

基于电压相量差的发电机GCB失灵保护新原理

王义凯^{1,2}, 谭力铭^{1,2}, 尹项根^{1,2}, 洪心³, 田兴³, 乔健^{1,2}, 徐雯^{1,2}

(1. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 华中科技大学 电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074; 3. 三峡梯调通信中心, 湖北 宜昌 443133)

摘要:大型发电厂普遍安装发电机出口断路器(GCB),当发电机出现内部故障或异常工况时,依照相关规定对应的保护需通过GCB切除发电机,并同时启动GCB失灵保护。由于此时发电机电气量的特殊性及其切机方式的多样性,目前工程中采用基于电流判据(相电流、负序电流判据)的GCB失灵保护无法有效检测部分GCB失灵故障。为提高GCB失灵保护动作性能,通过对称分量法构建故障复合序网分析不同GCB失灵故障情况下的电气量特征,在计及发电机灭磁过程的前提下,得出正确动作相GCB两侧基波电压相量差较大,拒动相GCB两侧基波电压相量差为0的结论。基于GCB两侧基波电压相量差的差异,构造基于基波电压相量差的GCB失灵保护判据。为提高轻载情况下GCB失灵保护的可靠性,引入3次谐波电压相量差辅助判据。仿真结果表明,所提保护新原理在不同GCB失灵故障情况下均具有较高灵敏度。

关键词:发电机;GCB失灵保护;对称分量法;基波电压相量差;3次谐波电压相量差

中图分类号:TM 77

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202111022

0 引言

发电机出口断路器(GCB)装设于发电机机端,通过其关合可方便地控制发电机的投切。大型发电机存在内部故障或异常工况时,相应保护动作,通过跳开GCB实现与系统的隔离,从而切除故障,并通过系统倒送电方式对厂用电负荷持续供电。在实际工程中,GCB可能由于跳闸线圈故障、操作机构故障、气压或液压降低、直流电源故障、操作箱继电器等问题拒绝动作跳闸^[1],因此发电机保护动作的同时将启动GCB失灵保护,在GCB拒动时失灵保护动作以切除与失灵断路器相关联的其他断路器,避免发电机的损毁事故。

现有的断路器失灵保护采用电流判据形式,电网线路断路器失灵保护采用负序电流及零序电流判据^[2-3]。由于发电机机端零序电流无法流通,GCB失灵保护采用相电流和负序电流判据。但在单相GCB拒动的情况下,由于主变三角绕组等值零序阻抗为无穷大,此时相电流、负序电流均为0,保护无法对该情况做出反应,这将导致故障检修过程中某一相仍然与系统连接,对检修人员的人身安全构成极大威胁,属于重大安全隐患。在发生负序过负荷故障时,如果负序电流未达到GCB失灵保护负序判据动作值,此时若三相断路器均拒动,则故障无法切除,

发电机长期处于负序过负荷状态将损坏转子铁芯^[4]。此外,由于GCB失灵故障下电气量的特殊性及其切机方式的多样性,现有GCB失灵保护在多种故障条件下均存在拒动风险,因此如何合理配置GCB失灵保护的问题亟需解决。

现有文献针对断路器失灵保护的研究主要集中在断路器的故障诊断^[5-6]、提高断路器失灵保护可靠性^[7-9]和提高失灵保护动作延时性能^[10-11]等方面,但多基于故障电流实现断路器失灵保护检测,无法解决GCB失灵保护面临的问题。文献[12]增设基于发电机故障保护的短延时动作逻辑,与GCB失灵保护共同出口。该方法能够有效防止GCB失灵保护拒动,但增加了误动的风险,易扩大故障范围,降低厂用电的供电可靠性。文献[13]在断路器保护出口逻辑中增设电流突变量启动判据,从而降低相电流和负序电流的整定值提高灵敏度,通过电流突变量判据防止GCB失灵保护误动。但是该方法未考虑在GCB发生单相拒动时,其相电流和负序电流均为0的特点,依然存在保护拒动风险。文献[14]提出零序电压启动判据,在一定程度上改善了GCB失灵保护拒动的问题。但其未考虑部分故障情况下GCB发生三相拒动时不存在零序电压的情况,导致GCB失灵保护依然存在拒动可能。

为提高GCB失灵保护的可靠性,本文通过对称分量法^[15-16],考虑发电机灭磁过程,分析正确动作相GCB和拒动相GCB两侧基波电压相量差的差异,得出正确动作相GCB两侧基波电压相量差较大、拒动相GCB两侧基波电压相量差为0的结论。基于此,提出基于基波电压相量差的GCB失灵保护方法,通过引入3次谐波电压相量差判据,保证在负荷较轻

收稿日期:2021-03-08; **修回日期:**2021-10-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877089);乌东德电站发变组保护整定计算项目

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877089) and the Generator and Transformer Group Protection Setting Calculation Program of Wudongde Power Plant

时仍能够可靠识别GCB拒动情况。仿真结果表明,相较于传统电流保护判据,本文所提保护方法能够反映所有GCB失灵故障情况,提高发电机保护性能。

1 GCB失灵故障电气量特征

由理论分析和现场实际运行经验可知,基于电流量的GCB失灵保护判据无法有效反映所有GCB失灵故障情况,需要寻求新的保护判据以提高GCB失灵保护性能。借助GCB非全相理论^[17-18],可采用GCB两侧基波电压相量差反映GCB失灵故障。由于GCB三相拒动时三相基波电压相量差均为0,基波电压相量差判据能可靠反映故障,下面分别针对单相GCB拒动和两相GCB拒动的情况进行分析。

1.1 单相GCB拒动情况

以A相GCB拒动情况为例进行分析,此时BC两相GCB正确跳开,故障复合序网与两相断线故障情况等效。此时的故障边界条件为A相基波电压相量差为0,BC两相电流为0,即:

$$\begin{cases} \Delta U_A = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_0 = 0 \\ I_B = I_C = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: ΔU_A 为A相GCB两侧基波电压相量差; ΔU_1 、 ΔU_2 、 ΔU_0 分别为等效复合序网中A相正序、负序、零序基波电压相量差; I_B 、 I_C 分别为B、C相电流。此时的等效复合序网如图1所示。图中, E_G 为发电机侧等值电动势; E_S 为系统侧等值电动势; Z_{1G} 、 Z_{2G} 、 Z_{0G} 分别为发电机侧等值正序、负序、零序阻抗; Z_{1S} 、 Z_{2S} 、 Z_{0S} 分别为系统侧等值正序、负序、零序阻抗。

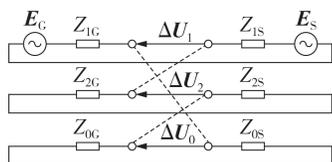


图1 A相GCB拒动情况下的复合序网图

Fig.1 Diagram of composite sequence network under GCB phase-A rejection condition

此时,正确动作相B相的GCB两侧基波电压相量差 ΔU_B 为:

$$\begin{aligned} \Delta U_B &= \alpha^2 \Delta U_1 + \alpha \Delta U_2 + \Delta U_0 = \\ & \alpha^2 (-\Delta U_2 - \Delta U_0) + \alpha \Delta U_2 + \Delta U_0 = \\ & (\alpha - \alpha^2) \Delta U_2 + (1 - \alpha^2) \Delta U_0 = \\ & (\alpha - \alpha^2) \frac{E_G - E_S}{Z_{1S} + Z_{2S} + Z_{0S}} Z_{2S} + \\ & (1 - \alpha^2) \frac{E_G - E_S}{Z_{1S} + Z_{2S} + Z_{0S}} Z_{0S} = \\ & \frac{(E_G - E_S) [\alpha^2 (Z_{2S} + Z_{0S}) - \alpha Z_{2S} - Z_{0S}]}{Z_{1S} + Z_{2S} + Z_{0S}} = \\ & \frac{(E_G - E_S) [\alpha^2 (Z_{2S}/Z_{0S} + 1) - \alpha Z_{2S}/Z_{0S} - 1]}{(Z_{1S} + Z_{2S})/Z_{0S} + 1} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{cases} Z_{1S} = Z_{1G} + Z_{1S} \\ Z_{2S} = Z_{2G} + Z_{2S} \\ Z_{0S} = Z_{0G} + Z_{0S} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\alpha = 1 \angle 120^\circ$ 。

由于变压器三角绕组等值零序阻抗近似无穷大, $Z_{2S}/Z_{0S} \approx 0$,式(2)可简化为:

$$\Delta U_B = (E_G - E_S)(\alpha^2 - 1) \quad (4)$$

同理,正确动作相C相的GCB两侧基波电压相量差 ΔU_C 为:

$$\Delta U_C = (E_G - E_S)(\alpha - 1) \quad (5)$$

分析式(4)、(5)可知,只要系统带一定的负荷,即 $E_G \neq E_S$,则BC相GCB两侧基波电压相量差不为0;而由于A相GCB未跳开,GCB两侧仍然保持有效的电气连接,A相GCB两侧基波电压相量差始终为0。因此基于GCB两侧基波电压相量差可判别单相GCB拒动情况。

1.2 两相GCB拒动情况

以BC两相GCB拒动情况为例进行分析,此时A相GCB正确跳开,故障复合序网与单相断线故障情况等效。此时故障边界条件为A相电流为0,BC两相GCB两侧基波电压相量差为0,即:

$$\begin{cases} I_A = I_1 + I_2 + I_0 = 0 \\ \Delta U_A = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_0 = 0 \\ \Delta U_B = \alpha^2 \Delta U_1 + \alpha \Delta U_2 + \Delta U_0 = 0 \\ \Delta U_C = \alpha \Delta U_1 + \alpha^2 \Delta U_2 + \Delta U_0 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: I_A 为A相电流; I_1 、 I_2 和 I_0 分别为等效复合序网中A相正序、负序和零序电流。对式(6)进一步推导可得:

$$\begin{cases} I_1 = -(I_2 + I_0) \\ \Delta U_1 = \Delta U_2 = \Delta U_0 = \frac{1}{3} \Delta U_A \end{cases} \quad (7)$$

根据故障边界条件可得等效复合序网见图2。

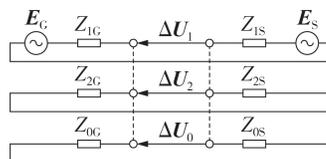


图2 BC两相GCB拒动情况下的复合序网图

Fig.2 Diagram of composite sequence network under GCB phase-B and phase-C rejection condition

则正确跳开相A相的GCB两侧的基波电压相量差为:

$$\begin{aligned} \Delta U_A &= 3 \Delta U_2 = 3 \frac{E_G - E_S}{Z_{1S} + Z_{2S} // Z_{0S}} (Z_{2S} // Z_{0S}) = \\ & \frac{3(E_G - E_S)}{1 + \frac{Z_{1S}}{Z_{2S}} + \frac{Z_{1S}}{Z_{0S}}} \end{aligned} \quad (8)$$

由于变压器三角绕组等值零序阻抗近似无穷

大, $Z_{1\Sigma}/Z_{0\Sigma} \approx 0$, 则式(8)可化简为:

$$\Delta U_A = \frac{3(E_G - E_S)}{1 + \frac{Z_{1\Sigma}}{Z_{2\Sigma}}} \quad (9)$$

分析式(9)可知, 只要系统带一定的负荷, 则A相GCB两侧基波电压相量差不为0; 而由于BC两相GCB未跳开, GCB两侧仍然保持有效的电气连接, BC两相GCB两侧基波电压相量差始终为0。因此基于GCB两侧基波电压相量差可判别两相GCB拒动情况。

1.3 考虑发电机灭磁过程的影响

若发电机出现内部故障或异常工况需要断开GCB, 发电机启动GCB失灵保护的同时需要进行灭磁。在灭磁过程中, E_G 逐渐减小, E_G 和 E_S 之间的夹角 θ 逐渐增大, 会对式(4)、(5)、(9)中的GCB两侧电压差产生影响, 定义等值电势差 $\Delta E = E_G - E_S$ 。

假设灭磁过程中的发电机侧等值电动势和等值电势差分别为 E_{Gx} 和 ΔE_x ($x=0, 1, 2$, 表示灭磁后不同时刻的先后顺序), E_{Gx} 和 E_S 之间的夹角为 θ_x , 灭磁过程中, GCB两侧等值电势差的变化过程如图3所示。

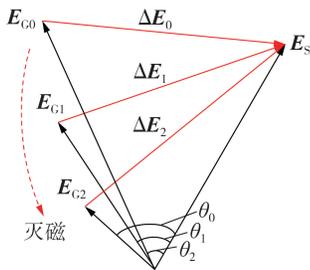


图3 灭磁过程中GCB两侧等值电势差变化过程

Fig.3 Changing process of equivalent electric potential difference between two sides of GCB in flux damping process

分析图3可知, 在灭磁过程中 ΔE 不断变化, 根据余弦定理计算得到 ΔE 为:

$$|\Delta E| = \sqrt{|E_G|^2 + |E_S|^2 - 2|E_G||E_S|\cos\theta} \quad (10)$$

由式(10)进一步计算可以得到:

$$\begin{aligned} |\Delta E| &= \sqrt{|E_G|^2 + |E_S|^2 - 2|E_G||E_S|\cos\theta} = \\ &|E_S| \sqrt{\frac{|E_G|^2}{|E_S|^2} - \frac{2|E_G|}{|E_S|}\cos\theta + 1} = \\ &|E_S| \sqrt{\left(\frac{|E_G|}{|E_S|} - \cos\theta\right)^2 + 1 - \cos^2\theta} \geq |E_S| |\sin\theta| \end{aligned}$$

分析上式可知, 即使在故障后发电机启动灭磁过程, 只要系统带一定的负荷, 则 $\Delta E \neq 0$, 式(4)、(5)和式(9)所示的正确动作相的GCB两侧电压差

不为0。

因此在考虑发电机灭磁的情况下, 断路器两侧基波电压相量差能够有效反映GCB失灵情况。对于正确动作相, GCB两侧存在一定的基波电压相量差; 而对于拒动相, GCB两侧基波电压相量差为0。利用该特点, 可基于GCB两侧基波电压相量差构成一种新型GCB失灵保护判据。

2 新型GCB失灵保护判据

新型GCB失灵保护判据在原有电流保护判据的基础上引入基波电压相量差判据和3次谐波电压相量差判据。在系统带有一定负荷时, 基于基波电压相量差的保护判据在各种断路器失灵故障下均可准确动作。而在发电机轻载时, 原有电流判据可能拒动, 上述基波电压相量差判据可能误动, 为提高GCB失灵保护的可靠性, 引入3次谐波电压相量差判据。通过记忆电流有流判据判断负载情况, 并决定基波电压相量差判据与3次谐波电压相量差判据的投入与闭锁。

2.1 基于基波电压相量差的GCB失灵保护判据

发生GCB失灵故障时, 只要存在一定的负荷电流, GCB两侧基波电压相量差就能够有效反映GCB失灵情况。对于正确动作相, GCB两侧存在一定的基波电压相量差; 而对于拒动相, GCB两侧基波电压相量差始终为0。基于此, 可构造基于GCB两侧基波电压相量差的GCB失灵保护判据为:

$$|\Delta U_\varphi| < \Delta U_{\text{set}} \quad \varphi = A, B, C \quad (11)$$

式中: $|\Delta U_\varphi|$ 为 φ 相GCB两侧基波电压相量差的幅值; ΔU_{set} 为保护定值, 需根据现场运行经验按躲过不平衡电压差整定。

基于基波电压相量差的GCB失灵保护判据为欠量判据, 当GCB失灵保护启动后, 若某相GCB两侧基波电压相量差很小, 说明该相发生GCB失灵故障。该保护判据能够有效识别GCB可能发生的各种失灵故障, 且能够给出具体的失灵故障相, 但在发电机轻载时可能发生误动, 在轻载情况下需要闭锁该判据, 并采用基于3次谐波电压相量差的GCB失灵保护判据。

2.2 轻载工况下基于3次谐波电压相量差的GCB失灵保护判据

发电机轻载时, 式(10)中 E_G 和 E_S 的夹角 $\theta \approx 0$, 此时基于式(11)的基波电压相量差保护判据可能发生误动, 而传统的基于电流的保护判据在系统轻载情况下可能发生拒动。为保证在发电机轻载时GCB失灵保护的可靠性, 引入3次谐波电压相量差判据。

由于发电机转子绕组结构特点, 总存在一定的3次谐波磁势和磁密, 另一方面转子大齿和小齿结

构不同使两者等效气隙线不同,也会产生 3 次谐波磁密,这样发电机相电压中存在 3 次谐波分量,而由于 3 次谐波电压呈零序性质,系统侧电压通常不存在 3 次谐波分量,因此只要三相 GCB 正常跳开,GCB 两侧就会存在 3 次谐波电压相量差,即使系统侧存在 3 次谐波电压,只要该谐波电压和发电机侧 3 次谐波电压相位不同,则仍然会存在 3 次谐波电压相量差。而 GCB 失灵故障发生时,由于主变低压侧采用三角形接法,各相 GCB 两侧均存在 3 次谐波电压,此时 3 次谐波电压接近 0。基于该特点,构建发电机轻载或空载情况下的基于 3 次谐波电压相量差的 GCB 失灵保护判据。当发电机故障导致相应的发电机保护需要跳开 GCB 时,若 GCB 正常动作,由于发电机侧存在 3 次谐波电压,而系统侧不含 3 次谐波电压(或存在相位不同的 3 次谐波电压),此时 GCB 两侧存在 3 次谐波电压相量差;若发生 GCB 失灵故障,各相 GCB 两侧 3 次谐波电压相量差均为 0。基于此,构造 GCB 失灵保护判据为:

$$|\Delta U_{\varphi 3}| < \Delta U_{set3} \quad \varphi = A, B, C \quad (12)$$

式中: $|\Delta U_{\varphi 3}|$ 为 φ 相 GCB 两侧 3 次谐波电压相量差的幅值; ΔU_{set3} 为保护定值,需根据现场运行经验按躲过不平衡电压差整定。

在发电机出现内部故障或异常运行工况,启动 GCB 失灵保护时,定义记忆电流为故障前发电机的电流,若记忆电流较小,说明在 GCB 切除之前系统处于轻载状态,此时应投入 3 次谐波电压相量差判据,并闭锁基波电压相量差保护判据。本文构造的记忆电流有流判据为:

$$|I_{memory}| < I_{memory.set} \quad (13)$$

式中: $|I_{memory}|$ 为记忆电流相量的幅值; $I_{memory.set}$ 为保护定值,需根据现场实际运行的负荷电流大小进行整定。

通过式(13)判断发电机是否处于轻载状态,若发电机处于轻载状态,则闭锁基波电压相量差判据,通过 3 次谐波电压相量差判据判断是否发生 GCB 失灵故障。

2.3 新型 GCB 失灵保护逻辑

GCB 失灵保护启动逻辑图如图 4 所示。发电机处于正常工作状态时,GCB 失灵保护闭锁;发电机出现内部故障或异常工况时,对应的保护动作跳开 GCB 并启动 GCB 失灵保护。

本文在原有 GCB 失灵保护电流判据的基础上增设基波电压相量差判据和 3 次谐波电压相量差判据,由于 3 次谐波电压幅值小,因此仅在轻载时基波电压相量差判据失效的情况下使用,不作为主要判据,通过电压判据配合保证 GCB 失灵保护在不同负载情况以及不同 GCB 失灵故障下均能够可靠动作,

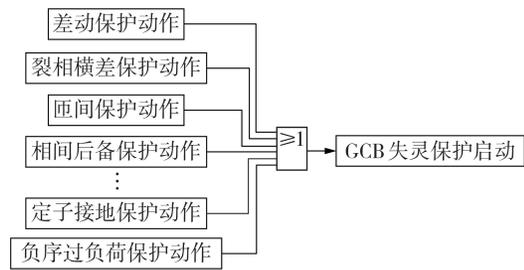


图 4 GCB 失灵保护启动逻辑图
Fig.4 Initiate logic diagram of GCB failure protection

保护动作逻辑图如图 5 所示。图中, I_{ph} 为相电流; $I_{ph.set}$ 为相电流判据整定值; I_2 为负序电流; $I_{2.set}$ 为负序电流判据整定值。

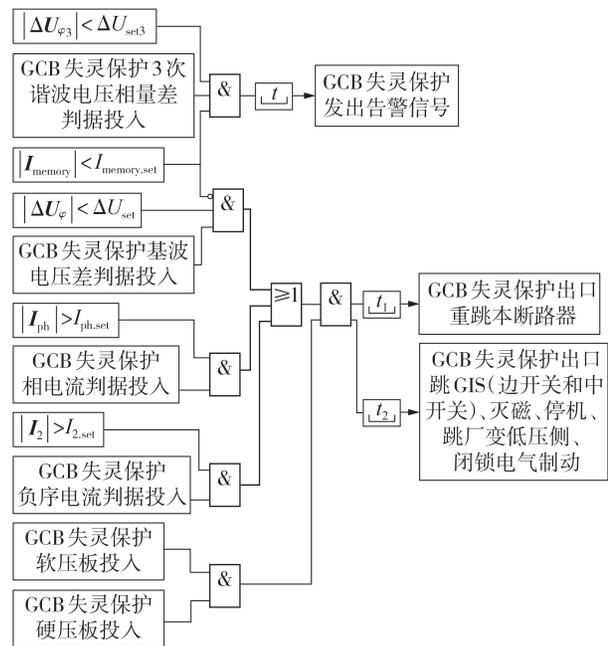


图 5 基于电压相量差的 GCB 失灵保护动作逻辑图
Fig.5 Operation logic diagram of GCB failure protection based on voltage phasor difference

实际应用中,当发电机因内部故障或异常工况启动 GCB 失灵保护时,若记忆电流较大,则发电机带有一定的负荷,基于基波电压相量差的 GCB 失灵保护判据能够有效识别 GCB 失灵故障,保护经延时动作出口,跳开发电机与系统、厂用电相连的相关断路器;若记忆电流较小,发电机轻载,则基波电压相量差判据无法进行有效判断而闭锁,此时根据 3 次谐波电压相量差判据识别 GCB 失灵故障,从而实现不同负载工况下对 GCB 失灵故障的全面识别,由于轻载或空载运行工况下 GCB 失灵故障对发电机和系统的安全运行影响小,保护动作于发警告信号。考虑到原有电流判据在实际工程应用时间长、现场运行经验丰富且不会引起 GCB 失灵保护误动,在此对其进行了保留。

3 仿真分析

为分析现有基于电流保护判据的GCB失灵保护存在的问题,并验证所提基于电压相量差的GCB失灵保护判据的有效性,利用PSCAD/EMTDC软件搭建某大型水电站发电机GCB失灵故障仿真模型如图6所示。发电机G的额定容量为 $944.5 \text{ MV}\cdot\text{A}$,额定电压为 22 kV ,额定电流为 $24\,787 \text{ A}$;三相GCB分相开合;变压器T采用YNd-11接线方式,变比为 $22 \text{ kV}/550 \text{ kV}$;负荷S等效为无穷大系统;电流互感器TA变比为 $30\,000 \text{ A}/1 \text{ A}$,电压互感器 TV_1 、 TV_2 变比均为 $22 \text{ kV}/0.1 \text{ kV}$;GCB失灵保护I、II段的动作时限分别为 0.1 、 0.3 s 。

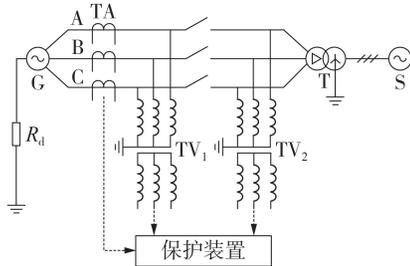


图6 GCB失灵故障仿真模型

Fig.6 Simulation model of GCB failure fault

假定在发生负序过负荷故障时,负序电流二次值刚好为保护启动值 0.09 A ,此时保护动作并启动GCB失灵保护,同时发电机启动灭磁过程。在仿真模型中为模拟发电机灭磁过程,在保护动作时刻将发电机励磁电压 E_f 置0。现有GCB失灵保护相电流判据动作值 $i_{op}=1.0 \text{ A}$,负序电流判据动作值 $i_{2op}=0.13 \text{ A}$ 。针对不同的GCB失灵故障情况,对现有电流判据和本文所提电压相量差判据的动作情况进行分析。

3.1 现有电流保护判据动作情况

现有GCB失灵保护由相电流判据和负序电流判据构成,能够有效反映两相GCB拒动故障情况,但无法有效反映单相GCB拒动及三相GCB拒动情况。在此对单相GCB拒动及三相GCB拒动故障进行仿真分析。GCB失灵保护因负序过负荷保护动作而启动,负序电流二次值刚好为启动值 0.09 A ,在 0.1 s 时刻保护动作同时发生A相GCB拒动故障,故障仿真结果见附录A图A1,图中结果均为电流互感器二次侧波形。由图可见,在GCB失灵保护动作前,三相存在一定的不平衡,负序电流达到负序过负荷保护启动值 0.09 A ,负序过负荷保护动作,发电机开始灭磁并启动GCB失灵保护。在发生单相GCB拒动故障情况下,由于主变三角绕组等值零序阻抗为无穷大,此时相电流、负序电流的稳态值均为0,均达不到其动作值,因此基于电流判据的GCB失灵保护无法检测单相GCB拒动故障情况。

在同样的负序过负荷故障条件下,在 0.1 s 保护动作的同时发生三相GCB拒动故障,仿真结果如附录A图A2所示。分析仿真结果可知,在发生三相GCB拒动故障情况下,相电流未达到动作定值 I_{op} ,负序电流也未达到动作定值 I_{2op} ,GCB失灵保护无法动作,此时故障无法切除,发电机将长期处于负序过负荷状态,对发电机与系统的安全运行十分不利。

3.2 基波电压相量差保护判据动作情况

为验证所提基于基波电压相量差的GCB失灵保护判据对不同GCB失灵故障的有效性,在上述负序过负荷故障仿真条件下,在 0.1 s 时负序过负荷保护动作,GCB收到跳闸命令,此时发电机开始灭磁。分别设置A相GCB拒动、BC两相GCB拒动和三相GCB拒动,得到GCB两侧基波电压相量差如图7所示。

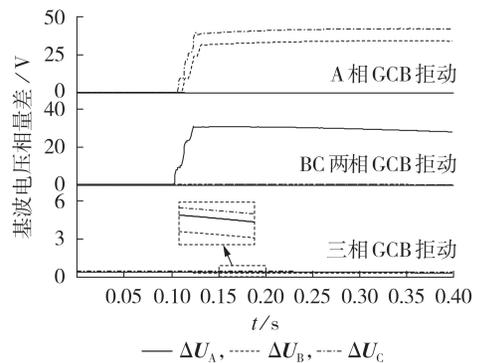


图7 不同GCB拒动情况下基波电压相量差判据仿真结果

Fig.7 Simulative results of fundamental voltage phasor difference criterion under different GCB rejection condition

分析图7可知,GCB正确跳开相基波电压相量差较大,而GCB因失灵拒动时,拒动相GCB两侧基波电压相量差幅值较小,与正确动作相相差较大,在保护定值选取适当时,保护能够可靠动作。在三相GCB拒动情况下,GCB两侧因电压互感器测量误差等因素存在一定的不平衡电压,因此在保护整定时,需要根据现场运行经验,保证定值能够可靠躲过不平衡压差。

3.3 3次谐波电压相量差保护判据动作情况

为验证在发电机轻载情况下基于3次谐波电压相量差的GCB失灵保护判据的有效性,将上述负荷修改为空载状态,其余仿真模型参数设置不变。设置三相GCB正常动作与发生三相GCB拒动情况,得到GCB两侧3次谐波电压相量差如图8所示。

分析图8可知,GCB正确跳开时3次谐波电压相量差较大,而GCB因失灵而拒动时,GCB两侧3次谐波电压相量差幅值较小,在保护定值选取适当时,在轻载情况下3次谐波电压相量差判据能够可靠动作。在进行保护整定时,需要根据现场运行经验,保证定值能够可靠躲过不平衡压差。

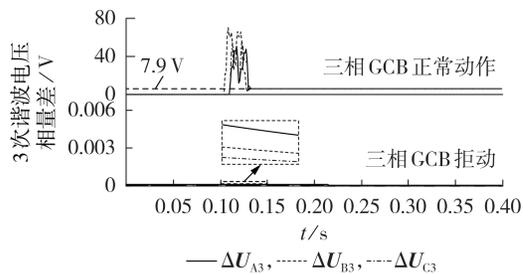


图8 GCB正常动作与拒动情况下3次谐波电压相量差判据仿真结果

Fig.8 Simulative results of third harmonic voltage phasor difference criterion under GCB normal operation and rejection condition

4 结论

GCB失灵保护对保证大型发电厂故障检修条件下的人身和设备安全具有重要意义。本文提出一种基于电压相量差的GCB失灵保护新原理,并得出如下结论。

1)通过对称分量法构建故障复合网分析GCB失灵故障时的故障电气量特征,考虑发电机的灭磁过程,可知正确动作相GCB两侧基波电压相量差较大,拒动相GCB两侧基波电压相量差为0。

2)基于GCB两侧基波电压相量差构建发电机GCB失灵保护判据,并引入3次谐波电压相量差判据,保证在发电机轻载运行条件下仍能够可靠识别GCB拒动故障,并通过记忆电流有流判据实现对基波电压相量差判据和3次谐波电压相量差判据的闭锁或投入。

3)仿真结果表明:现有基于电流判据的GCB失灵保护无法反映单相GCB拒动、三相GCB拒动情况;而当发电机带有一定负荷时,基于基波电压相量差的发电机GCB失灵保护方法在不同GCB失灵故障情况下均具有较高灵敏度,能够有效提高保护性能;在发电机轻载时,基于3次谐波电压相量差的发电机GCB失灵保护方法能够可靠反映GCB失灵故障。

本文研究结果可为大型发电厂的GCB失灵保护改进工作提供有效的技术支撑。需要注意的是,针对极少数机端3次谐波电压很小的发电机,3次谐波电压相量差判据易误动,不应投入该判据。此外,本文所提基于电压相量差判据的GCB失灵保护要求电厂在主变低压侧配置电压互感器,目前新建电厂均配有该电压互感器,但对于未配置主变低压侧电压互感器的电厂本文方法并不适用。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 洪峰,梁文武,吴小忠. 特高压直流受端系统500 kV变电站死

区及失灵保护配置研究[J]. 湖南电力,2017,37(6):75-78.

HONG Feng,LIANG Wenwu,WU Xiaozhong. Research on dead zone and failure protection of 500 kV substation in HVDC receiving system[J]. Hunan Electric Power,2017,37(6):75-78.

[2] 赵东宁,罗敏,王学斌,等. 断路器失灵保护对某省电网运行影响分析及解决方案探究[J]. 青海电力,2019,38(4):15-19.

ZHAO Dongning,LUO Min,WANG Xuebin, et al. Analysis of the impact of circuit breaker failure protection on the operation of a provincial power grid and the solution[J]. Qinghai Electric Power,2019,38(4):15-19.

[3] IEEE. Guide for breaker failure protection of power circuit breakers;IEEE Std C37.119-2016[S]. New York, USA:IEEE, 2016.

[4] 张琦雪,冯桂青,陈俊,等. 汽轮发电机定子绕组缺线圈运行时的负序过负荷保护分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):168-172.

ZHANG Qixue,FENG Guiqing,CHEN Jun, et al. Analysis of negative-sequence overload relay protection for turbine generator operating with asymmetrical stator windings[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(1):168-172.

[5] 阮江军,杨秋玉,黄道春,等. 高压断路器机械振动信号混沌吸引子形态特性[J]. 电力自动化设备,2020,40(3):187-193.

RUAN Jiangjun,YANG Qiuyu,HUANG Daochun, et al. Shape characteristic analysis of chaotic attractor for mechanical vibration signal of high-voltage circuit breaker[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(3):187-193.

[6] 李舒适,王丰华,耿俊秋,等. 基于优化VMD的高压断路器机械状态检测[J]. 电力自动化设备,2018,38(11):148-154.

LI Shushi,WANG Fenghua,GENG Junqiu, et al. Mechanical state detection of high voltage circuit breaker based on optimized VMD algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(11):148-154.

[7] 于游,邱金辉,吴颖超,等. 基于电流量的断路器失灵保护闭锁新原理[J]. 电力系统自动化,2014,38(23):114-118.

YU You, QIU Jinhui, WU Yingchao, et al. A novel blocking method of circuit breaker failure protection based on current[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(23):114-118.

[8] 姜自强,刘建勇. 南阳特高压断路器失灵保护的研究[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(12):117-122.

JIANG Ziqiang, LIU Jianyong. Study on Nanyang substation of UHV circuit breaker failure protection[J]. Power System Protection and Control,2015,43(12):117-122.

[9] 陈永昕,尹项根,张哲,等. 基于邻域信息的3/2接线按串配置断路器保护方案及实现方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):218-223.

CHEN Yongxin,YIN Xianggen,ZHANG Zhe, et al. String-based circuit breaker protection construction scheme based on neighborhood information under existing 3/2 connection mode and its implementation method[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(12):218-223.

[10] 李捷,丁晓兵,陈朝晖,等. 220 kV断路器失灵保护动作延时优化[J]. 南方电网技术,2017,11(8):65-71.

LI Jie,DING Xiaobing,CHEN Zhaohui, et al. Action delay optimization of 220 kV circuit breaker failure protection[J]. Southern Power System Technology,2017,11(8):65-71.

[11] 余江,周红阳,陈朝晖,等. 计及系统稳定需求的500 kV断路器失灵及死区保护优化[J]. 电力系统自动化,2015,39(2):142-146.

YU Jiang,ZHOU Hongyang,CHEN Zhaohui, et al. Improvement of 500 kV breaker failure and dead-zone prevention based on requirement on stability of grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(2):142-146.

- [12] 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.
XIE Chuangshu. Design of generator circuit breaker failure protection for nuclear power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 123-127.
- [13] 李文友, 何能全. GCB失灵保护动作逻辑探讨[J]. 工业技术创新, 2015, 2(2): 196-198.
LI Wenyu, HE Nengquan. The analysis about the action logic for generator circuit breaker failure protection[J]. Industrial Technology Innovation, 2015, 2(2): 196-198.
- [14] 兀鹏越, 孙钢虎, 徐金, 等. 发电机断路器失灵保护判据问题探讨[J]. 电气技术, 2012(12): 74-77.
WU Pengyue, SUN Ganghu, XU Jin, et al. The analysis of generator circuit breaker failure protection mal-operation[J]. Electrical Engineering, 2012(12): 74-77.
- [15] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析[M]. 3版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 82.
- [16] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2002: 96.
- [17] 陈俊, 李华忠, 徐青山, 等. 基于断口两侧电压相量差的发电机机端断路器非全相保护[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 125-130.
CHEN Jun, LI Huazhong, XU Qingshan, et al. Open-phase protection

of generator circuit breaker based on voltage phasor differences between two sides of breaking point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 125-130.

- [18] 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 Rufe, et al. Voltage features based open-phase protection of generator circuit breaker[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1): 140-144.

作者简介:



王义凯

王义凯(1996—), 男, 满族, 辽宁岫岩人, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护(E-mail: 742657004@qq.com);

谭力铭(1998—), 男, 湖南株洲人, 硕士研究生, 通信作者, 研究方向为电力系统继电保护(E-mail: 904632172@qq.com);

尹项根(1954—), 男, 湖北武汉人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为电力系统继电保护与安全自动控制(E-mail: xgyin@hust.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Novel principle of generator circuit breaker failure protection based on voltage phasor difference

WANG Yikai^{1,2}, TAN Liming^{1,2}, YIN Xianggen^{1,2}, HONG Xin³, TIAN Xing³, QIAO Jian^{1,2}, XU Wen^{1,2}

1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
3. Three Gorges Cascade Dispatch & Communication Center, Yichang 443113, China)

Abstract: GCB(Generator Circuit Breaker) is generally installed in large power plants. When the generator has internal faults or abnormal working conditions, the corresponding protection trips the generator by GCB according to relevant regulations, and the GCB failure protection is started at the same time. Due to the particularity of generator electrical quantity and the diversity of generator tripping modes, GCB failure protection based on current criterion (phase current and negative-sequence current criterion) used in current engineering cannot effectively detect some GCB failure faults. To improve the performance of the GCB failure protection, the electrical quantity characteristics of different GCB failure faults are analyzed by constructing fault composite sequence network using symmetrical component method. Considering the de-excitation process of generator, the conclusion is get that the fundamental voltage phasor difference between the two sides of GCB in the correct operation phase is large, while the fundamental voltage phasor difference between the two sides of GCB in the phase which fails to operate is nearly zero. Based on the difference of fundamental voltage phasor between two sides of GCB, the GCB failure protection criterion based on the fundamental voltage phasor difference is constructed. In order to improve the reliability of GCB failure protection under light load, the auxiliary criterion of third harmonic voltage phasor difference is introduced. Simulative results show that the proposed protection principle has high sensitivity under different GCB failure conditions.

Key words: electric generators; GCB failure protection; symmetric component method; fundamental voltage phasor difference; third harmonic voltage phasor difference

附录 A

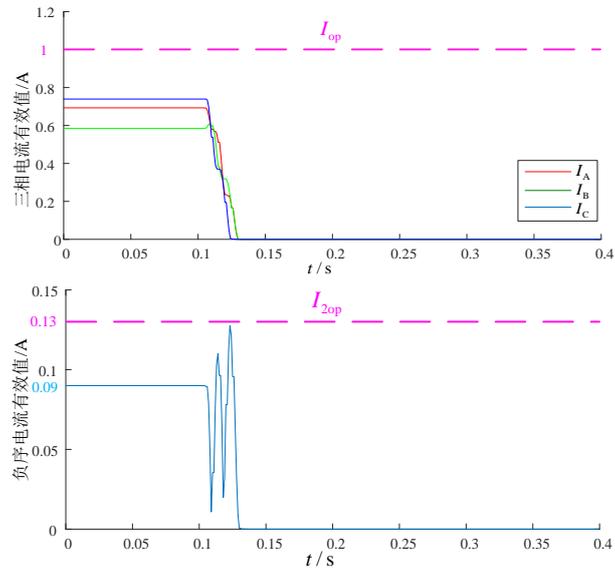


图 A1 GCB 单相拒动情况下的电流判据仿真结果

Fig.A1 Simulative results of current criterion under GCB single-phase rejection condition

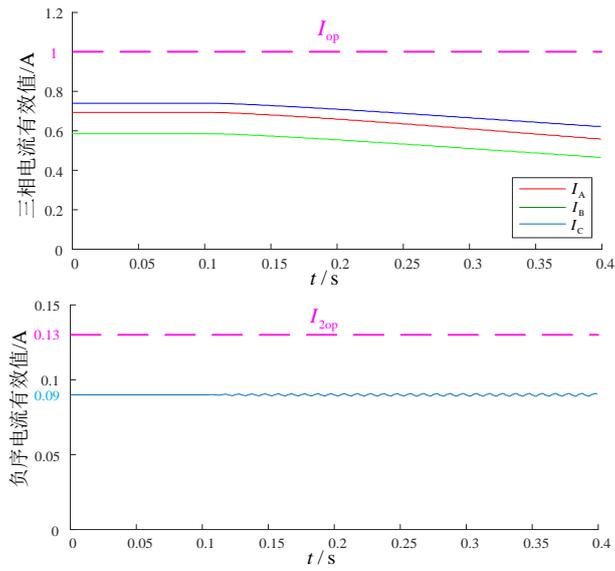


图 A2 GCB 三相拒动情况下的电流判据仿真结果

Fig.A2 Simulative results of current criterion under GCB three-phase rejection condition