

DOI: 10.7667/PSPC170329

智能变电站继电保护系统所面临的若干问题

张旭泽^{1,2}, 郑永康¹, 康小宁², 刘明忠¹, 孟雷¹, 陈迟¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610031;

2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西省智能电网重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 智能电网的蓬勃发展决定了智能变电站有着广阔的前景。智能变电站在组织结构、网络通信和使用二次设备上与传统的变电站都有很大的不同,使得智能变电站继电保护系统与传统变电站继电保护系统相比有明显优势,同时在数据采集、时钟同步和电磁兼容等方面也存在着一些亟待解决的问题。就地保护概念的提出同时带来了新的挑战。对智能变电站继电保护系统存在的问题进行了讨论。在综述了目前研究现状的基础上,指出了当前研究存在的不足,并对今后的研究方向提出了一些建议和设想。

关键词: 智能变电站; 继电保护; 异常数据; 延时; 电磁兼容

Several problems of intelligent substation relay protection system

ZHANG Xuze^{1,2}, ZHENG Yongkang¹, KANG Xiaoning², LIU Mingzhong¹, MENG Lei¹, CHEN Chi¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610031, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Smart Grid, School of Electric Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The fast development of smart grid ensures a bright future of intelligent substation. Intelligent substation differs much with the traditional substation in its structure, network communication method and the devices applied, which are all advantages of intelligent substation compared with traditional one. But in the practical operation, it also faces many problems in value sampling accuracy, clock synchronization and electromagnetic compatibility. The new concept "local protection" also brings some problems. The problems above are discussed and the current research results are listed, then the insufficient research points are pointed out and several suggestions and ideas for future research are proposed.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 521999160004).

Key words: intelligent substation; relay protection; abnormal data; time delay; electromagnetic

0 引言

随着信息技术、通信技术和计算机技术的发展,智能电网已经成为当今电网的发展趋势。我国对智能电网的定义是:以特高压电网为骨架,以各电压等级电网协调发展的坚强电网为基础,将现代的传感测量技术、通信技术、信息技术、计算机技术和控制技术与物理电网高度集成而形成的新型电网^[1-2]。从中可以看出,智能变电站作为电压变换的枢纽,电力传输的重要参与环节,它的正常工作将对智能电网的稳定运行产生重要影响。智能变电站与常规变电站相比,其在组成元件和结构上有较大不同。智能变电站的二次系统通常包含电子式互感器、

合并单元、交换机、保护测控等设备,互感器、保护及断路器之间复杂的电缆硬导线连接被光纤连接所代替。保护测控设备的电流电压等采样值输入由模拟信号转变为数字信号,保护测控设备的模拟信号采样也由装置内实现变为各合并单元实现。电子式互感器的传变特性、信息采集的正确性、全站的时钟对时准确性和运行过程中的暂态量都会对智能变电站继电保护系统的正常稳定运行造成重大影响。本文将从以上几个方面进行分析,总结现阶段已有的研究成果,并对未来的研究方向提出几点看法。

1 传变特性

电子式互感器可以分为电子式电压互感器和电子式电流互感器。电子式电流互感器一般可分为电磁传感类、光学传感类和电子传感类,电子式电压

互感器则可分为电气分压类和光学传感类。

1.1 电子式电流互感器

目前, 罗氏线圈电子式电流互感器是应用最多的电子式互感器, 对于它的研究也相对较多。文献[3-5]研究了罗氏线圈电流互感器的结构以及工作原理, 在此基础上给出了罗氏线圈电流互感器的传递函数。随后研究了在电网高次谐波、电网冲击电流的条件下罗氏线圈的输入输出波形特征, 发现将罗氏线圈用于 5 000 Hz 以下的电流测量不会引起显著的附加误差, 但用于冲击电流时罗氏线圈会出现输出电流滞后且响应电流振荡失真等现象。进一步研究发现, 罗氏线圈传感头的内阻减小会引起直流分量和高次谐波分量幅值的增加, 而且会带来冲击电流输出波形的局部振荡, 加重失真。文献[5]研究了磁光电流互感器、比较式光学电流互感器、全光纤电流互感器、铁芯线圈式低功率电流互感器及空心线圈电流互感器, 并对它们传变谐波的特性进行了研究和比较, 得到了各种类型的互感器谐波传变的特点及工作条件。文献[6-8]对罗氏线圈互感器, 低功率电流互感器和全光纤电流互感器的传变准确性、饱和性、频率响应以及暂态特性进行了比较, 分析了三种电流互感器的优缺点以及最佳使用场合。

目前, 国内外对于光学原理的互感器的实际运行经验十分欠缺。此外, 光学互感器还会受到互感器表面所承受的压力、所处环境的温度等外界环境的影响, 外界环境的变化将会改变互感器的测量结果。然而, 在长期的实际运行过程中, 外界的环境是在变化的, 因此如何规避外界环境对互感器的影响或者如何简单有效地对互感器的测量误差进行补偿也是一个亟待解决的问题。

1.2 电子式电压互感器

文献[9-10]对电容分压型电压互感器的结构和传变特性进行了分析, 在此基础上分析了电容分压型电压互感器的暂态传变特性。文献[11-13]分析了电阻分压型互感器的结构, 讨论了影响其传变准确度的影响因素。文献[14]针对目前电容型电压互感器存在的误差特性不稳定的问题, 提出了一种新型的电压互感器的结构, 并对新型的电压互感器进行了测试, 结果表明新型的互感器在传变误差上相较于以往的互感器有了一个明显的提升。文献[15]在综合分析了电阻型电压互感器、电容型电压互感器和电感型电压互感器的结构的基础上, 对三种类型的互感器的传变特性进行了分析比较, 总结了各种类型互感器的优缺点。

现阶段对于电子式电压互感器的研究还不够充分, 电压互感器的长期运行经验同样较为缺乏。同

时, 大量的研究都关注于其误差特性, 对于其长期运行的稳定性缺乏足够的探讨。

1.3 电子式互感器对继电保护的影响

电子式互感器的应用也对继电保护系统的可靠性和适应性带来了许多改变。文献[16-18]分析了电子式互感器的应用对线路保护、变压器保护、母联保护、母线保护等变电站内常见保护的影响, 指出由于电子式互感器的使用而造成的器件增多会降低保护系统的可靠性, 各个部件的延时、网络的延时以及采样不同步等问题都会对保护的正常工作造成影响。但另一方面, 由于电子式互感器的使用, 互感器饱和的问题得以解决, 同时, 由于互感器输出的是数字信号, 因而信号传输和采集的效率有所提高, 这对提高保护的性能是有所帮助的。此外, 传统的电磁式互感器随着系统电压升高, 互感器的绝缘结构会更加复杂, 互感器体积增加同时造价也随之增加, 且传统的电磁式互感器存在磁饱和, 铁磁谐振, 动作范围小等缺点。电子式互感器与之相比, 结构更加紧凑、体积小、不饱和, 易于数字信号的传输。这符合继电保护系统组件的发展趋势。然而, 随着变电站技术的发展, 变电站内的电磁环境日趋复杂, 电子式互感器在工作过程中容易受到电磁干扰。电子式互感器的采集器是电子式互感器最容易受到干扰的结构。现场运行经验发现, 当断路器、隔离开关和接地开关在进行分合操作时以及系统短路故障发生时, 都会产生强烈的电磁干扰。文献[19]分析了智能变电站电磁干扰的干扰源、易受电磁干扰的敏感设备和耦合路径。通过对电流互感器的取能端口和信号端口进行电快速瞬变脉冲群抗扰度实验, 对母线—大地接口进行浪涌抗扰度实验和阻尼振荡波抗扰度实验, 发现现场操作过程产生的暂态高次谐波是主要的干扰源。文献[20]对现场经常出现的隔离开关开合过程进行了深入的研究, 构建了空心线圈高频暂态模型, 对一次传感单元、采集单元和合并单元所受的干扰进行了初步的分析, 随后进行了仿真。依据仿真的结果, 提出了减小干扰的措施。

在电网发生扰动和故障期间, 变压器、电流互感器等非线性铁磁元件的暂态过程会影响电子式互感器的正确测量, 导致保护的错误动作, 这其中尤其对电流差动保护的影响最大。近年来电网发生不少由于变压器空投和线路合闸过程产生的感应电流使得附近的变压器、发电机和线路的保护误动作的事故。当前对于独立的变压器、发电机和互感器的暂态过程研究较多, 但是在实际系统中, 这些非线性铁磁元件的暂态过程往往相互影响, 不能再将它们独立地看待, 这使得对其分析变得异常复杂, 难

以进行, 至今仍没有得到很好的研究, 缺乏规避其对保护影响的应对措施。文献[21]建立了复杂合应涌流的等效模型, 通过对其求解得出了运行变压器负载对合应涌流的影响。随后对合应涌流进行了物理实验, 得到了其与合闸角、剩磁、等效阻抗、系统中性点接地情况、系统电压以及变压器类型的关系, 提出了合应涌流的识别方法及相应的应对策略。但是, 文章中提出的应对策略仅仅针对部分保护类型, 而且文章对于暂态过程和铁磁元件的交互作用对保护的影响这一问题缺少全面的分析, 在如何提高保护的抗干扰方面也缺少一个普适的方向和思路。目前, 相关研究还相对较少, 资料也较为欠缺, 但这一问题却已经严重影响到了系统的安全运行, 将交互作用的机理探究清楚并提出有针对性的保护整改方案仍然是摆在科研工作者面前的一道难题。

合并单元是电子式互感器的重要组成部分, 是模拟信号汇集以及模拟信号转换为数字信号的元件。由于采样时间序列往往与接收到的数字量采样不在一个节拍上, 因此需要用插值算法对数据进行重采样。因为插值算法的局限性, 插值一定会产生误差, 误差的大小因插值算法的复杂程度和算法阶数而异。一般而言, 插值算法的准确度和速度是一对难以调和的矛盾, 在实际工程中, 为了插值的速度, 往往对算法的准确度做了一定的牺牲, 从而造成插值结果的不准确。其次, 采样频率和插值位置同样深深地影响插值算法的准确性。插值位置不同, 虽然对信号的基波影响不大, 但是对信号的谐波会有较大的影响。同时, 合并单元作为智能变电站中一个重要的元件, 其本身是极为脆弱的。合并单元本身的电源损坏以及电磁波的干扰都会对合并单元的准确工作产生影响, 甚至会使得合并单元重启。此外, 一些程序上的疏忽也会影响合并单元的准确工作。例如曾经发生过的某厂家合并单元因计数程序出现错误而导致合并单元在计数时产生错误, 从而报错的情况。合并单元的正确稳定运行对保护系统的意义重大, 因此有必要对如何加强合并单元的可靠性做进一步的研究。

在实际运行中还发生过合空线路造成保护误动作的情况, 根据现场经验, 发生误动事故的线路往往是短线路, 在长线路上发生这种情况的情况非常少, 这背后的原因也有待探究。

2 对时系统与数据传输网络对继电保护系统的影响

IEC61850 标准将变电站的逻辑结构划分为三

层, 分别为过程层、间隔层和站控层。与传统的变电站相比, 智能变电站对数据传输网络可靠性的要求更高, 对各个组件间时间同步的要求更高。一旦数据传输网络出现故障, 将对继电保护系统和测控系统产生重大影响, 甚至使其不能工作。在智能变电站中, 保护测控设备的电压电流等采样值输入由模拟信号变为数字信号, 保护测控设备的模拟信号采样也由装置内实现变为各合并单元实现, 这些变化都对智能变电站的时钟同步系统提出了更高的要求。如果不同采集单元的时间基准不同, 那么实际同一时刻的数据将会“变成”不同时刻的数据, 这对保护系统的影响巨大, 严重影响继电保护系统的可靠动作。

目前时钟源主要通过接收卫星信号来实现对时, 时钟接收卫星信号受天气等多种因素的影响, 为保证主时钟输出信号的稳定性, 除主时钟自身具备较强的守时能力外, 主时钟跟踪卫星信号也应根据偏差大小选择不同的拉入同步策略。受同步系统中各环节的影响, 合并单元接收到的时钟同步信号可能发生异常跳变。在时钟同步信号异常的情况下, 条件允许时, MU 应该尽可能输出连续、稳定且带同步品质因数的数据, 以减少对保护设备等的影响。

时间同步系统一般同时采用北斗卫星系统和全球定位系统 GPS 同时作为时钟源, 对时网络可根据需要进行切换, 对时同步系统的时钟同步和守时精度应满足站内所有设备的对时精度要求。电子式互感器对电量的同步测量是过程层同步对时最重要的任务, 对同步精度的要求也最高, 一般来说差动保护对同步精度的要求至少要达到微秒级。

文献[22-23]研究了对时同步状况对保护装置的影响, 发现:

1) 对于线路保护, 电流或电压数据失步时保护会闭锁, 同时退出相应的方向元件并投入电压互感器断线过流。

2) 对于变压器保护, 任一侧相电流失步时, 闭锁变压器差动保护; 但如果外接零序电流或间隙电流失步时, 对保护行为无影响。后备保护中的电流和电压相对失步时, 置方向元件不满足条件, 不闭锁保护。

3) 对于母线保护, 当母线电压通道数据失步时不闭锁差动保护, 但应闭锁该母线电压对保护有影响的判据; 支路保护电流失步时闭锁差动保护, 母联保护电流失步不闭锁差动保护; 母联支路电流通道数据失步不闭锁母线保护; 支路电流失步不闭锁支路的失灵保护。

由此可见, 合并单元输出数据的同步程度对主

保护影响较大, 对仅依赖信号幅值的后备保护影响较小。在主保护因失步而闭锁期间一旦发生故障, 将对系统的安全造成极大的影响。因此, 系统的时钟同步对继电保护系统是极为重要的。

文献[24]提出了一种检验系统时钟同步的方法。通过比较调度自动化主站数据采集与监视控制系统(Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA)接收到某一条事件顺序记录(Sequence of Event, SOE)的时间 t_1 和 SOE 记录的自身时间 t_2 , 利用 t_2 与 t_1 的时间差值与阈值的大小判断是否同步。这个方法的好处是原理简单且易于实现, 目前已经在佛山市供电局得到了应用。但此方法的缺点同样也非常明显, 阈值选取较为困难, 选取过小可能造成同步信号误判为失步信号, 选取的过大则会造成失步信号误判为同步信号。同时, 传输延时也会对判断结果造成影响。

其实, 网络时钟同步可复用已有的网络设施, 与其他数据共网传输, 近年来受到了学术界和工业界的广泛关注。IEEE 1588 标准为网络环境下智能变电站的精确时钟同步提供了新的解决方案, 是目前最有发展和应用前景的时钟同步方案。文献[25-30]介绍了基于 IEEE 1588 标准的时钟同步原理、B 码的编码与解码、时钟计时方法、平滑修正方法以及两种透明时钟方案 P2P 和 E2E 并对它们的特性进行了比较, 得到在相同情况下 P2P 透明时钟方案的精度对网络拓扑变化的适应能力要优于 E2E 方案。

此外, 由于智能变电站的数据采集与传输环节较多, 而不同环节的延时又不尽相同, 因此对智能变电站中不同环节的延时进行分析是十分重要的。文献[31]分析了合并单元, 智能终端等设备的延时。通过分析得出, 智能化保护装置相比于常规保护装置, 主要增加了合并单元的采样延时(包括数据采集, SV 报文的生成)、保护采样延时(主要包括装置对 SV 报文的解析, 插值运算)和智能终端的延时环节。其中, 合并单元的采样延时所占的比重最小, 其次为保护装置的采样延时, 智能终端的动作延时最长。如何在系统的对时和守时环节中考虑延时造成的影响对于准确对时亦是十分重要的。

主时钟接收到的卫星信号不稳定可能对保护测控设备安全稳定运行带来不利影响。随着技术的发展, 继电保护系统应该逐步避免对外部时钟信号的依赖。在智能变电站的体系中, 由于站内过程层同步是不依赖于卫星绝对时钟信号的, 卫星同步信号对于站内同步系统来说反而会成为一种干扰源。如果变电站过程层同步系统的时钟源采取本地时钟,

则可以消除接受到的卫星信号不稳定带来的影响。但这一做法存在以下问题:

- 1) 智能变电站需要两套对时同步系统, 一套用于接受卫星信号从而对时, 另一套本地时钟系统用于同步;
- 2) 间隔层设备可能需要同时提供对时和同步接口;
- 3) 变电站内的一些设备是基于 GPS 时钟信号且有 GPS 时标的, 如 GOOSE 信号和 PMU 信号, 因此需要解决这些信号和基于本地时钟同步的采样信号的时间问题。

可见, 采用本地时钟的时间信号, 虽然可以解决因为接受卫星信号带来的不稳定问题, 但是却带来了一系列其他的问题。对时和同步是一个复杂的问题, 如何更加快速准确地检测信号的同步以及对时的准确问题还需要进一步研究。在本地时钟信号上加装一个卫星信号接收器, 每隔固定的时间就发送一个时间信号, 用于检测本地时钟与 GPS 时钟的时差是否改变是一个值得思考的解决方法。如果时差没变, 那么就认为同步信号达标, 用这个时差也可以方便解决 GPS 信号与本地时钟信号不一致的问题。

3 就地化保护带来的影响

传统变电站继电保护系统的保护装置放置在小室内, 而把互感器放置在现场。随着智能变电站的运行经验不断丰富, 发现智能变电站的电子式互感器长期工作在环境多变的户外会造成电子式互感器采样信息的突变故障和渐变故障, 这对于保护系统的长期稳定运行是一个巨大的威胁。由此, 提出了就地保护的概念。采用就地保护时, 将保护装置整体放置在室外的被保护元件附近, 可以使用传统的互感器进行测量工作, 对交换机和光纤的需求会大大降低, 从而减少了网络出现故障影响保护正常动作的风险。另一方面, 就地保护条件下, 各个保护装置之间所用的信息直接取自互感器, 对网络的依赖程度降低。一旦通信网络发生小的故障或者其他保护的测量环节发生故障, 保护仍可能继续工作, 从而提高了保护的可靠性。然而, 由于将保护装置整体放置在户外, 在多变的自然环境和复杂的电磁环境下, 保护装置能否长期有效地工作还有待探究; 同时, 传统的互感器在这样的环境下的可靠性也值得进一步验证。文献[32]对保护中的智能设备的抗电磁干扰程度进行了实验, 发现 CT 及 PT 回路在现场一次设备带电操作的过程中, 会引入强烈的电磁干扰, 该干扰可能耦合进入装置, 从而影响装置的

正常运行。且在 110 kV 和 500 kV 的变电站中, 暂态信号的强度已经大于国内标准规定的最大严酷等级的电快速瞬变脉冲群抗扰度、浪涌抗扰度以及阻尼振荡波抗扰度峰值, 表明智能设备受到的电磁干扰十分强烈。而关于环境因素如温度光照腐蚀等对保护装置的影响还有待探究。

4 异常数据

智能变电站的信息可以做到站域共享, 这一方面提高了变电站的信息化程度, 给站域保护的实现提供了基础, 另一方面对信息的正确性也提出了更高的要求。互感器采集的异常数据不仅仅会对自己所在的间隔产生影响, 甚至会对其他间隔也产生影响。“飞点”是电子式互感器常见的一类异常数据。“飞点”数据的品质位仍标记为正常, 因此合并单元仍然将其作为正常信号来处理, 但“飞点”本身已经完全不能反映原始信号的信息, 通常幅值很大, 在波形上表现为突然出现的尖峰。“飞点”信号的这一特征常常会使保护系统将其误认为是故障信号, 从而出现误动。如何辨识“飞点”和恢复“飞点”处的数据是当今关于“飞点”的主要研究内容。有学者提出了一个鉴别数据有效性的方法: 搜集一个周期的电流信号并找出它们中的最大模值, 将其与所测信号的幅值进行比较, 当两者的比小于阈值时, 断定信号正常, 大于阈值时断定信号异常。这一方法的优点是原理简单, 便于实现, 但是它的缺点也很明显, 需要对电流的幅值进行实时监测和更新; 且如果将阈值设为定值, 则不够灵活; 同时, 阈值的合理大小不易确定。该方法需要比较一个周期内所有数据点的幅值, 检测的延时较长, 难以满足继电保护系统速动性的要求。文献[33-34]用“飞点”处的波形不连续性检测“飞点”, 文献[34]在利用这一判据进行判断时, 还引入了一个长度为三个点的数据窗, 连续三点都不是“飞点”时才启动保护系统, 并利用“飞点”之前已知点的采样值和差分值来恢复“飞点”处的正确数据。这一方法的优点是判断结果的准确性高, 结果可靠, 同时判断速度较快, 但是由于在线判别要不间断地对数据是否异常进行检测, 而“飞点”的出现概率又相对较低, 因而可以考虑用计算量更小的方法先行判断有无“飞点”, 如果有再启动复杂度稍高的“飞点”判别算法。

例如, 可以用线路的三相电流和与三倍的零序电流是否相等来判断线路是否有“飞点”, 不过该方法需要互感器具有提取零序电流的能力。此外也可以利用智能变电站的信息站域共享的特点, 利用在

线路节点处几条支路的电流相量和是否满足基尔霍夫电流定律来判断有无“飞点”。用上述两个方法判断“飞点”时, 只需对电流相量进行加和即可, 省去了诸多的计算和比较, 速度更快。同时阈值小、灵敏度高, 是一个很有前途的研究方向。

5 结论

在相关新技术的推动下, 电力系统正在向着自动化、智能化的方向迅速发展。在这一进程当中, 智能变电站技术得到了广泛的关注和应用。随着电子式互感器在智能变电站中的使用, 智能变电站的数字化程度进一步增加, 同时还解决了传统互感器体积大、易饱和等缺点。然而, 智能变电站的保护系统也面临着许多问题。首先, 电子式互感器作为智能变电站的重要元件, 其转变特性还没有得到完整的研究, 尤其是基于光学原理的电子式互感器, 这极大地延缓了相应互感器投入使用的时间。同时, 温度、压力等环境因素都会对基于光学原理的电子式互感器的准确测量造成影响, 而相关的解决办法和运行经验都十分欠缺。其次, 合并单元作为电子式互感器的核心, 其运行的稳定可靠性会受到所使用的算法、所受的电磁干扰以及所处的自然环境的影响, 如何较好地屏蔽这些影响因素也是亟待解决的问题。对于异常数据“飞点”的研究现在已经取得了一定的成果, 但在如何更好地提高“飞点”识别效率和恢复速度方面还有许多工作要做。作为智能变电站信息共享的基础, 对时系统对于智能变电站的重要性不言而喻。然而, 当前的对时系统在对时准确性的检测和网络延时的考量等方面都有待完善。过分依赖外部时钟信号也是对时系统面临的一个问题, 这与继电保护系统对独立性的要求相违背。最后, 对于目前就地化保护的趋势, 在面临异常复杂的电磁环境时继电保护装置的可靠性与适应性还有待进一步探究。

智能变电站的前景是美好的, 但上述问题还有待解决。伴随着技术难题的攻破, 智能变电站技术必将迎来更大的发展, 智能电网的建设也将取得长足的进步。

参考文献

- [1] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [2] 张东霞, 苗新, 刘丽平, 等. 智能电网大数据技术发展研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 2-12. ZHANG Dongxia, MIAO Xin, LIU Liping, et al. Research

- on development strategy for smart grid big data[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 2-12.
- [3] 王玲, 牟育慧, 汪建, 等. 电子式互感器测量环节传输特性的研究[J]. 测控技术, 2016, 35(1): 1-5.
WANG Ling, MU Yuhui, WANG Jian, et al. Research on transfer characteristics of the electronic transformer[J]. Measurement & Control Technology, 2016, 35(1): 1-5.
- [4] RAMBOZ J D. Machinable Rogowski coil, design and calibration[J]. IEEE Transactions on Instruments and Measurement, 1996, 45(2): 511-515.
- [5] 冯宇, 王晓琪, 吴世普, 等. 电子式电流互感器谐波传变特性研究[J]. 电测与仪表, 2013, 50(9): 11-16.
FENG Yu, WANG Xiaoqi, WU Shipu, et al. Research on harmonic transfer characteristics of electronic current transformers[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50(9): 11-16.
- [6] 谢琼香, 何瑞文, 蔡泽祥, 等. 3种电子式电流互感器的传变特性分析与比较[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(5): 18-22.
XIE Qiongxian, HE Ruiwen, CAI Zexiang, et al. Characteristics analysis and comparison of three types of electronic current transformers[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(5): 18-22.
- [7] BLAKE J, TANTASWADI P, DE CARVALHO R T. In-line Sagnac interferometer current sensor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(1): 116-121.
- [8] SLOMOVITZ D. Electronic-based high-voltage measuring transformers[J]. IEEE Power Engineering Review, 2007, 22(3): 60-60.
- [9] 高厚磊, 杨锐, 王栋, 等. 电子式电压互感器传变特性分析与测试[J]. 北京交通大学学报, 2014, 38(5): 114-118.
GAO Houlei, YANG Rui, WANG Dong, et al. Analysis and test for electronic voltage transducer's transfer characteristics[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2014, 38(5): 114-118.
- [10] 王佳颖, 郭志忠, 张国庆, 等. 电子式电压互感器暂态特性仿真与研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 62-65.
WANG Jiaying, GUO Zhizhong, ZHANG Guoqing, et al. Investigation and simulation of transient characteristics of electronic voltage transformer[J]. Electronic Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 62-65.
- [11] 段梅梅, 李振华, 李红斌, 等. 电阻分压型电子式电压互感器误差分析及对电能计量的影响研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(2): 59-63.
DUAN Meimei, LI Zhenhua, LI Hongbin, et al. Error analysis of resistance dividing type electronic voltage transformer and its impact on electric power measurement[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(2): 59-63.
- [12] RATANAPANACHOTE S. Applications of an electronic transformer in a power distribution system[J]. Texas A & M University, 2005.
- [13] KANG M, ENJETI P N, PITEL I J. Analysis and design of electronic transformers for electric power distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 14(6): 1133-1141.
- [14] 吴涛, 周有庆, 曹志辉, 等. 新型电子式电压互感器及其误差分析[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 209-213.
WU Tao, ZHOU Youqing, CAO Zhihui, et al. A new type of electronic voltage transformer and its error analysis[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 209-213.
- [15] 杨锐. 电子式电压互感器行波传变特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
YANG Rui. The research on electronic voltage transducer's transfer characteristics on travelling waves[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [16] 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.
- [17] 许扬, 陆于平, 强生, 等. 光纤电流互感器对保护精度和可靠性的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 119-124.
XU Yang, LU Yiping, BU Qiangsheng, et al. Analysis for effect of fiber-optic current transformer on protection accuracy and reliability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 119-124.
- [18] 何瑞文, 蔡泽祥, 王奕, 等. 空心线圈电流互感器传变特性及其对继电保护的适应性分析[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1471-1476.
HE Ruiwen, CAI Zexiang, WANG Yi, et al. Analysis on transfer characteristics of air-core current transformer and its adaptability to relay protection[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1471-1476.
- [19] 童悦, 张勤, 叶国雄, 等. 电子式互感器电磁兼容性分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(11): 2829-2835.
TONG Yue, ZHANG Qin, YE Guoxiong, et al. Electromagnetic compatibility performance of electronic transformers[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11): 2829-2835.
- [20] 李振华, 胡蔚中, 闫苏红, 等. 隔离开关开合下电子式互感器传导干扰分析及抗干扰方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 233-240.

LI Zhenhua, HU Weizhong, YAN Suhong, et al. Conductive interference analysis and anti-interference methods of electronic transformers in disconnector switching test[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 233-240.

[21] 尹项根, 张哲, 王有怀, 等. 变压器间及其与电流互感器暂态交互作用分析和保护对策[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23):1-9.

YIN Xianggen, ZHANG Zhe, WANG Youhuai, et al. Multiple transformers and CTs interactive effect and its impact on the protective relay[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23):1-9.

[22] 吕航, 李力. 变电站同步信号异常对保护装置影响及对策[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 89-93.

LU Hang, LI Li. Countermeasures and impacts of substation synchronous signal abnormalities on protections[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 89-93.

[23] 张晓悦, 谈树峰, 杨颖安, 等. 数字化变电站时间同步系统异常分析及其整改[J]. 广东电力, 2013, 26(9): 40-44.

ZHANG Xiaoyue, TAN Shufeng, YANG Yingan, et al. Analysis on abnormality of time synchronization system in digital substation and rectification measures[J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26(9): 40-44.

[24] 彭飞进, 车磊, 邓智广. 变电站时钟系统同步异常的判断方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(2): 98-102.

PENG Feijin, CHE Lei, DENG Zhiguang. Method to assess the situation of the time synchronizing system in substation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(2): 98-102.

[25] COOKLEV T, EIDSON J C, PAKDAMAN A. An implementation of IEEE 1588 over IEEE 802.11b for synchronization of wireless local area network nodes[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2007, 56(5): 1632-1639.

[26] ELDSON J C. Measurement, control, and communication using IEEE 1588[J]. Advances in Industrial Control, 2006, 111(1): 75-82.

[27] 赵上林, 胡敏强, 窦晓波, 等. 基于 IEEE1588 的数字化变电站时钟同步技术研究[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 97-102.

ZHAO Shanglin, HU Minqiang, DOU Xiaobo, et al. Research of time synchronization in digital substation based on IEEE 1588[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 97-102.

[28] 汪祺航, 吴在军, 赵上林, 等. IEEE1588 时钟同步技术在数字化变电站中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 137-141.

WANG Qihang, WU Congjun, ZHAO Shanglin, et al. Application of IEEE1588 time synchronization in digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 137-141.

[29] BRUNNER C. IEC 61850 process connection: a smart solution to connect the primary equipment to the substation automation system[C]// 15th Power Systems Computation Conference, August, 22-26, 2005, Liege, Belgium.

[30] Han J, Jeong D K. Practical considerations in the design and implementation of time synchronization systems using IEEE 1588[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(11): 164-170.

[31] 庞福滨, 杨毅, 袁宇波, 等. 智能变电站保护动作时间延时特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 86-92.

PANG Fubin, YANG Yi, YUAN Yubo, et al. Research on characteristics of intelligent substation protection time delay[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 86-92.

[32] 嵇建飞, 杨逸飞, 袁宇波, 等. 智能变电站就地智能设备电磁兼容抗扰度试验分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 998-1007.

Ji Jianfei, YANG Yifei, YUAN Yubo, et al. Experimental analysis of EMC immunity for field installed intelligent equipment of intelligent substation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 998-1007.

[33] 赵亮, 钱玉春, 刘宏君, 等. 数字化变电站抗异常数据的方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 97-99.

ZHAO Liang, QIAN Yuchun, LIU Hongjun, et al. Abnormal data resisting method in digital substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 97-99.

[34] 吴文举, 占捷文. 基于可去间断点的连续采样飞点检测算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 18-24.

WU Wenju, ZHAN Jiewen. A flying spot detection algorithm for continuous sampling based on removable discontinuous points[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 18-24.

收稿日期: 2017-03-09; 修回日期: 2017-07-25

作者简介:

张旭泽(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电子式互感器对继电保护的影响; E-mail: dianqieefourier@163.com

郑永康(1977—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为继电保护、自动化、智能变电站等;

康小宁(1968—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护, 变电站综合自动化系统, 智能电网等。

(编辑 姜新丽)