

DOI: 10.7667/PSPC201631

双频式定子接地保护的分析与改进

包明磊^{1,2}, 李玉平^{1,2}, 桑建斌^{1,2}, 徐业荣^{1,2}, 李明^{1,2}

(1. 南京国电南自电网自动化有限公司, 江苏 南京 211100; 2. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要: 介绍了基波零序电压保护原理、三次谐波电压幅值比保护原理、三次谐波电压幅值比突变量保护原理以及三次谐波电压矢量比较保护原理等四种定子接地保护原理, 并根据三台汽轮发电机的参数, 对上述原理进行灵敏度分析。分析表明基波零序电压保护原理与三次谐波电压矢量比较保护原理相配合时灵敏度最高, 但该保护方案在大型机组采用接地变接地时灵敏度仍显不足。针对高压侧三次谐波电压的干扰, 为了同时提高保护方案的灵敏度与可靠性, 提出了一种改进方案。该方案在降低制动系数的同时增加了自适应制动门坎判据, 仿真结果表明该方案能够兼顾灵敏度与可靠性。所得结论为定子接地保护的研发改进提供了参考。

关键词: 双频式定子接地保护; 基波零序电压; 三次谐波电压; 灵敏度; 高压侧三次谐波电压

Analysis and improvement of the dual frequency stator ground fault protection

BAO Minglei^{1,2}, LI Yuping^{1,2}, SANG Jianbin^{1,2}, XU Yerong^{1,2}, LI Ming^{1,2}

(1. Nanjing SAC Power Grid Automation Co., Ltd., Nanjing 211100, China;

2. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: Four protection principles for the stator ground fault are introduced: the fundamental frequency zero-sequence voltage principle, the third harmonic voltage amplitude ratio principle, the fault component of third harmonic voltage amplitude ratio principle and the third harmonic voltage vector comparison principle. The sensitivity of the four principles is analyzed based on the parameters of three turbine generators. Analysis shows that the best combination on sensitivity is the fundamental frequency zero-sequence voltage principle and the third harmonic voltage vector comparison principle. However, their sensitivity may be still insufficient in the case of large generator connected with the grounding transformer. In order to improve the sensitivity and the reliability of the dual frequency stator ground fault protection while considering the disturbance of the high side third harmonic voltage, an improved design is introduced. In this design, the braking coefficient is reduced and the threshold criterion is adaptive, which guarantees both the sensitivity and reliability. The conclusion of this paper can provide reference for the research and development of the stator ground fault protection.

Key words: dual frequency stator ground fault protection; fundamental frequency zero-sequence voltage; third harmonic voltage; sensitivity; high side third harmonic voltage

0 引言

大型发电机定子单相接地时接地电流较大, 如果发生后未及时处理, 易引发相间短路或匝间短路, 严重情况下甚至烧毁铁芯^[1-3]。双重化的定子接地保护通常采用双频式定子接地保护与注入式定子接地保护相结合或者全部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特别是水电机组已有较多应用, 其优点明显, 可直接测量接地电阻且停机后可监视绝缘。但该保护成本较高, 装置现场校正流程复杂^[4-5], 且接地变二次侧电流互感器

的工作特性仍需改善^[6], 因此注入式定子接地不会完全取代双频式定子接地保护。

双频式定子接地保护由基波零序电压保护与三次谐波电压保护组成。基波零序电压保护简单可靠, 但在中性点附近存在死区。三次谐波电压定子接地保护的类型较多, 均能够可靠反应中性点附近的接地故障, 因此实际工程应用中由基波零序电压原理与三次谐波电压原理共同构成100%定子接地保护。但由于大型机组定子绕组对地电容较大, 基波零序电压保护灵敏度较低^[7], 与三次谐波电压保护相配合后灵敏度可能不够, 这就对大型发电机的定子接

地保护提出了更高的要求。在微机保护的处理器速度不断提高的背景下, 有条件通过更优的保护方案来同时提高保护的可靠性与灵敏度。因此, 为了提高定子接地保护的性能, 双频式定子接地保护仍在不断发展, 改进定子接地保护方案很有必要^[8-9]。

本文首先对双频式定子接地保护中的基波零序电压原理、三次谐波电压幅值比原理、三次谐波幅值比突变量原理以及三次谐波电压矢量比较原理进行介绍, 然后根据三台发电机参数, 对上述保护方案的灵敏度进行对比分析。在此基础上, 通过分析高压侧三次谐波电压对保护的影响, 对三次谐波电压矢量比较保护方案进行改进。

1 发电机定子接地电势分析

大型发电机运行时为小电流接地或不接地系统, 单相接地不会使相电流发生显著变化, 因此忽略接地电流对电磁转矩的影响, 接地时发电机机端中性点部分的电压保持不变。假设发电机 C 相定子绕组经接地电阻发生接地故障, 如图 1 所示。

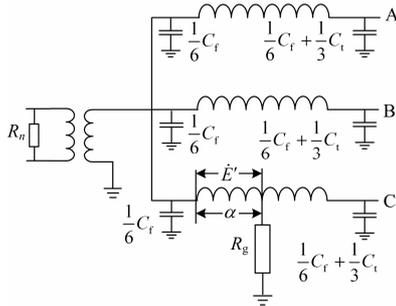


图 1 发电机定子单相接地电路图

Fig. 1 Circuit diagram of the generator with single phase ground fault

图 1 中 α 为中性点到故障点的绕组占全部绕组的比例(中性点接地时 α 为 0, 机端接地时 α 为 1), C_f 是定子三相绕组对地电容, C_t 为机端设备对地电容, R_g 为接地电阻, \dot{E}' 为中性点到绕组接地处的电势向量。

此时的基波零序等效电路如图 2 所示^[2]。

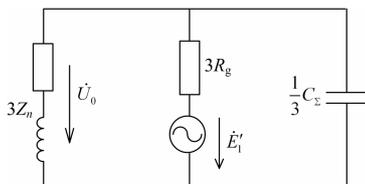


图 2 定子单相接地基波等效电路

Fig. 2 Fundamental harmonic equivalent circuit of the generator with single phase ground fault

图 2 中 R_g 是接地电阻, Z_n 是接地变压器或者消弧线圈等效一次阻抗, C_s 是定子绕组对地总电容, \dot{U}_0 是中性点零序电压向量, \dot{E}'_1 为中性点到绕组接地处的基波电势向量。

忽略主变高低压侧每相耦合电容与高压侧三次谐波电压的影响, 此时定子接地故障时的三次谐波等效电路如图 3 所示^[8-11]。

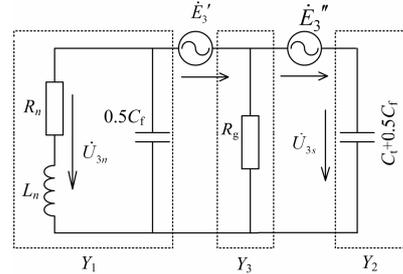


图 3 发电机定子接地三次谐波等效电路

Fig. 3 Third harmonic equivalent circuit of the generator with single phase ground fault

图 3 中 \dot{U}_{3s} 为机端三次谐波电压, \dot{U}_{3n} 为中性点三次谐波电压, R_n 、 L_n 为中性点接地变或消弧线圈的等效接地电阻与电感, \dot{E}'_3 为中性点到绕组接地处的三次谐波电势向量, \dot{E}''_3 是绕组接地处到机端的三次谐波电势向量。Y₁、Y₂、Y₃ 为各自虚线框所包含的导纳, 表达式为

$$\begin{cases} Y_1 = \frac{1}{R_n + j\omega_3 L_n} + 0.5j\omega_3 C_f \\ Y_2 = j\omega_3 (0.5C_f + C_t) \\ Y_3 = \frac{1}{R_g} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, ω_3 是三次谐波角频率。根据图 3, 可以求得 \dot{U}_{3s} 及 \dot{U}_{3n} , 表达式为

$$\begin{cases} \dot{U}_{3s} = \frac{\dot{E}'_3 Y_1 + \dot{E}''_3 Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3} \\ \dot{U}_{3n} = -\frac{\dot{E}'_3 Y_2 + \dot{E}''_3 Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3} \end{cases} \quad (2)$$

本文将常见的 60°相带双分支并联型汽轮发电机作为研究对象, 发电机单个分支有 9 匝绕组, 各匝绕组的基波电势向量 \dot{E}'_{1-n} (或三次谐波电势向量 \dot{E}'_{3-n}) 幅值相等, 相位不同, 电势向量如图 4 所示^[11]。

图 4 (a) 中单分支所有匝基波电势组成一段 60°圆心角的弧线, $\dot{E}'_1(\overline{NS})$ 是单相基波电势向量, $\dot{E}'_1(\overline{NG})$ 为中性点到绕组接地处的基波电势向量, α 是接地位置。当接地发生在分支一时, \dot{E}'_1 表达式为

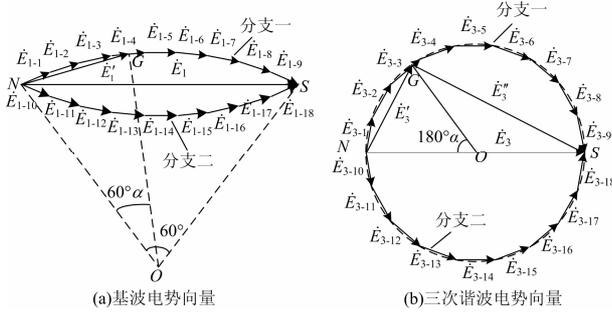


图4 定子接地时发电机电势向量

Fig. 4 Voltage vector when the stator grounding occurs

$$\dot{E}'_1 = \dot{E}_1 e^{-j60^\circ} (1 - e^{-j60^\circ \alpha}) \quad (3)$$

当接地发生在分支二时, \dot{E}'_1 表达式为

$$\dot{E}'_1 = \dot{E}_1 e^{j60^\circ} (1 - e^{j60^\circ \alpha}) \quad (4)$$

图4(b)中单分支所有匝三次谐波电势组成一个半圆, $\dot{E}_3(\overline{NS})$ 是发电机三次谐波电势向量, $\dot{E}'_3(\overline{NG})$ 为中性点到绕组接地处的三次谐波电势向量, $\dot{E}''_3(\overline{GS})$ 是绕组接地处到机端的三次谐波电势向量。当接地发生在分支一时, \dot{E}'_3 、 \dot{E}''_3 表达式为

$$\begin{cases} \dot{E}'_3 = \frac{1}{2} \dot{E}_3 (1 - e^{-j180^\circ \alpha}) \\ \dot{E}''_3 = \frac{1}{2} \dot{E}_3 (1 + e^{-j180^\circ \alpha}) \end{cases} \quad (5)$$

当接地发生在分支二时, \dot{E}'_3 、 \dot{E}''_3 表达式为

$$\begin{cases} \dot{E}'_3 = \frac{1}{2} \dot{E}_3 (1 - e^{j180^\circ \alpha}) \\ \dot{E}''_3 = \frac{1}{2} \dot{E}_3 (1 + e^{j180^\circ \alpha}) \end{cases} \quad (6)$$

2 双频式定子接地保护方案及灵敏度分析

2.1 双频式定子接地保护原理介绍

双频式定子接地保护一般是由基波零序电压保护原理和一种三次谐波电压原理共同构成, 各保护原理的特征方程如下所示。

(1) 基波零序电压保护原理

$$|\dot{U}_0| > U_{0set} \quad (7)$$

(2) 三次谐波电压幅值比保护原理

$$|\dot{U}_{3s}(t)| > K_{set2} |\dot{U}_{3n}(t)| \quad (8)$$

(3) 三次谐波幅值比突变量保护原理

$$\left| \frac{\dot{U}_{3s}(t)}{\dot{U}_{3n}(t)} - \frac{\dot{U}_{3s}(t-\Delta t)}{\dot{U}_{3n}(t-\Delta t)} \right| > K_{set3} \quad (9)$$

(4) 三次谐波电压矢量比较保护原理

$$\begin{cases} |\dot{U}_{3n}(t) + \dot{K} \dot{U}_{3s}(t)| > K_{set4} |\dot{U}_{3n}(t)| \\ \dot{K} = -\frac{\dot{U}_{3n}(t-\Delta t)}{\dot{U}_{3s}(t-\Delta t)} \end{cases} \quad (10)$$

式(7)中: \dot{U}_0 是基波零序电压向量; U_{0set} 是基波零序电压定值。

式(8)一式(10)中: $\dot{U}_{3n}(t)$ 与 $\dot{U}_{3s}(t)$ 分别是当前时刻的中性点三次谐波电压向量与机端三次谐波电压向量; $\dot{U}_{3n}(t-\Delta t)$ 、 $\dot{U}_{3s}(t-\Delta t)$ 分别是前 Δt 时刻的中性点三次谐波电压向量与机端三次谐波电压向量; K_{set2} 、 K_{set3} 、 K_{set4} 为各自方案的制动系数。

基波零序电压保护原理利用定子接地时基波零序电压抬高的特点, 是双频式定子接地保护的基础, 但由于中性点接地时, 基波零序电压无法升高, 原理存在死区, 因此大型机组的定子接地保护还需配置三次谐波电压原理。

三次谐波电压幅值比保护原理将 $\dot{U}_{3s}(t)$ 的幅值作为动作量, 将 $\dot{U}_{3n}(t)$ 的幅值与 K_{set1} 的乘积作为制动量, 发电机中性点附近接地后其动作量将远大于制动量, 从而构成定子接地保护原理。

三次谐波幅值比突变量保护原理计算 $\dot{U}_{3s}(t)$ 与 $\dot{U}_{3n}(t)$ 的幅值比以及 $\dot{U}_{3s}(t-\Delta t)$ 与 $\dot{U}_{3n}(t-\Delta t)$ 的幅值比, 然后将两个比值之差与 K_{set2} 比较, 定子未接地时该比值差为零, 接地后该比值差将大于 0。

三次谐波电压矢量比较保护原理引入机端三次谐波电压的调整系数 \dot{K} , 该系数根据机端、中性点三次谐波电压记忆值计算得到, 可以实时调整, 也可以手动调整, 使动作量在机组正常运行时保持为最小, 在接地故障发生时, \dot{K} 系数仍然由故障前的发电机等效三次谐波电路参数决定, 而 $\dot{U}_{3s}(t)$ 与 $\dot{U}_{3n}(t)$ 已经是故障时电压, 式(10)中计算得到的动作量不再为零, 在一定的制动系数下能够较灵敏地反应定子接地故障。

2.2 双频式定子接地保护的灵敏度计算

本文将将以三台发电机为例, 从两个角度对接地保护原理的灵敏度进行计算分析, 发电机的接地参数如表 1 所示^[11]。

表 1 三台发电机的接地参数

Table 1 Grounding parameters of three generators

机组	发电机 1	发电机 2	发电机 3
容量	300 MW	300 MW	1 026 MW
特点	无机端吸收电容	含机端吸收电容	无机端吸收电容
$C_f/\mu\text{F}$	0.528	0.528	1.029
$C_l/\mu\text{F}$	0.048	0.348	0.099 9
$C_z/\mu\text{F}$	0.576	0.876	1.128 9
R_n/Ω	5 529	3 636	2 821
L_n/H	21.13	13.89	10.78

表 1 中 C_f 为定子三相绕组对地电容, C_t 为发电机机端外部设备对地电容, C_Σ 为发电机对地总电容, R_n 为接地变接地时的等效接地电阻, L_n 为消弧线圈接地欠补偿运行时的等效接地电感。

2.2.1 机组参数对基波零序电压保护灵敏度的影响

基波零序电压保护原理的定值设置需要同时躲过发电机正常运行时中性点的基波最大不平衡电压与主变高压侧单相接地时耦合到低压侧的最大零序电压, 此处按照经验值设定 10 V。

根据式(3)、式(4)、图 2 和表 1 的参数, 可以计算得到三台发电机的基波零序电压保护在不同接地方式下的灵敏度, 如图 5 所示。

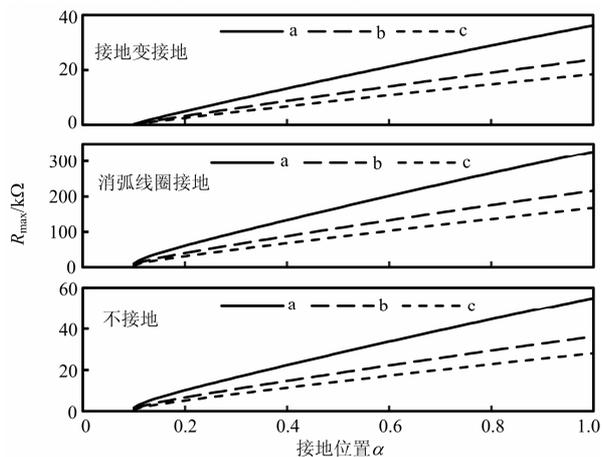


图 5 不同接地方式下基波零序电压保护的灵敏度
Fig. 5 Sensitivity of $3U_0$ protection principle under the different grounding modes

图 5 中, 曲线 a 表示 300 MW 发电机在无机端吸收电容时的灵敏度曲线, 曲线 b 表示 300 MW 发电机在含机端吸收电容时的灵敏度曲线, 曲线 c 表示 1 026 MW 发电机在无机端吸收电容时的灵敏度曲线。

可见, 基波零序电压保护原理在接地变接地时灵敏度最低, 而在同一种接地方式下, 灵敏度随着发电机对地总电容 C_Σ 的增大而降低。

随着机组对地电容的增大, 基波零序电压保护原理的低灵敏度区域将从中性点附近向绕组中部扩大, 如果配合的三次谐波电压保护原理灵敏度不够, 将会导致双频式定子接地保护方案整体的灵敏度出现薄弱环节, 在特定定子位置不能提供高灵敏的保护。

2.2.2 三次谐波电压保护原理的灵敏度分析

本文以第 2 台发电机(含机端吸收电容的 300 MW 发电机)为例, 研究三种三次谐波电压保护原理的灵敏度。

三次谐波电压幅值比保护原理的制动系数 K_{set2} 通常在投运阶段采用实测方式获取, 即实测机端三次谐波电压与中性点三次谐波电压的比值, 然后放大 1.2~1.5 倍。接地变接地方式下

$$K_{set2} = 1.2 \times \frac{1/R_n + 0.5j\omega_3 C_f}{j\omega_3 (0.5C_f + C_t)} \approx 0.78$$

消弧线圈接地方式下

$$K_{set2} = 1.2 \times \frac{1/j\omega_3 L_n + 0.5j\omega_3 C_f}{j\omega_3 (0.5C_f + C_t)} \approx 0.36$$

不接地方式下

$$K_{set2} = 1.2 \times \frac{0.5C_f}{0.5C_f + C_t} \approx 0.52$$

三次谐波幅值比突变量保护原理和三次谐波电压矢量比较保护原理的制动系数在相应的定值整定规程中未明确要求^[12], 而是由厂家自行规定, 一般取 0.2~0.8, 这里不妨设得灵敏些, 在不同接地方式下均取 $K_{set3} = K_{set4} = 0.2$ 。

根据式(1)~式(10)、图 3 和表 1 中的参数, 可以计算得到在不同接地方式下各保护原理的灵敏度曲线, 如图 6—图 8 所示。

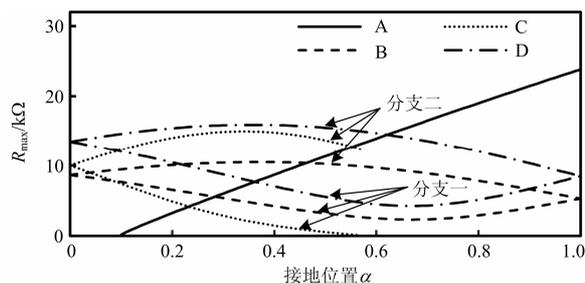


图 6 接地变接地方式下四种原理的灵敏度
Fig. 6 Sensitivity of four principles under the grounding transformer mode

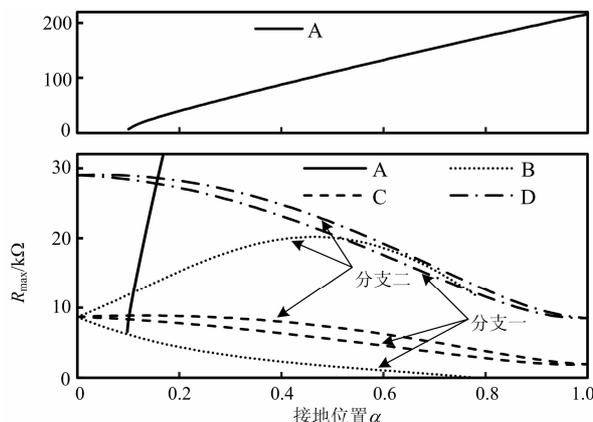


图 7 消弧线圈接地方式下四种原理的灵敏度

Fig. 7 Sensitivity of four principles under the arc suppression coil grounding mode

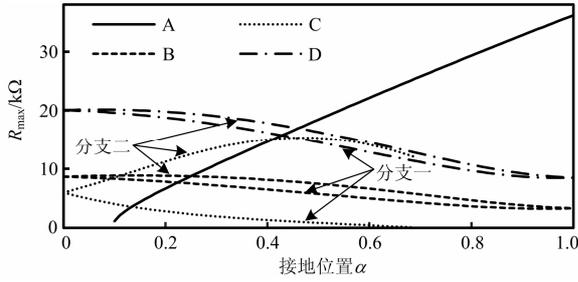


图 8 不接地方式下四种原理的灵敏度

Fig. 8 Sensitivity of four principles under the non-grounding mode

图 6—图 8 中，曲线 A 表示基波零序电压保护原理的灵敏度曲线，曲线 B 表示三次谐波电压幅值比保护原理的灵敏度曲线，曲线 C 表示三次谐波幅值比突变量保护原理的灵敏度曲线，曲线 D 表示三次谐波电压矢量比较保护原理的灵敏度曲线。

分析上述计算结果可得：

(1) 基波零序电压保护原理在分支一、分支二的灵敏度曲线是重合的，而三次谐波原理在分支一上的灵敏度均小于在分支二上的灵敏度，因此我们将重点分析保护在分支一上的灵敏度是否满足要求；

(2) 三次谐波原理的灵敏度在不同接地方式下并不一致，但是三次谐波电压矢量比较保护原理在不同接地方式下的灵敏度均为最高，因此采用基波零序电压保护原理与三次谐波电压矢量比较保护原理共同构成的 100% 定子接地保护方案将是最优的方案；

(3) 在接地变接地方式下，虽然基波零序电压保护原理与三次谐波电压矢量比较保护原理配合后的灵敏度最高，但其灵敏度在绕组距中性点约 1/3 处仍不足 10 kΩ，同时工程应用中可能会选取更高可靠的制动系数，灵敏度会进一步降低，从而不能为该处的接地故障提供高灵敏的保护，因此有必要对该种双频式定子接地保护方案进行改进。

3 双频式定子接地保护方案的改进

3.1 可靠性因素分析和方案改进

影响三次谐波电压保护可靠性的因素有很多，排除接线错误、定值设置不当等原因，在保护原理上还有随着发电机与系统的运行工况改变时主变高压侧饱和引起的三次谐波电压传递至低压侧导致保护误动的因素^[11,13]。本节将具体分析该因素对保护的影响，并找出解决改进的方案。

考虑主变高压侧饱和引起的三次谐波电压，发电机正常运行时的三次谐波等效电路如图 9 所示^[11,14]。

图 9 中 C_M 为主变高低压侧每相耦合电容， \dot{E}_{3h} 为主变高压侧三次谐波电压。

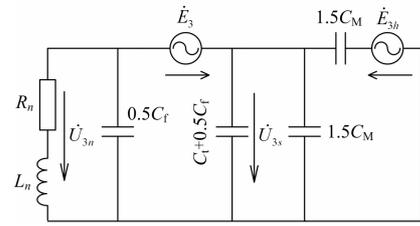


图 9 发电机正常运行时三次谐波等效电路

Fig. 9 Third harmonic equivalent circuit of the generator containing third harmonic voltage of the main transformer high voltage side

当 \dot{E}_{3h} 发生变化时， \dot{E}_{3h} 的变化量为

$$\Delta \dot{E}_{3h}(t) = \dot{E}_{3h}(t) - \dot{E}_{3h}(t - \Delta t)$$

$\Delta \dot{E}_{3h}(t)$ 传递至主变低压侧将导致保护动作量增加，动作量为

$$|\dot{U}_{3n}(t) + \dot{K}\dot{U}_{3s}(t)| = |\gamma \Delta \dot{E}_{3h}(t)(1 + \dot{K})| \quad (11)$$

式中， γ 是主变高、低压侧三次谐波电压传递系数，表达式为

$$\gamma = \frac{1.5j\omega_3 C_M}{3j\omega_3 C_M + \frac{1}{R_n + j\omega_3 L_n} + j\omega_3 (C_f + C_t)} \quad (12)$$

此时式(10)中的动作量将不等于 0，如果制动系数 K_{set4} 设置过低，将会导致该动作量大于制动量 $K_{set4} |\dot{U}_{3n}(t)|$ ，保护会误动。

工程应用中一般通过提高 K_{set4} 躲过这种高压侧三次谐波电压波动带来的影响，来提高保护的可靠性，此时双频式定子接地保护的灵敏度将进一步降低，不利于定子的保护。

根据以上分析，保护可以在降低制动系数 K_{set4} 的同时，增加一个辅助制动门坎，该门坎随着主变高压侧三次谐波电压的增大而增大，只有当动作量同时大于制动量和辅助制动门坎时，保护才能动作。

改进后的三次谐波电压矢量比较保护的判据为

$$\begin{cases} |\dot{U}_{3n}(t) + \dot{K}\dot{U}_{3s}(t)| > U_z \\ U_z = \max(K_{set4} |\dot{U}_{3n}(t)|, 1.2 |\gamma(1 + \dot{K})| |\Delta \dot{E}_{3h}(t)|) \\ \dot{K} = -\frac{\dot{U}_{3n}(t - \Delta t)}{\dot{U}_{3s}(t - \Delta t)} \end{cases} \quad (13)$$

式中， γ 是式(12)所示的主变高低压侧三次谐波电压传递系数，可作为定值输入，1.2 是可靠系数。

在使用这个动作方程时 K_{set4} 将可以设置的尽量灵敏，当发电机与系统稳定运行时， $|\Delta \dot{E}_{3h}(t)|$ 等于 0，式(13)中的 U_z 将会很小，保护将具有较高的

灵敏度, 当发电机与系统的运行工况改变时, U_z 将随着主变高压侧三次谐波电压的增大而增大, 防止因此造成的保护误动, 有较高的可靠性。

3.2 改进方案的灵敏度和可靠性仿真

本文仍然以第 2 台发电机(含机端吸收电容的 300 MW 发电机)为例, 验算改进后的双频式定子接地保护方案的灵敏度和可靠性。

在发电机与系统稳定运行时, 根据表 1 中的参数, 可以计算得到不同制动系数 K_{set4} 时基波零序电压保护原理与三次谐波电压矢量比较保护原理相配合的灵敏度曲线, 如图 10 所示。

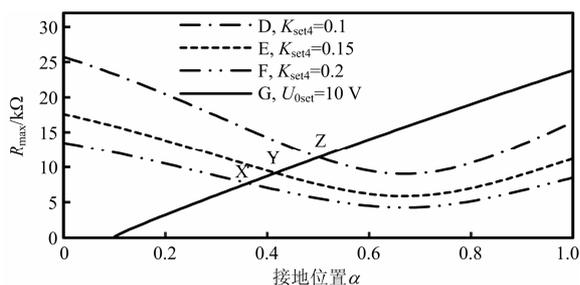


图 10 制动系数对矢量比较算法灵敏度的影响

Fig. 10 Influence of sensitivity of the third harmonic voltage vector comparison algorithm under different braking coefficients

图 10 中, 曲线 D、E、F 分别表示 $K_{set4} = 0.1$ 、 $K_{set4} = 0.15$ 、 $K_{set4} = 0.2$ 时三次谐波电压矢量比较保护原理的灵敏度曲线, 曲线 G 表示 $U_{0set} = 10\text{V}$ 时基波零序电压保护原理的灵敏度曲线。可见随着 K_{set4} 的降低, 灵敏度最低点从 X 点升至 Z 点, 灵敏度的提升效果是明显的, 因此降低制动系数可以提供较高的灵敏度。

发电机与系统的运行工况改变时, 没有发生接地故障, 但主变高压侧三次谐波电压发生较大波动, 此时三次谐波电压矢量比较保护的动作用量会随之波动。下面对改进方案抗主变高压侧三次谐波电压影响的能力进行仿真。

已知发电机额定线电压为 18 kV, 主变高低压侧每相耦合电容为 C_M 为 $0.0047\ \mu\text{F}$, 发电机三次谐波电压幅值为额定相电压的 1%, 设高压侧三次谐波电压的相位同发电机相电压一致, 根据图 9 和表 1 中的参数, 可以计算得到 $K_{set4} = 0.1$ 时改进前后三次谐波电压矢量比较保护原理的动作曲线, 如图 11 所示。

图 11 中, 曲线 1 是动作用量曲线, 曲线 2 是改进前算法的制动曲线, 曲线 3 是改进后算法的制动曲线。可见主变高压侧三次谐波电压的确会对原有的算法产生负面的影响, 当制动系数取的较灵敏的时候, 较小的电压扰动就能造成保护误动, 使用单一的判据很难同时满足保护可靠性和灵敏度要求; 在

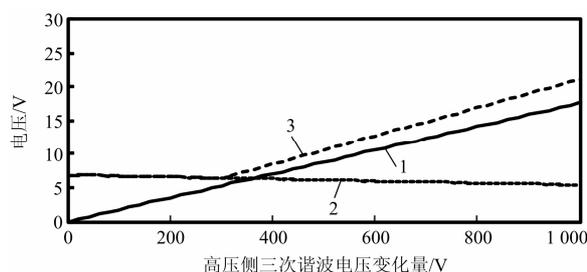


图 11 主变高压侧三次谐波电压变化量对矢量比较算法可靠性的影响

Fig. 11 Impact of third harmonic voltage of the main transformer high voltage side to the reliability of the third harmonic voltage vector comparison algorithm

使用改进后的保护算法时, 无论主变高压侧三次谐波电压如何波动, 动作用量始终小于制动量, 可确保无接地故障时保护的可靠性。

仿真结果表明, 改进后的算法可以选用较小的制动系数, 对定子接地故障有较高的灵敏度, 且提供了自适应的制动量算法, 有效防止主变高压侧三次谐波电压造成的误动, 兼顾了可靠性和灵敏度的需求。

4 结语

本文介绍了基波零序电压保护原理、三次谐波电压幅值比保护原理、三次谐波电压幅值比突变量保护原理以及三次谐波电压矢量比较保护原理等四种定子接地保护原理, 并根据三台汽轮发电机的参数, 计算分析了四种保护原理的灵敏度, 指出基波零序电压保护原理与三次谐波电压矢量比较保护原理配合时灵敏度最高, 但该方案在大型机组采用接地变接地时灵敏度仍显不足。针对高压侧三次谐波电压的干扰, 为了同时提高保护方案的灵敏度与可靠性, 本文提出了一种改进方案, 该方案在降低制动系数的同时增加了自适应制动门坎判据, 仿真结果表明该方案能够兼顾灵敏度与可靠性, 文中所得结论为定子接地保护的研发改进提供了参考。

参考文献

- [1] 党晓强, 邵能灵, 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.
- [2] 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 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.

[3] 沈浩然, 张建华, 丁磊, 等. 双馈异步发电机单相接地故障瞬态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 6-11.
SHEN Haoran, ZHANG Jianhua, DING Lei, et al. Transient characteristic research of doubly-fed induction generator during single-phase grounding fault[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 6-11.

[4] 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.

[5] 张琦雪, 席康庆, 陈佳胜, 等. 大型发电机注入式定子接地保护的现场应用及分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(11): 103-107.
ZHANG Qixue, XI Kangqing, CHEN Jiasheng, et al. Field Application and analysis of the stator earth fault protection with voltage injection for large-sized generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(11): 103-107.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 黄少锋, 孙鹏, 王增平. 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. A generator grounding fault protection based on phase-angle mutation of third harmonic voltage[J]. Power System Technology, 2000, 24(12): 70-73.

[9] 苏洪波, 尹项根, 陈德树. 微机自适应式发电机定子接地保护的研究[J]. 电网技术, 1996, 20(11): 60-67.
SU Hongbo, YIN Xianggen, CHEN Deshu. A microcomputer based adaptive generator protection for stator ground fault[J]. Power System Technology, 1996, 20(11): 60-67.

[10] 谔争鸣. 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 calculation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 57-60.

[11] 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.

[12] 中国电力企业联合会. DL/T 684-2012, 大型发电机变压器继电保护整定计算导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
China Electricity Council. DL/T 684-2012, guide of calculating settings of relay protection for large generator and transformer[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.

[13] 张健康, 粟小华, 夏芸. 750 kV 变压器保护配置及整定计算探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 89-94.
ZHANG Jiankang, SU Xiaohua, XIA Yun. Discussion on protection configuration and setting calculation for 750 kV transformer[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 89-94.

[14] 蔡云峰, 徐洋, 潘琪. 基于自定义模型的变压器纵差动保护 PSCAD 仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 118-122.
CAI Yunfeng, XU Yang, PAN Qi. PSCAD simulation of transformer longitudinal differential protection based on custom model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 118-122.

收稿日期: 2016-03-05; 修回日期: 2016-05-29

作者简介:

包明磊 (1977-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: minglei-bao@sac-china.com

李玉平 (1978-), 男, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护;

桑建斌 (1986-), 男, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护。

(编辑 姜新丽)