

## 基于相量集合的站域差动保护研究

李俊刚<sup>1,2</sup>, 孟乐<sup>2</sup>, 张爱民<sup>3</sup>, 张杭<sup>1</sup>, 刘星<sup>2</sup>, 耿英三<sup>1</sup>, 魏勇<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 许继集团, 河南 许昌 461000;

3. 西安交通大学电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 针对智能变电站发展现状, 分析了站域信息共享情况下, 采样信息失步对差动保护的影响。在此基础上提出了基于相量集合的站域差动保护算法。该算法采用各支路的电流同步相量参引进行差动保护逻辑计算, 依此计算出差动电流和制动电流, 解决了由于采样信息失步导致的保护误动或拒动。最后, 仿真结果表明, 基于相量集合的差动保护算法在 SV 一定程度的失步情况下, 差动保护的灵敏性和可靠性不受影响, 能够保证站域差动保护可靠实施。因此, 可以在新一代智能变电站站域保护装置上加以采用。

**关键词:** 站域差动保护; 相量集; 差动电流; 失步信息

### Research on substation differential protection based on phase set

LI Jungang<sup>1,2</sup>, MENG Le<sup>2</sup>, ZHANG Aimin<sup>3</sup>, ZHANG Hang<sup>1</sup>, LIU Xing<sup>2</sup>, GENG Yingsan<sup>1</sup>, WEI Yong<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. XJ Group Corporation, Xuchang

461000, China; 3. School of Electrical and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Based on the intelligent substation development, this paper analyzes the influence of unsynchronized sampling value (SV) on differential protection under the circumstance of substation information sharing, based on which a substation differential protection algorithm based on phase set is proposed. The algorithm uses the current synchronous phasor reference citation of each branch for differential protection logic calculation, and the calculated differential current and braking current can solve protection malfunction or refuse caused by the unsynchronized SV. Finally, the simulation results show that using the differential protection algorithm based on phase set, the sensitivity and reliability are not affected under a certain extent unsynchronized SV, which ensures reliable implementation of substation differential protection. Therefore, this differential protection algorithm can be used in the new generation intelligent substation.

**Key words:** substation differential protection; phasor set; differential current; unsynchronized information

中图分类号: TM77

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)06-0093-05

## 0 引言

快速可靠的继电保护是电网安全稳定运行的重要保障。而随着通信技术的不断完善发展, 为满足大型复杂电网安全稳定运行的要求、需提高继电保护的性能, 以适应电网运行多样性的需求。因此, 基于丰富变电站信息, 站域继电保护成为了研究热点, 并取得了一定的研究成果<sup>[1-8]</sup>。

基于智能变电站数据信息共享优势, 站域保护可以利用站内多间隔线路、元件的电气量、开关量信息、甚至相邻变电站信息来判别故障位置, 实现故障点的快速、准确、可靠隔离, 并实现站内集中备投、集中式低周、低压减载等功能。

目前, 智能变电站的过程层设备之间的采样值数据(SV)采用 DL/T860.92(IEC61850-9-2)协议, 因此, 组网传输方式符合智能变电站网络化发展方向, 可以实现多间隔信息共享和简化过程层网络结构。但是, 其不同间隔 SV 的同步依赖于时钟同步系统, 由于规范<sup>[9]</sup>明确要求保护装置应不依赖于外部时钟同步系统实现其保护功能。因此, 基于组网方式获取 SV 的站域保护装置, 其功能受到了限制, 主要表现为其不能采用差动和方向原理的保护或 SV 失步时需退出差动和方向原理的保护。

然而, 差动保护是目前继电保护界公认的最先进的保护<sup>[10]</sup>, 现有差动保护均要求各支路 SV 严格同步, SV 失步可能导致保护误动或拒动。所以,

智能变电站存在保护装置对差动保护原理选择与SV接入方式限制的矛盾。

因此,基于上述种种因素,如何在站域保护装置上更好实现差动保护,利用站域信息实现快速保护具有较大的工程意义。

## 1 智能变电站中站域信息失步及其影响

### 1.1 信息失步分析现状

目前,智能变电站中,过程层中合并装置(MU)会对电子互感器采集的数据进行处理,其根据时标将原始数据合并为相应的数据集,上送至间隔层保护装置,进行保护控制算法分析。如图1所示,过程层采用组网方式,保护装置SV采样的最大通道延时为 $2\text{ms}+10\text{ms}+T_s$ ,所以在MU失步的状态下,不同MU的SV最大失步时间为 $2\text{ms}+10\text{ms}+T_s$ 。目前,不同MU的SV一般失步 $1\sim 2T_s$ (以MU重采样为同步点计算,不同MU的SV最大失步时间为 $0.25\text{ms}+10\text{ms}+T_s$ )。

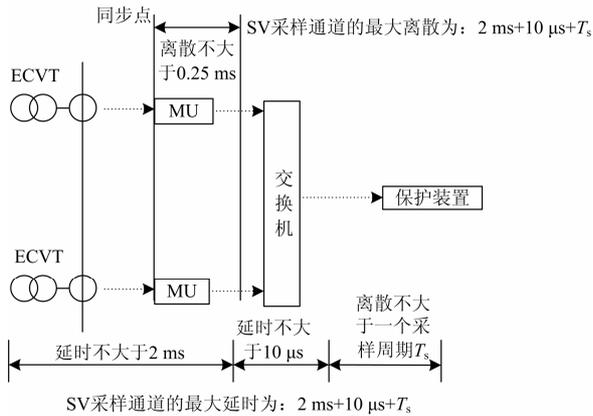


图1 信息失步分析

Fig. 1 Unsynchronized information analysis

### 1.2 失步对差动保护影响分析

对于32点采样来说, $T_s=0.625\text{ms}$ ,SV采样的最大延时为 $2.635\text{ms}$ ,对应相位差为 $47.43^\circ$ (以MU重采样为同步点计算,不同MU的SV最大失步时间为 $0.885\text{ms}$ ,对应相位差为 $15.93^\circ$ )。

图2显示,两大小相等、方向相反的相量,在失步 $2.635\text{ms}$ 时其差流为

$$|\dot{I}_M + \dot{I}_N| = 2|\dot{I}_M| \sin \frac{47.43^\circ}{2} = 0.804|\dot{I}_M|$$

可见差流本来为0的两相量失步时,将产生较大差流。同样相量失步亦对制动电流的计算产生很大影响。

故在模拟量失步时,系统非故障或区外故障时差动保护有误动可能;同时系统区内故障时,保护

灵敏度降低,有拒动可能。因此目前继电保护装置在模拟量失步时均退出差动原理的相关保护。

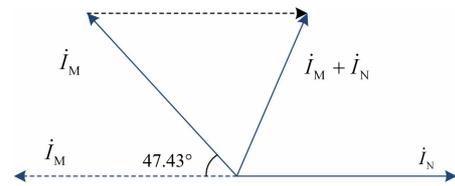


图2 差流分析

Fig. 2 Differential current analysis

## 2 相量集差动保护原理

差动保护的理论基础依据基尔霍夫电流定律:电路中任一节点,任何时刻,所有流入流出结点的支路电流的代数和恒等于零。目前差动保护均采用同一时刻各支路的电流的相量进行计算,当各支路电流失步时,即各支路电流不再是同一时刻,差动保护的理论基础不再存在。

若计算出一个大于失步时间的连续时间段内的各支路各个时刻的电流的相量值,每个支路电流相量组成一个集合。由于各支路相量集时间窗大于失步时间窗,所以各支路的电流相量集中必然存在一个该支路与其他各支路同步的电流相量。若采用各支路的电流同步相量参引差动保护逻辑计算,则失步情况下仍然可以投入差动保护。

### 2.1 基于相量集的差动保护分析

一个连续时间段内各个时刻的电流相量有无穷多个,根据该时间窗里所包含的采样点,在每个采样点处计算一个相量值。若装置的采样频率为1600点/s,即采样周期为 $T_s=0.625\text{ms}$ ,要想包含 $2.635\text{ms}$ 的失步时间,可取5个 $T_s$ 作为相量集的时间窗。分别计算当前采样点和依次前推1~5个点处的相量形成相量集。

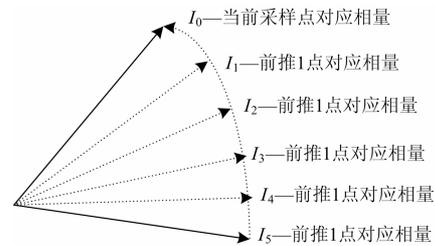


图3 相量集

Fig. 3 Phasor set

$I_0$ 在此定义集合加减法:两集合相加减等于集合内每个元素和另一集合各元素分别相加减,若两个集合的元素个数分别为 $m$ 和 $n$ ,则他们的和或差是一个元素个数为 $m \times n$ 的集合。下面以两端差动

为例, 进行相量集求取差动电流和制动电流的分析。

首先将当前采样点前推 1~5 个点, 分别计算当前点(下标为 0)和前推各点(下标为 1~5)处的相量值, 形成相量集合。设电流  $I_M$ 、 $I_N$  的相量集合分

别为  $(I_{m0} I_{m1} I_{m2} I_{m3} I_{m4} I_{m5})$ 、 $(I_{n0} I_{n1} I_{n2} I_{n3} I_{n4} I_{n5})$ 。那么两相量集合相加求取差动电流集合, 结果如式(1)所示, 两相量集合相减求取制动电流集合, 结果如式(2)所示。

$$\begin{pmatrix} I_{m0} \\ I_{m1} \\ I_{m2} \\ I_{m3} \\ I_{m4} \\ I_{m5} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I_{n0} \\ I_{n1} \\ I_{n2} \\ I_{n3} \\ I_{n4} \\ I_{n5} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{m0} + I_{n0} & I_{m0} + I_{n1} & I_{m0} + I_{n2} & I_{m0} + I_{n3} & I_{m0} + I_{n4} & I_{m0} + I_{n5} \\ I_{m1} + I_{n0} & I_{m1} + I_{n1} & I_{m1} + I_{n2} & I_{m1} + I_{n3} & I_{m1} + I_{n4} & I_{m1} + I_{n5} \\ I_{m2} + I_{n0} & I_{m2} + I_{n1} & I_{m2} + I_{n2} & I_{m2} + I_{n3} & I_{m2} + I_{n4} & I_{m2} + I_{n5} \\ I_{m3} + I_{n0} & I_{m3} + I_{n1} & I_{m3} + I_{n2} & I_{m3} + I_{n3} & I_{m3} + I_{n4} & I_{m3} + I_{n5} \\ I_{m4} + I_{n0} & I_{m4} + I_{n1} & I_{m4} + I_{n2} & I_{m4} + I_{n3} & I_{m4} + I_{n4} & I_{m4} + I_{n5} \\ I_{m5} + I_{n0} & I_{m5} + I_{n1} & I_{m5} + I_{n2} & I_{m5} + I_{n3} & I_{m5} + I_{n4} & I_{m5} + I_{n5} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} I_{m0} \\ I_{m1} \\ I_{m2} \\ I_{m3} \\ I_{m4} \\ I_{m5} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} I_{n0} \\ I_{n1} \\ I_{n2} \\ I_{n3} \\ I_{n4} \\ I_{n5} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{m0} - I_{n0} & I_{m0} - I_{n1} & I_{m0} - I_{n2} & I_{m0} - I_{n3} & I_{m0} - I_{n4} & I_{m0} - I_{n5} \\ I_{m1} - I_{n0} & I_{m1} - I_{n1} & I_{m1} - I_{n2} & I_{m1} - I_{n3} & I_{m1} - I_{n4} & I_{m1} - I_{n5} \\ I_{m2} - I_{n0} & I_{m2} - I_{n1} & I_{m2} - I_{n2} & I_{m2} - I_{n3} & I_{m2} - I_{n4} & I_{m2} - I_{n5} \\ I_{m3} - I_{n0} & I_{m3} - I_{n1} & I_{m3} - I_{n2} & I_{m3} - I_{n3} & I_{m3} - I_{n4} & I_{m3} - I_{n5} \\ I_{m4} - I_{n0} & I_{m4} - I_{n1} & I_{m4} - I_{n2} & I_{m4} - I_{n3} & I_{m4} - I_{n4} & I_{m4} - I_{n5} \\ I_{m5} - I_{n0} & I_{m5} - I_{n1} & I_{m5} - I_{n2} & I_{m5} - I_{n3} & I_{m5} - I_{n4} & I_{m5} - I_{n5} \end{pmatrix} \quad (2)$$

## 2.2 差动电流

在差动电流集合的基础上, 可以求取差动电流。

求取最小差流: 首先求取差动电流集合中幅值最小的两个元素, 若两最小元素反相位(相位差在  $160^\circ \sim 200^\circ$  之间, 则取最小差流为 0), 否则取差流集合的最小元素为最小差流。

求取最大差流: 取差流集合的最大元素为最大差流。

区内故障识别: 由于非区内故障时, 差动电流最小, 理论上为 0; 在区内故障时差动电流很大, 为故障点流出的电流。因此采用最小差流进行故障识别: 若  $I_{cd.min} < k \max\{I_{m0}, I_{n0}\}$  ( $K$  取 0.3~0.7) 则认为系统区内故障, 否则认为系统正常或区内故障。

上述判据的适用条件: 系统正常或区外故障时,  $I_{cd.min} \approx 0 \ll k \max\{I_{m0}, I_{n0}\}$ , 区内故障时由于  $\dot{I}_M$ 、 $\dot{I}_N$  相量集合元素间的最大相位差  $\theta$  为相量固有角差  $\Delta\varphi$  与失步角度之和。如图 4 所示,  $I_{cd.min}$  随着  $\theta$  的增大而减小, 当  $\theta$  不变时  $I_{cd.min} = I_m \sin(\pi - \theta)$ , 若要满足  $I_{cd.min} > k \max\{I_{m0}, I_{n0}\}$ , 必须有  $\theta < \pi - \sin^{-1}(k)$ 。

因此上述故障判据的适用范围为: 模拟量失步时间造成的失步角度小于  $\pi - \sin^{-1}(k) - \Delta\varphi$ , 如  $K$  取 0.5 时, 要求失步角度小于  $\frac{5\pi}{6} - \Delta\varphi$ 。

因此差流选取: 若判为系统故障则差动电流取最大差流, 否则差动电流取最小差流。

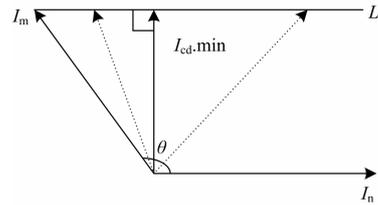


图 4 最小差流示意图

Fig. 4 Minimum differential current diagram

## 2.3 制动电流

求取制动电流集合中的最大元素为制动电流。系统正常或区内故障时, 制动电流很大更加能保证差动保护不误动; 区内故障时由于  $\dot{I}_M$ 、 $\dot{I}_N$  相量集合元素间的最大相位差为相量固有角差  $\Delta\varphi$  与失步角度的和, 由于  $\Delta\varphi$  小于  $90^\circ$ , 所以始终有  $\dot{I}_M - \dot{I}_N < \dot{I}_M + \dot{I}_N$ , 即制动电流小于差动电流, 差动保护仍能可靠动作。

2.2 节的实现方法要求模拟量失步时间造成的失步角度小于  $\pi - \sin^{-1}(k) - \Delta\varphi$ , 相量固有角差  $\Delta\varphi$  取决于系统正常运行时的各支路电源的固有相角差, 其大小取决于支路电源间的有功功率传输, 其不能超过电力元件的稳定运行极限, 即  $\Delta\varphi < \frac{\pi}{2}$ 。根据失步相位可计算出相量集差动要求模拟量失步时间  $T < \frac{\pi - \sin^{-1}(k) - \Delta\varphi}{2\pi} \cdot 20 \text{ ms}$ 。

### 3 多端差动分析

上述分析均以两端差动为例，相量集差动亦适用于多端差动，原因在于：由于各支路模拟量间失步时间均小于  $T$ ，各相量集时间窗大于失步时间窗，所以相量集中必然存在一个该支路与其他各支路同步的相量。任何多端差动本质和两端差动相同，其演化过程如图 5 所示。

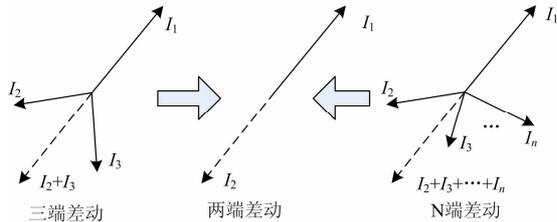


图 5 多端差动演化过程

Fig. 5 Multiport differential evolution

由相量集加减法的规则可以看出，多端差动时，其差动电流集合和制动电流的集合元素个数为各支路电流相量集元素个数的乘积。

### 4 仿真验证

利用某种线路光纤差动保护装置动作的故障录波数据对相量集差动进行仿真。装置采用 1 600 点/s 的采样频率，图 6 所示波形为线路正常时 A 相接地故障的录波，故障前负荷电流为 0.1 A，故障电流为 0.5 A。

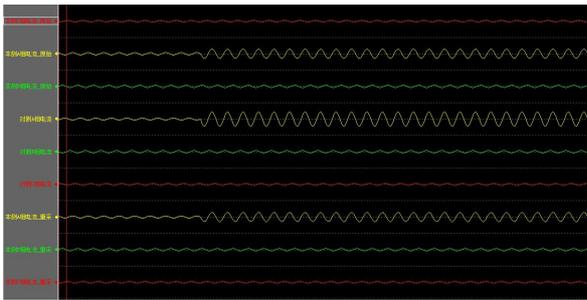


图 6 故障录波示意图

Fig. 6 Recorded wave

本侧 A/B/C 相电流\_原始数据为和对侧 A/B/C 相电流对齐了查样序号的数据，两组电流失步时间小于 0.5 倍采样周期  $T_s$ ，本次 A/B/C 电流\_重采为根据计算出的失步时间由本侧 A/B/C 相电流\_原始数据重采样而来，可认为其和对侧 A/B/C 相电流完全同步，分别对本侧 A/B/C 相电流\_原始数据前移 1~4 个采样点可得到与对称电流失步时间分别为  $T_s \pm 0.5T_s$ 、 $2T_s \pm 0.5T_s$ 、 $3T_s \pm 0.5T_s$ 、 $4T_s \pm 0.5T_s$  的本次电流数据，对以上同步、失步时间  $\pm 0.5T_s$ 、 $T_s \pm 0.5T_s$ 、

$2T_s \pm 0.5T_s$ 、 $3T_s \pm 0.5T_s$ 、 $4T_s \pm 0.5T_s$  六种情况采用相量集差动仿真计算出两侧的差动电流和制动电流，利用 Matlab 工具，并与同步情况下的传统相量差动的计算结果进行比较。

如图 7 仿真结果表明，在 5 种不同的失步程度下采用相量集差动计算出的差动电流均同传统相量差动同步状态下计算出的差动电流一致，即相量集差动的灵敏度不受失步影响，且失步情况下灵敏度比常规相量差动不降低。

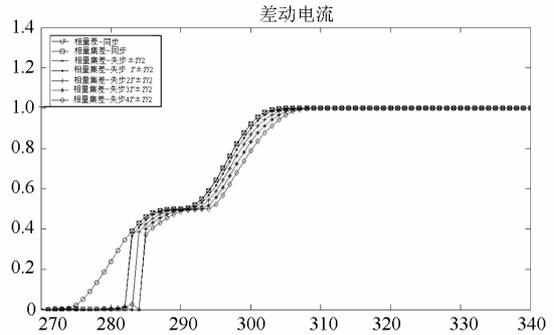


图 7 相量集差动电流仿真

Fig. 7 Differential current of phasor set

如图 8 所示，在 5 种不同的失步程度下采用相量集差动计算出的制动电流比同传统相量差动同步状态下计算出的制动电流大，但区内故障时制动电流始终小于差动电流，能够保证差动保护可靠动作。可见相量集差动的可靠性不受失步影响且更能做到正常或区外故障时保护不误动。

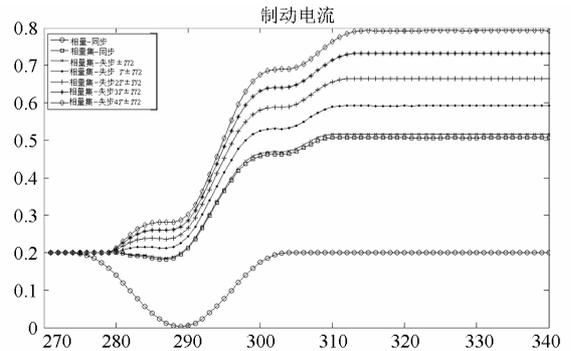


图 8 相量集制动电流仿真

Fig. 8 Set braking current of phasor set

### 5 结语

本文实现模拟量失步状态下差动保护可以继续投入，解决了目前智能变电站过程层 SV 组网方式下站域差动保护应用的局限性。

由于区内故障时选取差动电流集合中的最大元素为差动保护，所以相量集差动的灵敏度相比常规

相量差动不降低; 由于选取制动电流集合中的最大元素为制动电流保护, 相量集差动的制动电流较常规相量差动方式下的制动电流大, 同时故障时其又小于差动电流。故相量集差动保护更能做到非区内故障下保护不误动。

因此, 基于本文所述的差动算法可以在新一代智能变电站站域保护装置上加以应用, 依据站域共享信息, 实现故障点的快速、准确、可靠隔离。提高继电保护的性能, 为满足大型复杂电网安全稳定运行的要求提供支撑。

### 参考文献

- [1] 王宾, 董新洲, 许飞. 智能配电变电站集成保护控制信息共享分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(增刊): 1-6.  
WANG Bin, DONG Xinzhou, XU Fei. Analysis of data sharing for protection and control system in smart distribution substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(S): 1-6.
- [2] 马静, 曾惠敏, 林小华. 基于广域信息多端高压输电区域后备保护[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 61-69.  
MA Jing, ZENG Huimin, LIN Xiaohua. A novel wide area backup protection for multi-terminal transmission lines system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 61-69.
- [3] 朱林, 段献忠, 苏盛. 基于证据理论的数字化变电站继电保护容错方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 154-161.  
ZHU Lin, DUAN Xianzhong, SU Sheng. Evidence theory based fault-tolerant method for protective relays in digital substations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 154-161.
- [4] 李振兴, 尹项根. 基于综合阻抗比较原理的广域继电保护算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 179-186.  
LI Zhenxing, YIN Xianggen. A study of wide-area protection algorithm based on integrated impedance comparison[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 179-186.
- [5] 姜宪国, 王增平. 区域自治式后备保护分区方案[J]. 电工技术学报, 2013, 23(1): 234-241.  
JIANG Xiangguo, WANG Zengping. Zoning scheme of regional autonomy backup protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 23(1): 234-241.
- [6] 陈朝晖, 赵曼勇, 周红阳. 基于广域一体化理念的网络保护系统研究与实施[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 106-108, 113.  
CHEN Zhaohui, ZHAO Manyong, ZHOU Hongyang. Research and implementation of network protection system based on integrated and wide area information[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 106-108, 113.
- [7] 李振兴, 尹项根, 张哲. 广域继电保护故障区域的自适应识别方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 15-20.  
LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe. An adaptive identification method of fault region for wide area protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 15-20.
- [8] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于多 Agent 的广域保护系统体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 71-75.  
LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Hierarchy of wide area protection system based on multi-Agent[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 71-75.
- [9] 智能变电站继电保护通用技术条件[S]. 2013.
- [10] 王阳光, 尹项根, 游大海, 等. 遵循IEC 61850标准的广域电流差动保护IED[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 53-56.  
WANG Yangguang, YIN Xianggen, YOU Dahai, et al. Development of wide area current differential protection IED conforming with IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 53-56.

收稿日期: 2014-06-19

作者简介:

李俊刚(1981-), 男, 博士生, 研究方向为智能化变电站系统以及智能电网相关产品研发。E-mail: aogusdu@gmail.com

(编辑 周金梅)