大型汽轮发电机 3 次谐波电压定子接地 保护方案的研究与改进

桑建斌,包明磊,李玉平,李明,徐业荣 (南京国电南自电网自动化有限公司,江苏南京 211100)

摘要:基于一台 300 MW 汽轮发电机的参数,对常用的 3 种 3 次谐波电压定子接地保护方案进行灵敏度对比 分析。分析结果表明大型汽轮发电机采用接地变压器接地方式时,现有的 3 次谐波电压定子接地保护在定子 绕组中部的灵敏度仍然不足。考虑现有 3 次谐波电压定子接地保护存在误动较多的问题,分析了导致发电机 机端、中性点 3 次谐波电压变化的原因。在此基础上,提出一种改进型 3 次谐波电压变化量差动原理定子接 地保护方案。该方案对机端 3 次谐波电压变化量进行校正后与中性点 3 次谐波电压变化量构成差动判据,可 有效区分定子接地故障与发电机 3 次谐波电压的正常波动。该方案还根据高压侧 3 次谐波电压的变化量增 加了浮动的保护启动门槛,避免因高压侧 3 次谐波电压变化而导致的误动。仿真结果表明所提方案理论正确, 灵敏度较高,受机组运行变化状态的影响小。

关键词:汽轮发电机;3次谐波电压;定子接地保护;继电保护;变化量;灵敏度;仿真 中图分类号:TM 77 _______文献标识码:A ______DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.10.027

0 引言

大型发电机组保护均采用双重化配置,一般一 套保护采用注入式定子接地保护,另一套保护采用 双频式定子接地保护,或者2套保护都采用双频式 定子接地保护。

注入式定子接地保护在大型机组中已有较多应 用,可直接测量接地电阻,理论上灵敏度一致且停机 不受影响。但注入式定子接地保护在投运时,厂方人 员现场校正流程复杂^[1],且接地变二次侧电流互感 器的工作特性在发电机工况变化时不够理想,导致 机组投运后接地电阻的测量误差增大^[2]。这些客观 存在的不利因素,使得在双重化的保护配置环境下, 注入式定子接地保护仍需要与其他定子接地保护相 配合。

双频式定子接地保护由基波零序电压保护与3次谐波电压定子接地保护组成。基波零序电压保护 原理简单可靠,但在中性点附近存在死区。3次谐波 电压定子接地保护原理的种类较多,主要用于保护 中性点附近的接地故障。

大型发电机组对定子接地保护的灵敏度要求较高,如文献[3]根据机端电压 20 kV 以上的汽轮发电机定子绕组接地电流允许值为1A进行计算,近似得到 300~1000 MW 发电机的定子单相接地保护告警的灵敏度应能达到 10 kΩ。然而,近年来国内大型发电机组多采用接地变接地,这导致基波零序电压保护的灵敏度明显降低,同时由于大型发电机组定子对地电容的增大,基波零序电压保护的低灵敏度区域

收稿日期:2016-09-20;修回日期:2017-09-01

将从中性点向绕组中部扩大^[45]。而 3 次谐波电压定 子接地保护虽然在中性点附近灵敏度较高,但在定 子绕组中部时灵敏度较低甚至直接进入死区。此 外,3 次谐波电压定子接地保护误动较多^[5],在可靠 性上仍有待提高。

为整体提高双频式定子接地保护的性能,3次 谐波电压定子接地保护仍不断发展[6-11]:文献[6-7]指 出主变高压侧的3次谐波电压通过高低压侧耦合电 容传递至发电机侧,需要引起注意;文献[8]指出3 次谐波电压定子接地保护需要区分并网前后的状 态: 文献 [9] 将机端与中性点的 3 次谐波电压相角差 突变量作为动作判据;文献[10]根据机端、中性点的 3次谐波电压变化量在正常运行与定子接地时的信 息特征,构建了一套3次谐波电压变化量差动保 护;文献[11]在文献[10]的基础上利用基波和3次 谐波零序电压综合信息量组建了差动保护判据。但 文献[9-10]的保护方案均未考虑高压侧 3 次谐波电 压的影响,即使在主变高低压侧耦合电容较小的情 况下,当高压侧3次谐波电压变化较大时,仍有误动 的风险: 文献 [10-11] 中的保护方案虽具有很高的灵 敏度,但当发电机机端与中性点的等效接地参数不 平衡时,即使机组正常运行,保护的差动量理论值也 不为0,安全裕度不够。

本文基于一台 300 MW 发电机的参数,对 3 种投 入实际应用的 3 次谐波电压定子接地保护的灵敏度 进行分析。另外,本文还分析了导致发电机机端、中 性点 3 次谐波电压变化的原因。在此基础上,本文增 加了防误动的辅助判据,提出一种改进型的 3 次谐波 电压变化量差动保护,并分析该保护的灵敏度与可靠 性,最后基于 MATLAB/Simulink 对其进行仿真验证。

3次谐波电压定子接地保护理论基础 1

本文以一台常见的 60° 相带双分支并联型发电 机作为研究对象,该发电机的各分支有9匝绕组,各 匝绕组的3次谐波电势相量幅值相等、相位不同。

图 1(a)为发电机定子单相接地等效电路。图 中,Cs、CN分别为机端、中性点对地电容;R。为接地电 阻;G为接地点;α为中性点到接地点的绕组占全部 绕组的比例:E',为中性点到接地点的3次谐波电势 相量: E",为接地点到机端的3次谐波电势相量。

图 1(b)为本文所研究发电机的 3 次谐波电势 相量[12]。图中.各分支的各匝3次谐波电势组成一个 半圆: $E_3(\overline{NS})$ 为发电机单相3次谐波电势相量。



(a) 发电机定子单相接地电路图 (b) 定子接地 3 次谐波电势相量

图 1 发电机定子接地电路与 3 次谐波电势相量

Fig.1 Circuit and third-harmonic voltage phasor of stator grounding fault of generator

根据图 1,当接地故障发生在分支 1 时,E'3、E'3 的 表达式为:

$$\begin{cases} E'_{3} = \frac{1}{2} E_{3} (1 - e^{-j\pi\alpha}) \\ E''_{3} = \frac{1}{2} E_{3} (1 + e^{-j\pi\alpha}) \end{cases}$$
(1)

当接地故障发生在分支2时,E', E', 的表达式为:

$$\begin{cases} E'_{3} = \frac{1}{2} E_{3} (1 - e^{j\pi\alpha}) \\ E''_{3} = \frac{1}{2} E_{3} (1 + e^{j\pi\alpha}) \end{cases}$$
(2)

忽略接地变漏阻抗与励磁阻抗,发电机的3次 谐波等效电路如图2所示。

图 2(a)为发电机正常运行时的 3 次谐波等效电 路^[12], C_f为定子绕组三相对地总电容; C₁为机端设备 对地总电容: C_{M} 为主变高低压侧每相的耦合电容: U35为机端3次谐波电压相量;U30为中性点3次谐 波电压相量;R_N、L_N分别为中性点接地变或消弧线圈







图 2 发电机 3 次谐波等效电路

Fig.2 Third-harmonic equivalent circuit of generator

等效电阻、电感; E3b 为主变高压侧 3 次谐波电压相量。

假设主变高压侧 3 次谐波电压为 0,由于 C_{M} 远 小于 C_f,所以忽略 C_M,则发生定子接地故障时的 3 次谐波等效电路如图 2(b) 所示^[9,13], 图中 Y₁, Y₂, Y₃ 为各虚线框所包含的导纳,表达式如式(3)所示。

$$\begin{vmatrix} Y_{1} = \frac{1}{R_{N} + j\omega_{3}L_{N}} + 0.5 j\omega_{3}C_{f} \\ Y_{2} = j\omega_{3}(0.5 C_{f} + C_{i}) \\ Y_{3} = \frac{1}{R_{g}} \end{vmatrix}$$
(3)

其中,ω,为3次谐波角频率。

根据图 2(b),可以求得发生定子单相接地故障 后的 U_{3S} 和 U_{3N} 为:

$$\begin{cases} U_{3S} = \frac{E_3 Y_1 + E_3' Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3} \\ U_{3N} = -\frac{E_3 Y_2 + E_3' Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3} \end{cases}$$
(4)

2 3种3次谐波电压定子接地保护方案及其 灵敏度分析

2.1 3种3次谐波电压定子接地保护方案

3种常见的3次谐波电压定子接地保护方案如 下所示。

方案1:

$$\left| \boldsymbol{U}_{3S}(t) \right| > K_{\text{set1}} \left| \boldsymbol{U}_{3N}(t) \right|$$
(5)

方案 2:

$$\left| \frac{U_{3S}(t)}{U_{3N}(t)} - \frac{U_{3S}(t - \Delta t)}{U_{3N}(t - \Delta t)} \right| > K_{\text{set2}}$$
(6)

方案 3:

$$\begin{vmatrix} \boldsymbol{U}_{3N}(t) + K_3 \boldsymbol{U}_{3S}(t) \\ + K_3 = -\frac{\boldsymbol{U}_{3N}(t - \Delta t)}{\boldsymbol{U}_{3S}(t - \Delta t)} \end{aligned}$$
(7)

其中, **U**₃₀(t)和 **U**₃₅(t)分别为 t 时刻的中性点 3 次谐 波电压相量和机端3次谐波电压相量: $U_{\rm W}(t-\Delta t)$ 和 $U_{3S}(t-\Delta t)$ 分别为 $t-\Delta t$ 时刻的中性点 3 次谐波电压 相量和机端3次谐波电压相量;K_stl、K_stl、K_stl、K_stl、 方案1、2、3的制动系数。

2.2 3种3次谐波电压定子接地保护方案的灵敏度 计算

采用一台 300 MW 机组的接地参数对 3 种 3 次

$$\begin{array}{c} C_{S} \pm \\ \hline \\ C_{S} \pm \\ \hline \\ C_{S} \pm \\ \hline \\ C_{S} \pm \\ C_{S} \pm \\ \hline \\ C_{S} \pm \\ \hline \\ C_{S} \pm \\ C_{S} \pm \\ C_{S} \pm \\ C_{S} \hline \\ C_{S} \pm \\ C_{S} \hline \\ C_{S} \pm \\ C_{S} \hline \\ C_{S}$$

谐波电压定子接地保护方案的灵敏度进行计算,具体参数如表1所示^[12]。表中, C_{Σ} 为发电机对地总电容, $C_{\Sigma}=C_{t}+C_{t};\omega_{1}$ 为基波角频率。

表 1 300 MW 发电机参数

Table 1	Parameters	of	а	300 MW	generator
---------	------------	----	---	--------	-----------

参数	参数值	说明
$C_{\rm f}/\mu{ m F}$	0.528	_
C₁∕µF	0.348	含机端三相冲击波吸收电容 0.3µF
$C_{\Sigma} / \mu F$	0.876	$C_{\Sigma} = C_{\rm f} + C_{\rm t}$
$C_{\rm M}/\mu{ m F}$	0.0047	—
R_N / Ω	3 6 3 6	$R_N = 1/(\omega_1 C_{\Sigma})$
L_N/H	13.89	$L_N=1.2/(\omega_1^2 C_{\Sigma})$

方案 1 的制动系数 K_{sel} 通常采用实测方式获 取,即将机端 3 次谐波电压实测值与中性点 3 次谐波 电压实测值的比值放大 1.2~1.5 倍。

接地变接地方式下的 K_{sell} 为:

$$K_{\text{set1}} = 1.2 \left| \frac{1/R_N + j0.5\omega_3 C_f}{j\omega_3(0.5 C_f + C_t)} \right| \approx 0.78$$

消弧线圈接地方式下的 K_{set1} 为:

$$K_{\text{set1}} = 1.2 \left| \frac{\frac{1}{(1\omega_3 L_N) + 10.5\omega_3 C_f}}{j\omega_3(0.5 C_f + C_i)} \right| \approx 0.36$$

不接地方式下的 K_{cel} 为.

$$K_{\text{set1}} = 1.2 \times \frac{0.5 C_{\text{f}}}{0.5 C_{\text{f}} + C_{\text{t}}} \approx 0.52$$

方案 2、方案 3 的制动系数在相应的定值整定规 程中没有明确要求^[14],由厂家自行规定,一般取为 0.2~0.5。为保证较高的灵敏度,不同接地方式下均取:

$$K_{set3} = K_{set2} = 0.2$$

根据式(1)—(7)以及表1参数,计算得到各方 案在不同接地方式下的灵敏度,如图3所示。



图 3 不同接地方式下 3 种保护方案的灵敏度

Fig.3 Sensitivity of three protection schemes under different grounding modes

总结图3可得以下结论。

a.3种保护方案在分支1的灵敏度均小于在分支2的灵敏度,实际应当考察分支1的灵敏度。

b. 在表 1 的参数下,方案 3 在不同接地方式下的灵敏度均为最高。

c. 在接地变接地方式下,虽然方案 3 的灵敏度 最高,但其灵敏度在绕组距中性点 2/3 处仍不足 5 kΩ,实际应用时可能选取更可靠的制动系数,灵敏 度会更低。按照文献[3]中的计算结果,大型发电机 组定子接地保护告警的最佳灵敏度应能达到 10 kΩ,方案 3 的灵敏度仍显不足。

3 3次谐波电压变化量差动原理保护方案

3.1 3次谐波电压变化量差动原理理论分析

引起发电机中性点、机端3次谐波电势变化的因 素主要有4类:机组运行工况正常改变导致发电机 3次谐波电压发生变化;定子发生接地故障;主变高 压侧3次谐波电压发生变化;机端电压互感器及中 性点电压回路异常。下文对上述4类因素中的某一 因素进行分析时一般不考虑其他3类因素的影响。

假设在 t 时刻发电机 3 次谐波电势的变化量为 $\Delta E_3(t)$,暂忽略高压侧 3 次谐波电压的影响,根据图 2 得到机端、中性点的 3 次谐波电压变化量为:

$$\begin{aligned}
\Delta U_{3N}(t) &= -\frac{Y_2}{Y_1 + Y_2} \Delta E_3(t) \\
\Delta U_{3S}(t) &= \frac{Y_1}{Y_1 + Y_2} \Delta E_3(t)
\end{aligned} \tag{8}$$

发电机 3 次谐波电压变化时机端、中性点的 3 次 谐波电压变化量存在以下关系:

$$K_{4}\Delta U_{3S}(t) + \Delta U_{3N}(t) = 0$$

$$K_{4} = \frac{Y_{2}}{Y_{1}} = \frac{j\omega_{3}(0.5 C_{f} + C_{t})}{\frac{1}{R_{N} + j\omega_{3}L_{N}} + 0.5j\omega_{3}C_{f}}$$
(9)

分析式(9)中 K_4 的相位角可知:在消弧线圈接地方式(欠补偿)或不接地方式下, K_4 的相位角为 0° ;在接地变接地方式下, K_4 相位角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间。综上可知, K_4 的相位角一定是锐角。

假设在 t 时刻发生定子单相接地故障,根据式 (4)得到机端、中性点的3次谐波电压变化量为:

$$\begin{cases} \Delta U_{38} = \frac{E_3 Y_1 + E_3'' Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3} - \frac{E_3 Y_1}{Y_1 + Y_2} \\ \Delta U_{3N} = -\frac{E_3 Y_2 + E_3' Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3} + \frac{E_3 Y_2}{Y_1 + Y_2} \end{cases}$$
(10)

根据式(10)可知,发生定子单相接地故障时机 端、中性点的3次谐波电压变化量存在以下关系:

$$\Delta \boldsymbol{U}_{3S}(t) = \Delta \boldsymbol{U}_{3N}(t) \tag{11}$$

根据 K_4 的相位特征以及式(11)可知: $|\Delta U_{3N}(t) + K_4 \Delta U_{3S}(t)| > |\Delta U_{3N}(t) - K_4 \Delta U_{3S}(t)|$ (12) 在发生定子单相接地故障时一定成立。

基于以上分析,利用 $K_4 \Delta U_{3S}(t) = U_{3N}(t)$ 的相量 和幅值作为差动电压、相量差幅值作为制动电压,提 出一种改进型 3 次谐波电压变化量差动保护方案, 动作量 U_{34} 与制动量 U_{3r} 定义为:

$$\begin{bmatrix}
U_{3d} = |\Delta U_{3N}(t) + K_4 \Delta U_{3S}(t)| \\
U_{3r} = K_{set4} |\Delta U_{3N}(t) - K_4 \Delta U_{3S}(t)| \\
\Delta U_{3N}(t) = U_{3N}(t) - U_{3N}(t - \Delta t) \\
\Delta U_{3S}(t) = U_{3S}(t) - U_{3S}(t - \Delta t)
\end{bmatrix}$$
(13)

动作主判据为:

$$U_{\rm 3d} > U_{\rm 3r} \tag{14}$$

其中, K₄ 为机端校正系数, 使发电机正常运行时差动 量为 0, 避免因发电机机端与中性点对地等效参数不 一致造成误动; K_{set4} 为制动系数, 其整定值取决于 K₄ 的相位角, 当发电机组的接地参数确定后, K₄ 的相位 角也就确定了。当 K₄ 的相位角接近 0° 时, K_{set4} 的值 可以大于 1, 也可以小于 1; 当 K₄ 的相位角远离 0° 而 接近 90° 时, 为保证灵敏度, K_{set4} 的值应小于 1。

对比式(13)与式(7)可知,当绕组中部经较大过 渡电阻接地时,中性点 3 次谐波电压变化量 $\Delta U_{3N}(t)$ 与机端 3 次谐波电压变化量 $\Delta U_{3S}(t)$ 较小,式(13)或 式(7)的动作量都难以超越 $K_{set3}|U_{3N}(t)|$,但由于 K_4 的相位角一定是锐角,所以式(14)一定能满足动作 条件。利用式(14)作为动作主判据,有利于提高保护 在绕组中部的灵敏度。

当发电机 3 次谐波电压正常波动时,式(13)中 的制动量较小,但是动作量恒为 0,因此理论上不会 误动,为增加保护的可靠性,需增加制动门槛。

主判据未考虑主变高压侧 3 次谐波电压 E_{3h} 的 影响,在此推导辅助制动判据来防止 E_{3h} 的干扰。假 设t时刻主变高压侧 3 次谐波电压的变化量为 $\Delta E_{3h}(t)$, 根据图 2(a), $\Delta E_{3h}(t)$ 传递至主变低压侧引起的发电 机中性点及机端的 3 次谐波电压变化量为:

$$\Delta U_{3N}(t) = \Delta U_{3S}(t) = \gamma \Delta E_{3h}(t)$$
(15)

$$\gamma = \frac{1.5j\omega_3 C_{\rm M}}{3i\omega_2 C_{\rm M} + 1} + i\omega_2 (C + C) \tag{16}$$

 $3J\omega_3C_M + \frac{1}{R_N + j\omega_3L_N} + J\omega_3(C_1 + C_1)$ 其中, γ 为主变高低压侧 3 次谐波电压传递系数。

将式(15)代入式(13)可得 *E*_{3h}变化时的动作量 与制动量为:

$$\begin{cases}
U_{3d} = \left| \gamma \Delta E_{3h}(t) \left(1 + K_4 \right) \right| \\
U_{3r} = K_{set4} \left| \gamma \Delta E_{3h}(t) \left(1 - K_4 \right) \right|
\end{cases}$$
(17)

式(17)中 U_{3d} 易大于 U_{3r},为躲避主变高压侧 3 次谐波电压变化量的干扰,同时为防止主判据在装置 零漂时误动,制动门槛取为:

$$U_{dt} = 1.2 | \gamma \Delta E_{3h}(t) (1 + K_4) | + 0.05E_3$$
(18)
辅助判据为.

$$U_{\rm 3d} > U_{\rm dt} \tag{19}$$

其中,*E*₃为发电机 3 次谐波电压二次值,可从专用匝间零序电压互感器获取,也可以通过式(20)计算。

$$E_{3} = \left| \boldsymbol{E}_{3}(t) \right| = \left| \boldsymbol{U}_{3S}(t) - \boldsymbol{U}_{3N}(t) \right|$$
(20)

为保证本文方案的可靠性,需考虑相关电压互感 器异常以及并网瞬间保护是否闭锁。根据式(13),当 机端零序电压互感器或中性点电压回路断线时,主 判据、辅助判据均可能立即动作,此时应当闭锁该保 护。当高压侧零序电压互感器断线时,只要高压侧 3 次谐波电压变化不大,保护不会立即误动,所以此时 无需闭锁保护,但为保证保护的可靠性,可将式(18) 中的制动门槛切换为:

$$U'_{\rm dt} = 0.15 E_3$$
 (21)

辅助判据为:

此外,根据文献[8],并网时刻机端等效电容变 化较大,保护在并网瞬间应自动短时退出。

 $U_{3d} > U'_{dt}$

根据以上分析,本文方案引入了定值 γ ,增加了 E_{3h} 输入,计算量有所增加,但如果不检测 E_{3h} ,现有 保护方案只能采用较高的制动系数。本文的辅助判 据考虑了 E_{3h} 的变化,在 E_{3h} 不变时保护灵敏度较高, 当 E_{3h} 变化时能实时调整制动门槛值,提高了可靠性。

综上所述,本文方案的逻辑框图如图4所示。



图 4 本文保护方案逻辑框图

Fig.4 Logic diagram of proposed protection scheme

3.2 3次谐波电压变化量差动方案灵敏度分析

根据式(1)—(4)、(9)、(13)、(14)、(18)、(19)及 表 1.计算可得本文方案的灵敏度曲线见图 5。



图 5 本文保护方案的灵敏度分析

Fig.5 Sensitivity analysis of proposed protection scheme

由图 5(a)可见,本文保护方案的主判据灵敏度 很高,远大于实际工程要求。图 5(b)为不同的 U_{d} 下 得到的辅助判据灵敏度曲线,可见辅助判据的灵敏 度相对主判据较低,整体方案的灵敏度由辅助判据决 定。图 5(c)为 $U_{d}=0.05E_3$ 时不同接地方式下本文保 护方案在分支1的灵敏度曲线,可见在接地变接地方 式下方案的灵敏度最低,最低处约为 12 k Ω ,大于现 有方案 3 的灵敏度。

4 3次谐波电压变化量差动方案仿真分析

在 MATLAB/Simulink 中建立定子接地故障仿 真模型,发电机采用接地变接地方式,仅对分支1进 行接地仿真,仿真模型简图见图 6。仿真软件中现有 的模块无法实现发电机内部定子接地故障仿真,因 此采用图 6(a)所示的简化电路模拟单匝绕组,进而 组建图 1 所示的定子绕组电势模型。



图 6 仿真模型简图

Fig.6 Simplified diagram of simulation model

图 6(a)中 C₁为单匝绕组对地电容, E_{1-n}、E_{3-n}分 别为第 n 匝绕组的基波电压与 3 次谐波电压。由于 每匝定子绕组的电阻以及 3 次谐波感抗远小于对地 容抗,因此忽略绕组电阻与感抗。

主要仿真参数:发电机额定电压为 18 kV,机端 电压互感器变比为 18 kV/100 V/57.74 V;接地变变 比为 18 kV/173 V;主变采用 YNd11 接线方式,高压 侧额定电压为 500 kV,主变高压侧电压互感器变比为 500 kV/100 V/173 V; E_3 为额定相电压的 2%,突变 量时间间隔 Δt 为 80 ms,采用每半周期 24 点的半波 傅氏算法提取 3 次谐波电压相量,制动系数 K_{set4} 为 1.2;其余参数见表 1。

故障时刻 t 为 0.12 s,分别在中性点、α=0.67 处、 机端进行故障接地仿真,仿真中电压互感器均为正 常状态,仿真结果见图 7—11,图中电压均为二次值。

图 7 为定子绕组的不同位置经 1 k Ω 电阻接地时的中性点零序电压 U_N 与机端零序电压 U_s 。中性点接地时, U_N 与 U_s 中主要包含 3 次谐波分量。定子绕组在 α =0.67 处接地后, U_N 与 U_s 中的基波分量增大,且远大于 3 次谐波分量。机端接地后, U_N 与 U_s 中的基波分量进一步增大。可见,在基波分量可能远大于 3 次谐波分量的零序电压中准确提取 3 次谐波电压非常关键。

由图 8 可见,中性点经 1 kΩ、30 kΩ 电阻接地 后,保护动作,经 50 kΩ 电阻接地后,主判据动作,辅 助判据未动作。由图 9 可见,定子绕组在 α =0.67 处 经 1 k Ω 、8 k Ω 电阻接地后,保护动作,经 15 k Ω 电阻接地后,主判据动作,辅助判据未动作。由图 10 可





Fig.7 Zero-sequence voltage of generator's neutral point and terminal for stator grounding fault via $1 \text{ k}\Omega$ resistance in different locations of stator winding



图 8 中性点经不同电阻接地时的保护判据计算结果 Fig.8 Calculative results of protection criteria when generator's neutral point is grounded via different resistances



图 9 定子绕组在 α=0.67 处经不同电阻接地时的 保护判据计算结果





图 10 机熵经不同电阻接电时体扩升循闭异结苯 Fig.10 Calculative results of protection criteria when generator terminal is grounded via different resistances

见,机端经1k Ω 、15k Ω 电阻接地后,保护动作,经 40k Ω 电阻接地后,主判据动作,辅助判据未动作。 可见,本文保护方案在定子绕组不同位置接地时的 灵敏度符合图5中 $U_{d}=0.05E_3$ 时的计算结果。

由图 8—10 还可以看出:当半波傅氏计算的采 样窗中含有突变的基波电压时,3 次谐波电压无法 准确计算,为了避免误动,应使该保护方案的主判据 与辅助判据均持续满足 40 ms 以上再动作出口。

对本文保护方案在 E₃变化时进行仿真,设定 E₃ 由为额定相电压的 1% 突增至 3%,突变时刻为 0.12 s, 仿真结果如图 11 所示。





图 11 表明 E₃ 突增时动作电压 U_{3d} 很小,而制动 电压 U_{3r} 明显增大且远大于动作电压,可见主判据能 准确躲避发电机 3 次谐波电压变化带来的影响。

对本文保护方案在主变高压侧 3 次谐波电压 E_{3h}变化时进行仿真,设定 E_{3h}幅值由 50 V 突增至 500 V,相位与发电机 3 次谐波电压相同(辅助判据 不受 E_{3h}相位影响),突变时刻为 0.12 s,仿真结果如 图 12 所示。

由图 12 可见, **E**_{3h} 幅值增大时动作电压 U_{3d} 有所 增加, 主判据动作, 但是门槛电压 U_d 远大于动作电 压 U_{3r}, 辅助判据能准确躲避 **E**_{3h} 变化带来的扰动。

根据以上仿真结果可知,本文保护方案的灵敏



度较高,且受机组运行工况变化的影响较小。

5 结论

本文对比了 3 种常见的 3 次谐波电压定子接地 保护方案,根据一台 300 MW 汽轮发电机的参数,计 算并分析了 3 种保护方案的灵敏度。针对现有的 3 次谐波电压定子接地保护存在误动较多的问题,分 析了导致发电机机端、中性点 3 次谐波电压变化的 原因。在此基础上提出了一种改进型 3 次谐波电压 变化量差动保护,计算了该保护方案下主判据与辅助 判据的灵敏度,并采用 MATLAB/Simulink 对该保护 方案进行了仿真。仿真结果验证了本文保护方案下 灵敏度计算的正确性,表明该保护方案灵敏度较高 且受机组运行工况变化的影响较小。

本文保护方案具体有以下特点:校正后的3次谐 波变化量差动判据在发电机正常运行时差动量理论 值为0;依据发电机的接地参数来整定制动系数,发 生定子接地故障时差动量能够显著大于制动量;检 测主变高压侧3次谐波电压,增加了浮动的制动门 槛,避免主变高压侧3次谐波电压的干扰;机端零 序电压互感器、中性点电压回路断线后应闭锁保护, 高压侧零序电压互感器断线后应提高制动门槛值; 并网瞬间短时闭锁保护,避免机端对地电容变化较 大导致误动。

参考文献:

- 刘亚东,王增平,苏毅,等. 注入式定子接地保护的现场试验、整定和分析[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):150-154.
 LIU Yadong,WANG Zengping,SU Yi,et al. Field test,setting and analysis of injecting source-based stator grounding protection [J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(10):150-154.
- [2] 陈佳胜,张琦雪,陈俊,等. 基于分段相角补偿的注入式定子接地 保护方法[J].现代电力,2014,31(1):79-84. CHEN Jiasheng,ZHANG Qixue,CHEN Jun,et al. Stator earth fault protection with voltage injection based on multi-stage phase compensation[J]. Modern Electric Power,2014,31(1):79-84.
- [3] 高春如. 大型发电机组继电保护整定计算与运行技术[M]. 2版. 北京:中国电力出版社,2010:160-161.

[4] 刘亚东. 大型发电机保护关键技术研究[D]. 北京:华北电力大学,2014.

LIU Yadong. Study on key technology of large generator's protection[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2014.

[5] 毕大强,王祥琦,桂林.基于零序电压故障暂态分量的发电机定 子单相接地保护方案研究[J].中国电机工程学报,2003,23(11): 39-44.

BI Daqiang, WANG Xiangheng, GUI Lin. Protection scheme based on the fault transient component of zero-sequence voltage under the stator ground fault of generators [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 39-44.

[6] 党晓强, 部能灵, 王海田, 等. 大型汽轮发电机定子单相接地的继 电保护评述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2):131-135.

DANG Xiaoqiang, TAI Nengling, WANG Haitian, et al. A review on single phase to ground protection for huge turbine-generators [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2):131-135.

- [7] 王维俭,鲁华富.三次谐波电压式定子接地保护的运行和改进
 [J].中国电力,1995(11):46-49,53.
 WANG Weijian,LU Huafu. Operating and improving of third harmonic voltage stator grounding protection[J]. Electric Power, 1995(11):46-49,53.
- [8] 卢琪.提高三次谐波电压式定子接地保护动作可靠性的措施[J]. 电力自动化设备,2008,28(1):119-121.

LU Qi. Reliability of stator grounding protection based on 3rd harmonic voltage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(1): 119-121.

[9] 黄少锋,孙鹏,王增平,等. 基于三次谐波相角突变原理的发电机 定子接地保护[J]. 电网技术,2000,24(12):70-73.

HUANG Shaofeng, SUN Peng, WANG Zengping, et al. A generator grounding fault protection based on phase-angle mutation of third harmonic voltage[J]. Power System Technology,2000,24(12): 70-73.

- [10] 毕大强,王祥珩,王维俭. 基于 3 次谐波电压故障暂态分量的定 子单相接地保护[J]. 电力系统自动化,2003,27(13):45-49.
 BI Daqiang,WANG Xiangheng,WANG Weijian. Protection scheme based on fault transient component of third harmonic voltage for stator ground fault of generators[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(13):45-49.
- [11] TAI Nengling, JUERGEN S. Differential protection based on zerosequence voltages for generator stator ground fault[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1):116-121.
- [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,2002:205-206.
- [13] 谌争鸣. 大型发电机定子接地保护灵敏度分析与整定计算[J]. 电力系统自动化,2006,30(19):57-60.
 CHEN Zhengming. Analysis of the sensitivity of large-scale generator stator ground protection and its setting caculation[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(19):57-60.
- [14] 中国电力企业联合会.大型发电机变压器继电保护整定计算导则:DL/T 684-2012[S].北京:中国电力出版社,2012.

作者简介:



桑建斌(1986—),男,江苏无锡人,工程师,硕士,通信作者,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail:sangjianbin7@126. com);

包明磊(1977—),男,浙江宁波人,高级 工程师,硕士,主要研究方向为电力系统继 电保护。

Research and improvement of stator grounding protection based on third-harmonic voltage for large-scale turbine generator

SANG Jianbin, BAO Minglei, LI Yuping, LI Ming, XU Yerong (Nanjing SAC Power Grid Automation Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: The sensitivity of three common stator grounding protection schemes based on the third-harmonic voltage is compared and analyzed based on the parameters of a 300 MW turbine generator, which shows that the sensitivity of stator grounding protection schemes may be insufficient in the middle of the stator winding if the turbine generator is connected with the grounding transformer. Considering the frequent maloperation present in the existing stator grounding protection schemes based on the third-harmonic voltage, the causes of third-harmonic voltage variation of the generator terminal and the generator neutral point are analyzed. Based on the above research, an improved stator grounding protection scheme based on third-harmonic voltage variation component differential principle is proposed. The variation of the third-harmonic voltage of the generator terminal are corrected and then adopted to construct the differential criterion with the variation of the third-harmonic voltage of the generator neutral point, which can effectively distinguish the stator grounding faults from the normal change of generators' third-harmonic voltage. In order to avoid false tripping caused by harmonic voltage changes at high voltage side, a floating threshold value is also set according to the variation of the third-harmonic voltage at high voltage side. Simulative results show that the proposed scheme is theoretically correct and slightly affected by the changes of generator operating state with high sensitivity. Key words: steam-turbine-generator; third-harmonic voltage; stator ground protection; relay protection; variation component; sensitivity; simulation