

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190901

基于波形相关性分析的换流变压器零序差动保护方案

罗美玲¹, 国兴超², 于晓军¹, 吴建云¹, 赫嘉楠³, 寿海宁¹, 郑涛², 栗磊³

(1. 国网宁夏电力有限公司, 宁夏 银川 750001; 2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 3. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 宁夏 银川 750001)

摘要: 通过对换流变压器外部故障切除产生恢复性涌流的分析, 得出换流变铁芯可能在涌流的作用下发生饱和, 导致灵敏度较高的中性线TA发生偏置现象, 使其测量失真导致零序差动保护误动。为此, 提出一种基于波形相关性的换流变零序差动保护新方案。通过分析换流变压器区内故障、区外故障及外部故障切除时零序电流的特点, 利用零序差动保护两侧自产零序电流和中性线上零序电流的波形相关性进行识别。通过合理选择电流互感器的极性, 使得区外故障时, 零差保护两侧的零序电流呈现“穿越性”特征, 其波形相似度较高, 相关系数为正值。区内故障时, 两侧零序电流波形相似度较小, 相关系数落入负值区。通过PSCAD/EMTDC大量仿真验证, 该判据可准确识别区内与区外故障, 不受恢复性涌流的影响, 且具有一定的抗TA饱和的能力。

关键词: 换流变压器; 零序差动保护; 相关性分析; TA饱和

Zero-sequence differential protection scheme for a converter transformer based on waveform correlation analysis

LUO Meiling¹, GUO Xingchao², YU Xiaojun¹, WU Jianyun¹, HE Jianan³, SHOU Haining¹, ZHENG Tao², LI Lei³

(1. State Grid Ningxia Electric Power Limited Company, Yinchuan 750001, China; 2. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 3. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Yinchuan 750001, China)

Abstract: Through the analysis of the recovery surge current generated by external fault reversal of the converter transformer, it is pointed out that the commutating iron core may be saturated under the action of the inrush current, resulting in the biasing of the sensitive neutral line TA and causing its measurement distortion to lead to zero. In this paper, a new scheme of commutation-changing zero-sequence differential protection based on waveform correlation is proposed. By analyzing the characteristics of faults in the converter transformer, out-of-zone faults and zero-sequence currents during external fault removal, the zero-sequence differential protection is used to identify the waveform correlation between the zero-sequence currents on both sides and the zero-sequence current on the neutral line. By reasonably selecting the polarity of the current transformer, the zero-sequence current on both sides of the homodyne protection exhibits a "traversal" characteristic when the fault is outside the zone, and the waveform similarity is high, and the correlation coefficient is positive. When the fault occurs in the area, the similarity of the zero-sequence current waveforms on both sides is small, and the correlation coefficient falls into the negative value area. Through a large number of simulations verified by PSCAD/EMTDC, this criterion can accurately identify faults in and out of the zone, is not affected by the recovery inrush, and has some ability to resist TA saturation.

This work is supported by the Key Project of Smart Grid Technologies and Equipment of National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGNX0000DKJ S1900460).

Key words: converter transformer; zero sequence differential protection; correlation analysis; TA saturation

0 引言

在超/特高压直流输电工程中, 换流变压器是连

接交直流系统的重要元件, 保证其安全稳定运行至关重要。在超/特高压直流输电工程中, 除了配置纵联差动保护作为换流变主保护以外, 还在换流变Y侧的三相进线处装设有零序差动保护, 作为换流变重要保护之一^[1]。零差保护通过Y侧三相进线自产零序电流和中性点零序电流的差值作为动作电流来检测换流变内部接地故障, 具有较强的抗涌流能力和较高的准确性^[1], 在非内部故障时要求能够可靠闭

基金项目: 国家重点研发计划智能电网技术与装备重点专项资助(2016YFB0900600); 国家电网公司科技项目资助(SGNX0000DKJ S1900460)“超/特高压换流变故障性涌流及其对差动保护的影响研究”

锁。但是, 由于变压器铁芯存在饱和特性, 在外部故障持续期间与外部故障消除后电压恢复过程中, 变压器的绕组侧及中性线处均流过较大的故障电流或者恢复性涌流, 由于零差保护两侧TA型号参数存在差异, 在故障电流较大的非周期分量的影响下可能会出现一侧TA饱和的现象, 从而产生虚假的差流, 导致保护发生误动。近年来现场出现了多起由于故障切除产生恢复性涌流而引起的误动^[2]。

目前针对换流变零差保护动作特性的研究很少, 大多数对变压器零差保护动作性能的研究主要是针对交流系统传统变压器展开的^[3-4]。在常规的交流变压器零差保护基础上, 有学者提出了一些改进措施: 文献[5]提出了变特性的零差保护新方案来解决传统零差保护动作单一的缺点; 文献[6]提出通过优化比例判据来解决零差保护灵敏度的问题; 文献[7]提出采用零序电流自动补偿的方法来改善零差保护可靠性及灵敏性。文献[8]分析得出换流变外部故障切除可能会引起恢复性涌流使TA出现暂态饱和, 给换流变零差保护带来误动风险, 从而影响直流输电工程安全运行。文献[9]利用Hausdorff距离算法作为换流变零差保护辅助判据, 具有较好的抗恢复性涌流的能力, 但并未对外部故障存续及内部故障引起TA饱和的场景进行分析, 可能会带来误判。对于传统的交流系统变压器零差保护暴露出来的误动问题, 考虑到特高压换流站交直流场线路复杂, 电磁环境更加复杂, 可推断特高压换流变零差保护面临着同样甚至更高的误动风险。因此, 有必要探索新的方法, 来提升换流变零差保护的可靠性。

本文提出一种基于波形相关性原理的零序差动保护判据, 利用三相自产零序电流与中性线上零序电流的波形相关度信息, 构成具有自适应制动特性的零差保护判据。新判据可以有效解决外部故障及外部故障切除伴随一侧TA饱和产生虚假差流导致零差保护误动的问题, 提高了零差保护的可靠性, PSCAD/EMTDC仿真实验验证了新判据的有效性。

1 换流变零序差动保护原理

换流变零序差动保护构成如图 1 所示。换流变零差保护通过三相进线电流及中性线上的电流差值来检测换流变内部接地故障。三相进线电流的相量和为 3 倍零序电流, 称为三相自产零序电流 $3\dot{I}_{\text{self}0}$, 中性线上电流也为 3 倍零序电流, 称为中性线上零序电流 $3\dot{I}_{\text{n}0}$, 两侧电流正方向如图 1 所示。在正常工况下, 由于系统三相对称, 流过中性点的 3 倍零

序电流 $3\dot{I}_{\text{n}0} = 0$, 流入保护装置的三相电流之和, $3\dot{I}_{\text{self}0} = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$, 即 $3\dot{I}_{\text{self}0} = 3\dot{I}_{\text{n}0} = 0$ 。而当系统发生区内接地故障时(图 1 中 F_1), 零序差动电流值很大能够可靠动作。当系统发生区外故障时(图 1 中 F_2), 虽然 $3\dot{I}_{\text{self}0}$ 和 $3\dot{I}_{\text{n}0}$ 不再等于 0, 但 $|3\dot{I}_{\text{self}0}| = |3\dot{I}_{\text{n}0}|$ 仍然成立, 零差保护将不会动作。零序差动保护的判据为

$$I_{\text{op}} > I_{\text{op},0} \quad (1)$$

式中: $I_{\text{op}} = |3\dot{I}_{\text{self}0} - 3\dot{I}_{\text{n}0}|$; $I_{\text{op},0}$ 为换流变零差保护动作电流, 一般整定为换流变接地绕组的额定电流的 0.3 倍, 即 $I_{\text{op},0} = 0.3 \text{ p.u.}$ 。

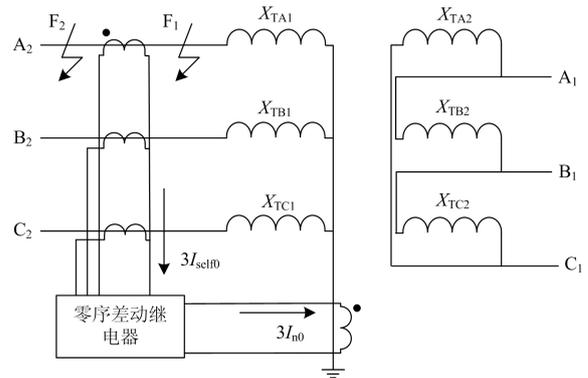


图 1 换流变零差保护原理接线图

Fig. 1 Wiring diagram of commutation and homodyne protection principle

2 恢复性涌流对换流变零序差动保护的影响

2.1 换流变故障恢复性涌流产生机理

对于一般的单相变压器而言, 可利用T型等效模型来模拟其暂态数学模型^[10]。变压器的T型等效电路如图2所示。

图2中 R_1 和 L_1 代表一次侧的电阻以及漏电抗, R_2 和 L_2 代表二次侧的电阻及漏电抗, R_m 和 L_m 代表励磁支路的励磁电阻及励磁电抗, R_L 和 L_L 代表负载电阻及负载电抗, u 代表变压器端电压, u_m 为励磁电压, i_1 、 i_2 和 i_m 分别为一次侧电流、二次侧电流及励磁电流。

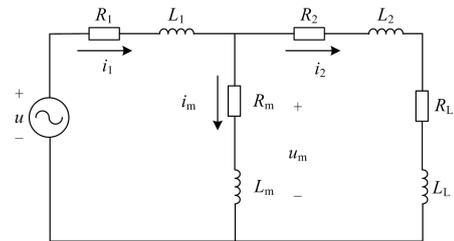


图 2 变压器 T 型等效电路

Fig. 2 Transformer T-type equivalent circuit

根据变压器数学模型, 其励磁电势 u_m 与端电压 u 的函数关系为

$$u = R_1 i_1 + (R_2 + R_L) i_2 + L_1 \frac{di_1}{dt} + (L_2 + L_L) \frac{di_2}{dt} \quad (2)$$

$$u_m = u - R_1 i_1 - L_1 \frac{di_1}{dt} \quad (3)$$

令电源电势为 $u(t) = \sqrt{2}U \cos(\omega t + \theta)$, 正常运行时, 变压器一次回路的电阻和电感相对二次回路来说很小, 可忽略。此时励磁支路的电势 u_m 可以近似认为与电源电势相等, 则变压器的铁芯磁链为

$$\psi(t) = \psi_m \sin(\omega t + \theta) \quad (4)$$

式中, $\psi_m = \frac{\sqrt{2}U}{\omega}$ 。令 $t=0$ 时刻发生变压器外部故障, 变压器二次回路的电阻、电感突变为 R_{2k} 和 L_{2k} , 其励磁电流变得小, 可以忽略。令 $n = \frac{|R_{2k} + jX_{2k}|}{|R_k + jX_k|}$, 表示区外故障的严重程度, 其中 $R_k = R_1 + R_{2k}$, $X_k = X_1 + X_{2k} = \omega(L_1 + L_{2k})$ 。不计一次侧阻抗的影响, 此时励磁支路的电势可表达为

$$nu(t) \approx nu = \sqrt{2}nU \cos(\omega t + \theta) \quad (5)$$

故障发生时, 变压器铁芯磁链不会突变, 根据式(4)和 $\psi(0_-) = \psi(0_+)$ 可得变压器的铁芯磁链为

$$\psi(t) = n\psi_m \sin(\omega t + \theta) + (1-n)\psi_m \sin(\theta) \quad (6)$$

令 $t = \tau$ 时刻故障切除, 变压器二次回路的电阻电感突变为 R'_2 、 L'_2 。当故障切除电压恢复后, 一次回路阻抗相对于二次回路很小, 同样可忽略, 此时励磁支路电势 u_m 又可以近似认为与电源电势 u 相等, 根据式(4)和 $\psi(0_-) = \psi(0_+)$ 可得此时变压器铁芯磁通为

$$\psi(t) = \psi_m \sin(\omega t + \theta) + \psi_{1,p}, \quad t \geq \tau \quad (7)$$

式中, $\psi_{1,p} = (1-n)\psi_m (\sin \theta - \sin(\tau\omega + \theta))$ 称为变压器的偏磁。正是由于偏磁的存在造成了恢复性涌流。此外, 切除角和恢复角也会对偏磁幅值产生很大影响, 从而影响故障恢复性涌流的严重程度。

图3为换流变在外部故障切除下的Y型绕组磁链变化情况, 故障发生于1.0 s。图中蓝、红、黄三色线条分别代表A、B、C三相磁链曲线。可看出, 三相磁链受到不同切除角的影响, 均产生不同程度的饱和现象, 因此该过程中将有涌流现象产生。图4为该换流变励磁电流, 蓝、红、黄三色线条分别代表A、B、C三相励磁电流曲线。可以看出故障切除以后电压恢复过程中三相均有涌流产生且各相涌流特性各不相同。

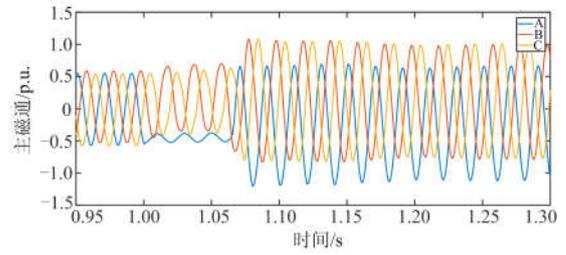


图3 换流变外部故障切除下的磁通
Fig. 3 Flux of the converter transformer under external fault removal

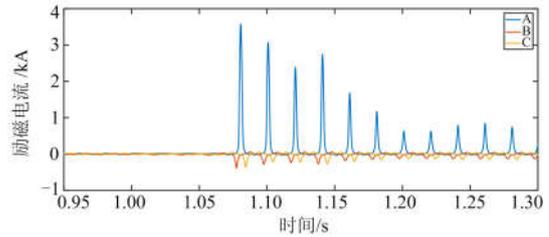


图4 换流变外部故障切除下的励磁电流
Fig. 4 Excitation current of converter transformer under external fault removal

2.2 恢复性涌流引起的TA饱和对零差保护的影响

由于换流变压器多由三个独立的单相变压器组成, 在故障以及故障切除过程中, 三相磁路不会相互产生影响。对于三相组式变压器来说, 三相电压相角互差 120° , 即使是同一时刻的故障, 各相的故障角及切除角均不同, 根据2.1节的磁链分析, 三相铁芯饱和程度并不一致, 相应的各相涌流特征均存在差异, 三相电流叠加后零序电流幅值明显上升, 且出现直流分量及高次谐波分量。

图5为外部故障发生及切除后中性线上零序电流变化情况, 故障时间为1.00~1.05 s。正常运行工况也存在一幅值较小的零序电流。此时中性线上零序电流关于时间轴对称, 并不会影响TA的传变特性。但当故障切除后, 零序电流幅值显著增大, 并产生了正负半波不对称的偏置现象, 可能会导致TA饱和从而影响TA的正常传变。

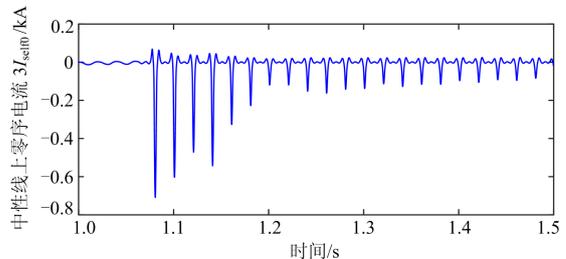


图5 中性线上零序电流波形
Fig. 5 Zero-sequence current waveform on the neutral line

为了分析中性线上零序电流测量发生畸变的机理, 需要对TA的传变特性进行研究。本文采用PSCAD/EMTDC中J-A互感器模型进行分析。在J-A互感器模型中, 参数主要用于对不同励磁曲线轨迹进行模拟, 其中与互感器饱和有关的励磁电流 i_m 表达式为^[11]

$$\frac{di_m}{dt} = \frac{l \left[R_L (i_2 - i_m) + L_L \frac{di_2}{dt} \right]}{\mu_0 N^2 A (1 + \frac{dM}{dH} + L_L)} \quad (8)$$

式中: l 为互感器铁芯等效磁链长度; i_m 为互感器励磁电流; i_2 为互感器二次侧电流; R_L 、 L_L 分别为J-A模型中TA二次回路负载电阻、电抗; μ_0 为真空下磁导率; A 为TA铁心等效截面积; N 为TA二次绕组匝数; M 为磁化强度; H 为磁场强度。

由于正常运行时换流变三相电流对称, 零序电流很小, 且中性线侧TA抗饱和能力一般劣于三相进线侧TA, 当零序电流存在非周期分量时, 铁芯剩磁累积可能会使TA磁链发生偏置, 进而导致TA饱和^[12]。对于零序差动保护而言, 其灵敏度较高但是没有配置二次谐波制动, 中性线上TA饱和导致的传变误差很有可能带来误动风险。

图6为故障前后中性线上TA铁芯磁感应强度, 可见故障切除以后, 铁芯剩磁累积导致TA磁链发生偏置, 严重影响TA的正常传变, 进而影响零序差动保护的動作可靠性。

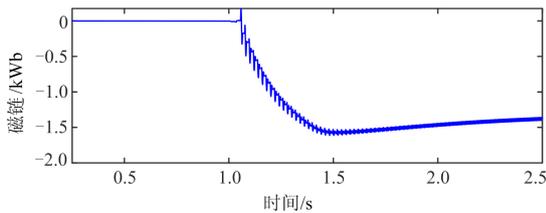


图6 故障切除后中性线上TA铁芯磁感应强度
Fig. 6 TA core magnetic induction strength on the neutral line after failure

3 基于波形相关性分析的换流变零差保护新原理

3.1 波形相关度的基本原理

相关分析主要是用来研究两个信号之间的相似或相依程度, 从而实现信号的检测识别与提取^[13-14]。假设某一时段内的两个零序电流序列为 $x(n)$ 和 $y(n)$, 定义 r_{ab} 为 $x(n)$ 和 $y(n)$ 的相关系数。

$$r_{ab} = \frac{\sum_{n=0}^k \text{cov}(x, y)}{\sum_{n=0}^k \sqrt{\text{Var}(x)\text{Var}(y)}} \quad (9)$$

式中: $\text{cov}(x, y)$ 为 $x(n)$ 与 $y(n)$ 的协方差; $\text{Var}(x)$ 和 $\text{Var}(y)$ 分别为 $x(n)$ 与 $y(n)$ 的方差。由许瓦兹(Schwartz)不等式可得^[13], 两个信号的相关度 $|r_{ab}| \leq 1$ 。 r_{ab} 可反映两电流信号间的幅值相角相关程度: r_{ab} 越大, 两个信号波形越相似; 当两个电流信号幅值成比例且相位相同时相关度 $r_{ab}=1$, 为强正相关; 幅值成比例且相位相反时相关度 $r_{ab}=-1$, 为强负相关; 幅值不成比例时 $-1 < r_{ab} < 1$, 为弱相关。

图7和图8为区外故障(不计TA饱和)和区内故障(不计TA饱和)时, 零序电流 $x(n)$ 、 $y(n)$ 的波形, 其中 $x(n)$ 为三相进线侧零序电流, $y(n)$ 为中性线上零序电流。可见, 正常情况下, $x(n)$ 、 $y(n)$ 是周期为 2π 的周期函数, 区外故障时 $x(n)$ 和 $y(n)$ 波形幅值成比例且相位相同, 相关度 r_{ab} 为1; 区内故障时 $x(n)$ 和 $y(n)$ 波形幅值成比例且相位相反, 相关度 $r_{ab}=-1$ 。因此, 相关度的大小可以清楚地区分零差保护区内外故障。

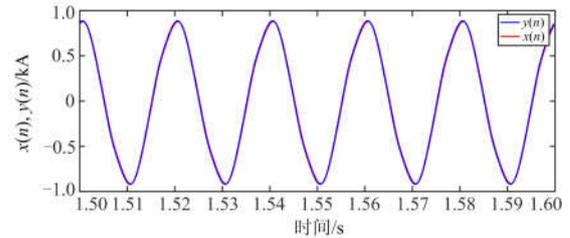


图7 区外故障(不计TA饱和)零序电流

Fig. 7 Out-of-zone fault (excluding TA saturation) current

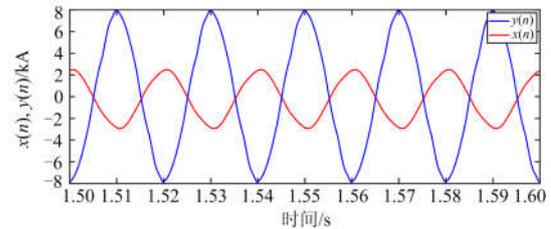


图8 区内故障(不计TA饱和)零序电流

Fig. 8 Fault in the zone (excluding TA saturation) current

3.2 基于波形相关性分析的零序差动保护新判据

由3.1节分析可知相关性分析对信号间差别具有放大差异的作用, 其差异具体表现在两信号在波形之间的差异, 即相关系数越大, 相关性越强, 反之越弱。基于特高压直流输电模型, 利用换流变零差保护两侧的 $3\dot{I}_{\text{self}0}$ 和 $3\dot{I}_{\text{n}0}$ 采样值构造如下两个电流离散信号^[14-15]。

$$\begin{cases} x(n) = 3i_{\text{self0}}(nT) \\ y(n) = 3i_{\text{n0}}(nT) \end{cases} \quad (10)$$

式中： $x(n)$ 和 $y(n)$ 为虚拟电流信号； $3i_{\text{self0}}$ 为三相进线侧自产零序电流采样值； $3i_{\text{n0}}$ 为中性线上零序电流采样值； T 为采样间隔。

得到两侧电流的离散信号后，根据式(9)计算出两侧电流相关系数 r_{ab} 。区外故障时，保护两侧零序电流的波形幅值完全相同，相角差基本为 0，为强正相关，相关系数为 1。区内故障时，两侧零序电流波形相似度小，相角差接近 180° ，为强负相关，相关系数接近-1，为了有效区分内部及外部故障，设置动作门槛 $r_{\text{ab.set}} = R_{\text{set}}$ 。改进后的的零序差动保护判据如式(11)所示。

$$\begin{cases} I_{\text{op}} > I_{\text{op.0}} \\ r_{\text{ab}}(i_{\text{self0}}, i_{\text{n0}}) < r_{\text{ab.set}} = R_{\text{set}} \end{cases} \quad (11)$$

式中： $r_{\text{ab.set}}$ 为相关系数动作门槛，其动作值 R_{set} 通过 ± 800 kV 特高压直流输电模型的实际参数验证给出； $r_{\text{ab}}(i_{\text{self0}}, i_{\text{n0}})$ 为两侧零序电流相关系数； $I_{\text{op}} = |3i_{\text{self0}} - 3i_{\text{n0}}|$ ， $I_{\text{op.0}}$ 为换流变零差保护动作电流，其大小为换流变接地绕组的额定电流的 0.3 倍^[15]，即 $I_{\text{op.0}} = 0.3 \text{ p.u.}$ 。

4 仿真分析

以 ± 800 kV 特高压直流输电模型中的整流侧换流变 T1 为研究对象，如图 9 所示。零差保护测量到的是换流变 Y0 侧的 i_{self0} 和 i_{n0} 。仿真模型相关参数如表 1 所示^[16-18]。

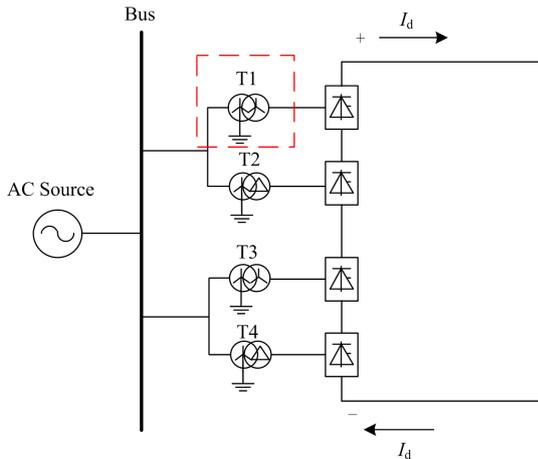


图 9 特高压双极 12 脉动换流单元示意图

Fig. 9 Schematic diagram of UHV bipolar 12-pulse converter unit

表 1 仿真模型参数

Table 1 Simulation model parameters

| 参数 | 数值 |
|-----------|---------|
| 额定容量/MW | 760 |
| 额定变比/kV | 525/170 |
| 联接方式 | Y0/Y |
| 正序漏抗/p.u. | 0.18 |
| 空心电抗/p.u. | 0.2 |
| 饱和点/p.u. | 1.25 |
| 励磁电流/p.u. | 1% |

通过 ± 800 kV 特高压直流输电模型分析验证新判据在不同典型故障场景下的有效性。为便于分析，中性线 TA 采用 PSCAD 中饱和特性良好的 J-A 模型^[19-23]。仿真总时长设为 2.0 s 且电流采样率设为 4 kHz，选取 20 ms 作为识别判据的窗长，通过时间窗的推移得到相关系数 r_{ab} 计算序列。

4.1 换流变区外故障(不计 TA 饱和)

利用搭建的 PSCAD/EMTDC 模型对换流变区外故障(不计 TA 饱和)场景进行仿真， $t=1$ s 时发生区外 A 相接地故障，零差保护检测到 i_{self0} 和 i_{n0} 的波形如图 10 所示，蓝色实线为 i_{self0} ，红色虚线为 i_{n0} 。图 11 蓝线为 r_{ab} 计算序列，虚线部分为正常情况下 r_{ab} 的计算值，由于正常情况下零序电流非常小，零差保护不会动作，这里的“1”为虚假的，并非指区外故障^[24-26]。

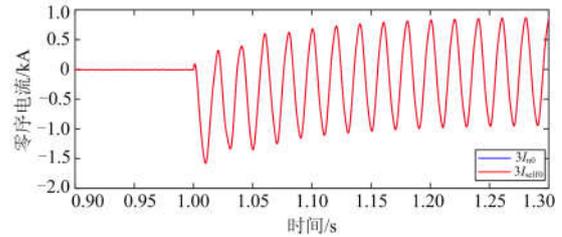


图 10 区外故障(不计 TA 饱和)工况下的 i_{self0} 和 i_{n0} 波形

Fig. 10 i_{self0} and i_{n0} waveforms for out-of-zone faults (excluding TA saturation)

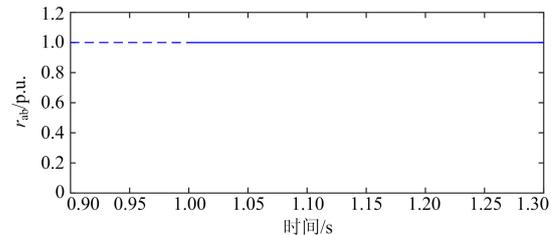


图 11 区外故障(不计 TA 饱和)下 r_{ab} 计算序列

Fig. 11 r_{ab} calculation sequence under out-of-zone fault (excluding TA saturation)

由图 10、图 11 可以看出，发生外部故障(不计 TA 饱和)时，两零序电流波形基本完全重合，相位

相同, 为强正相关, 判定为区外故障, 在故障持续时间内, 两电流波形基本一致, 其幅值和相位基本没有差异。其零序差动电流幅值大小基本为 0, 远低于保护动作值, 保护可靠闭锁。

外部故障持续期间, 较大的零序电流可能导致中性线 TA 饱和, TA 传变特性的劣化会产生较大的零序差流^[27-29], 进而引发传统零差保护误动。下面对此类工况进行验证。

4.2 换流变区外故障(计及 TA 饱和)

$t=1$ s 时发生区外 A 相接地故障伴随 TA 饱和, 零差保护检测到 i_{self0} 和 i_{n0} 的波形如图 12 所示。其中各波形及变量含义与 4.1 节相同。

如图 12 所示, 中性线上 TA 发生饱和, 饱和后 i_{n0} 传变畸形, 此时两侧零序波形为弱正相关。图 13 为区外故障伴随 TA 饱和和工况下的零序差流波形, 其幅值大小接近 0.49 p.u., 大于保护动作电流 0.3 p.u., 传统换流变零差保护将误动。采用本文所提判据, i_{self0} 和 i_{n0} 的相关系数序列 r_{ab} 计算结果如图 14 所示, 其中 r_{ab} 的最小值为 0.96。

除上述外部故障存续期间 TA 饱和造成零差保护误动情况外, 根据 2.2 节分析, 中性线 TA 在外部故障存续期间积累了一定剩磁, 外部故障切除后, TA 受到恢复性涌流的影响, 剩磁的累积效应会导致 TA 饱和, 进而在外部故障切除后传统零差保护存在虚假差流, 引发误动。因此, 下面就该工况下零差保护新判据可靠性进行验证。

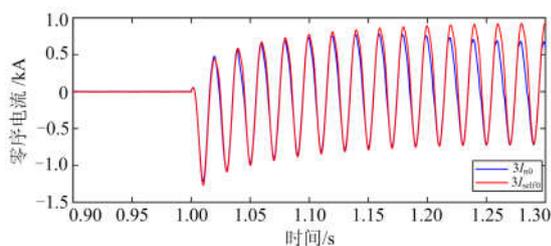


图 12 区外故障(计及 TA 饱和)工况下 i_{self0} 和 i_{n0} 波形
Fig. 12 i_{self0} and i_{n0} waveforms for out-of-zone faults (taking into account TA saturation)

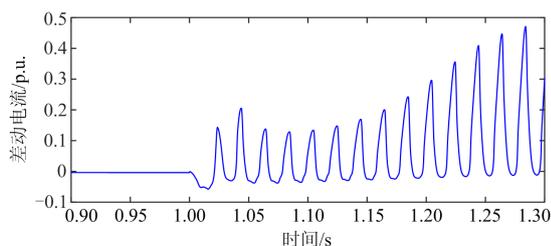


图 13 区外故障(计及 TA 饱和)工况下的零序差流
Fig. 13 Zero sequence difference flow under out-of-zone faults (taking into account TA saturation)

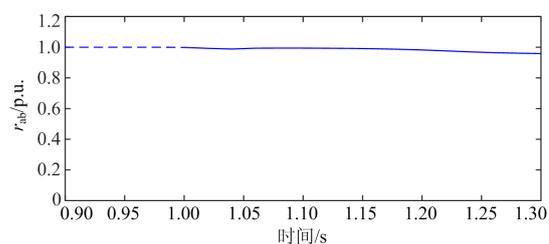


图 14 区外故障(计及 TA 饱和)工况下 r_{ab} 计算序列
Fig. 14 r_{ab} calculation sequence under out-of-zone fault (taking into account TA saturation)

4.3 恢复性涌流(计及 TA 饱和)

$t=1$ s 时发生区外 A 相接地故障, 0.05 s 后故障切除。零差保护检测到 i_{self0} 和 i_{n0} 的波形如图 15 所示。

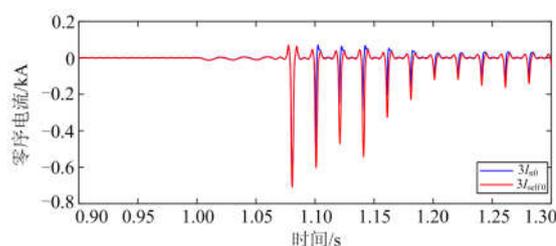


图 15 恢复性涌流(计及 TA 饱和)工况下 i_{self0} 和 i_{n0} 波形
Fig. 15 i_{self0} and i_{n0} waveforms under restorative inrush current (taking into account TA saturation)

截取恢复性涌流较为严重情况, 换流变三相磁链严重不对称, 中性线上 TA 受恢复性涌流影响, 其偏磁不断积累, 导致 TA 饱和, 传变后的零序电流发生畸变, 相位出现少许偏差且出现虚假差流。图 16 为恢复性涌流计及 TA 饱和和工况下的零序差流波形, 此时两波形为弱正相关, 可以看出故障切除后, 因中性线上零序 TA 饱和, 将在零差保护中产生虚假零序差流, 其幅值最大达到 0.5 p.u., 高于保护动作值。若不加闭锁判据, 零差保护将会误动。按本文所提判据, i_{self0} 和 i_{n0} 的相关系数序列计算结果如图 17 所示, r_{ab} 的最小值为 0.57。

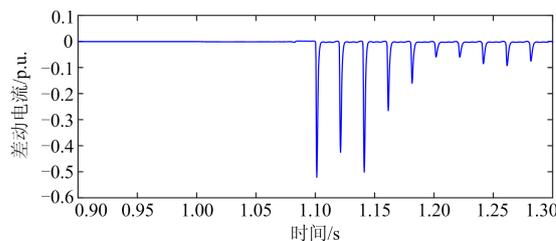


图 16 恢复性涌流(计及 TA 饱和)工况下的零序差流
Fig. 16 Zero sequence difference flow under restorative inrush current (taking into account TA saturation)

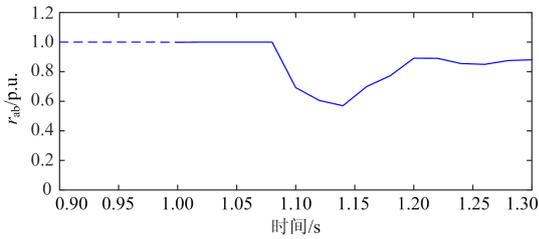


图 17 恢复性涌流(计及 TA 饱和)工况下 r_{ab} 计算序列
Fig. 17 r_{ab} calculation sequence under restorative inrush current (taking into account TA saturation)

4.4 换流变区内故障(不计 TA 饱和)

$t=1$ s 时发生区内单相接地故障。零差保护检测到 i_{self0} 和 i_{n0} 的波形如图 18 所示。

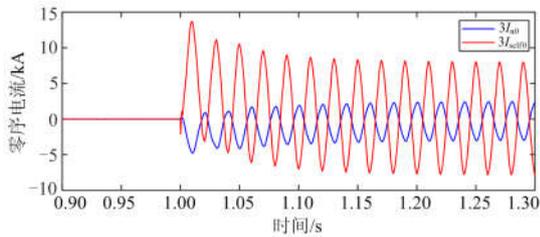


图 18 区内故障(不计 TA 饱和)工况下的 i_{self0} 和 i_{n0} 波形
Fig. 18 i_{self0} and i_{n0} waveforms in a fault in the zone (excluding TA saturation)

可以看出, 不计 TA 饱和时内部故障场景中故障波形趋于稳定后, i_{self0} 和 i_{n0} 的相位相反, 差动电流如图 19 所示, 幅值差显著增大, 远高于保护动作值。对两侧零序电流进行相关性系数的计算, r_{ab} 计算序列如图 20 所示, 故障后两电流波形幅值成比例且相位相反, 为强负相关, r_{ab} 最小值为-1。

故障发生瞬间, 零序电流发生突变, 故障前两侧电流几乎相同, $r_{ab}=1$ 。而故障一侧零序电流相位反转, 故障后 1 周内 r_{ab} 突变为-1, 可准确识别区内与区外故障。

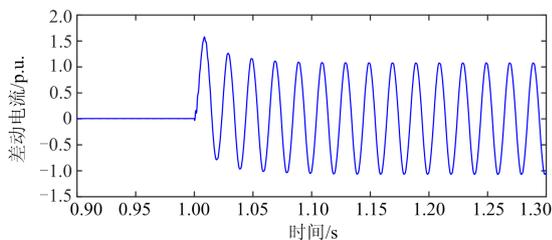


图 19 区内故障(不计 TA 饱和)工况下的零序差流波形
Fig. 19 Zero sequence difference flow under fault condition (excluding TA saturation)

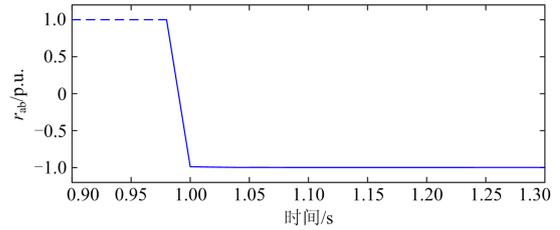


图 20 区内故障(不计 TA 饱和)工况下的 r_{ab} 计算序列
Fig. 20 r_{ab} calculation sequence under fault conditions (excluding TA saturation)

4.5 换流变区内故障(计及 TA 饱和)

$t=1$ s 时发生区内 A 相接地故障伴随换流变 TA 饱和。零差保护检测到的 i_{self0} 和 i_{n0} 的波形如图 21 所示, 差动电流波形如图 22 所示。

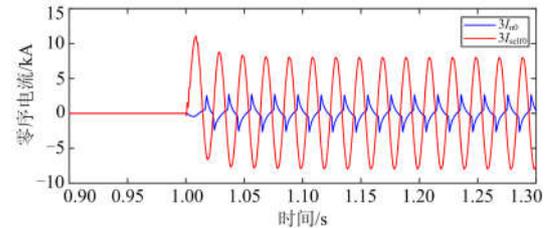


图 21 区内接地故障(计及 TA 饱和)工况下 i_{self0} 和 i_{n0} 波形
Fig. 21 i_{self0} and i_{n0} waveforms in ground faults (counting for TA saturation)

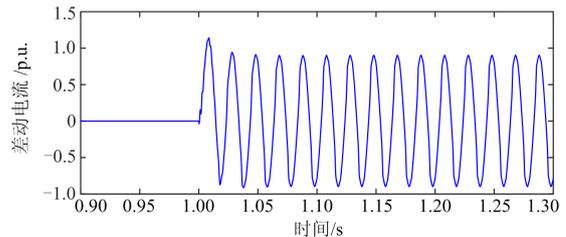


图 22 区内接地故障(计及 TA 饱和)工况下的零序差流
Fig. 22 Zero-difference waveform underground fault (in account of TA saturation)

可以看出, 当区内 TA 饱和后幅值差仍显著增大, 远高于动作定值。图 23 为内部故障伴随 TA 饱

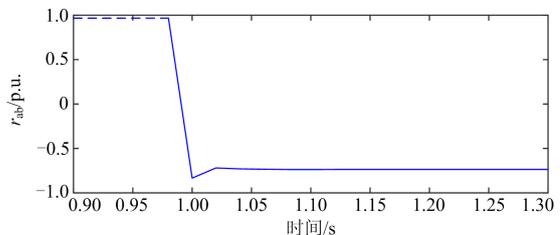


图 23 区内接地故障(计及 TA 饱和)工况下 r_{ab} 计算序列
Fig. 23 r_{ab} calculation sequence underground fault (taking into account TA saturation)

和场景下 r_{ab} 计算序列, 两波形的相位相反幅值仍成比例, 故障后 1 周波内 r_{ab} 突变为 -1, r_{ab} 最小值为 -1, 可准确识别区内与区外故障。

表 2 为不同故障情况下的仿真结果, 基于第 4 节分析, 恢复性涌流伴随 TA 饱和时的相关系数最小, 为 0.57, 即临界相关系数 $r_{abd}=0.57$, 考虑到工程实际需要计及各情况下 TA 传变特性不一致, 可适当减小临界相关系数以提升判据的可靠性, 动作门槛值 R_{set} 设置为 0.4。基于波形相关性分析的零序差动保护识别判据如式(12), 各变量含义同式(11)。

$$\begin{cases} I_{op} > I_{op,0} \\ r_{ab}(i_{setf0}, i_{n0}) < r_{ab,set} = 0.4 \end{cases} \quad (12)$$

因此, 保护启动后, 满足式(12)时判定为区内故障, 保护动作。反之, 判定为区外故障, 保护可靠闭锁。验证结果如表 2 第四列所示, 结果表明, 现有的零序差动保护有一定的误动风险, 而本文提出的基于波形相关性分析的零序差动保护策略具有较强的抗 TA 饱和能力, 在恢复性涌流引起 TA 饱和情况下也能正确动作。

表 2 不同故障情况下的仿真验证结果

Table 2 Simulation verification results under different fault conditions

| 故障类型 | 传统零序差动保护判据 | | 基于波形相关性的零差新判据 | |
|-------|---------------------|------|-----------------------------|------|
| | 差流幅值/p.u. | 动作情况 | 相关性系数最小值 $r_{ab,min}$ /p.u. | 动作情况 |
| 区内故障 | 金属性接地 TA 不饱和 | 1.6 | √ | √ |
| | 10 Ω 过渡电阻接地 TA 不饱和 | 1.1 | √ | √ |
| | 100 Ω 过渡电阻接地 TA 不饱和 | 0.62 | √ | √ |
| | 金属性接地伴随 TA 饱和 | 1.15 | √ | √ |
| 区外故障 | 金属性接地 TA 不饱和 | 0 | × | × |
| | 金属性接地伴随 TA 饱和 | 0.49 | * | × |
| 恢复性涌流 | 外部故障切除 TA 不饱和 | 0 | × | × |
| | 外部故障切除伴随 TA 饱和 | 0.51 | * | × |

注: √表示保护动作, ×表示保护不动作, *表示保护误动。

5 结论

零序电流差动保护是换流变压器应对绕组接地故障的重要保护方式, 但是现有的零差保护在外部故障持续及外部故障切除产生恢复性涌流工况下, 存在 TA 饱和使零差保护误动的风险。本文通过分析零差保护两侧的零序电流的幅值和相位特点, 结合相关性分析对信号间差别具有放大差异的作用, 提出了基于相关性分析的换流变零差保护新判据。基于高压直流输电模型进行了仿真验证, 结果表明, 现有的零序差动保护在外部故障持续及外部故障切除伴随 TA 饱和工况下可能会误动, 所提基于波形相关性的零差保护新判据能够可靠闭锁, 并且在各类内部故障工况下都能够灵敏动作, 具有较强的抗 TA 饱和能力, 在外部故障切除引起换流变恢复性涌流伴随 TA 饱和情况下, 仍具有可靠识别能力。

参考文献

- [1] 朱声石. 变压器零序差动保护的讨论[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(10): 5-8.
ZHU Shengshi. Discussion on transformer zero-sequence current differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(10): 5-8.

- [2] 石恒初. 一起 500 kV 变压器零序差动保护误动事故的分析[C] // 2012 年云南电力技术论坛论文集(文摘部分), 云南电网公司、云南省电机工程学会, 2012: 100-101.
SHI Hengchu. Analysis of a 500 kV transformer zero-sequence differential protection mis-operation accident[C] // 2012 Yunnan Power Technology Forum Proceedings (Abstracts), Yunnan Power Grid Corporation, Yunnan Provincial Electrical Engineering Society, 2012: 100-101.
- [3] 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, 2011: 1741-1745.
SHAN Yongxia. Analysis of a 220 kV autotransformer zero-sequence differential protection fault and its prevention[C] // 2011 Yunnan Power Technology Forum Proceedings (Selected), Yunnan Power Grid Corporation, Yunnan Society for Electrical Engineering, 2011: 1741-1745.
- [4] 王维俭. 再谈 220 kV 及以上大型变压器装设零序差动保护的必要性[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(4): 1-5.
WANG Weijian. Necessity of zero-sequence differential protection for large-sized transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(4): 1-5.
- [5] 罗云照, 陈朝晖. 变压器零序差动保护制动电流算法

- 探讨[J]. 南方电网技术, 2011, 5(5): 77-80.
- LUO Yunzhao, CHEN Zhaohui. On the algorithm of resisting current of transformer's zero-sequence differential protection[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(5): 77-80.
- [6] 吴大立, 尹项根, 张哲, 等. 基于负序电流判别的变压器差动保护零序电流自动补偿方法[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(2): 28-31.
- WU Dali, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Zero-sequence current automatic compensation of transformer differential protection based on negative-sequence current[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(2): 28-31.
- [7] 张项安, 单强, 张弦. 变压器零序差动保护的几个问题[J]. 继电器, 2005, 33(15): 13-17.
- ZHANG Xiang'an, SHAN Qiang, ZHANG Xian. Several problems on zero-sequence differential protection for transformer[J]. Relay, 2005, 33(15): 13-17.
- [8] 丁苏阳, 林湘宁, 翁汉俐, 等. 换流变零差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.
- [9] 鲁俊生. 交直流深度耦合下变压器差动类保护动作性能分析及新原理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- LU Junsheng. Operation performance analyses and novel principles studies on differential-type protections of power transformer under AC-DC deeply coupling interactions[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [10] 郑涛, 王增平, 翁汉俐, 等. 超/特高压变压器差动保护关键技术与新原理[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [11] 雷阳, 段建东, 张小庆, 等. 电流互感器 J-A 模型参数辨识及大通流动模试验[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(增刊 1): 240-245.
- LEI Yang, DUAN Jiandong, ZHANG Xiaoqing, et al. Identification of current transformer J-A model parameters with large current dynamic simulation experiments[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(S1): 240-245.
- [12] 翁汉俐, 刘雷, 林湘宁, 等. 涌流引起换流变压器零序过电流保护误动的机理分析及对策[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 171-182.
- WENG Hanli, LIU Lei, LIN Xiangning, et al. Mechanism and countermeasures of mal-operation of converter transformer zero-sequence overcurrent protection caused by inrush currents[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 171-182.
- [13] 李肖博, 栾庆武, 王宇, 等. 基于采样值相关度比较的母线保护方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12): 107-111.
- LI Xiaobo, LUAN Qingwu, WANG Yu, et al. Bus-bar protection scheme based on correlation of coefficients of sampled current values[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 107-111.
- [14] 林道鸿, 吴强, 邵雷, 等. 基于改进编辑距离算法的保护装置测试模板开发[J]. 广东电力, 2018, 31(10): 36-43.
- LIN Daohong, WU Qiang, SHAO Lei, et al. Test template development for relay protection device based on Levenshtein distance algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(10): 36-43.
- [15] 陈达壮, 黄家栋, 张玲. 基于 2 种傅氏算法相关性分析的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(10): 71-74.
- CHEN Dazhuang, HUANG Jiadong, ZHANG Ling. Identification of transformer excitation inrush based on correlation analysis between two Fourier algorithms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(10): 71-74.
- [16] ZHENG Tao, HU Xin, WANG Xiaoli, et al. Research on the fault-induced inrush current of the converter transformer and its impacts[C] // 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), October 20-22, 2018, Beijing, China: 1-6.
- [17] ZOU Guibin, HUANG Qiang, SONG Shenglan, et al. Novel transient-energy-based directional pilot protection method for HVDC line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-017-0047-Z.
- [18] 吴梓亮, 曾耿晖, 李一泉, 等. 基于双门槛值的变压器 Hausdorff 距离快速保护新判据[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 128-135.
- WU Ziliang, ZENG Genghui, LI Yiquan, et al. A novel criterion for fast protection of transformer based on Hausdorff distance and double threshold[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 128-135.
- [19] 张侃君, 戚宣威, 胡伟, 等. YD 型换流变三角形绕组 CT 饱和对直流保护的影响及对策[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 99-105.
- ZHANG Kanjun, QI Xuanwei, HU Wei, et al. Impact of the CT saturation of the delta winding on the HVDC

- protection and its countermeasure[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 99-105.
- [20] GUZMAN A, ZOCHOLL S, BENMOUYAL G, et al. A current-based solution for transformer differential protection, part II: description and evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(4): 886-893.
- [21] RAMOS A, BURGOS J C. Influence of tertiary stabilizing windings on zero-sequence performance of three-phase three-legged YNynD transformers, part II: tank overheating hazard and short-circuit duty[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 145: 149-156.
- [22] 王冰清, 李本瑜, 宋晓亮. 基于瞬时功率理论的变压器 CT 接线校验方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 173-179.
WANG Bingqing, LI Benyu, SONG Xiaoliang. Verification method for transformer CT wiring based on instantaneous power theory[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 173-179.
- [23] 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 and Energy Systems, 2019, 105: 753-764.
- [24] CAO Wenbin, QI Xuanwei, ZHANG Kanjun, et al. The impact of the CT saturation on the HVDC protection and its countermeasure[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2017, 12: 834-840.
- [25] 李施, 丁仁杰. 一种基于信号相关性的低频振荡辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 46-54.
LI Shi, DING Renjie. An identification method for low-frequency oscillation based on signal correlation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 46-54.
- [26] 张哲任, 徐政, 徐雨哲, 等. 高压直流输电基本测试系统[J]. 广东电力, 2018, 31(9): 2-12.
ZHANG Zheren, XU Zheng, XU Yuzhe, et al. Basic test systems for HVDC[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(9): 2-12.
- [27] 胡林静, 李培培, 于士航, 等. 基于 RTDS 小步长算法的并网双馈风力发电系统故障仿真研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(3): 63-70.
HU Linjing, LI Peipei, YU Shihang, et al. Fault analysis of grid connected doubly fed wind power generation system based on RTDS small step length algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(3): 63-70.
- [28] 赫亚庆, 王维庆, 王海云, 等. 光伏逆变器改进控制策略的稳定性研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(8): 60-66.
HE Yaqing, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Research on stability of the improved control strategy for photovoltaic inverters[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(8): 60-66.
- [29] ZHAO Yucong, CROSSLEY P. Countermeasure to prevent the incorrect blocking of differential protection applied to converter transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 95-105.

收稿日期: 2019-07-26; 修回日期: 2019-11-03

作者简介:

罗美玲(1982—), 女, 高级工程师, 研究方向为电网继电保护; E-mail: 693400664@qq.com

国兴起(1996—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: guoxc1996@163.com

(编辑 姜新丽)