

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190419

特殊工况下换流变零序差动保护误动机理分析及对策研究

翁汉琍¹, 李昊威¹, 万毅², 李振兴¹, 黄景光¹, 林湘宁³

(1. 三峡大学梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡电能有限公司, 湖北 宜昌 443002; 3. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对高压直流输电工程中换流变压器零序差动保护误动的案例, 分析了特高压换流变中性线上电流互感器在长时间单极-大地运行伴随交流系统高阻故障工况下饱和机理。采用基于工程实际参数的特高压直流输电模型进行仿真分析, 揭示换流变零序差动保护误动原因。并根据区内、外故障时保护两侧自产零序电流和中性线零序电流极性差异, 提出一种基于S变换相位差的换流变零序差动保护闭锁新判据, 以解决特殊工况下换流变零序差动保护误动的问题。通过仿真验证该判据的有效性。

关键词: 换流变压器; 零序差动保护; 电流互感器饱和; S变换; 相位差

Mechanism and countermeasures of mal-operation of converter transformer zero-sequence differential protection under special conditions

WENG Hanli¹, LI Haowei¹, WAN Yi², LI Zhenxing¹, HUANG Jingguang¹, LIN Xiangning³

(1. Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Three Gorges Electric Energy Co., Ltd., Yichang 443002, China; 3. China State Key Laboratory of Electromagnetic Engineering (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

Abstract: Aiming at the cases of mal-operations of zero-sequence differential protection of converter transformers in the HVDC transmission project, the saturation mechanism of current transformers on the neutral line of the UHVDC converter transformer under long-term unipolar-earth operation accompanied with high-impedance fault conditions of AC system is analyzed. The reason of the mal-operations of the zero-sequence differential protection is revealed based on the UHVDC model, which adopts the actual engineering parameters. According to the polarity difference between the self-produced zero-sequence current and the zero-sequence current on the neutral line on both sides of the protection under internal and external faults, a novel blocking criterion of zero-sequence differential protection for converter transformers based on S-transform phase angle difference is proposed to solve the mal-operation of the zero-sequence differential protection under special conditions. The validity of the criterion is verified by simulation tests.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607106) and Open Foundation of Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station (China Three Gorges University) (No. 2018KJX05).

Key words: converter transformer; zero-sequence differential protection; saturation of current transformer; S-transform; phase angle difference

0 引言

我国能源和负荷中心分布不均形成了电能大规

模远距离传输的迫切需求, 特高压直流输电在远距离大容量外送发挥着重要作用。换流变压器(换流变)作为特高压直流输电工程的核心设备之一, 除了配置纵联差动保护作为主保护外, 还装设了零序差动保护^[1-2], 用来保护其中性点接地的Y侧绕组。因此, 在非内部故障及扰动下, 灵敏度较高的零序差动保护都应可靠闭锁。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51607106); 湖北省梯级水电站运行与控制重点实验室(三峡大学)开放基金项目资助(2018KJX05)

然而, 对于超高压变压器零序差动保护误动现象, 常发生于外部故障存续期间^[3-4]与外部故障切除后^[5]。文献[6-7]分析得出换流变外部故障切除后恢复性涌流引起电流互感器(TA)暂态饱和导致零差保护存在误动风险。但没有分析换流变在外部故障存续期间零差保护误动的机理。对于换流变而言, 其所处交直流系统耦合中心, 较之传统交流系统变压器外部不对称故障的持续过程中, 较为复杂的电磁暂态环境将进一步加剧换流变零序差动保护误动风险。

高压直流输电系统长时间单极大地运行产生的入地电流和地磁风暴引起的地磁感应电流(GIC), 都有可能在中性点接地的换流变绕组中产生直流电流, 其直流偏磁大小可达 100 A 以上^[8-12]。除此之外, 交直流电网馈线所处环境复杂, 大量现场统计数据表明, 在高压电网中, 85%的短路故障是单相接地故障, 其中高阻接地故障约占到单相接地故障总数的 5%~10%, 其过渡电阻可达上千欧^[13-15]。目前针对该故障主要依靠阶段式零序过电流保护来识别, 而该保护电流定值的整定原则为躲开本线路的对地电容电流, 且需要与其他线路定值相互配合, 故其动作电流的定值比较大, 而发生高阻接地故障时, 其故障特征量很小, 故障不易被切除, 保护容易拒动^[16-17]。

若交流系统高阻故障一直未被零序过流保护识别, 整个电力网络里出现微弱的零序电流无法清除, 而单极运行或地磁风暴持续时间较长。这两种工况的交互影响, 将对换流变中性线上 TA 变特性的劣化产生助增作用, 该因素有可能对换流变零差保护造成不利影响。因此, 本文基于高压直流输电仿真模型, 首先从理论和仿真分析研究特殊工况下换流变零序差动保护误动机理, 并结合外部故障伴随 TA 饱和和内部故障及过渡电阻情况下零序电流相位差异, 提出了基于 S 变换相位差的换流变零序差动保护的闭锁新判据。通过仿真对所提新判据的有效性进行验证。

1 特殊工况下换流变零序差动保护误动风险分析

1.1 换流变零序差动保护判据

零序差动保护判据为^[18]

$$\begin{cases} \text{启动判据: } I_{op} \geq I_{op,0} \\ \text{动作判据: } I_{op} \geq k \cdot I_{res} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $I_{op,0}$ 为保护启动电流; $I_{op} = |3\dot{I}_{s0} - 3\dot{I}_{n0}|$ 为动作电流; $I_{res} = \max\{|3\dot{I}_{s0}|, |3\dot{I}_{n0}|\}$ 为制动电流, $3\dot{I}_{s0}$ 为

三相进线侧自产零序电流, $3\dot{I}_{n0}$ 为中性线上零序电流; k 表征不同工况下保护制动需求, 此场景下 k 取 0.8。

1.2 特殊工况分析

某换流站换流变零序过流保护及邻近线路零序过流保护参数如表 1 所示, 表中电流整定值均为二次侧电流。

表 1 某网公司某换流站零序过流保护定值

Table 1 Value of zero sequence overcurrent protection of

a converter station of State Grid

	定值名称	整定值	整定说明
换流变	星变零序过流 I 段定值	0.15 A	TA 变比为 2000/1
	星变零序过流 I 段时间	6 s	/
	星变零序过流 II 段定值	0.15 A	TA 变比为 2000/1
	星变零序过流 II 段时间	6 s	/
换流变附近某	零序过流 II 段定值	20 A	不用
	零序过流 II 段时间	10 s	不用
线路	零序过流 III 段定值	0.08 A	TA 变比为 4000/1
	零序过流 III 段时间	3 s	/

高阻接地故障电流大小一般在 10~200 A, 而且主要依靠零序过流保护识别^[13-14]。由表 1 可知, 换流站零序过流保护的最低动作值为 300 A(折算到一次侧), 高阻接地故障电流远小于该换流站零序过流保护的定值, 很难被保护识别。而当特高压直流输电工程采用单极-大地运行回路方式进行电能传送以及发生地磁风暴时, 上百安的直流电流将流经中性点接地的换流变压器。

如图 1 所示, 直流偏磁电流(I_{dc})和高阻接地故障产生的零序电流(I_{f0})同时在换流变中性线上的 TA

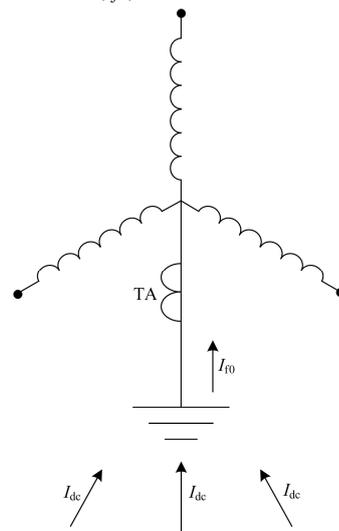


图 1 换流变压器中性点注入电流图

Fig. 1 Diagram of neutral injection current in converter transformer

中传变, TA 在长时间的非周期分量的影响下, 磁通不断累积, 最终导致 TA 渐进性偏置饱和。饱和机理分析见第 1.3 节。

1.3 特殊工况下换流变中性线上 TA 饱和机理

电流互感器的等效电路如图 2 所示, i_μ 、 i_1'' 、 i_2 分别为折算到二次侧的励磁电流、一次电流、二次电流, 为突出电流互感器的主要问题, 饱和对传变的影响, 电流互感器的等效电路仅以一个励磁电感 L_μ 表示, 完全不考虑它的漏抗和励磁支路的等值损耗电阻, 互感器的二次负载以纯电阻 R_2 表示(包括 TA 的二次漏阻), 不计它的电抗部分, 互感器的饱和表现为 L_μ 大幅度减小的非线性特性。

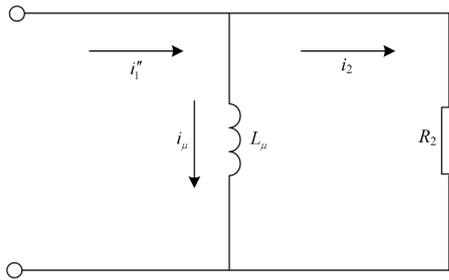


图 2 电流互感器等效电路
Fig. 2 Current transformer equivalent circuit

假设系统发生高阻接地故障, 若电源电压 $u = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \alpha)$, $\omega = 2\pi f$ 为工频角频率, α 为故障相位, 流过保护用 TA 一次侧的故障电流^[19]可表示为

$$i_1 = I_{dc} + I_{f0} [-\cos(\omega t + \alpha) + e^{-t/T_1} \cos \alpha] \quad (2)$$

式中: I_{dc} 为变压器中性线上的直流偏磁电流; I_{f0} 为无偏磁时高阻故障电流稳态峰值; T_1 为系统的一次时间常数。短路电流全偏移($\alpha = 0$)情况下, i_1 可表示为

$$i_1 = I_{dc} + I_{f0} (-\cos \omega t + e^{-t/T_1}) \quad (3)$$

设电流互感器的额定变比为 $K = N_2 / N_1$, 其中 N_1 、 N_2 分别为 TA 一次、二次侧绕组匝数, 则折算到二次侧一次电流为

$$i_1'' = \frac{I_{dc} + I_{f0} (-\cos \omega t + e^{-t/T_1})}{K} \quad (4)$$

如图 3 所示, i_1'' 没有负相波, 假设在 TA 未饱和时, 完全不计它的励磁电流, 即 $i_\mu \equiv 0$, $i_2 = i_1''$ 则

由 $N_2 \frac{d\phi}{dt} = i_1'' R_2$ 可得

$$\Delta\phi = \frac{1}{N_2} \int_0^\lambda i_1'' R_2 dt \quad (5)$$

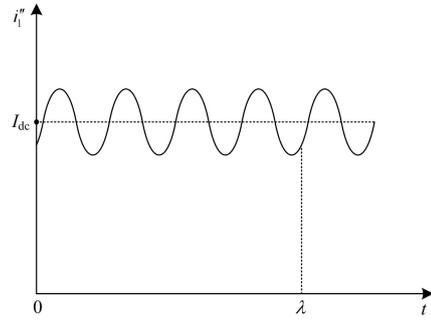


图 3 折算到二次侧的一次电流

Fig. 3 Primary current converted to the secondary side

式中, $\Delta\phi$ 为在 λ 时间内电流互感器铁芯中磁通的增量, 以 $i_1'' = \frac{I_{dc} + I_{f0} (-\cos \omega t + e^{-t/T_1})}{K}$ 代入得

$$\Delta\phi = \frac{R_2}{N_2 K} [I_{dc} \lambda + I_{f0} (-\frac{\sin \omega \lambda}{\omega} - T_1 e^{-\lambda/T_1}) + I_{f0} T_1] \quad (6)$$

经过 λ 时间后, 铁芯磁通达到 TA 的饱和值 ϕ_s , 其值为

$$\phi_r + \Delta\phi = \phi_s \quad (7)$$

式中, ϕ_r 为 TA 铁芯剩磁。

结合式(6)和式(7), TA 饱和的最终解析式为

$$\phi_r + \frac{R_2}{N_2 K} [I_{dc} \lambda + I_{f0} (-\frac{\sin \omega \lambda}{\omega} - T_1 e^{-\lambda/T_1}) + I_{f0} T_1] = \phi_s \quad (8)$$

TA 饱和时间是保护用 TA 的一个重要参数, 为准确求取 TA 起始饱和时间, 采用换流变压器中性线 TA 实际模型 LZZBW-35 进行分析, 其变比为 2000:1, 饱和磁密为 1.6T, TA 的铁心横截面积为 $6.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, 二次负载电阻为 2.25Ω , 即 $R_2 = 2.25 \Omega$ 、 $N_2 = 2000$ 、 $K = 2000$ 和 $\phi_s = 1.04 \times 10^{-2} \text{ WB}$ 。中高压系统的时间常数在 80~200 ms 之间, 系统强度越高, 系统一次时间常数越大, 此处取 $T_1 = 0.12 \text{ s}$ 。

假设剩磁 $\phi_r = 1.0 \text{ T}$, 高阻接地故障零序电流 $I_{f0} = 100 \text{ A}$, 直流偏磁电流 $I_{dc} = 500 \text{ A}$, 将上述数据代入式(8)计算, 可得 TA 饱和起始时间为 13.91 s。

为验证推导公式的正确性, 采用 PSCAD 中特高压直流输电模型进行仿真, 如图 4 所示, 换流变压器连接于换流器和交流母线之间, 通常采用三绕组变压器, 其参数为: 额定容量为 891 MW, 额定变比为 525 kV/169.5 kV/169.5 kV, 正序漏抗为 0.007 5 p.u./0.007 5 p.u./0 p.u., 空心电抗为 0.2 p.u., 饱和点为 1.25 p.u., 励磁电流为 0.1%。TA 采用 Lucus 模型, 其参数均与 TA 实际模型 LZZBW-35 一致。

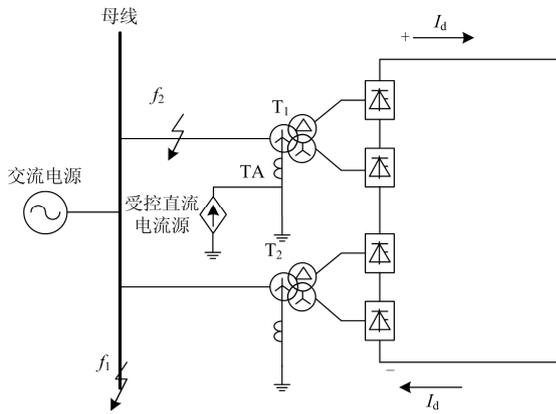


图4 换流变 TA 饱和仿真模型

Fig. 4 TA saturation simulation model of converter transformer

设 $t=0.1\text{ s}$ 时交流母线处发生 A 相经高阻接地故障(f_1), 过渡电阻 $250\ \Omega$, 故障一直持续, 受控直流源的大小设为 500 A , TA 饱和时间如图 5 所示, 黑色实线为 TA 一次侧零序电流, 红色实线为 TA 二次侧电流。

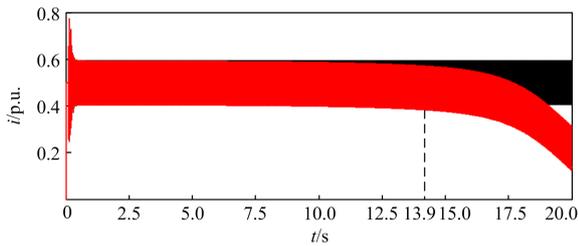


图5 TA 起始饱和时间

Fig. 5 Time-to-saturation of TA

由图 5 可知, TA 大约在 13.9 s 开始饱和, 这与 TA 饱和公式推导出的结果基本一致, 说明式(8)正确。

1.4 特殊工况下换流变中性线上 TA 起始饱和时间

由 1.2 节分析可知特殊工况中产生的零序电流和入侵直流偏磁电流分别可达 200 A 、 100 A , 两种电流将持续作用于换流变中性线上 TA。因此, 综合分析入侵零序电流 I_{f0} ($50\sim 200\text{ A}$) 和入侵直流偏磁电流 I_{dc} ($60\sim 100\text{ A}$) 对 TA 起始饱和时间的影响。

在不考虑剩磁的情况下, 即 $\phi_r = 0$, 将上述数据代入式(8)可确定 TA 起始饱和时间, 具体计算结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 特殊工况下, 零序电流起传变作用, 其幅值大小基本不会影响电流互感器起始饱和时间, 而作为非周期分量的直流偏磁电流是影响 TA 饱和的主要因素。入侵的零序电流一定情况下, 入侵的直流偏磁电流越大, 换流变中性线 TA 的起始饱和时间越短, 最短为 185.52 s , 在该工况持续过程

中, TA 磁通缓慢累积, 最终将导致 TA 饱和, 饱和后的 TA 严重影响其传变的准确性。

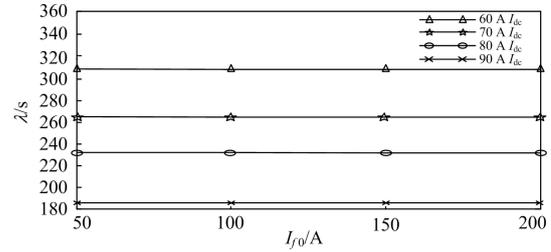


图6 特殊工况下电流互感器起始饱和时间

Fig. 6 TA initial saturation time under special conditions

通常情况下, 对于零序差动保护来说, 由于中性线侧零序电流大小远低于换流变进线侧三相电流, 中性线上配置的 TA, 精度高, 量程窄。因此, 灵敏度较高且不含二次谐波制动判据的零序差动保护受到的影响最大。

2 保护用 TA 饱和导致换流变零序差动保护误动机理及仿真分析

由第 1 节分析可知, 换流变中性线上 TA 在受到特殊工况的影响, 磁通不断累积, 会导致 TA 渐进性饱和, 在特殊工况存续期间, 饱和后的 TA 将引发零序差动误动风险。因此, 本节以图 4 特高压直流输电模型中的整流侧换流变压器 T_1 为研究对象, 研究特殊工况下零序差动保护动作性能。

零序差动保护启动电流 $I_{op,0}$ 的整定公式为^[18]

$$I_{op,0} = K_{rel}(K_{er} + \Delta m)I_N \quad (9)$$

式中: K_{rel} 为可靠系数, 通常取 1.3; K_{er} 为电流互感器传变误差, 取 0.02; Δm 为 TA 的变比未完全匹配引起的误差, 一般取 $\Delta m = 0.05$; I_N 为变压器接地绕组的额定电流。通过计算可得 $I_{op,0} = 0.091\text{ p.u.}$ 。

设 $t=0.1\text{ s}$ 时交流母线侧发生高阻接地故障(f_1), 过渡电阻 $250\ \Omega$, 故障一直持续, 受控直流源的大小为特殊工况直流偏磁大小 100 A 。特殊工况下保护两侧的零序电流如图 7 所示。图中黑色实线为三相自产零序电流 i_{s0} , 红色虚线为中性线上零序电流 i_{n0} 。

下文波形变量及含义均与之相同。

如图 8 所示, 换流变在特殊工况持续过程中, 中性线 TA 在长时间的非周期分量(直流偏磁)作用下, 会对 TA 造成较大的剩磁累积, 到达饱和点后, 由于一次电流较小且持续作用, 只能使 TA 工作在饱和点附近局部磁滞回环内, 此时 TA 对于工频电流来说表现为励磁电感较小, 因此二次侧电流基本

是正弦，只是出现相位的偏移^[20]。

由于中性线 TA 饱和，零序差动保护受其影响将产生虚假零序差动电流，其波形如图 8 所示，峰值已达 0.16 p.u.。将两电流输入传统零序差动保护判据，零序差动保护的制动电流有效值如图 9 所示。

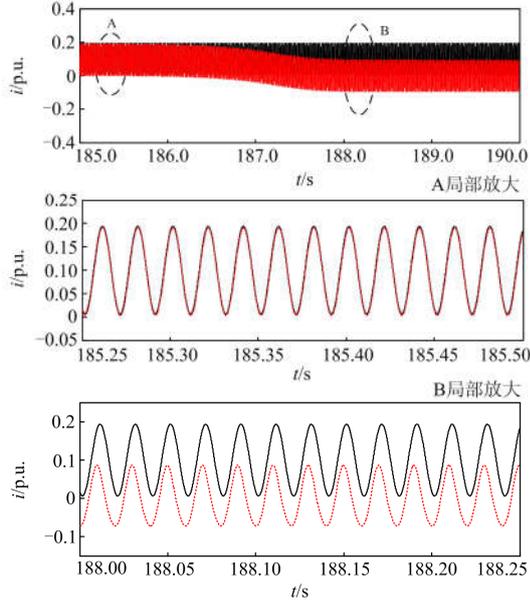


图 7 特殊工况下保护两侧零序电流波形

Fig. 7 Waveforms of zero-sequence current on both sides of protection under special working condition

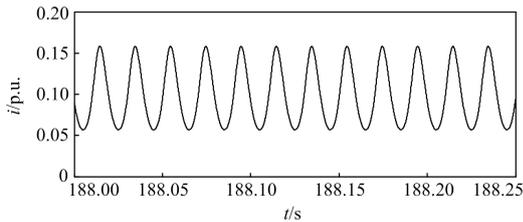


图 8 TA 饱和后零序虚假差流

Fig. 8 Zero-sequence fake differential current after TA Saturation

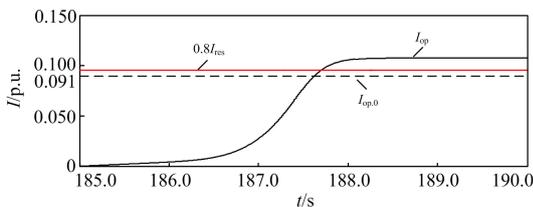


图 9 动作电流及制动电流有效值

Fig. 9 Effective value of action current and brake current

由图 9 可知，187.5 s 以后，动作电流幅值上升至制动电流以上，若无有效制动方案，这将导致零

序差动保护误动，对换流站乃至整个电力系统的稳定运行造成严重影响。

3 换流变零序差动保护闭锁新判据及仿真验证

3.1 基于 S 变换相位差保护闭锁判据

图 10 (a)、图 10 (b)分别为换流变正常外部故障和特殊工况 TA 饱和后的 i_{s0} 和 i_{n0} 波形；图 11 (a)、图 11 (b)为换流变内部故障及过渡电阻时 i_{s0} 和 i_{n0} 。

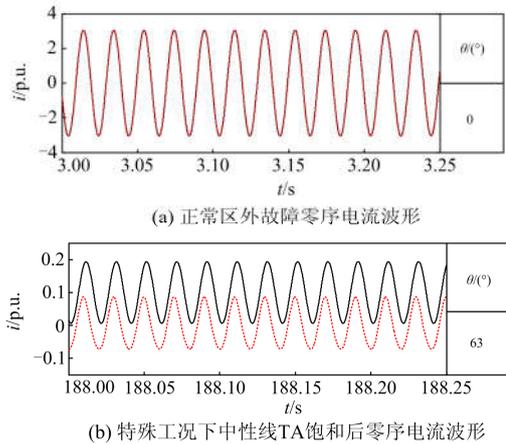


图 10 区外故障及特殊工况下 i_{s0} 和 i_{n0} 波形

Fig. 10 Waveforms of i_{s0} and i_{n0} under external fault conditions and special working condition

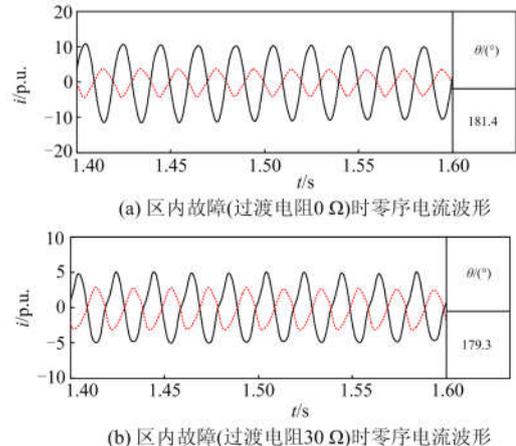


图 11 区内故障及过渡电阻下 i_{s0} 和 i_{n0} 波形

Fig. 11 Waveforms of i_{s0} and i_{n0} under internal fault and transition resistance conditions

如图 10(a)所示， i_{s0} 和 i_{n0} 基本重合，此时两电流间的相位差为 0。图 10(b)为特殊工况 TA 饱和场景，即换流变母线发生高阻接地故障且长时间未被保护识别，中性线上 TA 发生渐进性偏置饱和，饱和后的零序电流发生偏置，相位出现少许偏差且虚

假差流增大。从图 11(a)可以看出, 区内故障时两电流波形分布均匀且极性相反, 相位差基本为 180° 。对比图 11(a), 图 11(b)可知随着过渡电阻的增大, 两零序电流幅值减小, 但其相位差基本不变。

考虑到区内外故障以及 TA 饱和引起的相位误差, 需对保护两侧零序电流相位进行提取并对比, 进而有效识别区内外故障。而 S 变换在时频特征提取上较精确, 变换结果直观、计算量小, 且能准确地提取原始信号的相位信息。

对于一维信号 $x(t)$, 其连续的 S 变换为^[21-23]

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\omega(\tau-t, f)e^{-j2\pi ft} dt \quad (10)$$

$$\omega(\tau-t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2(\tau-t)^2}{2}} \quad (11)$$

式中: $\omega(\tau-t, f)$ 为高斯窗函数, τ 为控制高斯窗口在时间轴位置的参数; j 为虚数单位。

式(10)经传统傅里叶变换及傅里叶反变换后, 可将信号 $x(t)$ 的 S 变换表示为傅里叶变换 $H(f)$ 的函数, 如式(12)。

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\delta+f)e^{-\frac{2\pi^2\delta^2}{f^2}} e^{j2\pi\delta\tau} d\delta \quad (12)$$

式中: $f \neq 0$; $H(f)$ 函数为 $x(t)$ 的傅里叶变换; δ 为平移频率。

信号经 S 变换后生成 a 行 b 列矩阵 $S[a, b]$, 矩阵中的每一个元素都可以表征信号在某一频率及采样时间对应下的幅值和相位信息。将信号在某一采样时刻所有频率下的值作求和处理, 可以得到该信号在 t 时刻下的 S 变换元素和 S_t 为

$$S_t = \sum_{v=1}^a S[v, t] \quad (13)$$

对式(13)中的元素求相角可得到信号在 t 时刻 S 变换相角 θ_t 为

$$\theta_t = \text{angle}(S_t) \quad (14)$$

设两信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的相位分别为 θ_{xt} 、 θ_{yt} , 然后求取二者的相位差, 对相位差求均值^[24-25], 则两信号在 t 时间内的 S 变换相位差的绝对值为

$$\theta_{xy} = \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M |\theta_{xt} - \theta_{yt}| \quad (15)$$

式中, M 为数据窗内采样点的个数。

基于特高压直流输电模型, 对换流变零序差动保护的 i_{s0} 和 i_{n0} 分别进行 S 变换得到其时频矩阵后, 并根据式(15)计算出相位差 $\theta_{(i_{s0}, i_{n0})}$ 。将 $\theta_{(i_{s0}, i_{n0})}$ 与某一阈值比较, 作为保护是否闭锁的依据。故提出闭锁判据, 如式(16)。

$$\theta_{(i_{s0}, i_{n0})} < \theta_{\text{set}} \quad (16)$$

区内故障及区内故障过渡电阻时的临界相位差 $\theta_c = 180^\circ$, 零差保护用闭锁门槛值整定为

$$\theta_{\text{set}} = \theta_c / K_{\text{rel2}} \quad (17)$$

式中: 可靠系数 K_{rel2} 取 1.25; 则 $\theta_{\text{set}} = 180/1.25 = 144^\circ$, 考虑到工况的特殊性和 TA 传变特性不一致, 可适当降低 θ_{set} 以提升判据的可靠性。 θ_{set} 向下取整, 即 $\theta_{\text{set}} = 140^\circ$ 。

当满足闭锁判据 $\theta_{(i_{s0}, i_{n0})} < \theta_{\text{set}} = 140^\circ$, 判定为区外故障, 闭锁保护; 反之, 判定为内部故障, 保护可靠动作。

为此, 对传统的零序差动保护添加闭锁新判据, 使其能够在外部故障及特殊工况情况下闭锁保护; 且在发生区内故障时, 提供原有零序差动保护的保护能力。

故零序差动保护新判据为

$$\begin{cases} \text{启动判据: } I_{\text{op}} \geq I_{\text{op},0} \\ \text{动作判据: } I_{\text{op}} \geq k \cdot I_{\text{res}} \\ \text{附加闭锁判据: } \theta_{(i_{s0}, i_{n0})} < \theta_{\text{set}} = 140^\circ \end{cases} \quad (18)$$

当满足 $I_{\text{op}} \geq I_{\text{op},0}$ 时, 零序差动保护启动, 同时启动闭锁判据, 对零序电流进行 S 变换处理, 通过时间窗的推移同步计算出相位差值序列进行判别, 若满足附加闭锁判据, 则判定为区外故障, 闭锁保护, 反之, 则判定为区内故障, 保护开放。

3.2 仿真实验

本节针对图 4 中零序差动保护可能出现的情况进行仿真实验, 电流采样率设为 10 kHz, 选取 5 ms 作为识别判据的窗长, 能够在保证该判据在速动性和可靠性上均能取得不错的效果。通过时间窗的推移得到相位差序列, 并设置合适的门槛值即可对故障进行可靠识别, 相位差门槛值设为 140° 。

算例 1: 根据第 2 节分析, 在特殊工况持续过程中, 经过一段时间的磁通累积效应导致 TA 渐进性饱和, 零序电流在饱和后的 TA 里面劣性传变, 进而在特殊工况持续期间传统零序差动保护存在虚假差流, 引发误动。因此, 下面就该工况下零序差动保护闭锁新判据可靠性进行验证。

采用本文所提判据, i_{s0} 和 i_{n0} 经 S 变换处理后, 两电流间的相位差计算结果如图 12 所示, 相位差最大值为 63° , 小于 θ_{set} , 保护可靠闭锁。

算例 2: 换流变区内 A 相接地故障场景, $t=1$ s 时发生区内 A 相接地故障, 过渡电阻 5Ω , 故障持续 1 s。零序差动保护检测到的 i_{s0} 和 i_{n0} 波形如图 13。

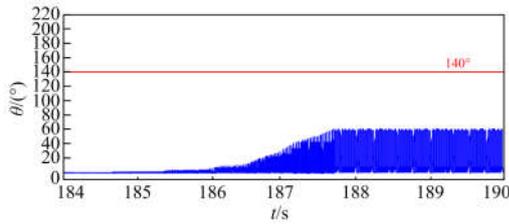


图 12 特殊工况下的 i_{s0} 和 i_{n0} 相位差计算结果
Fig. 12 Calculation results of the phase difference of i_{s0} and i_{n0} under special working condition

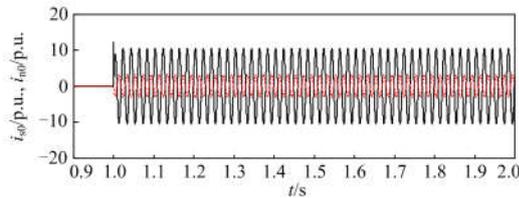


图 13 A 相接地故障工况下 i_{s0} 和 i_{n0} 波形
Fig. 13 Waveforms of i_{s0} and i_{n0} under A-phase grounding fault condition

由图 13 可知, 不计幅值条件下, 零序差动保护两侧零序电流的相位基本相差 180° 。如图 14 所示, 差流为 12 p.u., 远高于保护启动电流 0.1 p.u., 零序差动保护启动; 再经 S 变换后进行相位差的计算, 如图 15 所示, 故障后 1/4 周波内相位差为 181.4° , 高于 θ_{set} , 保护能够灵敏动作。

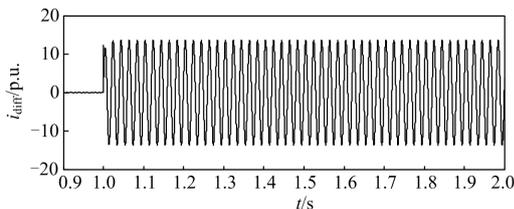


图 14 A 相接地故障工况下零序差流
Fig. 14 Zero-sequence differential current under A-phase grounding fault condition

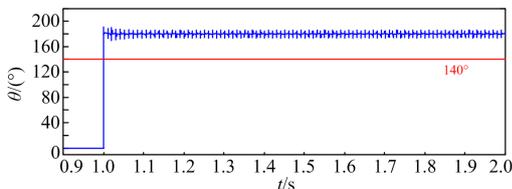


图 15 A 相接地故障工况下 i_{s0} 和 i_{n0} 相位差计算结果
Fig. 15 Calculation results of the phase difference of i_{s0} and i_{n0} under the A-phase grounding fault conditions

算例 3: 换流变区内 A 相接地故障伴随中性线 TA 饱和场景, $t=1$ s 时发生区内 A 相接地故障, 过

渡电阻 5Ω , 故障持续 1 s。零序差动保护检测到的 i_{s0} 和 i_{n0} 波形如图 16 所示。

由图 16 可以看出 i_{s0} 已饱和, 同样计算出 i_{s0} 和 i_{n0} 的相位差, 如图 17, 故障后 1/4 周波内相位差为 186.3° , 高于 θ_{set} , 保护灵敏动作。

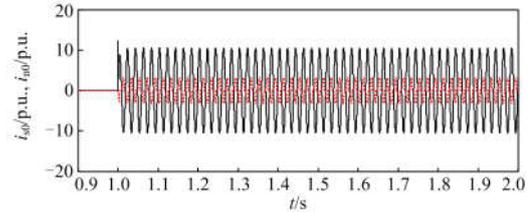


图 16 A 相接地故障伴随中性线 TA 饱和下 i_{s0} 和 i_{n0} 波形
Fig. 16 Waveforms of i_{s0} and i_{n0} under A-phase grounding fault accompanied with neutral TA saturation

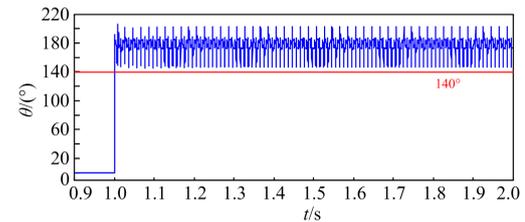


图 17 A 相接地故障伴随中性线 TA 饱和工况下 i_{s0} 和 i_{n0} 相位差计算结果

Fig. 17 Calculation results of the phase difference of i_{s0} and i_{n0} under the A-phase grounding fault accompanied with neutral TA saturation condition

算例 4: 换流变区内不平衡接地故障不同过渡电阻场景, 对区内接地故障不同过渡电阻($30\sim 180 \Omega$)工况下换流变零序差动保护闭锁新判据的灵敏性进行验证, 具体仿真计算结果如表 2 所示。

表 2 区内故障不同过渡电阻仿真计算结果
Table 2 Simulation calculation results of different transition resistances under internal fault

编号	故障类型	过渡电阻/ Ω	$\theta/^\circ$	判断结果
1	A-G	30	179.3	区内
2	A-G	60	180.8	区内
3	A-G	90	180.8	区内
4	A-G	120	179.2	区内
5	A-G	150	182.1	区内
6	A-G	180	179.6	区内
7	BC-G	30	185.8	区内
8	BC-G	60	186.2	区内
9	BC-G	90	181.3	区内
10	BC-G	120	184.5	区内
11	BC-G	150	181.3	区内
12	BC-G	180	182.3	区内

由表 2 可知, 上述 12 组数据相位差均不满足本文所提闭锁条件, 即在 1/4 个周波内判为区内故障, 保护灵敏动作。

4 结论

本文通过理论推导及计算研究了换流变中性线 TA 在特殊工况复杂直流偏磁作用下传变特性劣化的机理, 并基于实际投运高压直流输电工程模型及零序差动保护原理, 对该工况下零差保护的动作性能进行仿真分析。结果表明, 在特殊工况下, 不含制动判据的传统零序差动保护将误动。因此, 本文提出了基于 S 变换相位差的换流变零序差动保护闭锁新判据, 并通过仿真验证该判据的有效性。

参考文献

- [1] 康逸群, 游力, 李震宇, 等. 大型发电机变压器组继电保护配置分析[J]. 湖北电力, 2018, 42(2): 32-35, 40.
KANG Yiqun, YOU Li, LI Zhenyu, et al. Analysis on relay protection configuration of large generator-transformer unit[J]. Hubei Electric Power, 2018, 42(2): 32-35, 40.
- [2] 李应文, 刘涛, 裴东良, 等. 1000 kV 特高压主变压器差动保护配置分析[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(3): 106-113.
LI Yingwen, LIU Tao, PEI Dongliang, et al. Configuration analysis on current differential protection for 1000 kV UHV transformer[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(3): 106-113.
- [3] 邓涛. 一起主变零序差动保护误动事故分析[J]. 机电信息, 2014(33): 56-57.
DENG Tao. Analysis of a mal-operation accident of zero-sequence differential protection of main transformer[J]. Mechanical and Electrical Information, 2014(33): 56-57.
- [4] 张安龙. 一起 500 kV 自耦变零差保护误动原因分析[J]. 科技资讯, 2009(16): 129-130.
ZHANG Anlong. Analysis of mal-operation reasons for a zero-sequence differential protection of 500 kV auto-transformer[J]. Science & Technology Information, 2009(16): 129-130.
- [5] 山永霞. 一起 220 kV 自耦变零差保护误动原因分析及防范措施[C] // 2011 年云南电力技术论坛论文集(入选部分), 云南电网公司、云南省电机工程学会, 昆明, 中国: 2011: 1741-1745.
SHAN Yongxia. Analysis of a 220 kV autotransformer zero-sequence differential protection fault and its prevention[C] // 2011 Yunnan Electric Power Technology Forum (selected part), Yunnan Power Grid Corporation, Yunnan Society for Electrical Engineering, Kunming, China: 2011: 1741-1745.
- [6] 丁苏阳, 林湘宁, 翁汉琨, 等. 换流站零序差动保护在故障切除恢复性涌流期间的误动风险分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(增刊 1): 12-20.
DING Suyang, LIN Xiangning, WENG Hanli, et al. Mal-operation risk analysis and countermeasure on zero-sequence differential protection of converter substation during existence of recovery inrush due to fault removal[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(S1): 12-20.
- [7] DING Suyang, LIN Xiangning, ZHANG Zheyuan, et al. A novel Hausdorff distance based restrain criterion for zero-sequence differential protection of converter transformer[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 105: 753-764.
- [8] 段炼, 江安烽, 傅正财, 等. 多直流接地系统单极运行对沪西特高压变电站直流偏磁的影响[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 132-137.
DUAN Lian, JIANG Anfeng, FU Zhengcai, et al. Impact of multiple HVDC system monopolar operation on DC magnetic biasing in west Shanghai UHVAC substation[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 132-137.
- [9] 刘青松, 伍衡, 彭光强, 等. 南方电网所辖换流变压器直流偏磁数据分析[J]. 高压电器, 2017, 53(8): 153-158.
LIU Qingsong, WU Heng, PENG Guangqiang, et al. Analysis of DC magnetic bias data of converter transformer in CSG[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(8): 153-158.
- [10] 张东, 陶凤源, 董新胜, 等. 哈密地区变压器直流偏磁仿真分析及抑制措施研究[J]. 电瓷避雷器, 2015(1): 87-92.
ZHANG Dong, TAO Fengyuan, DONG Xinsheng, et al. Analysis and simulation of transformer DC bias and measures of suppression in Hami region[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(1): 87-92.
- [11] ALBERTSON V D, BOZOKI B. Geomagnetic disturbance effects on power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 1206-1216.
- [12] 马云龙, 闫振华. 多直流外送电网直流偏磁影响及治理研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(11): 98-104.
MA Yunlong, YAN Zhenhua. Influence of DC bias in sending-end grid with multi-HVDC and its countermeasures[J]. Smart Power, 2018, 46(11): 98-104.
- [13] 林志超, 刘鑫星, 王英民, 等. 基于零序电流比较的小电阻接地系统接地故障保护[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 15-21.
LIN Zhichao, LIU Xinxing, WANG Yingmin, et al. Grounding fault protection based on zero sequence current comparison in low resistance grounding system[J].

- Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 15-21.
- [14] 李海锋, 陈嘉权, 曾德辉, 等. 小电阻接地系统高灵敏性零序电流保护[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 198-204.
LI Haifeng, CHEN Jiaquan, ZENG Dehui, et al. High sensitive zero-sequence current protection for low-resistance grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 198-204.
- [15] 陈平, 林肖. 220 kV 输电线路故障继电保护动作分析[J]. 四川电力技术, 2008, 31(6): 66-67.
CHEN Ping, LIN Xiao. Relay protection action analysis of 220 kV transmission line faults[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2008, 31(6): 66-67.
- [16] 程钢, 宋汉蓉, 叶涛, 等. 110 kV 线路拒动故障分析及解决措施[J]. 水电能源科学, 2012, 30(11): 162-166.
CHENG Gang, SONG Hanrong, YE Tao, et al. Refuse operation fault analysis of 110 kV lines and its disposal measures[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(11): 162-166.
- [17] 张健康, 粟小华. 超高压线路后备保护整定原则探讨[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 120-125.
ZHANG Jiankang, SU Xiaohua. Discussion on setting calculation of backup protection for EHV transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 120-125.
- [18] 谢创树. 核电厂变压器零序差动保护配置及其整定计算[J]. 南方能源建设, 2015, 2(4): 74-80.
XIE Chuangshu. Design and setting of zero-sequence current differential protection for transformers in nuclear power plants[J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(4): 74-80.
- [19] 李长云, 李庆民, 李贞, 等. 直流偏磁条件下电流互感器的传变特性[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 127-132.
LI Changyun, LI Qingmin, LI Zhen, et al. Transfer characteristics of current transformers with DC bias[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 127-132.
- [20] 袁宇波, 陆于平, 许扬, 等. 切除外部故障时电流互感器局部暂态饱和及对变压器差动保护的影响及对策[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 12-17.
YUAN Yubo, LU Yuping, XU Yang, et al. The influence and countermeasure to transformer differential protection of CT partial transient saturation caused by external fault removal[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 12-17.
- [21] 陈豪威, 王媛媛, 唐夏菲, 等. 基于 S 变换暂态能量与方向的无整定配电网选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 71-78.
CHEN Haowei, WANG Yuanyuan, TANG Xiafei, et al. A new fault line selection method for distribution network system based on transient energy and direction of S-transformation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 71-78.
- [22] 肖助力, 龚仁喜, 陈双, 等. 基于改进 S 变换的电力系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 84-90.
XIAO Zhuli, GONG Renxi, CHEN Shuang, et al. Detection of harmonics in power system based on modified S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 84-90.
- [23] ZHAO Pu, CHEN Qing, SUN Kongming. A novel protection method for VSC-MTDC cable based on the transient DC current using the S transform[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 97: 299-308.
- [24] 李钊, 邹贵彬, 许春华, 等. 基于 S 变换的 HVDC 输电线路纵联保护方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1228-1235.
LI Zhao, ZOU Guibin, XU Chunhua, et al. S-Transform based pilot protection method for HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1228-1235.
- [25] 刘兴茂, 林圣, 何正友, 等. 基于 S 变换的行波相位比较式方向继电器[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 744-749.
LIU Xingmao, LIN Sheng, HE Zhengyou, et al. S transform based travelling wave phase comparison directional relay[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 744-749.

收稿日期: 2019-04-16; 修回日期: 2019-07-23

作者简介:

翁汉琍(1980—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统分析、继电保护与控制; E-mail: honey_weng@163.com

李昊威(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析、继电保护与控制。E-mail: 835020738@qq.com

(编辑 周金梅)