

DOI: 10.7667/PSPC151150

一种新模式常规采样 GOOSE 跳闸变压器保护的设计及应用

陈继瑞, 刘立功, 李旭, 邓茂军, 张营伟, 李宝伟

(许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 为解决智能变电站复杂数字采样回路环节引起的采样数据异常, 提出一种新模式的常规采样 GOOSE 跳闸变压器保护设计方法。利用 NPI 插件实现模拟量双 AD 直接采样的新采样回路并兼容 GOOSE 信息传输, 同时配合基于滑动数据窗的双 AD 实时采样数据互校验判据, 用于监测采样数据的有效性。另外, 针对特高压变压器涌流特性, 提出了一种分相差流谐波或闭锁、非间断点开放的综合励磁涌流识别判据。仿真结果表明, 综合励磁涌流识别判据可以应用于新模式的变压器保护。

关键词: 变压器; 智能变电站; 滑动数据窗; 常规采样; 励磁涌流; 双 AD

Design and application of a new model conventional sampling and GOOSE tripping transformer protection

CHEN Jirui, LIU Ligong, LI Xu, DENG Maojun, ZHANG Yingwei, LI Baowei

(XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: To solve sampling-data anomalies of smart substations caused by the complex digital sampling circuit links, this paper puts forward a new model transformer protection design method based on regular sampling and GOOSE trip. NPI plugs is used to achieve new sampling circuit and GOOSE information transmission of analog double AD-directly sampling, and coupled with double AD real-time sampling data validation criterion based on sliding data windows, the effectiveness of sampling data is checked. In addition, for UHV transformer inrush current characteristics, it proposes a comprehensive inrush current identification criterion of differential current harmonics blocking each other and discontinuity points opening, the simulation results show that comprehensive inrush current identification criterion can be applied to the new model transformer protection.

Key words: transformer; smart substation; sliding data window; conventional sampling; inrush current; double AD

0 引言

随着智能变电站在电网中大批量长时间地运行, 采样回路异常导致的保护装置拒动、误动现象时有发生。由于目前的智能变电站保护装置主要以电子互感器、采集器、合并单元等模式来实现采样回路数字化, 而新常规采样的源端直接在保护装置, 通过 NPI 插件实现双 AD 采样, 结构对比如图 1 所示; 这就导致数字化采样回路的采样环节较多, 再者电子互感器、采集器、合并单元等装置的技术局限性及高精度的数据同步性等要求, 很容易引起采样数据异常, 且异常问题难定位^[1-2]。

针对数字化采样的缺点, 结合 GOOSE 跳闸的优点, 根据新的变压器保护标准化设计规范, 给出了一种新模式的常规采样 GOOSE 跳闸的变压器保

护的设计方法。常规采样指利用 PowerPC 处理器的处理速度, 实现保护装置直接对模拟量进行双 AD 数据采样; GOOSE 跳闸指通过光纤与交换机实现保护出口或变电站二次继电保护间联闭锁及失流启动等信息的传输, 同时结合双 AD 采样校验和差流二次谐波与非间断点综合判别的辅助判据把关, 保证了变压器保护动作的可靠性。

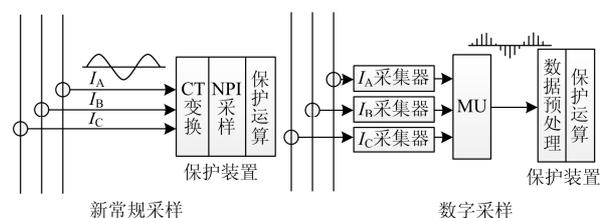


图 1 采样模式对比

Fig. 1 Sampling pattern contrast

以下主要从新常规采样回路、GOOSE 跳闸回路、辅助判据等方面介绍新模式变压器保护的设计方案。

1 新常规采样模式的采样回路设计方案

传统的常规采样一般为“一启动、一动作”的双 DSP 处理器串联模式, 不仅处理速度慢且浪费资源。而新常规采样模式的采样回路设计方案, 主要基于 NPI 插件的 FPGA 重采样与透传功能以及新的单 PowerPC 处理器模式^[3-4], 设计流程图如图 2 所示。

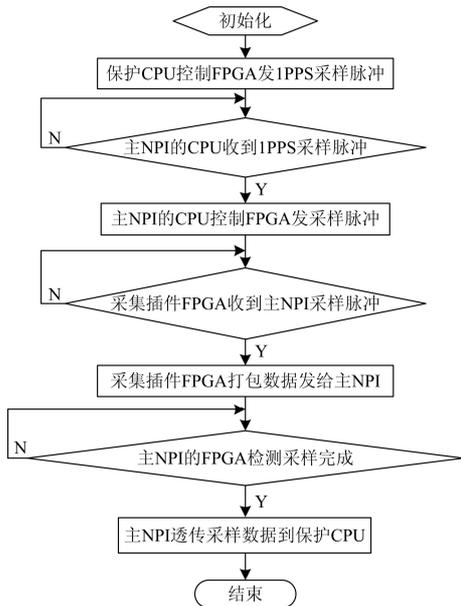


图 2 新常规采样模式流程图

Fig. 2 Flowchart of new regular sampling mode

具体实现步骤如下。

(1) 由外部时钟或主 CPU 插件内部晶振提供 1PPS 秒脉冲源。

(2) 保护 CPU 的 FPGA 经装置背板以太网将 1PPS 脉冲传给主 NPI 插件的 CPU 单元。当模拟量采集回路较多时, 主机箱通过级联扩展子机箱来解决; 即通过单模光纤将主机箱的脉冲扩展插件与子机箱的脉冲扩展插件连接起来, 将 1PPS 脉冲传输给子机箱的主 NPI 插件 CPU 单元, 同时把主机箱与子机箱的主 NPI 通过多模光纤级联, 将子机箱的采样传给主机箱保护 CPU, 主机箱的采样级联回路如图 3 所示。

主机箱的脉冲扩展插件来完成 1PPS 脉冲信号由电平信号转换成光信号; 子机箱的脉冲扩展插件主要完成 1PPS 脉冲信号由光信号转换成电平信号, 子机箱的采样级联回路如图 4 所示。

(3) 主机箱的主 NPI 插件 CPU 收到 1PPS 脉冲的时间戳后, 先记录 1PPS 脉冲的时间戳, 然后向主 NPI 的 FPGA 发送固定间隔为 0.833 ms 的采样脉冲产生时刻与发送使能位; 当主 NPI 的 FPGA 检测到采样脉冲使能位后, 启动判别, 当 FPGA 时间大于等于采样脉冲产生时刻时, 立即向采集插件的 FPGA 产生一个采样脉冲, 同时清零使能位, NPI 的重采样原理如图 5 所示。子机箱采样原理与主机箱一样, 不再累述。

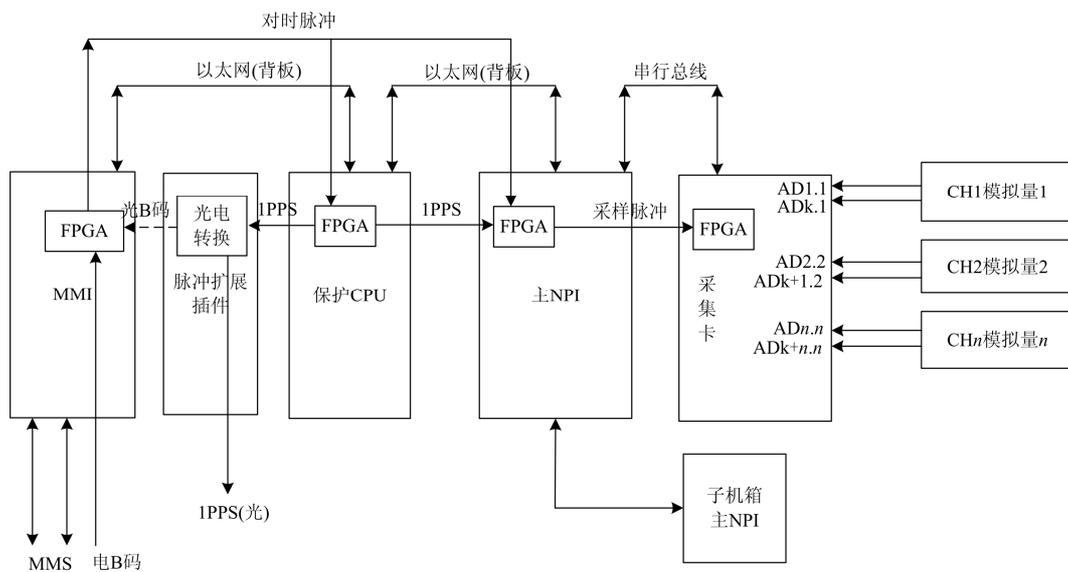


图 3 主机箱采样回路图

Fig. 3 Sampling circuit diagram of main box

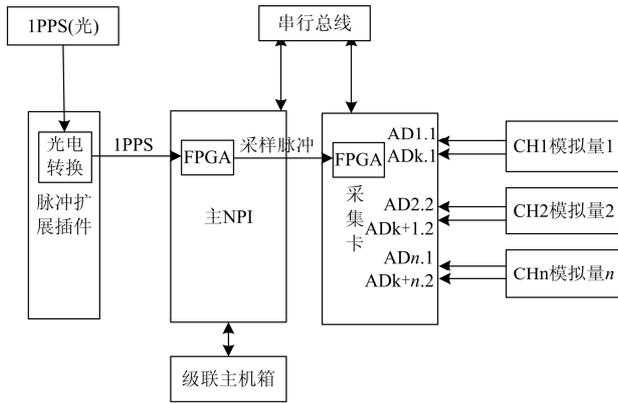


图4 扩展机箱采样回路图
Fig. 4 Sampling circuit diagram of extension box

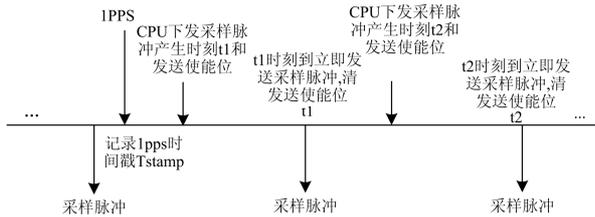


图5 NPI 重采样原理图
Fig. 5 Principle diagram of NPI secondary sampling

(4) 采集插件收到主 NPI 的采样脉冲后，立即对所有 AD 进行采样，并对所有模拟通道的采样数据进行打包后，发送给主 NPI；当主 NPI 的 FPGA 检测到所有 AD 采样完成后，向主 NPI 插件的 CPU 单元发送采样完成标志，并经背板以太网透传数据包给保护 CPU 插件；当配置子机箱时，子机箱的主 NPI 通过外部级联光纤，将子机箱的采样数据包发送给主机箱的主 NPI，主机箱主 NPI 的 FPGA 通过配置文件识别出级联模式，并对主 NPI 采样数据进行缓存，等待与子机箱采样数据同步后，一起透传给主机箱的保护 CPU，完成采样全部采样。

2 双 AD 判别原理

针对新常规采样的单 CPU 模式，为了确保数据采集的可靠性，降低变压器保护因采样异常误动的机率，增加了双通道 AD 采样数据的实时把关。

双 AD 判别利用滑动数据窗的单周波采样点，通过全周傅里叶滤波算法，计算出工频的采样幅值，其滑动数据窗采样如图 6 所示。

保护 CPU 在接收到两路 AD 采样数据后，其中一路 AD 采样数据用于保护逻辑运算，另一路 AD 采样数据用于与第一路 AD 采样数据进行比较，若两路 AD 的采样幅值大于误差要求，则保护认为 AD 采样数据有异常，瞬时闭锁保护；否则，若第一路

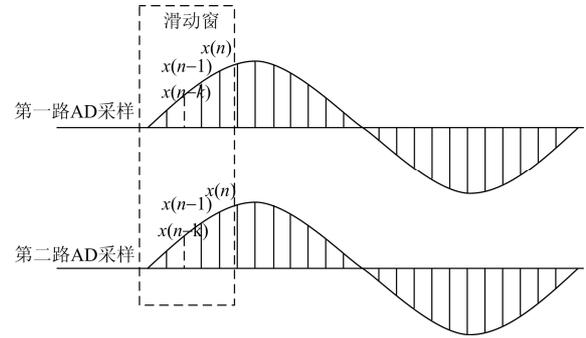


图6 滑动数据窗采样图
Fig. 6 Sliding data window sampling diagram

AD 的采样幅值与第二路 AD 的采样幅值，满足误差范围要求，则保护认为采样数据正常，可直接用于保护逻辑运算，同时继续比较下一滑动窗数据采样的幅值，并重复以上比较，其判别公式如下：

$$\begin{cases} |AD1 - AD2| > k_c I_n \\ |AD1 - AD2| > \lambda_c AD2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} |AD1 - AD2| > k_v U_{\phi n} \\ |AD1 - AD2| > \lambda_v AD2 \end{cases} \quad (2)$$

式(1)为电流采样双 AD 判据，式(2)为电压采样双 AD 判据， I_n 为额定电流、 $U_{\phi n}$ 为额定相电压， k_c 、 k_v 、 λ_c 、 λ_v 分别是绝对门槛系数和相对门槛系数， $AD1$ 、 $AD2$ 分别为两路 AD 数据幅值。

新常规采样模式下，采用 PowerPC 处理器，处理速度大幅度提升，让实时数据双 AD 判别成为可能，并且该判据在实际应用中也得到了验证，有效地避免了变压器保护采样异常导致的误动作。

3 改进的非间断点与二次谐波判别原理

随着当今经济的快速发展，全国各行业对电力需求也日益增加。因此，建设特高压输电已成为发展趋势，同时也对特高压的变压器运行稳定性，提出了更高的要求。目前的特高压工程变压器多使用分体的特殊结构，导致空载合闸时励磁涌流的二次谐波含量明显低于传统变压器识别励磁涌流的经验值，因此，传统的二次谐波制动原理不再满足特高压变压器的需求^[5-6]。

通过对特高压现场变压器空投波形的分析，原始波形如图 7 所示；可知道特高压变压器的波形不仅带有衰减的非周期分量，且波形对称性较差，往往带有明显的间断角，但是由于实现间断角原理，所需要的周波采样点需要在 72 点以上，这对于不需要采样精度那么高的保护装置来说，给硬件需求和软件处理都带来极大的浪费，另外，空投变压器区

内故障 CT 饱和时, 也会出现间断角, 容易导致差动保护拒动; 因此, 本文提出了一种分相差流谐波“或”闭锁+差流原始值与差流微分值特性识别的非间断角原理共同把关的励磁涌流识别方案。

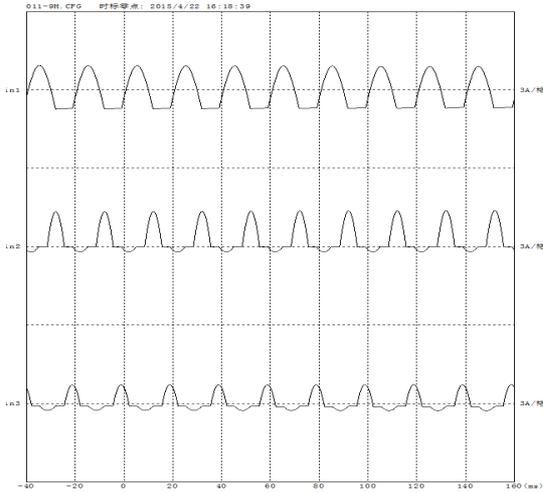


图 7 特高压变压器空冲原始波形

Fig. 7 UHV transformer empty original waveform

3.1 改进的差流分相二次谐波“或”闭锁原理

改进的差流分相二次谐波“或”闭锁原理, 主要针对变压器空投时, 某相励磁涌流二次谐波的含量会明显低于经验值 15%, 而导致差流保护误动作。因此, 通过其他相别的励磁涌流实现相互闭锁, 可以降低差动保护动作误动作的概率^[7-10]。

差流二次谐波“或”闭锁的判别方程为

$$I_{cd2} > k_{xb2} \times I_{cd1} \quad (3)$$

式(3)中: I_{cd2} 为相差流的二次谐波含量; I_{cd1} 为相差流的基波值; k_{xb2} 为制动系数。

另外, 采用“或”闭锁的方案有可能导致空投变压器于故障时, 由于非故障相的励磁涌流的影响而使差动保护延时动甚至拒动。因此, 就需要空投变压器故障时有故障开放判据。

3.2 微分、原始差流采样值的非间断点开放原理

微分、原始差流采样值的非间断点开放识别原理, 主要利用特高压变压器空充时励磁电流含有间断角及波形含有衰减的直流分量导致波形不对称的特性; 同时当变压器空充于故障时, 故障电流波形谐波含量较小, 波形对称性明显的特点^[11-15]。

当差流中的采样点满足判据时认为该采样点是非间断点, 并通过统计每周波中差流的非间断点个数, 若间断点个数满足判据, 则认为是故障, 瞬时开放差动保护; 否则判为空充, 闭锁差动保护。

其原理的实现步骤如下。

(1) 利用差动保护原理, 合成差动电流采样值波形, 差动电流的计算公式为

$$I_d(k) = i_1(k) + i_2(k) + i_3(k) + \dots + i_n(k) \quad (4)$$

式(4)中: $I_d(k)$ 为合成后的差动电流采样值; $i_1(k)$ 、 $i_2(k)$ 、 $i_3(k)$ 、 $i_n(k)$ 为变压器折算到基准侧后的各侧电流采样值。

(2) 对步骤(1)中合成的差动电流原始点值进行比较, 先求出每周波中原始差流各采样点的最大值, 再比较其他采样点与最大点的关系, 计算出本周波中的非间断点数, 判别公式为

$$\begin{cases} |I_d(k)| > k_L \times I_{dmax} \\ 1 \leq k \leq N \text{ 且 } m_1 \geq a_L \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} |I_d(k)| > k_H \times I_{dmax} \\ 1 \leq k \leq N \text{ 且 } m_2 \geq a_H \end{cases} \quad (6)$$

式中: $I_d(k)$ 为一个周波中各时刻差流采样值; I_{dmax} 为一个周波中最大点差流采样值; m_1 为满足式(5)的非间断点数, m_2 为满足式(6)的非间断点数, k_L 、 k_H 、 a_L 、 a_H 分别为比率系数和间断点门槛; N 为一个周波采样点数。

(3) 对步骤(1)中合成的差动电流进行微分计算并求出微分后的差流最大采样点值, 再比较其他采样点与最大点的关系, 计算出非间断点数, 判别公式为

$$\begin{cases} |I_{dd}(k)| > k_d \times I_{ddmax} \\ 1 \leq k \leq N \text{ 且 } m_3 \geq a \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: $I_{dd}(k)$ 为一个周波中各时刻微分差流采样值; I_{ddmax} 为一个周波中微分差流最大采样点; m_3 为满足式(7)的非间断点数; k_d 、 a 分别为比率系数和间断点门槛; N 为微分后的一个周波点差采样点数。微分判据可以很好地识别差流中带直流分量的情况。

当步骤(2)或步骤(3)任一个判据的非间断点满足判据, 则快速开放差动保护; 否则, 闭锁差动保护并继续下个周波非间断点个数判别。

该开放原理的优点在于不仅可以有效识别励磁涌流特性, 而且通过非间断点判别, 也可以有效抑制变压器 CT 暂态饱和引起的差动误动。

3.3 RTDS 试验仿真验证

利用实时数字仿真系统(RTDS)验证改进后的变压器励磁涌流识别方案的差动保护性能, 变压器仿真模型如图 8 所示, 保护装置接线图如图 9 所示, 变压器模型参数如表 1 所示。

表 1 变压器模型参数

Table 1 Transformer model parameters

名称	参数
变压器容量	1000 MVA
变压器变比	500 kV/242 kV/36.5 kV
变压器接线方式	Y0 自/△-12-11
高-中短路阻抗	0.12
中-低短路阻抗	0.38
高-低短路阻抗	0.22
CT1、CT2 变比	1250 A/1A
CT3 变比	2500 A/1 A
CT4 变比	5000 A/1 A

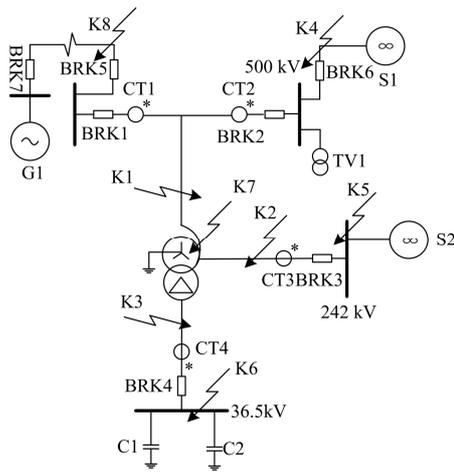


图 8 变压器电气接线图

Fig. 8 Transformer wiring diagram

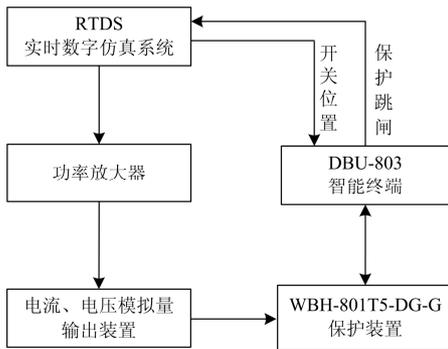


图 9 保护装置接线图

Fig. 9 Protection equipment wiring diagram

差动保护定值：差流启动定值为 $0.4I_e$ ，差流制动系数 S 为 0.5，二次谐波制动系数为 0.15。针对改进的变压器差动保护励磁涌流判据，验证了空投和手合于故障时变压器差动保护的可靠性。试验结果表明，空充试验时，差动保护可靠不动作，波形如图 10 所示；手合于故障试验时，差动保护可以快速动作，波形如图 11 所示。

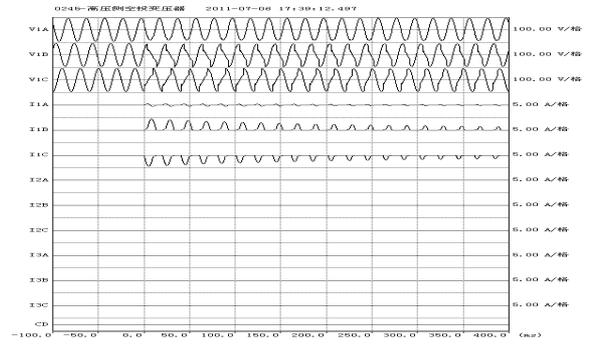


图 10 高压侧空投波形图

Fig. 10 Waveform of transformer closed at high-voltage side

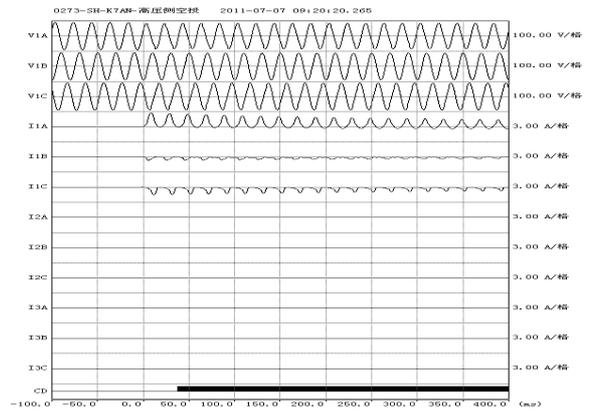


图 11 空投高压侧 A 相接地故障波形图

Fig. 11 Waveform of transformer closed phase A earth fault in high-voltage side

4 结语

本文对提出的一种新模式常规采样 GOOSE 跳闸变压器保护的采样回路、双 AD 数据校验判据以及改进的差流二次谐波“或”闭锁+基于差流原始值、差流微分的非间断点开放辅助判据进行了研究，本文提出的方案不仅可以有效避免电子互感器、采集器、合并单元复杂的采样回路异常引起的差动保护误动，通过配合双 AD 实时校验判据与改进的励磁涌流识别判据，提高了变压器差动保护的采样可靠性及避免了空投变压器时励磁涌流引起的差动保护误动。

本文新模式的变压器保护处理速度快，硬件实现简单，适用于特高压工程电压等级，且已经通过了国家检测机构测试，已用于生产。

参考文献

[1] 李旭, 黄继东, 倪传坤, 等. 不同电流互感器混用对线路差动保护的影响及对策的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 141-145.

LI Xu, HUANG Jidong, NI Chuankun, et al. Influence of

- mixing different types of current transformers on line differential protection and the countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 141-145.
- [2] 邓茂军, 吴起, 陈亮, 等. 基于电子式互感器的电炉变压器差动保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 114-118.
DENG Maojun, WU Qi, CHEN Liang, et al. Study of furnace transformer differential protection based on electronic transformer[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 114-118.
- [3] 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, 2002.
- [4] 易永辉, 王雷涛, 陶永健. 智能变电站过程层应用技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 1-5.
YI Yonghui, WANG Leitao, TAO Yongjian. Process level application scheme in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 1-5.
- [5] 宋小会, 杨建翔, 郭志忠, 等. 交流特高压变电站站用变保护技术方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 110-115.
SONG Xiaohui, YANG Jianxiang, GUO Zhizhong, et al. Protection of station transformer of UHV AC substation station technology solutions[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 110-115.
- [6] 张巧霞, 贾华伟, 叶海明, 等. 智能变电站虚拟二次回路监视方案设计及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 123-128.
ZHANG Qiaoxia, JIA Huawei, YE Haiming, et al. Design and application of virtual secondary circuit monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 123-128.
- [7] 史泽兵, 郝后堂, 江卫良. 一种新型的励磁涌流制动方案[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 147-150.
SHI Zebing, HAO Houtang, JIANG Weiliang. A new restraint scheme for inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 147-150.
- [8] 何越, 林湘宁, 黄景光. 一种直接消除变压器合闸励磁涌流的方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(11): 141-149.
HE Yue, LIN Xiangning, HUANG Jingguang. A method to eliminate the magnetizing inrush current of energized transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(11): 141-149.
- [9] 王增平, 王雪. 基于改进主成分分析的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(22): 1-5.
WANG Zengping, WANG Xue. Inrush current recognizing in power transformer based on modified principal component analysis[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(22): 1-5.
- [10] 王雪, 王增平. 基于波形时域分布特征的变压器励磁涌流识别[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 148-154.
WANG Xue, WANG Zengping. Identification of transformer inrush currents based on waveform distribution characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 148-154.
- [11] 王祖光. 间断角原理的变压器差动保护[J]. 电力系统自动化, 1979, 3(1): 21-33.
- [12] 邵文权, 乔妮, 王建波. 基于波形互相关系数的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 14-20.
SHAO Wenquan, QIAO Ni, WANG Jianbo. A novel algorithm of identifying inrush current based on waveform cross-correlation coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 14-20.
- [13] 秦志坚, 安平, 方厚善. 谐波发生设备的设计研究[J]. 电器与能效管理技术, 2016(4): 61-63.
QIN Zhijian, AN Ping, FANG Houshan. Design of harmonic current test equipment[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2016(4): 61-63.
- [14] 王春宁, 耿志慧, 马宏忠, 等. 基于振动的电力变压器铁心松动故障诊断研究[J]. 高压电器, 2015, 51(12): 59-65.
WANG Chuning, GENG Zhihui, MA Hongzhong, et al. Fault diagnosis of transformer core loosening based on vibration[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(12): 59-65.
- [15] 李伟峰. 一种低谐波畸变的平滑光伏并网调制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(12): 113-117.
LI Weifeng. Research on smooth modulation strategy with low harmonic distortion for active power filter of PV grid-connection[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(12): 113-117.

收稿日期: 2015-07-05; 修回日期: 2015-09-14

作者简介:

陈继瑞(1984-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统继电保护产品研发工作; E-mail: 790321152@qq.com

刘立功(1979-), 男, 本科, 工程师, 从事继电保护产品营销工作;

李旭(1977-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护产品研发工作。

(编辑 姜新丽)