第 41 卷 第 1 期 2017 年 1 月 10 日
DOI：10.7500/AEPS20160121008
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol.41 No.1 Jan.10，2017

基于电压型故障特征量的发电机机端断路器非全相保护

李荷婷[1,2]，桂　林[1,2]，贺儒飞[3]，陈　俊[4,5]
（1. 清华大学电机工程与应用电子技术系，北京市 100084；
2. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室，清华大学，北京市 100084；
3. 广州蓄能水电厂，广东省广州市 510950；4. 南京南瑞继保工程技术有限公司，江苏省南京市 211102；
5. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室，江苏省南京市 211106）

摘要：针对广州蓄能水电厂 A 厂在轻载发电工况下，发电机机端断路器（GCB）发生单相断线时，相关保护未能及时切除故障导致事故扩大的现状，利用对称分量法对 GCB 非全相故障进行了理论分析，并运用 PSCAD 软件搭建了 GCB 非全相故障的动态仿真计算模型。根据故障特征提出了以 GCB 两侧基波零序电压的相角差作为 GCB 非全相保护新型判据的构想，通过动模实验验证了仿真计算模型的正确性与 GCB 非全相保护新型判据的合理性。

关键词：发电机机端断路器；非全相保护；保护判据；故障分析

0　引言

2012 年 1 月 31 日 13 时 05 分，广州蓄能水电厂（简称“广蓄”）A 厂的 3 号发电机由于发电机机端断路器（GCB）连杆断裂导致 A 相未合上，在发电机启动并网 20 s 后，3 号发电机主变压器低压侧零序过压保护动作，跳开了系统 500 kV 侧开关、3 号与 4 号主变压器及 3 号发电机（参见广蓄 A 厂主接线），扩大了事故范围。

抽水蓄能电厂的 GCB 操作十分频繁，且其焊接口又较为脆弱，当 GCB 机械疲劳积累到一定程度后就会发生一次断裂，而 GCB 操作机构的安装位置使得日常巡检难以发现该问题。当 GCB 发生非全相故障时，发电机运行在非全相状态，此时定子绕组中会流过负序电流，从而在转子表层感应出倍频电流。该倍频电流在转子接触电阻较大的部位会形成局部高温，进一步灼烧转子[1]，甚至造成氢气冷却的汽轮发电机发生爆炸，严重威胁机组与系统的安全稳定运行[2-3]。

一般情况下，分相操作的高压断路器（220 kV 及以上）非全相保护多采用断路器本体辅助触点的开合进行逻辑判断，并采用零序或负序电流判据构建辅助保护[4-5]。而 GCB 作为三相联动的断路器[6]，不存在三相辅助触点，无法配置由辅助触点构成的非全相保护；而发电机反时限负序电流保护的动作时间过长，容易导致相邻设备后备保护抢先无选择性动作，使故障范围扩大[7-8]。因此，针对 GCB 非全相故障构建合理、有效的电气量保护具有重要的应用价值。

在广蓄 A 厂的 GCB 非全相事故中，相关电流保护没有动作，而主变压器低压侧零序过压保护（基波零序电压的动作定值为 10 V，延时 3.5 s）却抢先于发电机定子绕组接地保护（基波零序电压的动作定值为 5 V，延时 0.3 s）动作。从中受到启发，GCB 非全相故障会导致发电机机端和主变压器低压侧的基波零序电压不完全相等，可以考虑利用 GCB 两侧（即发电机机端与主变压器低压侧）基波零序电压的相角差作为 GCB 非全相保护的新型判据[9-13]。

1　GCB 非全相故障的理论分析

假设发电机三相电压与系统参数完全对称，搭建 GCB 非全相故障的单机无穷大系统模型，GCB 所在位置的 qk 处发生单相断线故障，如图 1 所示。图中：X_{C1} 为发电机机端并联电容的电抗值；X_{C2} 为主变压器低压侧并联电容的电抗值；R_n 为发电机中性点的接地电阻。

利用对称分量法[14]和叠加原理对 GCB 非全相故障进行分析，得到相应的复合序网如图 2 所示。图中：$\dot{E}_G$ 和 $\dot{E}_S$ 分别为发电机与系统侧的电源电动势；X_{1G} 和 X_{2G} 分别为发电机的正、负序电抗；X_S 为

收稿日期：2016-01-21；修回日期：2016-07-28。
上网日期：2016-11-08。

系统侧电抗；$\Delta\dot{U}_{1b}$，$\Delta\dot{U}_{2b}$，$\Delta\dot{U}_{0b}$分别为 GCB 发生非全相故障时断口处的正、负、零序电压；$\dot{I}_{1b}$，$\dot{I}_{2b}$，$\dot{I}_{0b}$分别为 GCB 发生非全相故障时的正、负、零序电流。

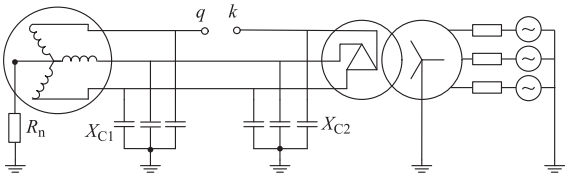

图 1　单机无穷大系统中 GCB 发生非全相故障时的电路图

Fig.1　Circuit diagram when GCB open-phase fault occurs in one-machine infinite-bus system

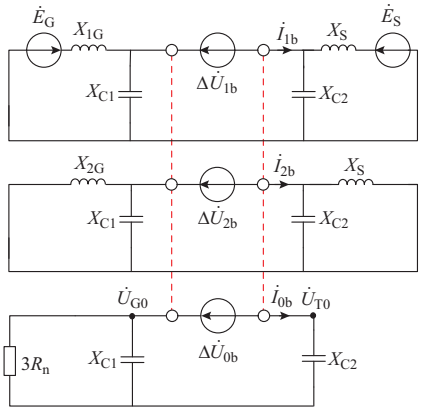

图 2　GCB 发生非全相故障时的复合序网图

Fig.2　Complex sequence network when GCB open-phase fault occurs in one-machine infinite-bus system

GCB 发生非全相故障时的负序电流 $\dot{I}_{2b}$为：

$$\dot{I}_{2b}=-\frac{\dot{I}_L}{1+\frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{1\Sigma}}+\frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{0\Sigma}}} \tag{1}$$

式中：$Z_{1\Sigma}$，$Z_{2\Sigma}$，$Z_{0\Sigma}$分别为 qk 断线处的正、负、零序输入阻抗；$\dot{I}_L$ 为系统在正常运行状态下的负荷电流。

反时限负序电流保护作为防止小的负序电流长时间灼烧转子的主保护，其动作判据为：

$$t\geqslant\frac{A}{I_2^{*2}-I_{2\infty}^{*2}} \tag{2}$$

式中：I_2^* 为发电机负序电流的二次标幺值；A 为发电机的短时负序转子发热常数；$I_{2\infty}^*$为发电机允许长期承受的负序电流的二次标幺值；t 为转子表层负序过负荷保护的动作时间。

在广蓄 A 厂的 GCB 非全相事故中，发电机的短时负序转子发热常数 A 为 40 s，发电机允许长期承受的负序电流二次标幺值 $I_{2\infty}^*$为 0.09。在发电机带载量从 0 升至 30%的过程中，其定子绕组负序电流的二次标幺值 I_2^* 从 0 逐渐升至 0.219（标幺值）左右，转子表层负序过负荷保护的动作时间超过 1 000 s，在其动作前，主变压器低压侧零序过压保护抢先动作，跳开了 500 kV 侧高压开关，扩大了事故范围。因此，转子表层负序过负荷保护无法解决发电机轻载情况下 GCB 非全相故障遇到的问题，且负序过流不是 GCB 非全相故障的独特特征并受负荷电流影响较大（见式(1)）。

在考虑基于电压型故障特征量的 GCB 非全相保护判据时，发电机机端基波零序电压 $\dot{U}_{G0}$为：

$$\dot{U}_{G0}=\frac{j3X_{C1}R_n}{3R_n-jX_{C1}}\dot{I}_{0b} \tag{3}$$

主变压器低压侧基波零序电压 $\dot{U}_{T0}$为：

$$\dot{U}_{T0}=-jX_{C2}\dot{I}_{0b} \tag{4}$$

从式(1)和式(2)可以看出，在主变压器低压侧容抗大于发电机机端综合阻抗的情况下，GCB 发生非全相故障时，主变压器低压侧基波零序电压的有效值会大于发电机机端基波零序电压的有效值；且随着发电机带载量的增加，主变压器低压侧基波零序电压的有效值有着更大的增长幅度。

同时，根据相关电厂（发电机中性点经接地变压器接地）的实际参数，通过式(3)和式(4)可以计算出 GCB 发生非全相故障时，发电机机端与主变压器低压侧基波零序电压的相角差，具体数据如表 1 所示。

表 1　GCB 发生非全相故障时各电厂发电机机端与主变压器低压侧基波零序电压的相角差

Table 1　Phase angle difference between both sides of GCB in GCB open-phase fault of some power plants

电厂	发电机机端电容/μF	主变压器低压侧电容/μF	接地变压器变比	接地变压器二次侧电阻/Ω	相角差/(°)
天津盘山电厂	0.361	0.26	20/0.23	0.215	241
福建宁德核电厂	0.527	0.26	24/0.866	1.540	240
广蓄 A 厂	0.987	0.26	$18/(0.5\sqrt{3})$	1.150	245
溪洛渡右岸电站	3.174	0.26	$20/(0.8\sqrt{3})$	1.130	235

从表 1 中可以看出，GCB 发生非全相故障时，发电机机端与主变压器低压侧基波零序电压相角差约在 235°～245°的范围内。

对比系统正常运行时，发电机机端与主变压器低压侧基波零序电压的相角差为 0°。进一步说明可以将发电机机端与主变压器低压侧基波零序电压的相角差作为 GCB 非全相保护的新型判据。

2　基于动模机组 GCB 非全相故障的仿真分析

2.1　GCB 非全相故障仿真计算模型的搭建

基于南京南瑞继保电气有限公司(简称“南瑞继保”)的动模机组，考虑发电机机端或主变压器低压侧三相对地电容不完全相等的情况，运用 PSCAD 软件搭建了 GCB 发生非全相故障的仿真计算模型，见附录 A 图 A1。

2.2　GCB 非全相故障的仿真结果分析

整个仿真的仿真时间为 15 s，发电机启动并网的第 1 s 时刻 GCB 发生 C 相断线故障，随后发电机输出有功功率从 0 kW 动态升至 2.5 kW 左右，发电机输出有功功率的波形如图 3 所示。

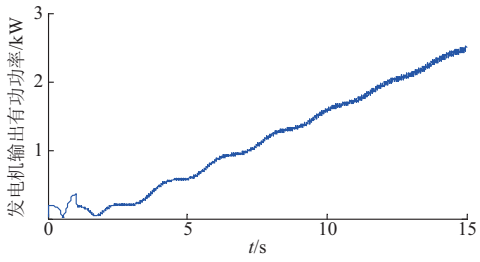

图 3　仿真中 GCB 发生非全相故障后发电机输出有功功率不断增加的变化波形

Fig.3　Increased active power waveform of generator after GCB open-phase fault occurs in simulations

系统完全对称时，发电机机端的三相对地电容均为 1 μF，主变压器低压侧的三相对地电容均为 0.29 μF；系统不完全对称时，发电机机端的三相对地电容均为 1 μF，主变压器低压侧的三相对地电容分别为 0.29，0.29，0.26 μF。其中，在系统完全对称与不完全对称的情况下，GCB 两侧基波零序电压的相角差波形如图 4 所示。

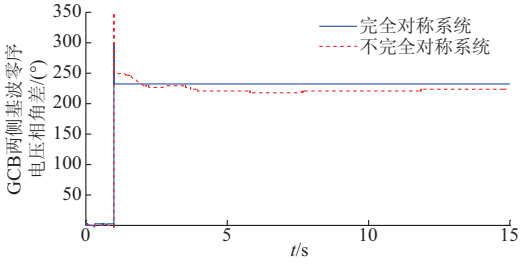

图 4　仿真中 GCB 两侧基波零序电压相角差波形

Fig.4　Waveform of phase angle difference of zero-sequence fundamental voltages between two sides of GCB in simulations

从图 3 和图 4 的仿真波形中可以看出，当发电机启动并网时 GCB 发生非全相故障，随后发电机输出有功功率不断增加的过程中，GCB 两侧基波零序电压的相角差会维持在较大的值。系统完全对称时，该相角差稳定在 231°，与理论计算得到的 232° 基本一致；系统不完全对称时，该相角差稳定在 219°左右，相较于系统正常运行时的 0°相角差，故障特征十分明显。

2.3　GCB 非全相保护新型判据的提出

由理论分析和仿真计算得到 GCB 发生非全相故障时的故障特征，提出 GCB 非全相保护的新型判据——GCB 两侧基波零序电压的相角差。该判据可表示为：

$$\begin{cases}\min(U_A, U_B, U_C, U_{TA}, U_{TB}, U_{TC}) > 80\% U_{ph.N} \\ \min(U_{G0}, U_{T0}) > U_{0.set} \\ |\varphi_{G0} - \varphi_{T0}| \geqslant \varphi_{0.set}\end{cases} \tag{5}$$

式中：U_A，U_B，U_C，U_{TA}，U_{TB}，U_{TC} 分别为发电机机端与主变压器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} 和 U_{T0} 分别为发电机机端与主变压器低压侧基波零序电压的有效值；$U_{0.set}$ 为 GCB 非全相保护启动时基波零序电压有效值需要达到的门槛值，一般需避开系统正常运行时发电机机端与主变压器低压侧基波零序电压有效值；φ_{G0} 和 φ_{T0} 分别为发电机机端与主变压器低压侧基波零序电压的相角；$\varphi_{0.set}$ 为发电机机端与主变压器低压侧基波零序电压相角差的动作值。

为了尽快切除故障并与发电机定子接地保护的动作时间取得配合，建议将 GCB 非全相保护新型判据的动作延时设定为 0.5 s。

3　基于动模机组 GCB 非全相故障的实验验证

利用南瑞继保的动模系统和 PCS-985 保护装置进行 GCB 非全相故障实验，以此来验证 GCB 非全相故障时故障特征的正确性，以及 GCB 非全相保护新型判据的合理性。

其中，GCB 非全相故障控制单元用来对 GCB 的非全相故障进行操作控制，PCS-985 保护装置可以对实验中的相关电气量进行录波并检验 GCB 非全相保护新型判据的动作情况，其实物见附录 A 图 A2。

实验中，为了使得发电机三相电压尽量平衡，在发电机机端并联的三相对地电容均为 1 μF，在主变压器低压侧并联的三相对地电容分别为 0.29，0.29，0.26 μF。

实验中，发电机启动并网时 GCB 发生 C 相断线故障，随后发电机输出有功功率从 0 kW 逐渐升至 2.5 kW。记录 GCB 发生非全相故障时（第 1 s）至故障解除时（第 15 s）全过程的实验波形。其中，发电机输出有功波形如图 5 所示，GCB 两侧基波零序电压相角差的实验波形与仿真波形如图 6 所示。

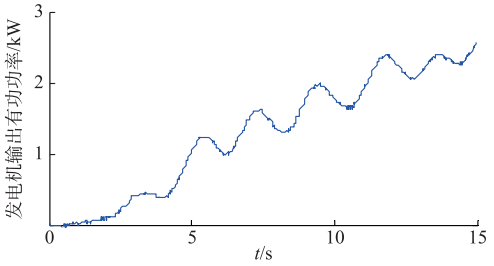

图 5　动模实验中 GCB 发生非全相故障后发电机输出有功不断增加的变化波形

Fig.5　Increased active power waveform of generator after GCB open-phase fault occurs in experiments

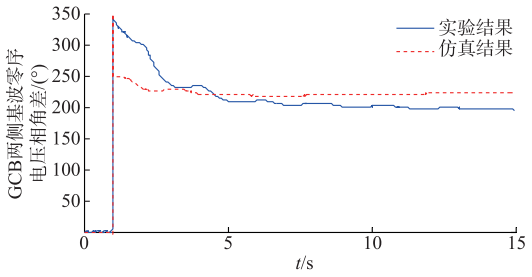

图 6　仿真与实验中 GCB 两侧基波零序电压相角差波形

Fig.6　Waveform of phase angle difference of zero-sequence fundamental voltages between two sides of GCB in simulations and experiments

从图 5 和图 6 的实验波形中可以看出，当发电机启动并网时 GCB 发生非全相故障，随后发电机输出有功功率不断增加的过程中，GCB 两侧基波零序电压的相角差会维持在较大的值，为 206°左右，故障特征十分明显；相应的发电机机端与主变压器低压侧基波零序电压的相角差判据（定值为 60°～300°，延时 0.5 s）也能够快速、灵敏动作，进一步验证了 GCB 非全相保护新型判据的合理性。

引起实验与仿真结果误差的主要因素为：①仿真计算模型并未考虑动模机组本身对地电容的不对称度[15]；②接触电阻对测量结果的影响；③动模系统的线路阻抗较大，动模机组运行不稳定，发电机输出有功功率的波动较大。

4　结论

1）系统正常运行时，发电机机端与主变压器低压侧基波零序电压的相角差为 0°；当 GCB 发生非全相故障时，发电机机端与主变压器低压侧基波零序电压的相角差显著增大（变为 60°～300°），故障特征十分明显，可以基于 GCB 两侧基波零序电压的相角差来构建 GCB 非全相保护的新型判据。

2）南瑞继保的动模实验，既再现了 GCB 发生非全相故障时发电机机端与主变压器低压侧基波零序电压的相角差特征，又对 GCB 非全相保护的新型判据进行了验证，解决了发电机轻载工况下 GCB 发生非全相故障时电流判据灵敏度不足的问题，避免了机组本体受损和系统相关后备保护的无选择性动作，提高了机组和系统的安全运行水平。

3）随着响水涧、仙游等一批国产化抽水蓄能电站的投入运行，国内抽水蓄能电站的建设已进入发展高潮，上述 GCB 非全相保护新型判据将继广蓄 A 厂之后得到广泛的推广和应用。

附录见本刊网络版（http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx）。

参 考 文 献

[1] 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.

[2] 冯杨州.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.

[3] 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.

[4] 常凤然，张洪.高压断路器的非全相保护[J].电力系统自动化，2000，24(11)：62-64.
CHANG Fengran, ZHANG Hong. Non-three-phase protection of high-voltage breaker[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(11): 62-64.

[5] 谢创树.核电厂发电机出口断路器失灵保护设计[J].电力系统自动化，2014，38(6)：123-127.DOI：10.7500/AEPS20130606007.
XIE Chuangshu. Design of the generator circuit breaker failure protection for nuclear power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 123-127. DOI: 10.7500/AEPS20130606007.

[6] 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)：66-68.
ZHENG Wei. Harm and its prevention of non-all-phase operation for circuit breaker[J]. Electrical Equipment, 2008, 9(12): 66-68.

[7] FU Qiuling, YIN Xianggen, LI Xinjing, et al. Appling improvement of the inverse time overload protection of large generating units[C]// Power Engineering and Automation Conference (PEAM), September 8-9, 2011, Wuhan, China:

63-66.
[8] 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)：12-21.
DAI Duheng，ZHANG Lerong. Analysis and treatment methods of the non-full phase operation in the eighth generator of Shaoguan Power Plant[J]. Guangdong Power，1989(4)：12-21.
[9] 李玉海，张小庆，徐敏.关于定子接地保护的几个问题[J].电力系统自动化，1999，23(11)：50-54.
LI Yuhai，ZHANG Xiaoqing，XU Min. Some problems about the stator ground protection[J]. Automation of Electric Power Systems，1999，23(11)：50-54.
[10] 高春如，沈俭，吴政华，等.大型发电机定子绕组单相接地保护方式的商榷[J].电力系统自动化，2006，30(20)：88-92.
GAO Chunru，SHEN Jian，WU Zhenghua，et al. Discussion on single phase grounding fault protection mode of large-scale generator stator winding[J]. Automation of Electric Power Systems，2006，30(20)：88-92.
[11] WU Pengyue，WANG Tuanjie，HAN Weiwei，et al. Analysis on the false action and operation criteria for the generator circuit breaker failure protection [C]// Advanced Power System Automation and Protection (APAP)，October 16-20，2011，Jeju，South Korea：215-218.
[12] 涂崎，邰能灵.基于相角差的发电机定子接地保护方向元件[J].电力系统自动化，2009，33(14)：61-65.
TU Qi，TAI Nengling. Directional elements of the generator stator ground protection based on the phase angle difference [J]. Automation of Electric Power Systems，2009，33(14)：61-65.
[13] 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)：43-48.
BI Daqiang，WANG Xiangheng，GUI Lin，et al. Research 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)：43-48.
[14] 李光琦.电力系统暂态分析[M].3版.北京：中国电力出版社，2007.
[15] 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.

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

桂　林(1974—)，男，通信作者，博士，副教授，主要研究方向：大机组保护及故障分析。E-mail：guibinyu2010@163.com

贺儒飞(1977—)，男，高级工程师，主要研究方向：抽水蓄能电站电气二次设备。E-mail：herufei@126.com

(编辑　章黎)

Voltage Features Based Open-phase Protection of Generator Circuit Breaker

LI Heting[1,2], *GUI Lin*[1,2], *HE Rufei*[3], *CHEN Jun*[4,5]

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. Guangzhou Pumped Storage Power Station, Guangzhou 510950, China;
4. Nari-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China;
5. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China)

Abstract: In view of the failure of Guangzhou Pumped Storage Power Station A (GPSPSA) generator circuit breaker (GCB) to shave the fault during single-phase disconnection that led to expansion of the accident when the generator was running under low load, the symmetrical component method is adopted to analyze the GCB open-phase fault. The simulation model for the GCB open-phase fault is built using the PSCAD software. According to the fault features, the phase angle difference of the zero sequence fundamental voltages between the two sides of GCB is assumed to be the new criterion for GCB open-phase protection. Through the experiment of the dynamic simulation system for the GCB open-phase fault, the simulation model is verified to be correct and the new criterion for the GCB open-phase protection is rational.

Key words: generator circuit breaker (GCB); open-phase protection; protection criterion; fault analysis