

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.07.018

CT混搭时变压器涌流识别问题分析

张 臻¹, 程 琤¹, 王慎杰²

(1. 郑州航空工业管理学院, 郑州 450015; 2. 武汉大学, 武汉 430072)

摘要: 在常规变电站的数字化改造过程中,可能存在CT与ECT混合用于变压器差动保护的情况,这种情况是否会影响变压器的涌流识别以防止差动保护误动,这是必须要进行分析的问题。从变压器的涌流特性与识别判据入手,仿真了CT与ECT的传变特性,研究了涌流在CT饱和与未饱和时传变后差动电流中谐波的含量,分析了二次谐波制动判据的有效性,解答了CT混搭时变压器涌流识别的问题。

关键词: CT混搭; 变压器差动保护; 涌流识别; CT饱和

Analysis on Transformer Inrush Recognition Problem in CT Mashup

ZHANG Zhen¹, CHENG Cheng¹, WANG Shenjie²

(1. Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China;
2. Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In the digital renovation process of conventional substation, the circumstance may exist that CT and ECT mix in transformer differential protection. The problem needs to be analyzed that whether the circumstance would influence transformer inrush recognition to prevent differential protection's disoperation. The analysis starts from transformer inrush current characteristics and identification criterion. Transfer characteristics of CT and ECT is simulated, and the harmonic content of differential current after the inrush is transferred under saturated and unsaturated CT is studied, the validity of the second harmonic restraint criterion is analyzed, the transformer inrush recognition problem in CT mashup is answered.

Key words: CT mashup; transformer differential protection; inrush recognition; CT saturation

0 引言

在实施常规变电站的数字化改造的过程中,结合变电站的重要程度、互感器的设备型式及运行情况等,可能存在电磁型CT与电子式CT(ECT)^[1-3]混合使用的情况,这样可以在保证运行可靠性和技术先进性的前提下,充分发挥电力资产的使用效率。《智能变电站继电保护技术规范》中规定:线路纵联保护、母线差动保护、变压器差动保护应适应常规互感器和电子式互感器混合使用的情况^[4]。对于变压器差动保护采用不同特性CT的适应性问题,文[5]中采用PSCAD对各种不同特性的CT的混合使用进行了建模,仿真分析了发生区外故障时,CT的混搭对变压器差动保护的影响;文[6]中针对混合用于变压器差动保护的电磁型CT提出了校验方法,

只有校验合格的CT与ECT混搭时才能保证差动保护的可靠性。

变压器在空载合闸、外部故障切除等暂态过程中,磁链中可能产生暂态分量而发生偏移,从而引起铁心饱和,导致空投变压器产生各种涌流^[7]。文[8-10]中对变压器励磁涌流、恢复性涌流及和应涌流特性进行了分析。受涌流中的非周期分量及铁心剩磁等因素的影响,电磁型CT容易发生暂态饱和。电磁型CT饱和后,二次电流发生畸变,不能线性传变一次电流中的暂、稳态分量^[11-12]。当电磁式CT和ECT混合用于变压器差动保护时是否会影响变压器的涌流识别,是实现CT混合使用必须进行分析的问题。笔者将从对变压器的涌流特性及涌流识别判据分析入手,仿真了CT与ECT的传变特性,研究了CT传变的变压器涌流对差动电流中谐波含量的影响,解答了CT混搭时的变压器涌流识别问题。

1 变压器励磁涌流

图 1 是变压器的近似磁化曲线, 铁心不饱和时, 磁化曲线的斜率很大, 励磁电流 i 近似为零; 铁心饱和后磁化曲线的斜率 L 很小, i 大大增加, 形成励磁涌流。

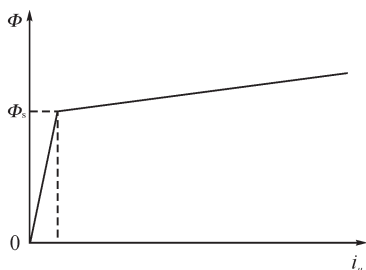


图 1 变压器磁化曲线

Fig. 1 Transformer magnetization curve

以单相变压器为例, 设 u 为空载时合闸电压, 则

$$u = U_m \sin(\omega t + \alpha). \quad (1)$$

式(1)中, α 为合闸初相角。

设变压器铁心剩磁为 Φ_r , 额定工作磁通为 Φ_m , 在简化的铁心磁化特性下可得励磁涌流为

$$i_\mu = \begin{cases} 0 & 0 \leq \theta \leq \theta_1, \theta \geq 2\pi - \theta_1 \\ I_m(\cos\theta_1 - \cos\theta) & \theta_1 < \theta < 2\pi - \theta_1 \end{cases}. \quad (2)$$

式(2)中: $\theta = \omega t + \alpha$; $\theta_1 = \arccos(\cos\alpha + k_r - k_s)$; $k_r = \Phi_r / \Phi_m$; $k_s = \Phi_s / \Phi_m$ 。

三相变压器空载合闸时, 三相绕组都会产生励磁涌流。对于 Y, d11 接线的三相变压器, 引入每相差动保护的电流为两个变压器绕组电流之差, 其励磁涌流也应该是两个绕组励磁涌流之差。对于一般情况三相变压器励磁涌流具有以下特点^[13]:

1) 变压器空载合闸时, 至少有两相的励磁涌流不同, 其中某相可能出现对称性涌流, 而其他两相涌流仍然偏于时间轴一侧;

2) 励磁涌流的间断角显著减小, 其中对称性涌流的间断角最小并且其波宽为 120° ;

3) 至少有一相励磁涌流中的二次谐波含量比较大。

2 励磁涌流识别

如何区分励磁涌流和故障电流是变压器差动保护的重要研究课题之一。工程中主要应用二次谐波制动判据、间断角判据来防止励磁涌流造成差动保护误动^[14-15]。

电磁型 CT 在剩磁和涌流中的非周期分量的作用下, 可能进入饱和状态。由于引入差动保护的电流为 CT 二次侧电流, 因此须考虑 CT 传变对励磁电

流的影响, 尤其是 CT 饱和后对二次电流的影响^[16]。

将电流互感器简化为励磁电抗 L_μ , 二次负载简化为纯电阻 R_2 , i_1 、 i_2 、 i_μ 分别为 CT 一次侧、二次侧及励磁电流。

$$i_\mu = I_m \left(A - \frac{\cos\omega t + \omega T_2 \sin\omega t}{1 + (\omega T_2)^2} + C e^{-\frac{t}{T_2}} \right). \quad (3)$$

式(3)中: $A = \cos\alpha - \frac{\Phi_s - \Phi_r}{\Phi_m}$; $T_2 = \frac{L_\mu}{R_2}$; C 为待定常数。

当 CT 不饱和时, $L_\mu \gg R_2$, $i_\mu \approx 0$ 。

当 CT 饱和后, L_μ 大大减小, 为饱和电感, i_μ 不能在瞬时变为零, 设在 t_1 时刻涌流产生, t_2 开始衰减, T_2 时间常数不断衰减, 在 R_2 上产生反向电压, t_2 时刻衰减结束, $i_\mu = 0$ 。

设 $i_\mu|_{t=t_1} = D$, $i_\mu|_{t=t_2} = B$, 忽略一次侧电阻。

$$B = \frac{I_m \sin\delta}{1 - e^{-2\pi/(\omega T_2)}} [\sin(\omega t_1 + \delta) + \sin(\omega t_1 - \delta) e^{-2(\pi - \omega T_1)}] e^{-2t_1/T_2}; \quad (4)$$

$$C = B e^{-t_1/T_2} + I_m \sin\delta \sin(\omega t_1 - \delta) e^{-t_1/T_2}; \quad (5)$$

$$D = B e^{-2t_1/T_2}. \quad (6)$$

式(4)–(6)中, $\delta = \arctan\omega T_2$ 。

可以看出, CT 饱和后, 反向电流峰值 D 与一次侧涌流大小、CT 饱和后励磁电感 L_μ 及二次负载 R_2 有关, CT 二次回路电流间断角消失, 导致间断角鉴别判据失效, 可能使差动保护误动。

因此, CT 混搭时变压器的涌流识别问题, 需要进行二次谐波制动判据是否失效。

3 仿真建模

3.1 建模

系统电气主接线采用 220 kV 变电站普遍采用的接线方式, 见图 2。

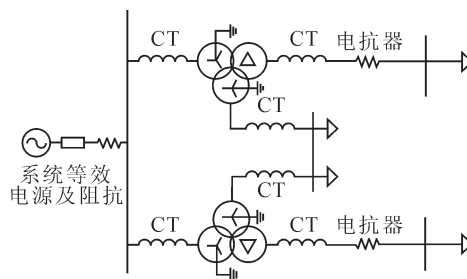


图 2 220 kV 系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of 220 kV system

其中系统 220 kV 系统等值电源为无限大电源, 最大运行方式下的电抗标幺值为: $X_{G(1)}^* = 0.00712$, $X_{G(0)}^* = 0.0128$ ($S_j = 100 \text{ MV} \cdot \text{A}$, $U_j = U_p$)。

变压器 220、110 kV 侧中性点直接接地, 额定容量为 150/150/75 MV·A, 额定电压为 $220 \pm 8\%$

1.25%/121/10.5 kV,连接组别为 YNyn0d11,其中变压器饱和特性中的气隙电抗标幺值设置为 0.458,拐点电压标幺值设置为 1.15。

CT 模型采用 PSCAD 中基于 Jiles-Atherton 铁磁滞理论的 CT 模型,ECT 采用罗氏线圈 ECT 模型^[17]与 FOCT 模型^[18]。

其中,罗氏线圈 ECT 数学模型为:

$$H(s)=U_0(s)/I(s)=\frac{Ms}{LC_0s^2+(L/R_a+R_sC_0)s+(R_s/R_a+1)}\times\frac{1}{RCs}; \quad (7)$$

FOCT 数学模型为:

$$H(s)=\frac{Y(s)}{I(s)}=\frac{K_1K_2}{\tau s+K_2K_3}=\frac{K_1}{K_3}\times\frac{1}{1+Ts}。 \quad (8)$$

具体参数见文[19]。

根据系统图建立变压器空载合闸的仿真模型模拟变压器励磁涌流,变压器铁心剩磁的模拟采用在相电流中注入直流,当直流源参数设置为 0 时,变压器铁心无剩磁,当三相电流中分别注入直流 0.5、-0.2、-0.25 A 时,各相铁心剩磁系数分别为 0.7、-0.44、-0.26。

设 $t=0.4$ s 合闸,此时 A 相电压接近过零点,A 相励磁涌流幅值最大,在铁心剩磁系数为 0.7、-0.44、-0.26,系统电源阻抗为 $(9.33+j52.9) \Omega$ 的情况下,励磁涌流波形见图 3。

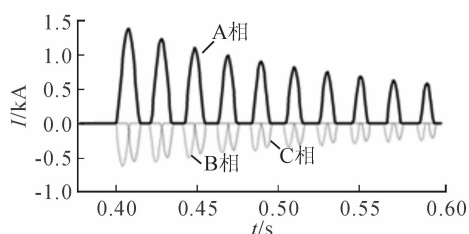


图3 励磁涌流波形

Fig. 3 Inrush current waveform

3.2 CT 与 ECT 对涌流的传变特性

常见的 YN,d11 三相变压器正常运行时,Y 侧、d 侧的相电流相位相反,而 d 侧线电流 $-I_{da}$ 、 $-I_{db}$ 、 $-I_{dc}$ 分别超前于 Y 侧线电流 I_{YA} 、 I_{YB} 、 I_{YC} 相位 30° (正序),为防止由此引起较大的差动电流,必须进行相位校正^[20]。对于数字式变压器差动保护而言,变压器各侧 CT 采用星形接线方式,而通过软件对二次电流进行相位校正。保护装置中相位校正方式(或转角方式)有 2 种,一种为 Y→d 的转角方式,另一种为 d→Y 的转角方式。文中只列出了采用 Y→d 转角方式的结果。

3.2.1 CT 的传变特性

考虑 CT 剩磁及变压器铁心有剩磁时的传变特性见图 4。

电磁型 CT 在空载合闸后不会立即进入饱和状

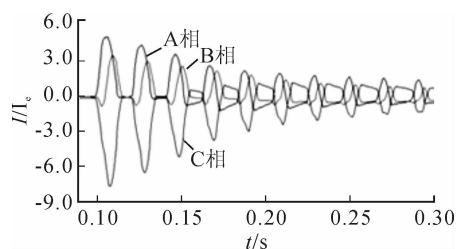


图4 CT 的传变特性

Fig. 4 Transfer characteristics of CT

态,在前 2~3 个周波都能线性传变励磁涌流,随后进入饱和状态后不能较好地传变。

3.2.2 ECT 的传变特性

将罗氏线圈 ECT 与 FOCT 传变的励磁涌流波形与理想传变的励磁涌流波形放到同一个图中对比,结果见图 5。

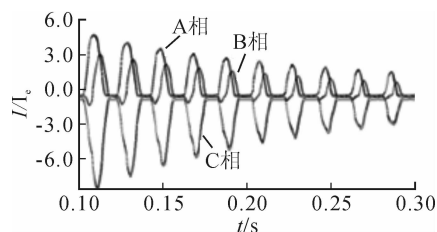


图5 ECT 的传变特性

Fig. 5 Transfer characteristics of ECT

可以看出:考虑变压器铁心剩磁时,罗氏 ECT、FOCT 传变的励磁涌流波形与理想传变的励磁涌流波形是基本重合的,说明了 ECT 有较好的线性传变特性。

4 励磁涌流对差流中谐波的影响

电磁型 CT 在剩磁和涌流中的非周期分量的作用下,可能进入饱和状态。当高压侧 A 相 CT 饱和时,对应的 CT 的二次电流以及差流波形见图 6。

电磁型 CT 饱和后,常常会造成励磁涌流的二次电流波形间断角消失,二次电流中的基波电流幅值减小,但二次谐波含量却普遍增加,CT 饱和程度越深,二次电流中的二次谐波含量比一次电流中的二次谐波含量越大。

对于图 3 所示的励磁涌流和图 6 所示的转角后的差动电流波形,经过差分滤波处理后,利用 FFT 分别提取电流中的二、三次谐波含量见图 7 (仅列出 A 相)。为观察 CT 饱和对差流中的谐波含量的影响,将电磁型 CT 未饱和与饱和情况下的差流中的谐波含量进行对比,其中虚线对应于电磁型 CT 未饱和的情况。

可以看出,差流中的谐波含量与励磁涌流中的谐波含量的情况不同,在 0.42~0.52 s 时间段内,A

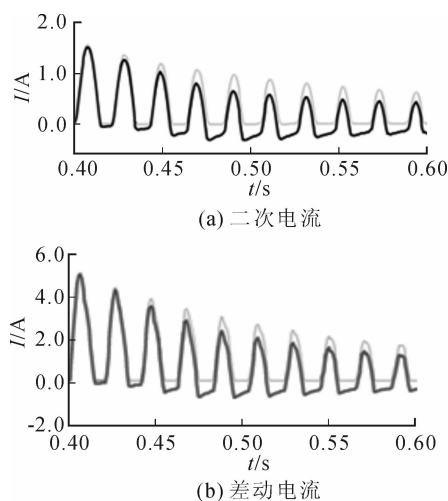


图 6 CT 的二次电流和差动电流

Fig. 6 Waveform of secondary current and differential current of CT

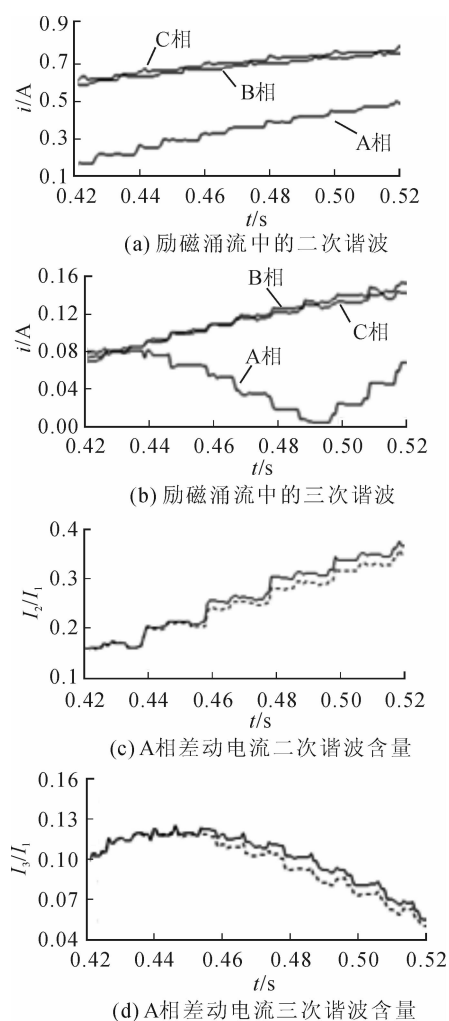


图 7 励磁电流和差动电流的二次谐波与三次谐波

Fig. 7 Second and third harmonic in excitation current and differential current

相电磁型 CT 饱和后, 会使差流中的二次谐波含量增大、三次谐波含量减小。仿真中发现, 电磁型 CT

饱和也会使某相差流中的二次谐波含量降低, 如采用 Y→d 转角方式时, 当高压侧 B 相 CT 饱和后, 会使 A 相差流中的二次谐波含量增大, 而 B 相差流中的二次谐波含量略有下降, 但不会引起二次谐波制动判据失效。

在变压器空载合闸产生励磁涌流的情况下, 除变压器高压侧外, 其他侧的线电流为零。如果高压侧电磁型 CT 进入饱和状态, 一般会使差流中的二次谐波含量增大, 不会造成差动保护的误动, 但会使变压器发生内部故障时保护延迟动作, 对常规变电站进行数字化改造时, 若用 ECT 代替高压侧电磁型 CT, 则能够解决 CT 饱和引起的这一问题。

5 其他涌流

根据系统模型建立恢复性涌流和和应涌流的模型进行仿真。

在恢复性涌流模型中, 改变中压侧 A 相电磁型 CT 的剩磁及负荷大小, 当出线上的短路故障被切除后, 由于 CT 铁心含有高剩磁并且负荷电流较小, 中压侧 A 相电磁型 CT 的工作点位于饱和点附近的局部磁滞回环上, 该 CT 发生局部暂态饱和时的二次电流波形以及 A、C 相差流中的二次谐波含量见图 8。

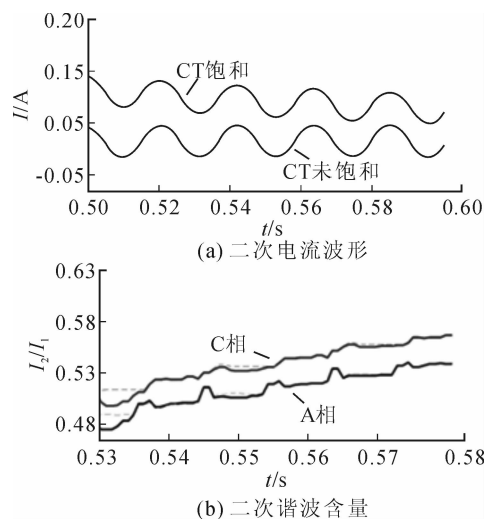


图 8 二次电流波形及 A、C 相差动电流的二次谐波含量

Fig. 8 Waveform of secondary current and second harmonic content in differential current of phase A and C

从图 8 中可以看出, 中压侧 A 相电磁型 CT 发生局部暂态饱和时, CT 的二次电流波形并没有明显畸变, 但其比值差、相位差增大, 会使 A、C 相差流中的二次谐波含量下降, 由于二次谐波含量较高, 并不会造成差动保护的误动。

空投变压器引起并联带负荷运行的变压器产生和应涌流时, 若中或低压侧电磁型 CT 饱和或局

部暂态饱和,也可能出现图8中的情况;空投变压器引起级联的上一级运行变压器产生和应涌流时,对于运行变压器而言,空投变压器的励磁涌流为穿越性质的电流,可能使运行变压器的中或低压侧电磁型CT进入饱和状态并且差流中的二次谐波含量减小,限于篇幅,此处不列举相关仿真波形。

6 结论

1)变压器空载合闸产生励磁涌流以及空投变压器引起并联空载运行的变压器产生和应涌流时,由于差流仅与变压器一侧CT的电流有关,若该侧CT为电磁型CT并且CT发生饱和,一般会使差流中的二次谐波含量增大,不会造成差动保护误动,但会使变压器发生内部故障时延迟动作,若该侧CT为ECT,则不存在这一问题。

2)变压器产生恢复性涌流以及空投变压器引起与其并联或级联的带负荷运行的变压器产生和应涌流时,差流与多侧CT的电流有关,若变压器中或低压侧为电磁型CT并且发生饱和或局部暂态饱和,差流中的二次谐波含量将会下降,由于不同原理的CT混合用于变压器差动保护会引起不平衡电流增大,差流中的二次谐波含量会有所下降,若二次谐波判据失效并且差流较大,则可能引起差动保护误动,但对于级联型和应涌流而言,CT饱和判据能够解决CT饱和引起的保护误动问题。

参考文献:

- [1] 任稳柱,袁渊,杨忠州,等. 电子式互感器稳态误差校验技术的研究[J]. 高压电器,2011,47(4):64-68.
REN Wenzhu,YUAN Yuan,YANG Zhongzhou,et al. Steady-state error calibration technology for electronic instrument transformer[J]. High Voltage Apparatus,2011,47(4):64-68.
- [2] 袁季修. 电流互感器和电压互感器[M]. 北京:中国电力出版社,2011.
- [3] 王晓芳,周有庆,李付亮. 基于电子式电流互感器的线路光纤纵差保护[J]. 高压电器,2009,45(4):29-33.
WANG Xiaofang,ZHOU Youqing,LI Fuliang. Differential protection of optical-fiber line based on electronic current transformer[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(4):29-33.
- [4] 国家电网公司. Q/GDW441-2010 智能变电站继电保护技术规范[S]. 北京:中国电力出版社,2010.
China State Grid Corporation. Q/GDW441-2010 Technical specifications of protection for smart substation[S]. Beijing: China Power Press,2010.
- [5] 殷伯云,罗志娟,杨丽,等. 主变差动保护采用不同原理CT的仿真研究[J]. 电网技术,2013,37(1):281-286.
YAN Baiyun,LUO Zhijuan,YANG Li,et al. Simulation analysis of power transformer differential protection adopting current transformers based on different principles[J]. Power System Technology,2013,37(1):281-286.
- [6] 余祥坤,吕艳萍,杨丽,等. 与ECT混合用于差动保护的电磁型CT的校验方法[J]. 电网技术,2012,36(10):275-280.
YU Xiangkun,LYU Yanping,YANG Li,et al. A verification method for electromagnetic current transformers mixedly applied in differential protection with electronic current transformers[J]. Power System Technology,2012,36(10):275-280.
- [7] 陈艳,陈小川,高仕斌. 几种削减变压器励磁涌流的方法[J]. 高压电器,2005,41(4):282-285.
CHEN Yan,CHEN Xiaochuan,GAO Shibin. Several methods to reduce transformer inrush current[J]. High Voltage Apparatus,2005,41(4):282-285.
- [8] 王松,王翔,曹阳,等. 计及磁动态特性的变压器励磁涌流机理分析[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(15):27-32.
WANG Song,WANG Xiang,CAO Yang,et al. Principle of the magnetizing inrush current in transformer with magnetic hysteresis characteristics[J]. Power System Protection and Control,2008,36(15):27-32.
- [9] 钱坤,徐明,施乐华. 变压器恢复性涌流产生机理及其特性研究[J]. 变压器,2013,50(12):29-33.
QIAN Kun,XU Ming,SHI Lehua. Research on characteristic and mechanism of transformer recovery inrush current[J]. Transformer,2013,50(12):29-33.
- [10] 武万才,边疆,吴志勇. 变压器和应涌流产生机理及其特性分析[J]. 电力自动化设备,2011,31(6):112-115.
WU Wancai,BIAN Jiang,WU Zhiyong. Principle and characteristics of transformer sympathetic inrush[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(6):112-115.
- [11] 景敏慧,孔霄迪,覃松涛,等. P类电流互感器饱和原因分析及对策[J]. 电力系统自动化,2007,31(21):94-97.
JING Minhui,KONG Xiaodi,QIN Songtao,et al. Cause analysis on the saturation of P class current transformers and its countermeasures[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(21):94-97.
- [12] 李艳鹏,侯启方,刘承志. 非周期分量对电流互感器暂态饱和的影响[J]. 电力自动化设备,2006,26(8):15-18.
LI Yanpeng,HOU Qifang,LIU Chengzhi. Influence of non-periodic components on transient saturation of current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(8):15-18.
- [13] 张保会,尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京:中国电力出版社,2005.
- [14] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京:中国电力出版社,2005.

(下转第101页)

- [9] STRACHAN S M, RUDD S, MCARTHUR S, et al. Knowledge-based diagnosis of partial discharges in power transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(1): 259-268.
- [10] GUTFLEISCH F, NIEMEYER L. Measurement and simulation of PD in epoxy voids[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(5): 729-743.
- [11] ZHOU C, SONG X, MICHEL M, et al. On-line partial discharge monitoring in medium voltage underground cables[J]. Science, Measurement & Technology, IET, 2009, 3(5): 354-363.
- [12] 王 颂, 吴晓辉, 袁 鹏, 等. 局部放电超高频检测系统标定方法的研究现状及发展[J]. 高压电器, 2007, 43(1): 59-61.
WANG Song, WU Xiaohui, YUAN Peng, et al. Current situation and development of calibration for UHF-PD (partial discharge) detection system[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(1): 59-61.
- [13] TOZZI M, CAVALLINI A, MONTANARI G C, et al. PD detection in extruded power cables: an approximate propagation model[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(3): 832-840.
- [14] CHANDRASEKAR S, CAVALLINI A, MONTANARI G C, et al. Bandwidth and sensitivity issues in PD detection in power cables[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(3): 735-743.
- [15] 杜伯学, 马宗乐, 霍振星, 等. 电力电缆技术的发展与研究动向[J]. 高压电器, 2010, 46(7): 100-104.
DU Baixue, MA Zongle, HUO Zhenxing, et al. Recent research status of techniques for power cables[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(7): 100-104.
- [16] BOGGS S, DENSLEY J. Fundamentals of partial discharge in the context of field cable testing[J]. Electrical Insulation Magazine, 2000, 16(5): 13-18.
- [17] GAO K T, LI F. PD pattern recognition for stator bar models with six kinds of characteristic vectors using BP network[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(3): 381-389.
- [18] 吕启深, 吴 磊, 梁基重, 等. GA-BP 神经网络在 GIS 典型缺陷局部放电识别中的应用[J]. 电瓷避雷器, 2011(4): 34-38.
LYU Qishen, WU Lei, LIANG Jichong, et al. Application of GA-BP-NN in PD pattern recognition of GIS typical defects[J]. Insulators and Surge Arresters, 2011(4): 34-38.
- [19] HAO L, LEWIN P L. Partial discharge source discrimination using a support vector machine[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(1): 189-197.
- [20] 罗 翔, 张孔林, 蔡金锭, 等. 基于模糊聚类分析的 XLPE 电缆局部放电脉冲分离技术[J]. 高压电器, 2013, 49(9): 102-107.
LUO Xiang, ZHANG Konglin, CAI Jinding, et al. Separation technique of partial discharge pulse based on fuzzy clustering for XLPE cables[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(9): 102-107.
- [21] HUNTER J A, HAO L, LEWIN P L. Comparison of two partial discharge classification methods[C]//IEEE International Symposium on Electrical Insulation. San Diego, California, USA: IEEE, 2010: 6-9.
- [22] 唐 炬, 魏 钢, 李 伟, 等. 基于双向二维最大间距准则的局部放电灰度图像特征提取[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 129-134.
TANG Ju, WEI Gang, LI Wei, et al. Partial discharge gray image feature extraction based on bi-directional two dimensional maximum margin criterion[J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 129-134.

黄健华(1975—), 男, 工程师, 从事电力系统规划、建设管理方面的工作。

桂峻峰(1975—), 男, 讲师, 从事电力设备状态监测、故障诊断等方面的研究工作。

(上接第 96 页)

国电力出版社, 1996.

- [15] 刘志超. 三相变压器励磁涌流及保护方案[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(10): 58-60.
LIU Zhichao. Analysis of magnetic inrush current of three phase transformer and the differential protection scheme[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(10): 58-60.
- [16] 翟小社, 耿英三, 宋政湘, 等. Rogowski 线圈分布参数的分组建模与数值计算方法[J]. 高压电器, 2007, 43(2): 102-105.
ZHAI Xiaoshe, GENG Yingsan, SONG Zhengxiang, et al. A subdivided modeling method and numerical calculation of rogowski coil's distributed parameter[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(2): 102-105.
- [17] 张朝阳, 张春熹, 王夏霄, 等. 闭环光纤电流互感器误差分析与实验研究[J]. 高压电器, 2008, 44(5): 417-419.
ZHANG Chaoyang, ZHANG Chunxi, WANG Xiaoxiao, et al.

- [18] 吕 宁. 变压器差动保护中励磁涌流和 CT 饱和问题的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
LYU Ning. The research of inrush current and CT saturation in transformer differential protection[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.
- [19] 张 霖, 吕艳萍. 光电式电流互感器传感特性仿真分析[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(9): 68-71.
ZHANG Lin, LYU Yanping. Simulative analysis of optical current transducer characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(9): 68-71.
- [20] 陈志文. Y₀/Δ-11 变压器差动保护相位校正及零序电流补偿问题分析[J]. 现代电力, 2010(1): 26-29.
CHEN Zhiwen. Analysis of phase adjustment and zero-sequence current compensation with Y₀/Δ-11 transformer differential protection[J]. Modern Electric Power, 2010(1): 26-29.