

DOI: 10.7667/PSPC170489

# 新一代大型智能水电厂发变组保护装置设计及应用

易永辉, 沈燕华, 张玉宝, 吕灵芝, 韩宇

(许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 针对传统发变组保护二次回路接线复杂、对外接口标准未统一、运行维护不方便以及在保护数据处理、通信数据处理、适应智能运维等方面的不足, 提出了模拟量采用常规采样、开关量采用 GOOSE 传输的保护装置设计方案。研究了发电机差动保护综合优化技术、异常数据容错技术、基于异步采样适应不同工况的发电机保护算法及保护装置运维智能化处理等关键技术, 并提出了大型智能水电厂发变组保护的整体工程配置方案。理论仿真和试验测试均表明, 该方案能够满足智能水电厂对继电保护的技术要求。

**关键词:** 智能水电厂; 发变组保护; 数据容错处理; 智能运维

## Design and application of the generator-transformer unit protection device for large scale smart hydropower plant

YI Yonghui, SHEN Yanhua, ZHANG Yubao, LÜ Lingzhi, HAN Yu  
(XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** In view of the problems such as the complex secondary circuit wiring of the traditional generator-transformer group protection, non-unified external interface standard, inconvenient operation and maintenance, and the higher requirements on the protection data processing, communication data processing and adaptive operation and maintenance mode, this paper presents a design scheme of protection device based on analog quantity using the conventional sampling and switch quantity using the GOOSE transmission. It summarizes and studies the key technologies of the device system, such as comprehensive optimization technology of generator differential protection, abnormal data fault-tolerant technique, generator protection algorithm based on asynchronous sampling for different working conditions, and intelligent operation of protection device operation and maintenance, and puts forward the whole project configuration scheme of the generator-transformer group protection of the large scale smart hydropower plant. The theoretical simulation and test results show that the scheme can meet the technical requirements of relay protection for intelligent hydropower station.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (2016).

**Key words:** smart hydropower plant; generator-transformer group protection; data fault-tolerant process; intelligent operation and maintenance

## 0 引言

近年来,我国全面开展智能电网的研究与建设,促进了大型水电厂的智能化技术研究和《DL/T 1547-2016 智能水电厂技术导则》<sup>[1]</sup>的发布,并有部分水电厂开始了相关尝试性建设。参考借鉴智能电网建设中的技术成果,深化研究智能水电厂保护控制技术得到了广泛的关注<sup>[2]</sup>。

目前,在智能化水电厂的尝试性建设中,继电保护主要有两种方案。一是仅把开关站按照智能变电站的模式设计,这种方案虽然实现了水电厂对电网系统接入部分的智能化建设,但发电机和厂用电系统存在二次电缆多、二次回路存在电磁干扰和寄生回路等问题,水电厂继电保护系统、励磁系统和监控系统等无法做到接口、规约的统一。二是模拟量采用 SV 采样、开关量采用 GOOSE 传输,模拟量和开关量均采用光纤传输,目前虽然出现了各种高性能的合并单元<sup>[3-4]</sup>,但是通过长期运行与统计,数字化采集回路异常导致的保护不正确动作占有相

**基金项目:** 国家电网公司科技项目资助(2016)“智能发电厂(站)监控系统与继电保护关键技术研究及设备研制”

当的比例, 同时该类保护装置需要配置的 MU 设备复杂繁多, 且目前的监控系统还不具备接收电子式互感器信号接口<sup>[5-7]</sup>的能力。此外, 该方式虽简化了二次回路, 但是增加了继电保护的整组动作时间及其离散性, 有损快速性特性<sup>[8]</sup>。文献[9]提出的模拟量采用 SV 采样, 开关量采用 GOOSE 传输的发变组保护在国内尚未得到推广应用。

智能水电厂继电保护装置若基于 IEC 61850 通信标准、GOOSE 传输跳闸的方案, 则在快速性、可靠性及运维方面仍需面临以下技术挑战。

1) 采用智能终端跳闸出口方式, 增加了保护整组动作时间。为了满足发变组保护装置整组动作的快速性要求, 需要优化发变组保护装置的软硬件构成。

2) 新能源并网过程对电力系统产生冲击, 随着风电、光伏新能源电站的快速建设, 这种冲击更大更频繁; 超高电压等级的一次设备在操作过程中产生高次电弧光冲击<sup>[10]</sup>, 一次设备的频繁操作, 使发变组保护装置的电磁环境更加恶劣。各种冲击与干扰对装置抗干扰能力、容错能力提出了更高的要求。

3) 发电机在起停机过程中频率变化范围大, 而傅里叶算法在频率偏移大时产生较大的误差, 常规发变组保护在低频状态下会退出部分保护。而智能水电厂, 特别是作为调峰的水电厂, 会频繁进行起停机操作, 发电机经常处于低频状态, 为了发电机的可靠运行, 应全程投入全部保护, 这对保护装置在低频状态下的测量精度提出了更高的要求。

4) 发电厂的发电机变压器运行工况多样, 运行人员对传统保护装置的人为操作较多, 发变组保护智能化后由于二次回路不够直观, 运行维护人员需具备较高的专业知识, 急需提高保护装置运维特性。

针对以上问题与需求, 本文提出了模拟量采用常规采样、开关量采用 GOOSE 传输的新一代大型智能水电厂发变组保护装置设计方案。研究分析了发电机差动保护综合优化技术、异常数据容错技术、基于异步采样适应不同工况的发电机保护算法及保护装置运维智能化处理等关键技术, 并提出了工程实施中的指导性方案。

## 1 保护装置的框架设计

### 1.1 总体功能设计

本方案中, 发变组继电保护功能共由两台装置实现: 发电机保护装置实现发电机和励磁变的全部电气量保护; 变压器保护装置实现主变和高厂变的全部电气量保护。每台装置模拟量采用常规采样,

开关量采用 GOOSE 传输, 规约采用 IEC 61850 通信标准, 完成智能水电厂的继电保护及对外接口功能。保护装置硬件系统如图 1 所示。

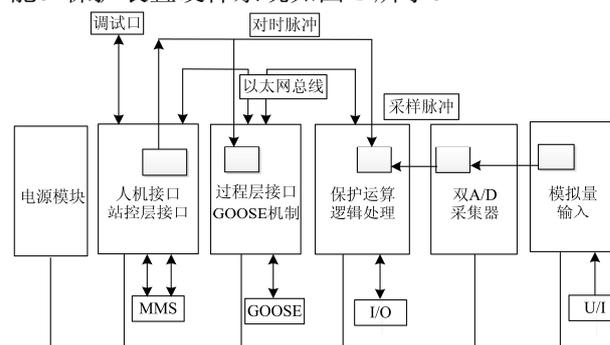


图 1 装置总体系统图

Fig. 1 Overall system diagram of the device

### 1.2 核心硬件设计

装置的核心 CPU 采用高性能系列处理器, 双 CPU 配置, 一块 CPU 实现装置的对外人机接口与通信, 另一块 CPU 实现保护数据处理与逻辑判断。相比常规保护装置, 该 CPU 拥有更优秀的计算与逻辑处理能力, 并且能够满足智能水电厂基于 IEC 61850 的通信需求。

### 1.3 通信接口设计

保护装置通过 IEC 61850-7-2 网络方式与过程层智能终端通信, 通过光纤实现一次设备的相关开关量采集、保护装置的跳闸出口功能以及电厂其他 IED 设备相关信息的传输, 一次设备和二次设备的一些数据信息也可通过 GOOSE 模拟量的方式进行传输。

装置含有 2 个站控层 MMS 接口和 1 个就地调试接口, 保护装置的动作报告和遥测数据等信息采用 IEC 61850 Client/Server 模式实现传输, 支持 MMS 报文、GOOSE 报文和 Sntp 报文等。

### 1.4 输入输出功能设计

装置配置了多块交流采集插件, 实现交流模拟量的采集, 每一路模拟量采用双 AD 设计, 实现模拟量数据采集的双套配置, 提高数据采集环节的可靠性。

装置配置了一块网络通信接口插件, 用于 GOOSE 报文接收与发送, 实现保护装置的开关量信息传输。GOOSE 发送主要用于保护装置到智能终端的点对点跳闸出口信息传输; GOOSE 接收主要用于断路器位置接点信息、间隔层相关动作闭锁、失灵启动以及一些间隔层测量数据的传输, 以此来实现过程层和间隔层各 IED 之间保护测控装置信息与数据的统筹优化, 主要功能如图 2 所示。

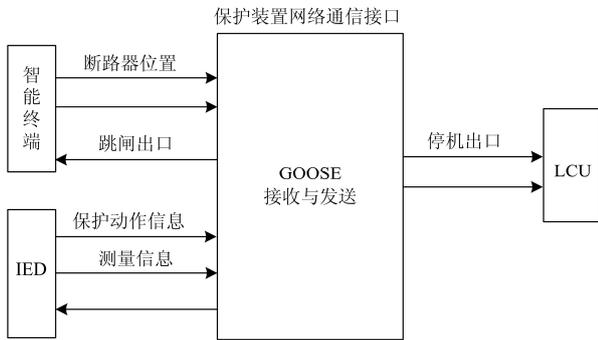


图 2 GOOSE 发送与接收图

Fig. 2 GOOSE sending and receiving diagram

## 2 关键技术研究

### 2.1 发电机差动保护综合优化技术

发电机保护装置跳闸信息采用 GOOSE 传输，通过智能终端跳闸出口，带来了整组动作时间长、动作时间离散性大的问题，需要对发电机保护的实现方式进行优化。

对于大型水轮发电机组，发电机比较常见的主保护有发电机完全纵差保护、不完全纵差保护、裂相横差保护和单元件横差保护，一般工程按照“两横三纵”共 5 套差动保护配置。差动保护作为发电机的主保护，每一套差动保护均需进行大量数据计算及逻辑判断，5 套差动保护占据了传统保护装置 CPU 的绝大部分资源。本文提出了如图 3 所示的发电机综合差动保护。

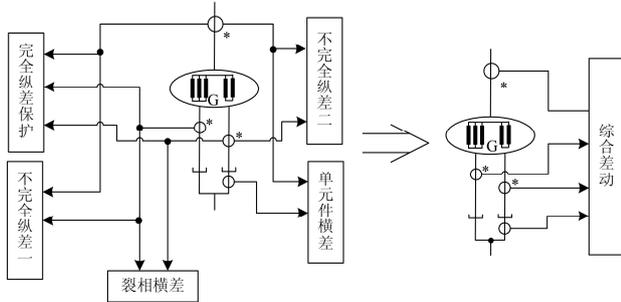


图 3 发电机差动保护数据优化示意图

Fig. 3 Schematic diagram of data optimization of the generator differential protection

发电机综合差动保护实现了传统保护装置“两横三纵”5 套差动保护的所有功能，在模拟量数据、保护定值、投压板及控制字配置等方面进行了合并优化，加强了各数据量、状态量的综合利用，简化了装置 IEC 61850 数据模型，降低了保护装置主保护运行时间，提高了发电机主保护动作速度。

在新硬件平台上，发电机差动保护优化前的整组动作时间见表 1，优化后的整组动作时间见表 2。

对比试验数据表明，采用差动保护综合优化技术，解决了文献[7]提出的保护装置保护整组动作时间超差的问题。

表 1 优化前差动保护整组动作时间  
Table 1 Tripping time of differential protection before optimization

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	平均值
A 相	26.8	27.3	26.6	27.1	26.2	27.4	26.90
B 相	26.9	25.9	27.3	26.7	26.3	27.6	26.78
C 相	27.1	26.3	27.6	26.3	26.9	27.1	26.88

表 2 优化后差动保护整组动作时间  
Table 2 Tripping time of differential protection after optimization

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	平均值
A 相	24.7	24.9	24.9	24.4	24.2	24.9	24.67
B 相	24.4	24.1	24.5	24.5	24.7	24.4	24.43
C 相	24.4	24.6	24.4	24.7	24.4	24.7	24.53

### 2.2 异常数据容错技术

风电、光伏新能源的并网过程会给电网带来冲击；一次设备操作产生高次电弧光，在一次系统采样源头存在冲击干扰，这些冲击对保护装置形成了各种各样的电磁干扰<sup>[11]</sup>。文献[12]提出了异常数据直接导致保护装置存在误动可能。

本文中，保护装置通过“一横一纵双向比对”提高装置异常数据容错能力。

装置在硬件上对每一个模拟量设计两路 AD，保护装置对两路 AD 采集到的数据进行实时计算横向对比，判别公式如式(1)和式(2)。

$$|I_{ad1} - I_{ad2}| < k_1 \times I_{ad2} \quad (1)$$

$$|I_{ad1} - I_{ad2}| < k_2 \times I_n \quad (2)$$

式中： $I_{ad1}$  为第一路 AD 采样数据； $I_{ad2}$  为第二路 AD 采样数据； $I_n$  为 CT 额定电流； $k_1$ 、 $k_2$  为比对相对系数。

当式(1)和式(2)同时满足时，认为双 AD 采样数据一致，横向比对开放差动保护逻辑判别。

保护装置通过滑动数据窗，对每一路模拟量进行全周傅里叶计算，通过双 AD 数据横向比对，避免了因 AD 采样回路异常造成的保护误动，但是当外部实际模拟量回路出现异常时，两组 AD 有可能同时出现异常大数，全周傅里叶计算的值就有可能造成保护误动。为此装置在软件上增加了三点算法、点差等判据，对每相差动电流进行与全周傅里叶数

据的纵向比对, 以此剔除异常大数, 提高保护装置的可靠性。

三点算法判别公式如式(3)。

$$I_{\text{three}} > K_1 \times I_{\text{op}} \quad (3)$$

式中:  $K_1$  为判别系数;  $I_{\text{op}}$  为差动最小动作电流;

$I_{\text{three}}$  为差动电流三点算法有效值, 计算公式为

$$I_{\text{three}} = \sqrt{\frac{a_{k-1}^2 - a_k \times a_{k-2}}{\sin^2 \frac{2\pi}{N}}} \quad (4)$$

式中:  $a_k$  为当前采样指针下的差动电流虚拟采样点;  $a_{k-1}$ 、 $a_{k-2}$  为前推采样点;  $N$  为每周采样点数。

点差判别公式如式(5)。

$$\phi\{a_{k-i} > K_2 \times I_{\text{op}}\} > m \quad (5)$$

式中:  $i=0\sim 11$ , 若前推 12 个采样点瞬时值大于设定值的个数大于  $m$ , 则点差判别满足;  $K_2$  为判别系数。

当式(3)的三点算法判据和式(5)的点差判据同时满足时, 认为全周傅里叶数据有效, 开放差动保护逻辑判别。通过大量实验表明, 装置在正常故障下可靠动作, 并且能有效抵制如图 4 所示的异常数据冲击, 而常规差动存在误动风险。

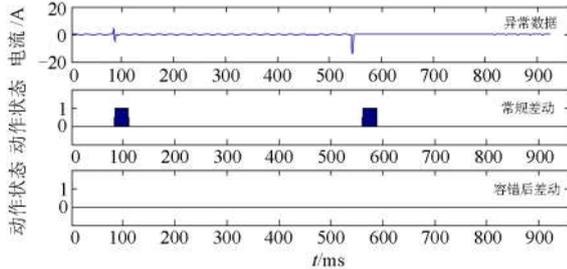


图 4 异常数据冲击时两种差动保护方法动作响应对比图  
Fig. 4 Response comparison of two differential protection methods tripping under abnormal data

### 2.3 基于异步采样适应不同工况的保护算法

发电机在起停机过程中频率在 0~50 Hz 波动, 常规傅里叶算法在频率偏移时会产生误差, 可能导致保护误动。保护装置在采用同步采样的方式时, 可以在较大的频率范围内实现频率跟踪, 解决频率偏移对模拟量计算精度的影响。文献[13]提出一种自适应的基波提取及频率跟踪算法, 但是这种方式的频率测量精度在发电机低频、起停机状态下会受到波形畸变、电磁干扰和硬件测频回路异常的影响, 难以实用化。文献[14]提出一种频率偏移时基波幅值的改进算法, 该算法使用的软件测频方法容易受到谐波的影响。文献[15]提出一种数字滤波器计算低频阶段的有效值, 但是该滤波器不能满足技术规

范中 5~60 Hz 的频率适应范围要求。为了兼顾水轮发电机起停机和正常运行状态下保护的测量精度问题, 本文装置采用异步采样的方式, 在发电机不同的状态下采用不同的保护算法。

装置在低频状态下设计的数字滤波器, 最低适用频率为 5 Hz。5 Hz 基频纯正弦波形经全波整流后, 其最低谐波频率为 10 Hz, 此处选择低通滤波器的截止频率为 1 Hz, 保证对 10 Hz 的谐波分量具有较大的抑制作用。为防止滤波器产生“过冲”, 此处选择的品质因数  $Q$  为 0.5。

上述参数确定以后, 可以直接写出滤波器的  $s$  域传递函数为

$$G(s) = \frac{(2\pi f_c)^2}{s^2 + (\frac{2\pi f_c}{Q})s + (2\pi f_c)^2} = \frac{4\pi^2}{s^2 + 4\pi s + 4\pi^2} \quad (6)$$

利用 Matlab 语言分别描绘出其幅频特性和相频特性曲线, 分别如图 5 所示。

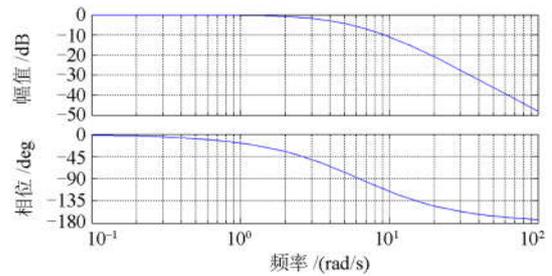


图 5 滤波器幅频和相频特性曲线  
Fig. 5 Amplitude frequency and phase frequency characteristic curve of the wave filter

根据上面的仿真图形可以看出, 对 5 Hz 信号来说, 二阶低通滤波器滤波效果较好。

假设输入波形的数学表达式为

$$i(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (7)$$

平方后, 则有

$$i^2(t) = A^2 \left[ \frac{1 - \cos 2(\omega t + \varphi)}{2} \right] \quad (8)$$

图 6 给出了全波整流和经滤波后的波形, 可以看出整流后的谐波成分得到较程度的抑制。

本文研制的装置确定采样频率为 1 200 Hz, 采样周期为 0.000 833 33 s, 即每周波 24 点。利用双线性  $z$  变换后的数字滤波器传递函数为

$$G(z) = \frac{0.682 \times 10^{-5} \times [1 + 2z^{-1} + (z^{-1})^2]}{1 - 1.9896 z^{-1} + 0.9896(z^{-1})^2} \quad (9)$$

数字仿真表明, 输入信号为 5 Hz 时, 其稳态误差不超过 2%, 满足技术指标要求。

采用基于异步采样的方式, 在发电机起停机、

低频状态下采用一种数字滤波器计算有效值，在发电机正常运行状态下采用常规傅里叶算法，两种算法仅仅在各自对应的工况和对应的保护中使用。在不同的工况下运行不同的保护数据与逻辑判断，保证在起停机状态和正常运行时保护数据的测量精度。

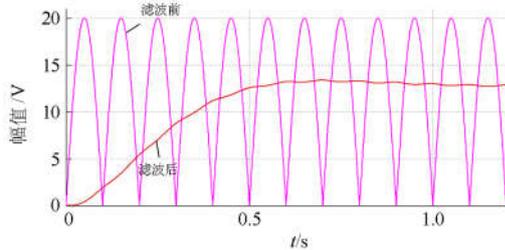


图 6 滤波前后的波形比较  
Fig. 6 Waveform before and after filtering

### 2.4 保护装置运维智能化处理

发电厂的发电机变压器运行工况多样，包括起机、停机、盘车、零起升压、并网和倒送电等。发变组保护配置较为复杂，有些保护需要在特定的运行方式下进行手动操作。例如：传统的发变组保护在停机状态下投入误上电保护硬压板，而在正常运行后再退出该保护硬压板；在零起升压时需要测量发电机变压器某些一次系统参数等，需要运行维护人员具备较高的专业知识。

相对于传统发变组保护装置，本文设计的装置在运维方面进行了智能化优化处理。

1) 取消就地硬压板，保护投退完全由软压板在就地或远方实现，有利于智能发电厂根据各类工况，在监控后台实现保护装置和开关组合的程序化顺序遥控操作，实现过程控制向目标状态的转变，杜绝误操作可能。

2) 加入了遥控“双确认”判断逻辑，“遥控确认”及“遥信确认”两种不同原理同时发生对应变化，认为远方遥控操作成功，“双确认”加强了遥控控制的实时信息反馈和远方调度确定就地信息的可靠性。

3) 增加外加 20 Hz 电源定子接地保护所需的系统参数自动测试功能，根据水电厂实际的一次设备系统，自动计算发电机接地变等系统参数，降低人为干预，减少投运调试时间，避免因人为原因影响定子接地保护精度。

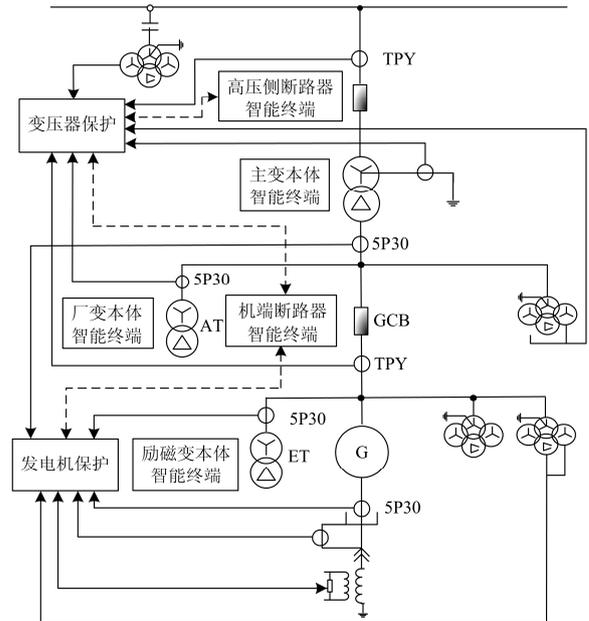
4) 增加 CT 的极性校验与自适应调整功能，当外部一次 CT 极性与保护装置设计不一致时，自动进行自适应调整，并根据调整结果发送提示信息，杜绝了保护因一次 CT 极性错误导致的保护误动。

5) 增加外部开入量状态和模拟量的不正常组

合告警判别，增加了保护多个元件之间的相互配合，避免了因外部单个输入错误引起的不正确动作。

### 3 工程实施方案

本文设计的发变组保护装置将应用于东北某智能水电厂，该电厂是我国第一座按照智能水电厂标准建设的水电厂，新建 6 台单机容量为 200 MW 的水轮发电机组，发变组保护及智能终端配置如图 7，发变组保护及断路器智能终端按双套配置，主变、厂变及励磁变本体智能终端按单套配置。充分考虑了与监控系统、LCU 柜的信息交互，取消了传统水电厂在开关站与主变保护之间加装的光纤远传装置，保护装置直接通过光纤传输 GOOSE 信息。装置的综合特性完全满足水电厂智能化建设的要求，即将投入运行。



虚线代表GOOSE信号传输，实线代表常规模拟量信号传输。

图 7 发变组保护系统及智能终端配置图

Fig. 7 Configuration diagram of generator-transformer-unit protection & digital IO (DBU) system

### 4 结论

本文研究分析了发电机差动保护综合优化技术、异常数据容错技术、基于异步采样适应不同工况的发电机保护算法及保护装置运维智能化处理等关键技术，提出了模拟量信号采用常规采样，开关量信号采用 GOOSE 传输，通信规约采用 IEC 61850 标准，装置对外接口参照国网九统一标准设计的适用于大型智能水电厂发变组保护方案。理论仿真和试验测试均表明，本方案能够满足相关技术要求。

## 参考文献

- [1] 智能水电厂技术导则: DL/T 1547[S]. 2016.  
Technical guide for smart hydropower plant: DL/T 1547 [S]. 2016.
- [2] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 1-4.  
XIAO Shijie. Consideration of technology for constructing chinese smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 1-4.
- [3] 牟涛, 任志航, 樊占峰, 等. 基于高性能 FPGA 的合并单元设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 128-132.  
MU Tao, REN Zhihang, FAN Zhanfeng, et al. Realization of the critical technologies merging unit based on FPGA[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 128-132.
- [4] 闫志辉, 周水斌, 郑拓夫. 新一代智能站合并单元智能终端集成装置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 68-71.  
YAN Zhihui, ZHOU Shuibin, ZHENG Tuofu. Study of device with merging unit and intelligent terminal for new intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 68-71.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 陈继瑞, 刘立功, 李旭, 等. 一种新模式常规采样 GOOSE 跳闸变压器保护的设计及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 98-103.  
CHEN Jirui, LIU Ligong, LI Xu, et al. Design and application of a new model conventional sampling and GOOSE tripping transformer protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 98-103.
- [8] 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.
- [9] 赵立东, 郭宝甫, 陈海龙, 等. 发电机-变压器组保护装置在智能水电站中的设计及应用[J]. 水电自动化与  
大坝监测, 2012, 36(5): 54-56.  
ZHAO Lidong, GUO Baofu, CHEN Hailong, et al. Design and application of generator-transformer group protection device in intelligent hydropower station[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2012, 36(5): 54-56.
- [10] 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.
- [11] 张卫东. 变电站开关操作瞬态电磁干扰问题的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2003.  
ZHANG Weidong. Research on transient electromagnetic interference in substation switching operation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2003.
- [12] 王晶. 电力系统异常数据检测辨识方法综述[J]. 电力与能源, 2015, 36(6): 813-817.  
WANG Jing. A survey on power system bad data detection and identification[J]. Power & Energy, 2015, 36(6): 813-817.
- [13] 张斌, 张东来. 电力系统自适应基波提取与频率跟踪算法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 81-89.  
ZHANG Bin, ZHANG Donglai. Adaptive fundamental component extraction and frequency tracking algorithm for power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 81-89.
- [14] 郑作伟, 江卫良, 郝后堂, 等. 频率偏移时基波幅值计算误差对保护的影响及其改进算法[J]. 电力科学与工程, 2016, 32(3): 17-21.  
ZHENG Zuowei, JIANG Weiliang, HAO Houtang, et al. Effects of fundamental amplitude's calculational errors when frequency offset on protections and its improved algorithm[J]. Electric Power Science and Engineering, 2016, 32(3): 17-21.
- [15] 吴笃贵, 赵志华. 燃气轮发电机起停机保护的的特殊问题[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊): 437-441.  
WU Dugui, ZHAO Zhihua. Special problems on starting-up protection of gas turbine generator[J]. Power System technology, 2006, 30(S): 437-441.

收稿日期: 2017-04-06; 修回日期: 2017-04-27

作者简介:

易永辉(1969—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为智能电网及智能微电网保护控制技术; E-mail: yyh6006@163.com

沈燕华(1978—), 男, 通信作者, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: xj\_syh@126.com

(编辑 魏小丽)