;发电机中性点接地电阻阻值折算到一次侧为2286 Ω 。在常规运行工况下,直连配电网线路每相对地电容为0.405 μ F。

5.1 直连线路对地电容实时计算

基于PSCAD/EMTDC软件,建立海洋核动力平台发电机准分布参数模型。在系统正常运行状态下,测量得到发电机机端和中性点的3次谐波电压波形,如附录A图A1所示,对应的相量值如附录A图A3所示,根据式(2)得到直连线路对地电容实时计算结果如图8所示。

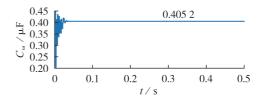


图 8 发电机直连线路对地电容实时计算结果 Fig.8 Real-time calculation results of grounding capacitance of generator directly connected lines

正常运行工况下,直连线路每相对地电容计算结果为0.4052 μF,误差为0.05%。对应不同运行工况改变直连线路对地电容并进行多次仿真实验,计算误差均在0.1%以内,具有较高的计算精度。

5.2 故障风险与实时诊断仿真分析

基于准分布参数模型,在0.2 s设置 A 相 1 分支 (对应图 A1 中的故障分支)发生单相接地故障。仿 真分析以下故障情况:故障部分线圈匝数占比分别 为 0.125(1/8)、0.25(2/8)、0.375(3/8)、0.5(4/8)、0.625(5/8)、0.75(6/8)、0.875(7/8),接地故障过渡电阻分别选取 10、200、500 Ω 。

以 A 相 1 分支故障占比为 0.5 处发生经 200 Ω 过 渡电阻接地故障为例进行分析,此时的零序电压相 量及3次谐波电压故障分量仿真结果如附录A图A4 所示。基于第2节中给出的基波接地故障电流、3次 谐波接地故障电流及接地故障全电流计算方法,得 到接地故障电流仿真结果,如图9所示。图中,基于 本文所提方法计算出的接地故障全电流与实测接地 故障电流十分接近,说明本文方法具有较高的准确 性,能够有效反映接地故障对发电机安全运行的危 害风险。计算曲线仅在故障后短时间内误差较大, 这是因为保护算法中采用全周傅氏算法计算相量 时,在故障后1个周期内同时跨越了故障前和故障 后2种状态。但发电机定子接地保护一般延时0.3~ 0.5 s 跳闸, 因此过渡过程中的短时计算误差不影响 风险分析结果。此时的接地故障电流为2.76 A,未超 过安全阈值3A,保护发告警信号,运行人员应根据 系统供电要求,及时转移负荷并平稳停机。

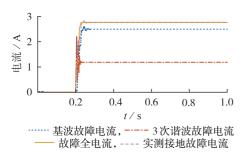


图9 接地故障电流仿真结果

Fig.9 Simulative results of grounding fault current

本文方法利用基波电势分布特征实现故障定位,在滤除直流分量、3次谐波分量及其他高次谐波分量后,基于傅里叶变换得到相电动势基波分量和中性点零序电压基波分量,并基于故障定位方程组得到故障定位结果,如图10所示。基于本文所提的解析计算定位方法得到α=0.503,误差为0.6%。其他故障情况的仿真结果见附录B表B1。仿真结果表明,本文提出的接地故障电流计算方法和故障定位方法误差均在1%以内,具有较高的计算精度。针对故障风险分析部分,通过比较接地故障电流和发电机

能够承受的安全电流阈值,在故障风险较高时,保护动作切机,保障发电机的运行安全;在故障风险较低时,保护动作于告警,根据海上电网及站内负荷需求确定切机方式,保证系统的平稳运行。分析接地故障定位仿真结果可知,本文方法由于未进行几何关系近似处理,在无需注入式保护设备的条件下仍具有较高的定位精度,满足核动力平台的应用需求。

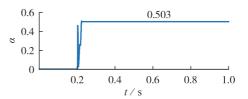


图 10 本文方法的故障定位结果

Fig.10 Fault location results of proposed method

6 结论

针对海洋核动力平台的安全需求与结构特点, 本文提出海洋核动力平台发电机定子接地故障风险 分析与实时诊断方法,并得出以下结论:

- 1)为保证接地故障电流实时计算的准确性,基于发电机正常运行时的3次谐波电压特征,提出一种无需外加设备的发电机直连线路对地电容实时计算方法;
- 2)综合基波与3次谐波分量求解接地故障全电流,准确分析故障风险,并基于故障风险自适应决定发电机定子接地保护的出口方式;
- 3)基于发电机定子绕组60°相带分布特点,提出一种通过解析计算即可确定故障部分线圈占完整分支线圈的匝数比的故障定位方法,提高故障检修效率,但该方法在发生高过渡电阻接地故障时可能出现多解情况,此时将多个定位结果均作为备查故障位置;
- 4)PSCAD/EMTDC仿真结果表明,本文方法具有较高的准确性,能够为海洋核动力平台发电机定子接地保护的精细化改进提供有效参考。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1] 尹项根,王义凯,李鹏,等. 海洋核动力平台电网安全问题及保护技术研究[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(22):9-17. YIN Xianggen,WANG Yikai,LI Peng, et al. Study on security problems and protection technologies of the floating nuclear power plant grid[J]. Power System Protection and Control, 2020,48(22):9-17.
- [2] 吴大立,郑中祥,尹项根,等. 基于Petri 网和多种群遗传算法的海洋核动力平台电力系统网络重构[J]. 电力自动化设备, 2020,40(8):160-168.

WU Dali, ZHENG Zhongxiang, YIN Xianggen, et al. Network reconstruction of offshore nuclear power platform power system based on Petri net and multi-population genetic algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(8):160-168.



- [3] WANG Yikai, YIN Xin, XU Wen, et al. Fault line selection in cooperation with multi-mode grounding control for the floating nuclear power plant grid [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1):1-10.
- [4] 贾文超,黄少锋. 基于零序电压故障分量相位特征的发电机定子单相接地故障选相[J]. 电力自动化设备,2016,36(5):116-121. JIA Wenchao, HUANG Shaofeng. Phase selection based on fault component phase characteristics of zero-sequence voltage for generator stator single-phase grounding fault[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(5):116-121.
- [5] 王育学,尹项根,张哲,等. 基于接地电流的大型发电机定子接地保护及精确定位方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(31): 147-154.

 WANG Yuxue,YIN Xianggen,ZHANG Zhe, et al. A novel pro-
 - WANG Yuxue, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. A novel protection and precise location method based on grounding currents for stator ground faults of large generators [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31):147-154.
- [6] 毕大强,王祥珩,王善铭,等. 大型水轮发电机定子单相接地故障的暂态仿真[J]. 电力系统自动化,2002,26(15):39-44. BI Daqiang, WANG Xiangheng, WANG Shanming, et al. Transient simulation for the stator ground fault of large-sized hydro-generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(15):39-44.
- [7] 毕大强,刘春秋,葛宝明. 注入式发电机定子接地保护的自适应整定[J]. 电力系统自动化,2010,34(16):64-68.
 BI Daqiang, LIU Chunqiu, GE Baoming. Self-adaptive setting for injecting source based stator ground fault protection[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(16):64-68.
- [8] NADER S S,RUSS F,AMIR N,et al. Adaptive 100% injection-based generator stator ground fault protection with real-time fault location capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5):2364-2372.
- [9] BLÁNQUEZ F R, PLATERO C A, REBOLLO E, et al. On-line stator ground-fault location method for synchronous generators based on 100 % stator low-frequency injection protection [J]. Electric Power Systems Research, 2015, 125:34-44.
- [10] 陈俊,刘梓洪,王明溪,等.不依赖注入式原理的定子单相接地故障定位方法[J]. 电力系统自动化,2013,37(4):104-107.

- CHEN Jun, LIU Zihong, WANG Mingxi, et al. Location method for stator single-phase ground fault independent of injection type principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4):104-107.
- [11] 黄少锋,贾文超. 大型汽轮发电机定子单相接地故障定位新方法[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(9):35-40. HUANG Shaofeng, JIA Wenchao. A new fault location method for stator single-phase ground fault in large turbine generator [J]. Power System Protection and Control,2017,45(9):35-40.
- [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;212-216.
- [13] 邰能灵,邓妍. 基于小波启动的故障分量相角比差发电机定子接地保护[J]. 电力系统自动化,2004,28(13):60-63.

 TAI Nengling, DENG Yan. A new phase-angle differential protection for generator stator ground fault with wavelet transform start-up component[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(13):60-63.
- [14] 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.

作者简介:



王义凯(1996—), 男, 满族, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护(\mathbf{E} -mail: 742657004@qq.com);

尹项根(1954—),男,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统继电保护与安全自动控制(E-mail:xgyin@hust.edu.cn);

(**E-mail**:906982507@qq.com)_o

(编辑 任思思)

Risk analysis and real-time locating of single-phase grounding fault of generator stator winding for offshore nuclear power plant

WANG Yikai, YIN Xianggen, QIAO Jian, TAN Liming, XU Wen

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The grounding fault current is affected by the change of grounding capacitance of the directly connected lines under different generator operating conditions of the offshore nuclear power plant. Based on the characteristics of the third-order harmonic voltage of the generator, a real-time calculating method of grounding capacitance without external equipment is proposed. The grounding fault current is solved considering the fundamental and third-order harmonic waves through the principle of fault component. Thus the protection outlet mode is adaptively determined according to the real-time fault risk. To shorten the maintenance time, the geometric relationship satisfied by the fault windings' electromotive force and the fault phase electromotive force, and the amplitude-phase equations satisfied by the fault windings' electromotive force and the zero-sequence voltage are constructed. The turns ratio of the coil between the fault point and the neutral point in the whole branch can be accurately determined by analytical calculation, and the fault locating is realized. Simulation analysis of PSCAD / EMTDC shows that the proposed method has high accuracy. Key words: offshore nuclear power plant; generator stator winding single-phase grounding fault; fault risk analysis; grounding fault location

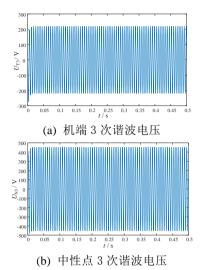


图 A1 发电机正常运行工况下的 3 次谐波电压波形

Fig.A1 Third-order harmonic voltage waveform of generator under normal operating condition

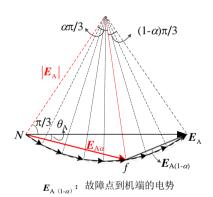


图 A2 故障相绕组感应电势分布相量图

Fig.A2 Electric potential distribution diagram of fault-phase winding

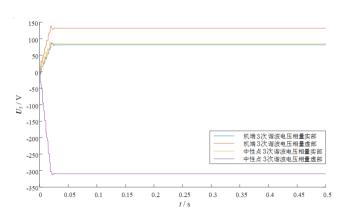


图 A3 发电机正常运行工况下的 3 次谐波电压相量值

Fig.A3 Third-order harmonic voltage phase value of generator under normal operating condition

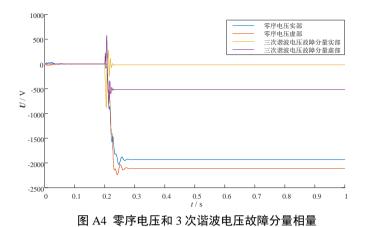


Fig. A4 Zero-sequence voltage phasor and third-order harmonic voltage fault components phasors

附录 B

表 B1 发电机定子绕组单相接地故障风险分析与实时定位结果

Table B1 Results of fault risk analysis and real-time locating under single-phase grounding fault of generator stator winding

			<u> </u>		U	С 1	υ	, ,			U
故障场景		接地故障风险分析							故障定位结果		
故障位置	$R_{ m g}/\Omega$	零序电压 相量/V	三次谐波电压 故障相量/V	$I_{ m fl}/{ m A}$	$I_{\rm f3}/{ m A}$	I _f 计算值/A	I _f 实测值/A	保护动作 情况	δ/ (°)	α	误差
0.125	10	-570.1-j546.6	-392.3-j707.5	0.6895	1.8607	1.9843	1.9934	告警	37.07	0.1252	0.16%
	200	-582.2-j427.9	-531.1-j439.5	0.6307	1.5857	1.7065	1.7142	告警	29.58	0.1260	0.80%
	500	-553.9-j282.2	-460.2-j161.2	0.5427	1.1215	1.2459	1.2512	告警	20.27	0.1238	-0.96%
0.25	10	-1064.1-j1163.0	-182.0-j743.3	1.3761	1.7601	2.2343	2.2414	告警	40.81	0.2504	0.16%
	200	-1103.7-j928.0	-375.4-j533.1	1.2588	1.4996	1.9579	1.9639	告警	33.32	0.2519	0.76%
	500	-1066.3-j634.3	-379.7-j261.4	1.0831	1.0603	1.5157	1.5197	告警	24.01	0.2523	0.92%
0.375	10	-1473.5-j1838.6	26.2-j695.7	2.0570	1.6013	2.6068	2.6120	告警	44.56	0.3755	0.13%
	200	-1555.5-j1492.0	-195.5-j559.9	1.8816	1.3640	2.3240	2.3283	告警	37.07	0.3725	-0.67%
	500	-1582.5-j1050.3	-266.9-j323.2	1.6190	0.9642	1.8843	1.8871	告警	27.76	0.3783	0.88%
0.5	10	-1791.4-j2561.9	200.4-j571.8	2.7291	1.3936	3.0643	3.0680	切机	48.30	0.5005	0.10%
	200	-1929.9-j2110.1	-18.9-j515.7	2.4964	1.1869	2.7642	2.7673	告警	40.82	0.5030	0.60%
	500	-1932.5-j1522.8	-139.0-j337.2	2.1479	0.8388	2.3059	2.3079	告警	31.50	0.5042	0.84%
0.625	10	-2012.1-j3320.4	313.9-j390.4	3.3894	1.1524	3.5800	3.5827	切机	52.05	0.6254	0.06%
	200	-2220.5-j2771.7	127.5-j407.1	3.1004	3.2520	3.2520	3.2543	切机	44.56	0.6286	0.58%
	500	-2271.3-j2044.0	-15.3-j301.1	2.6676	0.6934	2.7562	2.7578	告警	35.25	0.6299	0.78%
0.75	10	-2131.9-j4101.3	349.4-j179.2	4.0352	0.9031	4.1351	4.1373	切机	55.80	0.7497	-0.04%
	200	-2442.2-j3465.6	221.2-j250.7	3.6911	0.7692	3.7704	3.7723	切机	48.31	0.7461	-0.52%
	500	-2539.1-j2605.1	85.2-j220.4	3.1758	0.5434	3.2220	3.2234	切机	39.00	0.7553	0.71%
0.875	10	-2148.7-j4891.0	301.3+j29.6	4.6637	0.6961	4.7154	4.7174	切机	59.55	0.8753	0.03%
	200	-2531.5-j4179.8	248.0-70.2	4.2660	0.5928	4.30	4.30	切机	52.06	0.8789	0.45%
	500	-2731.4-j3196.2	147.1-j107.3	3.6704	0.4191	3.6942	3.6957	切机	42.75	0.8807	0.65%