

20Hz 注入式定子接地保护在扩大单元接线发电机组上的应用

刘春秋¹, 葛宝明¹, 毕大强²

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044; 2. 电力系统国家重点实验室, 清华大学电机系, 北京 100084)

摘要: 针对目前注入式定子接地保护不具备选择性, 无法应用在扩大单元接线发电机组的问题, 提出了一种新的注入式定子接地保护方案。该方案首先计算发电机组接地电阻的值以判断是否存在接地故障, 当检测到接地故障后, 以注入的 20 Hz 电压的相位为基准, 将测量到的发电机中性点与机端处的 20 Hz 电流作差后的相位与之比较, 通过这个相位关系来判断故障发电机, 实现选择性停机。仿真结果验证了新方案计算接地故障过渡电阻和判断故障发电机的准确性, 实现了注入式定子接地保护在扩大单元接线机组上的应用。

关键词: 扩大单元接线; 发电机; 注入式; 定子接地保护; 接地变压器

Application of injecting 20 Hz source-based stator ground fault protection for generators in expanded unit connection

LIU Chun-qiu¹, GE Bao-ming¹, BI Da-qiang²

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. State Key Lab of Power Systems, Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: At present, the stator ground fault protection of generator through injecting 20 Hz voltage cannot be used in generators connected to expansion units due to lack of selectivity. This paper proposes an improved protection scheme to realize the selectivity. The proposed scheme firstly calculates the ground resistance value of generators to determine whether ground fault occurs. When the ground fault is detected, the 20 Hz differential current between the neutral and terminal of each generator can be obtained. The phase relationship between the 20 Hz differential current and injected 20 Hz voltage is derived. The new protection scheme can determine the fault generator according to the phase relationship, so that it can achieve a selective shutdown. The simulation results verify the accuracy of calculating the grounding transition resistance and selecting the fault generator, which realizes the application of the injecting stator ground fault protection in the generators connected to expanding units.

Key words: expansion unit connection; generator; injecting source; stator ground fault protection; earthing transformer

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)03-0040-06

0 引言

发电机定子单相接地是发电机的一种主要故障类型, 如不及时处理将严重危及定子线棒和铁芯的安全, 并且定子单相接地故障往往是相间或匝间短路的先兆。因此, 定子接地保护是发电机保护中十分重要的保护, 它对于预防定子绕组严重短路故障具有重要意义^[1]。目前, 国内外应用较多的发电机定子单相接地保护方案主要有基波零序电压型保护^[2], 3次谐波电压型保护^[3-4], 外加电源型保护^[5-8]等。其中, 外加电源注入式发电机定子接地保护具有不受机组运行状况影响、灵敏度高、无死区等特点, 既能在 100%范围内测量定子接地故障电阻,

同时也能反映定子绕组绝缘下降, 起到对绝缘老化监视的作用, 因此注入式定子接地保护有着更好的应用前景。

但中小型水电站的发电机一般采用扩大单元接线方式, 此时注入式定子接地保护不具备选择性, 无法判断故障发电机, 不能区分接地故障位于机内还是机外, 严重限制了注入式保护在这些中小型机组上的应用。

针对上述问题, 本文提出了一种新的注入式发电机定子接地保护方案, 该方案首先通过计算发电机组接地电阻的值来判断是否存在接地故障。当发生接地故障后, 以注入的 20 Hz 电压相位为基准, 将测量到的发电机中性点与机端处的 20 Hz 电流作差, 其相位与基准比较, 通过这个相位关系来判断故障发电机, 实现选择性停机。

基金项目: 中国电机工程学会电力青年科技创新项目资助

1 扩大单元接线发电机组接地电阻的计算

1.1 系统接线图

以两台发电机并列运行的双机一变发电机组系统为例,其注入式定子接地保护接线如图 1 所示。图 1 中,两台并列运行的发电机 G_1 、 G_2 分别经配电变压器 T_{n1} 、 T_{n2} 接地。在接地变压器 T_{n1} 的二次侧注入 20 Hz 方波电源,通过检测 T_{n1} 二次侧的电流和测量电阻两端的电压来计算系统的接地电阻值。

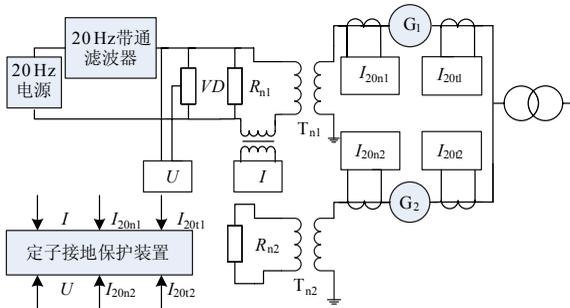


图 1 双机一变机组注入式定子接地保护原理

Fig.1 Principle of injecting stator ground protection for double converter generators connected as expanding unit

1.2 接地电阻的计算

在接地电阻计算过程中,考虑了配电变压器 T_{n1} 、 T_{n2} 的参数^[9-10],其等值电路见图 2。图 2 中 R_{12} 、 X_{12} 为 T_{n1} 二次绕组的漏电阻、漏电抗。 R'_{11} 、 X'_{11} 为 T_{n1} 一次绕组的漏电阻、漏电抗归算到二次侧的值。 R'_{m1} 、 X'_{m1} 为 T_{n1} 的激磁电阻、激磁电抗归算到二次侧的值。 R_{22} 、 X_{22} 为 T_{n2} 二次绕组的漏电阻、漏电抗。 R'_{21} 、 X'_{21} 为 T_{n2} 一次绕组的漏电阻、漏电抗归算到二次侧的值。 R'_{m2} 、 X'_{m2} 为 T_{n2} 的激磁电阻、激磁电抗归算到二次侧的值。 R'_g 为发电机绕组单相接地的过渡电阻归算到二次侧的值。 X'_c 为归算到 T_n 二次侧的两台发电机三相绕组对地容抗值,分析中假设两台接地变压器的变比相同,均为 k 。

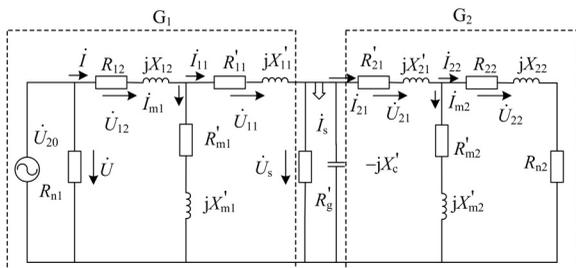


图 2 保护测量回路的等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit diagram for measurement

由图 2 可以得到,对于发电机 1,有下方程:

$$\begin{cases} \dot{U}_{12} = \dot{I}(R_{12} + jX_{12}) \\ \dot{I}_{m1} = (\dot{U} - \dot{U}_{12}) / (R'_{m1} + jX'_{m1}) \\ \dot{I}_{11} = \dot{I} - \dot{I}_{m1} \\ \dot{U}_{11} = \dot{I}_{11}(R'_{11} + jX'_{11}) \end{cases} \quad (1)$$

因此可以得到:

$$\dot{U}_s = \dot{U} - \dot{U}_{12} - \dot{U}_{11} \quad (2)$$

对于发电机 2,有:

$$\begin{cases} \dot{I}_{21} = \dot{I}_{11} - \dot{I}_s \\ \dot{U}_{21} = \dot{I}_{21}(R'_{21} + jX'_{21}) \\ \dot{I}_{m2} = (\dot{U}_s - \dot{U}_{21}) / (R'_{m2} + jX'_{m2}) \\ \dot{I}_{22} = \dot{I}_{21} - \dot{I}_{m2} \\ \dot{I}_{22} = (\dot{U}_s - \dot{U}_{21}) / (R_{22} + R_{n2} + jX'_{22}) \end{cases} \quad (3)$$

因此可以得到:

$$\dot{I}_s = \dot{I}_{11} - \dot{U}_s Z_1 / (1 + Z_2 + Z_3) \quad (4)$$

其中:

$$Z_1 = \frac{1}{R_{22} + R_{n2} + jX'_{22}} + \frac{1}{R'_{m2} + jX'_{m2}}$$

$$Z_2 = \frac{R'_{21} + jX'_{21}}{R'_{m2} + jX'_{m2}}$$

$$Z_3 = \frac{R'_{21} + jX'_{21}}{R_{22} + R_{n2} + jX'_{22}}$$

由式(2)、(4)可得发电机绕组对地的导纳归算到

配电变压器的二次值为 $Y = \dot{I}_s / \dot{U}_s$,保护计算的发电机绕组对地电阻(即接地故障的过渡电阻) R_g 为:

$$R_g = k^2 \times 1 / \text{Re}(Y)$$

2 注入 20 Hz 电压电流的相位分析

2.1 当发电机定子绕组发生单相接地故障时的 20 Hz 电压电流等值电路分析

当发电机 1 定子绕组距中性点 α 处(α 为故障点到中性点的匝数占全部绕组匝数的百分比)发生单相接地故障时,其 20 Hz 电压电流等值电路如图 3 所示,图中 C_g 为发电机定子绕组每相对地电容,

C_t 为发电机外部系统单相对地电容之和。 \dot{I}_{20n1} 、 \dot{I}_{20n2} 为分别流过各发电机中性点侧的注入 20 Hz 电源电流。 \dot{I}_{20t1} 、 \dot{I}_{20t2} 为分别流过各发电机机端处的注入 20 Hz 电源电流， \dot{U}_{20} 为注入的 20 Hz 电源电压。此处各值均为变压器一次侧的值。

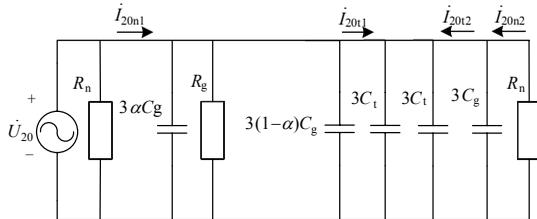


图 3 G_1 发生接地故障时的 20 Hz 等效电路
Fig.3 20Hz equivalent circuit of G_1 earth fault

令 $\Delta \dot{I}_{20} = \dot{I}_{20n} - \dot{I}_{20t}$ ，由图 3 可得，此时对于发电机 1 有：

$$\dot{I}_{20n1} = \dot{U}_{20} \left[\frac{1}{R_g} + \frac{1}{R_n} + 6j\omega(C_t + C_g) \right]$$

$$\dot{I}_{20t1} = \dot{U}_{20} \left[\frac{1}{R_n} + j3\omega(C_g + 2C_t) \right]$$

$$\Delta \dot{I}_{201} = \dot{I}_{20n1} - \dot{I}_{20t1} = \dot{U}_{20} \left(\frac{1}{R_g} + j3\omega C_g \right) \quad (5)$$

$$\phi_1 = \arg \Delta \dot{I}_{201} - \arg \dot{U}_{20} \quad (6)$$

其中， $\omega = 2\pi f$ ，为角频率。

由式 (5) 可以得到，此时对于故障发电机， $\Delta \dot{I}_{201}$ 的相位超前 \dot{U}_{20} 的相位在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间，即此时 ϕ_1 的范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。

对于发电机 2，有：

$$\dot{I}_{20n2} = -\frac{\dot{U}_{20}}{R_n}$$

$$\dot{I}_{20t2} = -\dot{U}_{20} \left(\frac{1}{R_n} + j3\omega C_g \right)$$

$$\Delta \dot{I}_{202} = \dot{I}_{20n2} - \dot{I}_{20t2} = \dot{U}_{20} j3\omega C_g \quad (7)$$

$$\phi_2 = \arg \Delta \dot{I}_{202} - \arg \dot{U}_{20} = \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

由式 (7) 可见，对于非故障发电机 $\Delta \dot{I}_{202}$ 的相位超前 \dot{U}_{20} 的相位 90° ，即此时 ϕ_2 的值为 90° 。

2.2 发电机区外发生单相接地故障时的 20 Hz 电压电流等效电路

当发电机区外发生单相接地故障时，其 20 Hz 等效电路如图 4 所示。

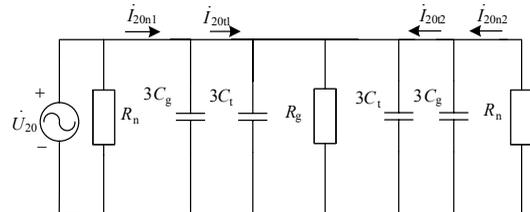


图 4 发电机区外接地故障时的 20 Hz 电路图
Fig.4 20 Hz equivalent circuit of external earth fault

由图 4 可以得到，此时对于发电机 1 有：

$$\dot{I}_{20n1} = \dot{U}_{20} \left[\frac{1}{R_g} + \frac{1}{R_n} + 6j\omega(C_t + C_g) \right]$$

$$\dot{I}_{20t1} = \dot{U}_{20} \left[\frac{1}{R_g} + \frac{1}{R_n} + 3j\omega(2C_t + C_g) \right]$$

$$\Delta \dot{I}_{201} = \dot{I}_{20n1} - \dot{I}_{20t1} = \dot{U}_{20} j3\omega C_g \quad (9)$$

$$\phi_1 = \arg \Delta \dot{I}_{201} - \arg \dot{U}_{20} = \frac{\pi}{2} \quad (10)$$

同理可得，对于发电机 2 有：

$$\dot{I}_{20n2} = -\frac{\dot{U}_{20}}{R_n}$$

$$\dot{I}_{20t2} = -\dot{U}_{20} \left(\frac{1}{R_n} + j3\omega C_g \right)$$

$$\Delta \dot{I}_{202} = \dot{I}_{20n2} - \dot{I}_{20t2} = \dot{U}_{20} j3\omega C_g \quad (11)$$

$$\phi_2 = \arg \Delta \dot{I}_{202} - \arg \dot{U}_{20} = \frac{\pi}{2} \quad (12)$$

由式 (9)、(11) 可以得到，当发电机区外发生单相接地故障时，对于发电机 1 和发电机 2 均有 $\Delta \dot{I}_{20}$ 的相角超前于 \dot{U}_{20} 的相角 90° ，即此时 ϕ 的值为 90° 。

在上面接地电阻 R_g 以及相角 ϕ 的计算中均采用傅氏分解的方法，以 10 Hz 为基频，提取电压、电流的二次谐波分量来计算得到 R_g 和 ϕ 的值。采用此种方法不仅可以有效地提取 20 Hz 分量，而且可滤除其他所有 10 Hz 的倍频信号（主要是 50 Hz 工频）干扰信号。

3 扩大单元接线发电机组注入式定子接地保护原理

3.1 保护原理

由上面的分析可以推出以下结论:

当发电机内部发生定子单相接地故障时,对于故障发电机, $\Delta \dot{I}_{20}$ 的相角超前 \dot{U}_{20} 的相角 $0^\circ \sim 90^\circ$; 而非故障发电机的 $\Delta \dot{I}_{20}$ 的相角超前 \dot{U}_{20} 的相角 90° 。当发电机区外发生单相接地故障时,所有发电机的 $\Delta \dot{I}_{20}$ 的相角均超前于 \dot{U}_{20} 的相角 90° 。

保护装置首先计算系统的接地电阻值,当检测到接地故障时,将测量得到的发电机中性点与机端处的 20 Hz 电流做差,再与注入的 20 Hz 电压进行相位比较,计算各台发电机的 ϕ ,利用 ϕ 来判断故障发电机,实现有选择性的停机处理。

3.2 定值整定

3.2.1 接地电阻的整定

1) 低值整定(动作值)

我国对于各容量机组的安全接地电流有明确规定,接地电阻的低定值一般按在距发电机中性点 20% 以内发生单相接地时,接地故障电流 I_0 不大于国家规定的安全接地电流 I_g 为原则整定。即:

$$|I_0| = \left| \frac{0.2U_\phi}{R_g + \frac{R_n}{2 + 6R_n j\omega(C_g + C_t)}} \right| \leq I_g$$

其中, U_ϕ 为发电机相电压。

2) 高值整定(报警值)

接地电阻的高值整定要综合考虑发电机的绝缘水平、定子冷却水的电导率、中性点接地变压器、机端电压互感器、升压变低压侧等因素,在保证正常运行时不误发信号的前提下取值越大越好。

3.2.2 ϕ 值的整定

1) 动作值

ϕ 的动作值可整定为: $\phi < \phi_L$

其中: ϕ_L 为接地电阻的低值整定值所对应的 ϕ 值。

2) 报警值

ϕ 的告警值可整定为: $\phi_L < \phi < \phi_H$

其中: ϕ_H 为接地电阻的高值整定值所对应的 ϕ 值。

3.3 保护流程

1) 按照图 1 所示的保护装置结构,对并列运

行发电机的 \dot{U} 、 \dot{I} 、 \dot{I}_{20n1} 、 \dot{I}_{20t1} 、 \dot{I}_{20n2} 、 \dot{I}_{20t2} 进行离散采样,并计算接地电阻 R_g 的值;

2) 当 R_g 的值小于高值整定值时,发出接地故障报警信号,并启动选择性保护程序,计算并列运行的各台发电机的 ϕ ,当发电机的 ϕ 值也达到报警值时,发出报警信号,指出发生故障的发电机;

3) 当计算得到的 R_g 达到低值整定值时,若此时 ϕ 也达到动作值,说明该发电机内部发生定子单相接地故障,则保护立即动作,切除故障发电机;若此时 ϕ 值没有达到动作值,说明发电机内部无故障,则保护不动作。

4 保护原理仿真结果分析

根据图 1 的保护原理结构,建立了保护装置的仿真模型。仿真实验中,发电机每相绕组对地电容取 $0.66 \mu\text{F}$,机端外部系统每相对地总电容取 $0.1 \mu\text{F}$ 。以发电机 1 内部定子接地故障、发电机系统外部发生接地故障两种情况,分别进行了仿真。

(1) G_1 内部发生定子接地故障时

仿真中,发电机 1 定子 C 相绕组经 4000Ω 接地,此时测得的发电机 1 与发电机 2 的 $\Delta \dot{I}_{20}$ 、 \dot{U}_{20} ,以及过渡接地电阻 R_g 的波形分别如图 5、图 6 所示。发电机 G_1 定子绕组经不同阻值电阻发生接地故障时,测得的接地电阻 R_g 的值以及 $\Delta \dot{I}_{20}$ 与 \dot{U}_{20} 的相角差如表 1 所示。

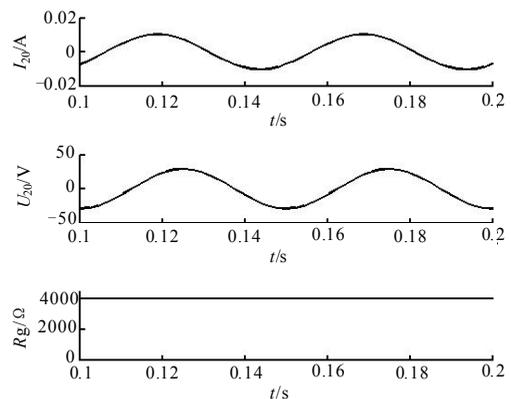


图 5 G_1 的 $\Delta \dot{I}_{20}$ 、 \dot{U}_{20} 以及系统接地电阻 R_g

Fig.5 $\Delta \dot{I}_{20}$, \dot{U}_{20} of G_1 and R_g when G_1 internal fault with high resistance

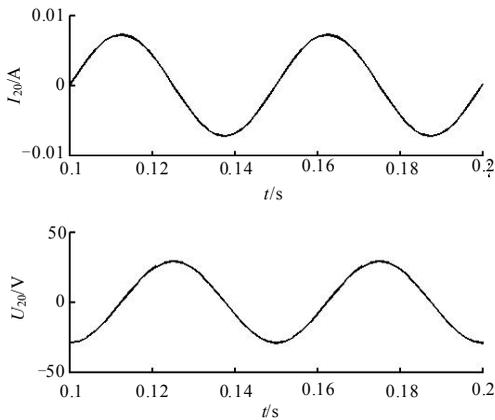


图 6 G₂ 的 $\Delta \dot{I}_{20}$ 、 \dot{U}_{20}

Fig.6 $\Delta \dot{I}_{20}$ 、 \dot{U}_{20} of G₂ when G₁ internal fault with high resistance

表 1 发电机 G₁ 发生单相接地故障时的仿真结果

Tab.1 Simulating results for single phase fault of generator G₁

R _g 实际值/Ω	R _g 测量值/Ω	误差/%	发电机	测得的 $\phi/(^\circ)$	理论计算的 $\phi/(^\circ)$	误差/%
1 000	999.5	0.05	G ₁	14.79	13.97	5.87
			G ₂	89.97	90	0.03
2 000	1 998	0.1	G ₁	27.83	26.45	5.22
			G ₂	89.97	90	0.03
3 000	2 995	0.17	G ₁	38.39	36.74	4.49
			G ₂	89.96	90	0.04
4 000	3 991	0.225	G ₁	46.57	44.86	3.81
			G ₂	89.97	90	0.03
5 000	4 985	0.3	G ₁	52.86	51.21	3.22
			G ₂	89.97	90	0.03

由表 1 可以看到，保护装置能够准确测得接地电阻的值。并列运行的两台发电机，当某一发电机内部发生定子单相接地故障时，故障发电机 $\Delta \dot{I}_{20}$ 的相角超前 \dot{U}_{20} 的相角 $0^\circ \sim 90^\circ$ ；而非故障发电机的 $\Delta \dot{I}_{20}$ 的相角超前 \dot{U}_{20} 的相角 90° 。

在表 1 中可以看到，由于接地变压器漏阻抗和激磁阻抗等的影响，表中测得 ϕ 值与理论计算的略有误差，但这个误差很小，可以忽略其影响。

(2) 发电机外部发生接地故障时

仿真中，发电机外部母线经 1 000 Ω 接地，此时测得的发电机 G₁ 与发电机 G₂ 的 $\Delta \dot{I}_{20}$ 、 \dot{U}_{20} 以及过渡接地电阻 R_g 的波形分别如图 7、图 8 所示。

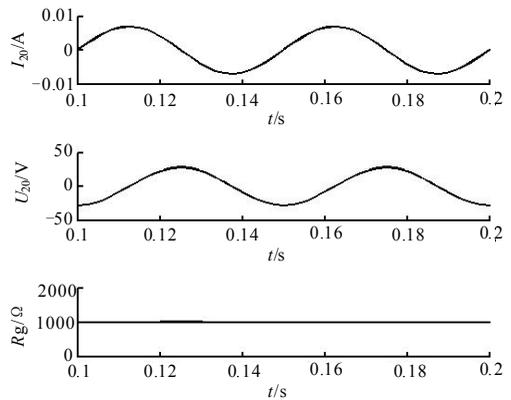


图 7 G₁ 的 $\Delta \dot{I}_{20}$ 、 \dot{U}_{20} 以及 R_g

Fig.7 $\Delta \dot{I}_{20}$ 、 \dot{U}_{20} of G₁ and R_g when external fault with high resistance

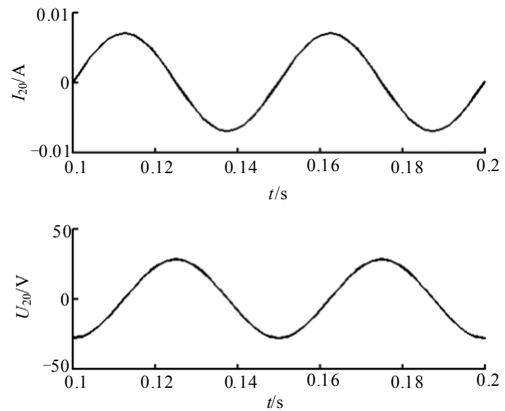


图 8 G₂ 的 $\Delta \dot{I}_{20}$ 、 \dot{U}_{20}

Fig.8 $\Delta \dot{I}_{20}$ 、 \dot{U}_{20} of G₂ when external fault with high resistance

发电机外部母线经不同阻值电阻发生单相接地故障时，测得接地电阻 R_g 以及 $\Delta \dot{I}_{20}$ 与 \dot{U}_{20} 的相角差如表 2 所示。

由表 2 可以看到，并列运行的两台发电机，当发电机区外发生单相接地故障时，所有发电机的 $\Delta \dot{I}_{20}$ 相角均超前于 \dot{U}_{20} 的相角 90° 。

从上面的仿真结果可以看出，新的注入式保护方案能够准确测得接地故障电阻的值，并且通过计算 ϕ 的值可以实现选择性保护。当发生单相接地故障时，对于故障发电机保护将动作，及时予以切除；对于非故障发电机保护则不动作，避免误跳闸，造成不必要的损失。

表 2 发电机机端母线发生单相接地故障时的仿真结果

Tab.2 Simulating results for external fault

R_g 实际值 / Ω	R_g 测量值 / Ω	误差 /%	发电机电	测得的 $\Phi/(^\circ)$	理论计算的 $\Phi/(^\circ)$	误差 /%
1 000	999.5	0.05	G ₁	90.04	90	0.04
			G ₂	90	90	0
2 000	1 998	0.1	G ₁	90.06	90	0.07
			G ₂	89.97	90	0.03
3 000	2 998	0.067	G ₁	90.04	90	0.04
			G ₂	90	90	0
4 000	3 992	0.2	G ₁	90.05	90	0.06
			G ₂	89.97	90	0.03
5 000	4 989	0.22	G ₁	90.04	90	0.04
			G ₂	90	90	0

5 结论

以注入的 20 Hz 电压的相位为基准, 将发电机中性点与机端处的 20 Hz 电流做差后的相位与之比较, 通过这个相位关系来判断故障发电机, 实现选择性停机, 改进了目前注入式保护原理无选择性的缺陷, 实现了注入式接地保护在扩大单元接线机组上的应用。

参考文献

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
WANG Wei-jian. The principle and application electrical main equipment[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [2] 毕大强, 王祥珩, 桂林, 等. 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 Da-qiang, WANG Xiang-heng, GUI Lin, et al. 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.
- [3] 毕大强, 王祥珩, 王维俭. 基于三次谐波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]. 电力系统自动化, 2003, 27 (13): 45-49.
BI Da-qiang, WANG Xiang-heng, WANG Wei-jian. 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.
- [4] 唐清弟, 谭建华. 3 定子接地保护误动原因分析和对策[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (1): 59-61.
TANG Qing-di, TAN Jian-hua. Reason and countermeasures of maloperation of generator stator ground protection based on the third harmonic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (1): 59-61.
- [5] 李德佳, 毕大强, 王维俭. 大型发电机注入式定子单相接地保护的调试和运行[J]. 继电器, 2004, 32 (16): 51-56.
LI De-jia, BI Da-qiang, WANG Wei-jian. Adjustment and operation of injection voltage scheme against the stator single-phase-to-ground fault of large generators[J]. Relay, 2004, 32 (16): 51-56.
- [6] 邵能灵, 尹项根, 胡玉峰, 等. 注入式定子单相接地保护的应用分析[J]. 继电器, 2000, 28 (6): 15-18.
TAI Neng-ling, YIN Xiang-gen, HU Yu-feng, et al. Analysis and application of injection voltage scheme against generator stator ground faults[J]. Relay, 2000, 28 (6): 15-18.
- [7] 侯有韬, 张丽丽. 外加电源式定子接地保护影响因素的分析[J]. 继电器, 2005, 33 (12): 27-31.
HOU You-tao, ZHANG Li-li. Influencing factors of stator ground-fault protection with outside sources[J]. Relay, 2005, 33 (12): 27-31.
- [8] 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 Qi-xue, XI Kang-qing, CHEN Jia-sheng, 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.
- [9] 毕大强, 王祥珩, 王维俭, 等. 发电机中性点接地装置等效电路的分析[J]. 继电器, 2003, 31 (1): 12-16.
BI Da-qiang, WANG Xiang-heng, WANG Wei-jian, et al. Analysis on the equivalent circuit of grounding equipments at the neutral of power generator[J]. Relay, 2003, 31 (1): 12-16.
- [10] 毕大强, 王祥珩, 余高旺, 等. 高准确度外加 20Hz 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 Da-qiang, WANG Xiang-heng, YU Gao-wang, et al. Development of a high accuracy stator ground fault protection by injecting 20Hz voltage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (16): 75-78.

收稿日期: 2010-02-12; 修回日期: 2010-04-27

作者简介:

刘春秋 (1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为发电机接地保护; E-mail: 07121914@bjtu.edu.cn

葛宝明 (1971-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机及其控制;

毕大强 (1973-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统主设备继电保护、电力电子技术在电力系统中的应用。