

DOI: 10.7667/PSPC171272

发电机机端断路器非全相保护新型判据的研究

贺儒飞¹, 李荷婷²

(1. 广州蓄能水电厂, 广东 广州 510950; 2. 苏州供电公司, 江苏 苏州 215004)

摘要: 2012年1月, 某蓄能水电厂发电机在轻载运行时, 发电机机端断路器(Generator Circuit Breaker, GCB)发生单相断线故障, 而相关保护未能及时切除故障, 导致故障范围扩大。针对此问题, 通过比较分析现有的反时限负序电流保护和基于GCB两侧基波零序电压相角差的GCB非全相保护, 提出综合零序电压和负序电流量的GCB非全相保护复合判据。考虑GCB两侧基波零序电压故障特征量的幅值、相位变化, 提出基于零序电压比值和相量差的GCB非全相保护新型判据。这几种新型判据进一步完善了GCB非全相保护, 可在相关电厂得到应用。

关键词: 发电机机端断路器; 负序电流; 基波零序电压; 非全相保护; 新型判据

Research on the new open-phase protection criterions of the generator circuit breaker

HE Rufe¹, LI Heting²

(1. Guangzhou Pumped Storage Power Station, Guangzhou 510950, China;

2. Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215004, China)

Abstract: In January 2012, a certain Pumped Storage Power Station once had a serious accident. The Generator Circuit Breaker (GCB) had the open-phase fault when the generator ran with low load. The relevant protection failed to remove the fault and led to expand the accident scope. Through the comparative analysis of the inverse time negative sequence current protection and the phase angle difference protection of the zero sequence fundamental voltages between GCB both sides, the comprehensive protection based on the zero sequence voltage and the negative sequence current is put forward for the open-phase fault. Considering the phase and amplitude features of the zero sequence fundamental voltages between GCB both sides, new criterions of the GCB open-phase protection based on the zero sequence voltage amplitude ratio and phasor difference are given. GCB open-phase protection is further optimized by these new protection criterions and can be applied in the relevant power plants.

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid (No. K-ST2014-003).

Key words: GCB; negative sequence current; zero sequence fundamental voltage; open-phase protection; new criterions

0 引言

2012年1月, 某蓄能水电厂(以下简称“A厂”)发生了严重的GCB(Generator Circuit Breaker)非全相事故。A厂的装机容量为 4×300 MW, 其发变组为单元接线, 每两个单元接线的发变组在主变高压侧组成一个联合单元接入500 kV系统, 其主接线如图1所示。

事故时, A厂3号发电机GCB连杆A相断裂, 发电机启动并网后一直运行在非全相状态。直至并网后20 s, 3号发电机主变低压侧零序过压保护动

作才切除主变和机组, 扩大了故障范围。

目前, 高压断路器多为分相操作, 其非全相保护以负序电流作辅助判据, 采用断路器本身辅助接点的开合进行逻辑判断。但是GCB作为三相联动的断路器^[1], 其本体不存在三相辅助接点, 因此其非全相保护无法由辅助接点配置。除此以外, 发电机轻载运行的情况下GCB发生非全相故障时的故障电流小且“不稳定”, 可能反映该故障的转子表层负序过负荷保护的动作时间过长, 相邻设备的后备保护容易提前无选择性动作而扩大故障范围^[2-4]。

GCB非全相故障不仅会对机组本体造成严重损伤, 还会威胁系统的安全稳定运行^[5-7]。因此, 必须研究GCB非全相保护的快速判据。

基金项目: 南方电网科技项目资助(K-ST2014-003)

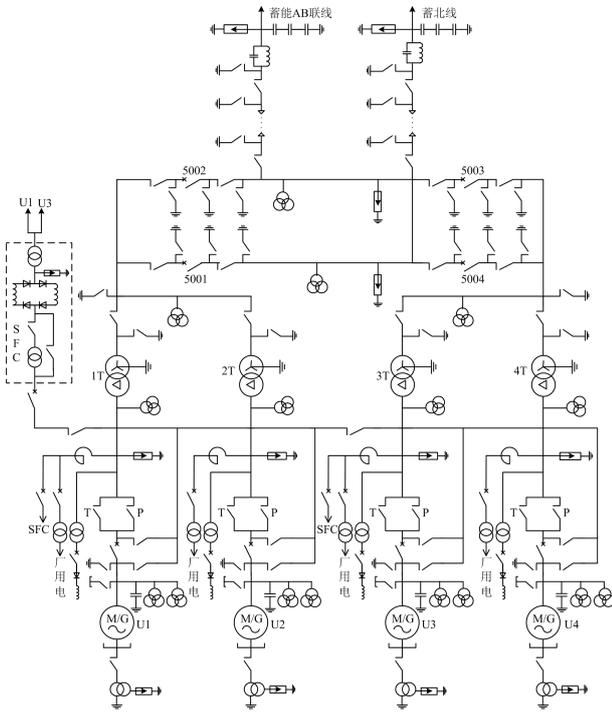


图1 蓄能A厂的主接线图

Fig. 1 Main wiring graph of pumped storage power station A

1 GCB 非全相保护的现状

1.1 反时限负序电流保护

当系统或发电机的对称状态遭到破坏时，流过发电机定子绕组的负序电流就会增大。当发电机负序电流的标幺值的平方与其持续时间之积达到一定数值时，发电机转子接触电阻较大的局部区域容易过热而造成损坏^[8-11]。

以负序电流量为保护判据的反时限负序电流保护的动作为

$$t \geq \frac{A}{I_2^{*2} - I_{2\infty}^{*2}} \quad (1)$$

式中： t 为保护的动作时间； A 为发电机的短时负序转子发热常数，一般设备参数中可直接给出，单位为s； I_2^* 为发电机负序电流的标幺值； $I_{2\infty}^*$ 为发电机允许长期承受的负序电流的标幺值。

反时限负序电流保护的動作特性如图2所示。

反时限负序电流保护的延时完全由发电机转子负序发热允许程度独立决定。同时，利用负序电流作为保护判据时，不存在电压互感器(PT)断线而造成误动的问题。

在A厂的GCB非全相事故中，通过查找相关设备参数可知，发电机允许长期承受的负序电流的标幺值 $I_{2\infty}^*$ 为0.09，发电机的短时负序转子发热常

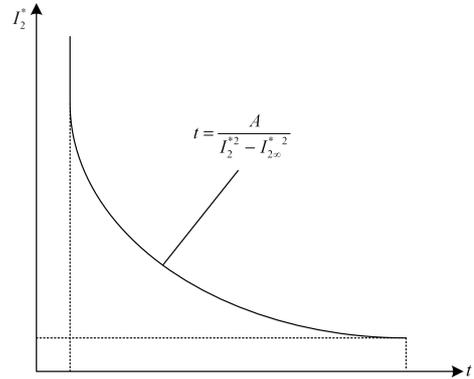


图2 发电机反时限负序电流保护的動作特性

Fig. 2 Characteristic curve of the generator inverse time negative sequence current protection

数 A 为40s。发电机负荷在从0升至30%时，发电机定子绕组负序电流的标幺值 I_2^* 从0升至约0.219 p.u.，此时，反时限负序电流保护的動作时间将超过1000s。此种情况下，在反时限负序电流保护動作前，A厂3号发电机的主变低压侧零序过压保护就抢先動作，使得事故范围扩大。因此，发电机轻载运行的情况下，GCB发生非全相故障无法通过反时限负序电流保护来及时解决。

1.2 基于GCB两侧基波零序电压相角差的GCB非全相保护

相关理论、仿真和实验分析表明，GCB发生非全相故障时，发电机机端与主变低压侧的基波零序电压会出现不一致的情况，由此提出了基于发电机机端与主变低压侧基波零序电压相角差的GCB非全相保护判据^[12-13]，其表示为

$$\begin{cases} \min(U_A, U_B, U_C, U_{TA}, U_{TB}, U_{TC}) > 80\%U_{ph.N} \\ \min(U_{G0}, U_{T0}) > U_{0.set} \\ |\varphi_{G0} - \varphi_{T0}| \geq \varphi_{0.set} \\ t_{op} = 0.5 \text{ s} \end{cases} \quad (2)$$

式中： U_A 、 U_B 、 U_C 为发电机机端三相电压的有效值； U_{TA} 、 U_{TB} 、 U_{TC} 为主变低压侧三相电压的有效值； $U_{ph.N}$ 为发电机额定相电压的有效值； U_{G0} 为发电机机端基波零序电压的有效值； U_{T0} 为主变低压侧基波零序电压的有效值；GCB非全相保护启动时，需设置基波零序电压有效值的门槛值 $U_{0.set}$ 以防止系统正常运行时出现误动情况； φ_{G0} 为发电机机端基波零序电压的相角； φ_{T0} 为主变低压侧基波零序电压的相角； $\varphi_{0.set}$ 为发电机机端与主变低压侧基波零序电压相角差的動作值，约为 60° ； t_{op} 为GCB非全相保护新型判据的動作延时，考虑尽快切除故

障的同时与发电机定子接地保护的動作时间进行配合。

在发电机轻载运行的情况下, GCB 发生非全相故障时, 基于发电机机端与主变低压侧基波零序电压相角差的 GCB 非全相保护可以灵敏动作。而当发电机机端或主变低压侧的某相测量 PT 发生断线故障时, 该断线相的相电压有效值即变为零, 不满足发电机机端与主变低压侧三相电压中的最小相电压有效值需要大于 80% 额定相电压有效值的条件, GCB 非全相保护不会启动, 保证了 GCB 非全相保护的可靠性。

基于发电机机端与主变低压侧基波零序电压量的 GCB 非全相保护, 不需要断路器本体的辅助接点来判断三相不一致, 适用于三相联动的断路器; 同时, 其判据不依赖于电流大小, 解决了发电机轻载情况下 GCB 发生非全相故障时电流判据无法识别的问题。

2 GCB 非全相保护新型判据的提出

依据现有 GCB 非全相保护的特点, 可以考虑将 GCB 两侧基波零序电压量判据与负序电流判据构成一个复合判据, 分别针对发电机轻载工况和重载工况下的 GCB 非全相故障。

此外, 根据 GCB 两侧基波零序电压除相角差外其他故障特征量的变化情况, 可以基于发电机机端与主变低压侧基波零序电压提出不同的 GCB 非全相保护判据。

2.1 GCB 两侧基波零序电压与负序电流的综合判据

发电机小负荷运行时, 相电流很小, 电流互感器(CT)存在不能准确测量的问题。当 GCB 发生非全相故障时, 可以采用发电机机端与主变低压侧基波零序电压的相角差来构建 GCB 非全相保护。

发电机大负荷运行时, 不存在 CT 测量问题, GCB 发生非全相故障时, 可以考虑采用负序电流量作为 GCB 非全相保护的另—判据。

假设发电机三相电压完全对称, 发电机机端三相对地电容完全相等, 主变低压侧三相对地电容完全相等。系统运行在完全对称的状态下, GCB 发生单相断线故障。搭建 GCB 发生 A 相断线的单机无穷大系统模型, 如图 3 所示。其中, qk 为 GCB 发生 A 相断线的断口位置。

运用对称分量法和叠加原理对 GCB 非全相故障进行分析, 得到 GCB 发生单相断线故障时的复合序网^[14-16], 如图 4 所示。

在图 3 与图 4 中, X_{1G} 、 X_{2G} 和 X_{0G} 分别为发电机的正序电抗、负序电抗和零序电抗; X_{1T} 和 X_{2T}

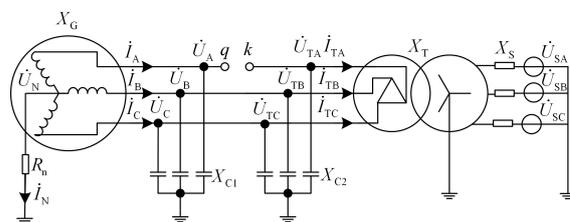


图 3 GCB 发生 A 相断线故障的电路图

Fig. 3 Circuit diagram of GCB open-phase fault

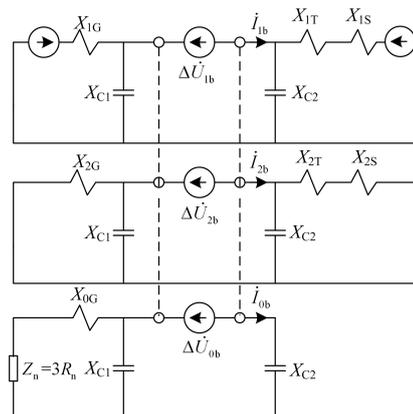


图 4 GCB 发生单相断线故障时的复合序网

Fig. 4 Complex sequence network in the GCB open-phase fault

分别为变压器的正序电抗和负序电抗; X_{1S} 和 X_{2S} 分别为系统侧的正序电抗和负序电抗。 $\Delta\dot{U}_{1b}$ 、 $\Delta\dot{U}_{2b}$ 、 $\Delta\dot{U}_{0b}$ 分别为断口处的正序电压、负序电压和零序电压; \dot{i}_{1b} 、 \dot{i}_{2b} 、 \dot{i}_{0b} 为故障时的正序电流、负序电流和零序电流; R_n 为发电机中性点的接地电阻; X_{C1} 为发电机机端并联电容的电抗值; X_{C2} 为主变低压侧并联电容的电抗值。

通过计算可得 GCB 发生非全相故障时的负序电流为

$$\dot{i}_{2b} = -\frac{\dot{I}_L}{1 + \frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{1\Sigma}} + \frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{0\Sigma}}} \quad (3)$$

式中: \dot{I}_L 为系统正常运行时的负荷电流; $Z_{1\Sigma}$ 、 $Z_{2\Sigma}$ 和 $Z_{0\Sigma}$ 分别为断口处的正序阻抗、负序阻抗和零序阻抗, 其表达式为

$$\begin{cases} Z_{1\Sigma} = \frac{X_{1G}X_{C1}}{j(X_{1G} - X_{C1})} + \frac{X_{C2}(X_{1T} + X_{1S})}{j(X_{1T} + X_{1S} - X_{C2})} \\ Z_{2\Sigma} = \frac{X_{2G}X_{C1}}{j(X_{2G} - X_{C1})} + \frac{X_{C2}(X_{2T} + X_{2S})}{j(X_{2T} + X_{2S} - X_{C2})} \\ Z_{0\Sigma} = \frac{X_{C1}(X_{0G} - jZ_n)}{Z_n + j(X_{0G} - X_{C1})} - jX_{C2} \end{cases} \quad (4)$$

考虑在 $Z_{1\Sigma} \approx Z_{2\Sigma}$, $Z_{0\Sigma} \gg Z_{2\Sigma}$ 的条件下, 可以得到 $\dot{I}_{2b} \approx -\dot{I}_L / 2$ 。当 \dot{I}_L 达到 50% 额定电流时, 负序电流的二次标幺值 I_2^* 约为 0.25。

由此, 针对 GCB 非全相故障, 考虑基于发电机机端与主变低压侧基波零序电压与负序电流的“或门”综合判据, 可表示为

$$\begin{cases} \min(U_A, U_B, U_C, U_{TA}, U_{TB}, U_{TC}) > 80\%U_{ph.N} \\ \min(U_{G0}, U_{T0}) > U_{0.set} \\ |\varphi_{G0} - \varphi_{T0}| \geq \varphi_{0.set} \text{ or } I_2^* \geq I_{2.set}^* \\ t_{op} = 0.5 \text{ s} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $I_{2.set}^*$ 为 GCB 非全相保护中负序电流的动作值, 可取 0.25。

系统正常运行时, 发电机机端与主变低压侧基波零序电压相角差以及系统的负序电流为 0。在 GCB 发生非全相故障的情况下, 发电机带负荷量持续变大时, 发电机机端与主变低压侧基波零序电压的相角差会变为较大的稳定值; 同时, 当发电机带负荷量较大(大于 50% 额定负载)时, 系统的负序电流也会变为较大的值, 在此条件下, GCB 非全相保护也能动作。故采用双重判据可以提高 GCB 非全相保护的可靠性。

而当发电机发生接地故障时, 接地相的相电压有效值会变为零, 不满足 GCB 非全相保护的启动条件, GCB 非全相保护不会动作。

2.2 GCB 两侧基波零序电压有效值的比值判据

相较于系统正常运行的情况, GCB 发生非全相故障时, 发电机机端与主变低压侧的基波零序电压会出现十分明显的差变化。基于相角差的 GCB 非全相保护考虑了发电机机端与主变低压侧基波零序电压的相位差异, 除此之外, 还可以考虑发电机机端与主变低压侧基波零序电压的幅值差异。由此, 针对 GCB 非全相故障提出了主变低压侧与发电机机端基波零序电压有效值的比值判据, 其表示为

$$\begin{cases} \min(U_A, U_B, U_C, U_{TA}, U_{TB}, U_{TC}) > 80\%U_{ph.N} \\ \min(U_{G0}, U_{T0}) > U_{0.set} \\ \frac{U_{T0}}{U_{G0}} = \eta_{0.set} \\ t_{op} = 0.5 \text{ s} \end{cases} \quad (6)$$

式中, 主变低压侧与发电机机端基波零序电压有效值的比值 $\eta_{0.set}$ 作为保护的動作值。

系统正常运行时, 主变低压侧基波零序电压有效值与发电机机端基波零序电压有效值的比值为

1.0 左右; 而当 GCB 发生非全相故障时, 主变低压侧基波零序电压有效值与发电机机端基波零序电压有效值的比值会变为大于 1.0 的数值, 故障特征较为明显。

依据图 4 中 GCB 发生非全相故障时的零序网络, 得到主变低压侧基波零序电压有效值与发电机机端基波零序电压有效值的比值表达式为

$$\frac{U_{T0}}{U_{G0}} = \frac{X_{C2}}{X_{C1}Z_n} \sqrt{Z_n^2 + X_{C1}^2} \quad (7)$$

考虑不同电厂发电机机端的并联电容值不同, 同时, 在发电机中性点经接地变压器接地的方式下, 发电机中性点接地电阻也各不相同。因此, 根据不同电厂的实际参数, 由式(7)可以计算出 GCB 发生非全相故障时主变低压侧与发电机机端基波零序电压有效值的比值, 得到的计算结果如表 1 所示。

表 1 GCB 非全相故障中主变低压侧基波零序电压有效值与发电机机端基波零序电压有效值的比值

Table 1 Ratio of zero sequence fundamental voltage RMS between low voltage side of main transformer and generator in the fault

	发电机 机端电 容/ μF	主变低压 侧电容/ μF	接地变 变比	接地变二 次侧电阻 / Ω	比值
天津盘山 电厂	0.361	0.26	20/0.23	0.215	2.9
福建宁德 核电厂	0.527	0.26	24/0.866	1.54	4.0
广蓄 A 厂	0.987	0.26	18/0.5 $\sqrt{3}$	1.15	9.1
广蓄 B 厂	1.058	0.26	18/0.5 $\sqrt{3}$	1.1	9.5
溪洛渡 右岸电站	3.174	0.26	20/0.8 $\sqrt{3}$	1.13	12.5
锦屏二级 水电站	1.913	0.26	20/0.866	0.92	11.1

从表 1 可以得到, 当 GCB 发生非全相故障时, 主变低压侧基波零序电压有效值与发电机机端基波零序电压有效值的比值为 2.9~12.5。由此, 基于 GCB 两侧基波零序电压有效值比值判据的 GCB 非全相保护的保護定值可以综合设定为 2.5 左右, 也可以按照各厂的实际参数进行设定。

2.3 GCB 两侧零序电压相量差的有效值判据

在 GCB 发生非全相故障时, 除了考虑发电机机端基波零序电压与主变低压侧基波零序电压的相位、幅值差异, 还可以直接采用发电机机端基波零序电压与主变低压侧基波零序电压的相量差来构建 GCB 非全相保护的新的判据, 其表示为

$$\begin{cases} \min(U_A, U_B, U_C, U_{TA}, U_{TB}, U_{TC}) > 80\%U_{ph.N} \\ \min(U_{G0}, U_{T0}) > U_{0.set} \\ |\dot{U}_{G0} - \dot{U}_{T0}| \geq K_{0.set} \\ t_{op} = 0.5 \text{ s} \end{cases} \quad (8)$$

式中: \dot{U}_{G0} 、 \dot{U}_{T0} 分别为发电机机端与主变低压侧的基波零序电压; $K_{0.set}$ 为发电机机端与主变低压侧基波零序电压相量差有效值的动作值, 可设为 2 V(二次值)左右。

系统正常运行时, 发电机机端与主变低压侧的基波零序电压相等, 发电机机端与主变低压侧基波零序电压相量差的有效值基本为 0; GCB 发生非全相故障时, 发电机机端与主变低压侧的基波零序电压不再相等, 其相量差的有效值会变为较大的值, 且会随着发电机输出有功的增加而不断增加。

保护装置会测量发电机机端与主变低压侧的三相电压、发电机机端与主变低压侧的零序电压, 分别计算发电机机端与主变低压侧三相电压的基波幅值、发电机机端与主变低压侧基波零序电压的幅值。当 GCB 两侧三相电压的基波幅值均大于 80% 额定电压, GCB 两侧基波零序电压的幅值均大于定值门槛 $U_{0.set}$, 并且 GCB 两侧基波零序电压相量差的有效值大于定值门槛 $K_{0.set}$ 时, 判断为 GCB 非全相故障, 经过短延时 t_{op} 动作于报警或跳闸。

3 结语

1) 针对发电机轻载和重载工况运行时, GCB 发生单相断线故障的不同电气量特征, 比较分析了现有的反时限负序电流保护和基于 GCB 两侧零序电压相角差的新型非全相保护的特点, 提出将 GCB 两侧基波零序电压的相角差判据与负序电流判据构成一个复合“或门”判据, 分别应对发电机轻载工况和重载工况下的 GCB 非全相故障, 可有效提高非全相保护在不同工况下的可靠性和灵敏度。

2) GCB 发生非全相故障时, 主变低压侧与发电机机端基波零序电压量的变化十分明显, 依据发电机机端与主变低压侧基波零序电压的相位、幅值和相量等差异可以构建 GCB 非全相保护的判据。在发电机轻载运行时 GCB 出现非全相故障, 这些判据能够避免电流判据灵敏度不足的缺陷, 进一步完善和优化了非全相保护, 提高了机组和系统运行的稳定性与安全性。

3) 一般情况下, 发电机机端或中性点装有电流互感器, 可以直接检测系统运行时的负荷电流; 同时, 发电机机端与主变低压侧分别安装有电压互

感器, 可以直接测量发电机机端与主变低压侧的三相电压与基波零序电压量, 考虑到零序电压量较小, 宜采用开口三角绕组的电压^[17-19]。所有相关电气量输入同一套保护装置内, 采用常规的工频傅氏算法, 就可以即时计算出系统运行时的负序电流、发电机机端与主变低压侧基波零序电压的相角差、有效值的比值、相量差的有效值等^[20-21]。故上述非全相保护的硬件回路和算法都比较容易实现, 具有较好的工程实用价值。

基于上述新型判据的 GCB 非全相保护已在 A 厂成功投入运行, 运行状况稳定可靠, 可以在相关电厂推广和应用。

参考文献

- [1] 郑伟. 断路器非全相运行的危害及其预防[J]. 电力设备, 2008, 9(12): 71-73.
ZHENG Wei. Harm and its prevention of non-all-phase operation for circuit breaker[J]. Electrical Equipment, 2008, 9(12): 71-73.
- [2] 王维俭, 王祥珩, 王赞基. 大型发电机变压器内部故障分析与继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [3] 魏曜, 薛明军. 一种适用于高压线路非全相运行时的距离保护振荡闭锁的开放方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 70-75.
WEI Yao, XUE Mingjun. A new method for opening distance protection when the high voltage transmission lines is non-full-phases operation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 70-75.
- [4] 戴笃恒, 张乐荣. 韶关发电厂#8 发变组非全相运行的分析与处理方法探讨[J]. 广东电力, 1989(4): 13-21.
DAI Duheng, ZHANG Lerong. Analysis and treatment methods of the non-full phase operation in the eighth generator of Shaoguan Power Plant[J]. Guangdong Electric Power, 1989(4): 13-21.
- [5] 王维俭. 发电机变压器继电保护应用[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [6] 冯扬州. 大型汽轮发电机组非全相运行的分析与研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2006.
FENG Yangzhou. Research on the open-phase operation in large turbogenerator unit[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2006.
- [7] 李占宝, 周长华, 王峰, 等. 大型发电机出口断路器事故分析和处理[J]. 电力建设, 2013, 34(7): 95-99.
LI Zhanbao, ZHOU Changhua, WANG Feng, et al. Analysis and treatment on circuit breaker fault at generator outlet[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(7): 95-99.
- [8] 邢瑞江. 反时限电流保护的应用[J]. 电工技术,

2008(4): 17-19.

XING Ruijiang. Application of inverse time overcurrent relay protection[J]. Electric Engineering, 2008(4): 17-19.

[9] 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, 2006.

[10] FU Qiuling, YIN Xianggen, LI Xinjing, et al. Applying improvement of the inverse time overload protection of large generating units[C] // Power Engineering and Automation Conference (PEAM), 2011, 1: 63-66.

[11] BENMOUYAL G, MEISINGER M, BURNWORTH J, et al. IEEE standard inverse-time characteristic equations for overcurrent relays[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3): 868-872.

[12] 李荷婷, 桂林, 贺儒飞, 等. 基于电压型故障特征量的发电机机端断路器非全相保护[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 140-144.

LI Heting, GUI Lin, HE Rufeif, et al. Voltage features based open-phase protection of generator circuit breaker[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1): 140-144.

[13] 陈吉, 崔凤仙, 户传立, 等. 一种快速可靠的发电机突加电压保护[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 160-163.

CHEN Ji, CUI Fengxian, HU Chuanli, et al. A fast and reliable inadvertent energization protection of generators[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 160-163.

[14] 李佩杰, 罗翠云, 白晓清, 等. 一种求解多相混合配电网潮流的扩展序分量法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 15-23.

LI Peijie, LUO Cuiyun, BAI Xiaoqing, et al. An extended sequence components method for solving multiphase power flow in distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 15-23.

[15] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2007.

[16] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.

[17] 孙宇光, 王祥珩, 欧阳蓓, 等. 凸极同步发电机定子绕组内部故障的瞬态计算及有关保护方案的分析[J]. 电工技术学报, 2001, 16(1): 3-8.

SUN Yuguang, WANG Xiangheng, OUYANG Bei, et al. Transient calculation of internal faults in the salient-pole synchronous machine and research on their main equipment protection schemes[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(1): 3-8.

[18] 韩志勇, 徐衍会, 辛建波, 等. 水轮机组与电网耦合对电网动态稳定的影响[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 166-170.

HAN Zhiyong, XU Yanhui, XIN Jianbo, et al. Effect of the coupling between hydraulic turbine set and power grid on power grid dynamic stability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 166-170.

[19] 方红伟, 夏长亮. 基于RS算法的同步发电机定子绕组内部故障分析和保护[J]. 电工技术学报, 2007, 22(6): 48-53.

FANG Hongwei, XIA Changliang. Analysis and protection of stator winding internal faults in synchronous generator based on RS algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(6): 48-53.

[20] 陈波, 王永庆. 电网安全控制与保护技术现状分析及发展趋势研究[J]. 陕西电力, 2017, 45(11): 67-71.

CHEN Bo, WANG Yongqing. Current situation analysis of power grid security control and protection technology and its development trend[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(11): 67-71.

[21] 成林, 郭安祥, 齐卫东, 等. 复杂电磁环境下电子式电流互感器输出特性研究[J]. 陕西电力, 2017, 45(8): 64-69.

CHENG Lin, GUO Anxiang, QI Weidong, et al. Study on output characteristics of electronic current transformer in complex electromagnetic environment[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(8): 64-69.

收稿日期: 2017-08-23

作者简介:

贺儒飞(1977—), 男, 通信作者, 高级工程师, 研究方向为抽水蓄能电气二次技术; E-mail: herufeif@126.com

李荷婷(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为发电机故障分析及其保护. E-mail: loading.527@163.com

(编辑 许威)