

新一代智能变电站站域保护控制系统研究

智能化设备、数字化技术和网络控制技术的应用,推进智能变电站二次系统结构和形态均发生了革命性变化。以此为契机,新一代智能变电站站域保护控制系统在系统性、自适应性和智能化方面进行创新,充分利用智能变电站信息共享标准化的优势,实现后备保护、失灵保护、简易母线保护、备用电源自动投入和过负荷联切等功能的集成优化。分析了新一代智能变电站站域保护控制系统功能需求,提出了软硬件平台实现方案。通过重庆220 kV大石新一代智能变电站实践,证实了所述技术的有效性和先进性。研究对于创新智能变电站继电保护模式具有重大意义。

牛 强¹ 侯伟宏² 范增辉³ 梁经宛¹ 王雷涛¹ / 1. 许继集团有限公司

2. 国网浙江省电力公司杭州供电公司 3. 新乡航空工业(集团)有限公司



牛 强/工程师

近年来,我国以特高压电网为骨干网架的各级电网迅速协调发展,以信息化、自动化和互动化为特征的智能电网正在逐步形成,作为智能电网核心组成部分的智能变电站技术也逐渐成熟^[1]。随着电网装备制造技术的进步和先进通信技术的引入,限制保护与控制技术变革的技术瓶颈正逐渐消失。智能化设备、数字化技术和网络控制技术的推广应用,促使智能变电站二次系统结构和形态均发生了革命性变化^[2]。

为创新智能变电站继电保护技术模式,我国在2013年开展了新一代智能变电站建设^[3-4]。新一代智能变电站以“系统高度集成、结构布局合理、技术装备先进、经济节能环保”为目标,以全站信息数字化、通信平台网络化、信息共享标准化、应用功能互动化和运维检修高效化为功能特点,采用高可靠、高集成和长寿命的智能设备,实现能量智能调节,设备可控在控,信息共享互动,

服务便捷优质。

与传统智能变电站相比,新一代智能变电站从设备、系统、控制到功能都是一次新的革新与突破。在二次系统层面,新一代智能变电站采用了层次化保护控制系统,站域保护控制系统是其中的关键环节。站域保护控制系统充分利用信息共享标准化的优势,实现了后备保护、失灵保护、简易母线保护、备用电源自动投入和过负荷联切等功能的集成优化。本文总结了智能变电站继电保护现状,分析了站域保护控制系统功能需求,对站域保护控制系统关键技术进行了研究,包括软硬件处理能力、硬件架构和软件平台设计等,并将研究成果成功应用于重庆220 kV大石新一代智能变电站,为新一代智能变电站继电保护技术与功能突破提供了支撑。

智能变电站继电保护现状

截至2013年12月,我国已经投运的智能变电站达843座,覆盖66~750 kV电压等级,在标准制定、方案设计、设备研制、工程建设及运行维护等方面都实现了巨大突破^[5]。现阶段,智能变电站继电保护和控制系统的架构脱胎于传统的常规变电站结构和功能体系,延续了面向对象的设计原则,各类保护有明确的保护对象和动作范围,彼此之间通过逻辑接口进行相互配合^[6]。智能变电站继电保护的典型设计方案是直采直跳方案,在部分智能变电站试点应用了网采网跳和集中式保护方案^[7],在新一代智能变电站建设中提出了层次化保护方案。

关键词/Keywords

新一代智能变电站·
层次化保护控制系统·
站域保护控制系统·
集中式·
网采网跳·

1. 直采直跳方案

直采直跳方案如图1所示：保护装置不经过交换机，以点对点的方式直接从合并单元获取数据，以点对点的方式向智能终端发送跳闸命令。

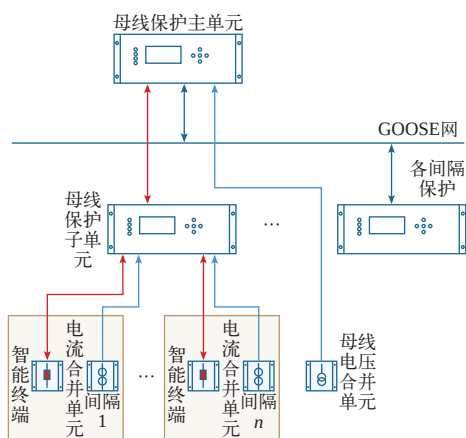


图1 智能变电站母线保护直采直跳方案

直采直跳方案优点是保护装置不依赖于外部对时系统实现其保护功能，避免了组网方式下交换机引起的采样和跳闸信息不确定性延迟；缺点是保护装置光口数量多，二次回路光纤连接复杂。

2. 网采网跳方案

网采网跳方案如图2所示：保护装置通过SV网获取合并单元数据，通过GOOSE网向智能终端发送跳闸命令。

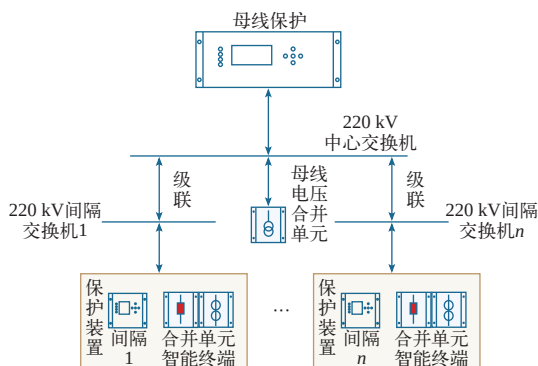


图2 智能变电站母线保护网采网跳方案

网采网跳方案优点是保护装置通过网络实现输入输出，可以减少母线保护、主变压器保护等跨间隔保护装置的光口数量，简化二次回路光纤连接。其缺点是多间隔数据同步依赖于对时系统，网络化信息交互存在时延。

3. 集中式保护方案

如图3所示，集中式保护方案是在网采网跳方案的基础上产生的一种新的保护配置方式，集成了多个间隔的保护测控功能，需要配置高性能的通信处理器，大容量Flash存储器，大容量、高可靠性内存，并且对于重要的部件需要冗余配置，增加装置的可靠性^[8-10]。

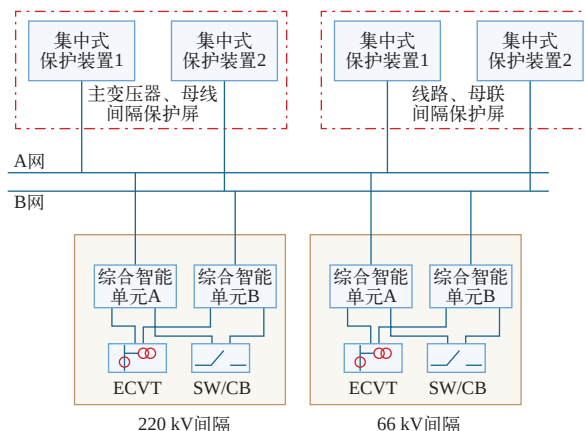


图3 智能变电站集中式保护方案

目前，我国在辽宁220 kV何家智能变电站试点应用了集中式保护方案，提高了二次设备集成度，简化了通信网络结构。

4. 层次化保护方案

在新一代智能变电站建设中，我国于2013年首次提出了层次化保护方案，如图4所示。层次化保护综合应用电网全网数据信息，通过多原理、自适应的故障判别方法，实现时间维、空间维和功能维三维度的协调配合，提升继电保护性能和系统安全稳定运行能力。

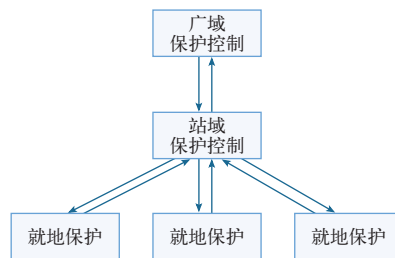


图4 新一代智能变电站层次化保护方案

层次化保护从体系架构上划分为就地层、站域层和广域层三个层次，三层保护协调配合，构

成以就地层保护为基础、站域层保护与广域层保护为补充的多维度层次化继电保护系统。

1) 就地层。面向被保护对象,利用本地(和对侧)信息独立决策,采用直采直跳方式实现快速、可靠的元件保护。

2) 站域层。面向变电站内所有元件及线路,利用本站各元件及线路电压、电流信息及设备动作、状态等信息集中决策,采用网采网跳方式实现站内元件后备保护、公用保护及控制等功能。

3) 广域层。面向区域内所有元件和线路,利用区域电网全景信息,实现线路后备保护及安稳控制功能,优化站域层和就地层保护功能。

受到篇幅限制,本文重点论述站域保护控制系统软硬件实现方案。

站域保护控制系统功能设计

如图5所示,站域保护控制系统以过程层信息的数字化采集、网络化传输为技术前提。通过集中采集变电站各线路及元件的电流、电压等信息,实现后备保护、失灵保护、母线保护、低频低压减载、备用电源自动投入和过负荷联切等功能的集成优化。站域保护控制装置可靠性原则以防误动为主,跳闸及控制命令通过GOOSE网络作用于智能终端。

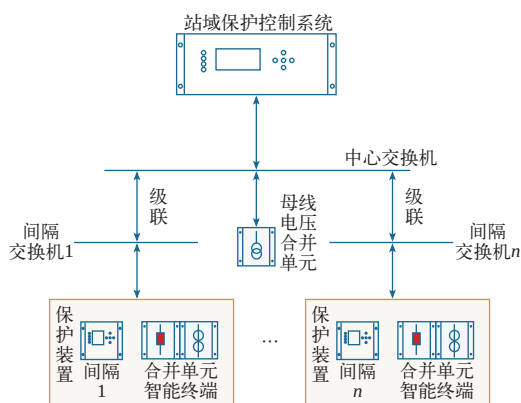


图5 站域保护控制系统技术方案

1) 保护冗余。实现站内110 kV及以下电压等级单套配置的保护功能冗余(线路、主变压器、母线、分段、低容、低抗和所变压器等)。对于110 kV等电压等级,保护单重化配置,配置站域后

备保护既能够提高继电保护的可靠性,又避免了保护双重化带来的复杂性,并且能够配置断路器失灵保护等,完善了原有的保护配置。

2) 优化后备。对站内断路器状态实时监视,由此判别站内电气接线拓扑,形成关联矩阵,优化保护功能。基于多间隔数据共享的保护功能优化失灵保护35 kV及10 kV母线保护起到快速近后备保护作用,优化后备保护动作时间。

3) 安全自动控制。实现低周低压减载、站域备用电源自动投入、主变压器过负荷联切和负荷均分等功能。

4) 广域保护控制的子站。作为广域保护控制系统的子站,完成对站域保护控制信息的采集、处理及转发功能。

站域保护控制系统技术需求

站域保护控制系统需要接入变电站多个间隔的采样值信息和断路器状态,实现多个间隔的保护计算,对装置性能提出了更高的要求。

1. 数据流量分析

为了便于分析,以典型的80点/周波采样、每帧1个ASDU进行计算,每帧数据的长度为169~226 byte,每个合并单元的流量为:169~226 byte/APDU × 8 bit/byte × 80APDU/周波 × 50周波/s = 5 408 000~7 232 000 bit,因此,每个间隔流量最大约为7.23 Mbit^[11]。

以重庆220 kV大石新一代智能变电站为例,站域保护控制系统需要接入30组SV,接入流量为30 × 7.23 Mbit = 216.9 Mbit。装置若采用1个百兆网口无法实现过程层数据的接入,需要重新设计硬件以满足大流量数据的接入。

2. 实时性需求分析

按照继电保护通用技术条件的要求,装置整组动作时间应小于40 ms。站域保护控制系统整组动作的时间构成

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5$$

式中, t_1 为合并单元采样延时; t_2 为合并单元到保护传输时间; t_3 为保护装置动作时间; t_4 为保护到智能终端传输时间; t_5 为智能终端动作时间。

站域保护控制系统集成了多个软件模块，各软件模块需要同时满足实时性的要求。为满足整组动作时间要求，站域保护控制系统动作时间需要控制在30 ms以下。重庆220 kV大石新一代智能变电站配置了1套站域保护控制系统，包括13个110 kV线路后备保护模块、3个失灵保护模块、2个母联保护模块、3个过负荷联切模块、5个10 kV简易母线模块、2个集中式减载模块及2个备用电源自动投入模块，合计30个软件模块，每个软件模块的动作时间应小于1 ms。

3. 存储容量需求分析

站域保护控制系统集成了多个软件模块，需要存储多间隔的保护程序等信息，因此，CPU需要有足够的存储空间。

站域保护控制系统硬件方案

站域保护控制系统由核心CPU插件、过程层接口插件、稳压电源插件和站控层通信插件构成，如图6所示。其中，过程层接口组件采用千兆以太网口，接收互感器SV数据以及开关机构GOOSE数据；过程层接口组件将接收到的信息递给核心CPU组件，由核心CPU组件分析处理；核心CPU组件将信息传递给通信转换组件，通信转换组件将信息转换为IEC 61850-8-1格式，通过MMS报文上传。

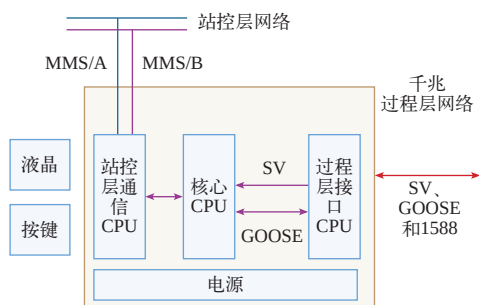


图6 站域保护控制系统结构

核心CPU是站域保护控制装置的核心单元，采用一款高性能双核处理器，具备强大的信息处理能力，典型参数如下所述。

1) 双核高性能支持800 MHz~1.2 GHz时钟频率。经过实际测试，本处理器运行单模块的时间为0.2~0.5 ms，完全满足实时性的要求。

2) 具有ECC功能的512 KB二级高速缓存。还可配置为缓冲存储器，满足多软件模块对大存储空间的要求。

3) CPU支持双准确度浮点，每核心带32 KB一级指令高速缓存以及32 KB一级数据缓存，经过实际测试，装置测量准确度完全满足需求。

通过实验室测试得知，在常温下施加40组SV流量进行冲击，CPU占有率为68%，能够满足站域保护控制系统对大容量数据接入和处理的要求。典型变电站CPU占有率如下所述。

1) 典型220 kV变电站大约35组SV，网络流量约为 $35 \times 150 \times 8 \times 4\,000$ Mbit/s = 168 Mbit/s，根据流量可估计CPU占有率为46.2%。

2) 典型110 kV变电站大约71组SV，网络流量约为 $71 \times 140 \times 8 \times 4\,000$ Mbit/s = 318 Mbit/s，根据流量可估计CPU占有率为87.5%。

综上，按照预留CPU占有率50%的裕度考虑，本方案可支持38组SV，可满足典型220 kV变电站和规模不大于38个间隔的110 kV变电站站域保护需求。

站域保护控制系统软件方案

站域保护控制系统软件平台主要有以下功能：完成对过程层GOOSE、SV数据采集并发给保护CPU进行保护程序处理；与站控层设备进行通信并实现MMS报文的解析和处理；接收过程层对时命令实现装置对时。软件平台包括底层平台、应用程序、人机接口、设备驱动和通信规约转换等模块。

1. 模块功能划分

1) 底层平台负责处理和协调装置硬件、操作系统、各独立编译模块运行环境及加载、实时数据库管理、应用程序调度、历史数据记录、模拟量数据采集、运行时钟管理、文件系统管理和通信回路及基本服务功能函数的提供等。

2) 人机接口负责就地人机交互操作、与通信规约转换模块之间的数据搜集及操作、与PC机之间的通信交互、生成XML格式的故障报告文件、生成COMTRADE格式的录波文件、主接线图管

理、就地打印管理、动态多语言管理和GUI图形界面管理等。

3) 通信规约转换根据应用功能选择, 分别实现IEC 61850规约转换、以太网通信管理等。

4) 设备驱动负责管理硬件相关设备的操作和控制。

5) 应用程序主要负责完成保护及控制系统的运算、逻辑判别和控制操作功能。

2. 实时数据库系统

实时数据库系统如图7所示, 主要由内存数据库、历史数据库、数据库管理系统及应用接口函数组成。整个实时数据库系统的高性能要求主要是以内存数据库作为底层支持, 实时数据的处理完全在内存数据库中完成。

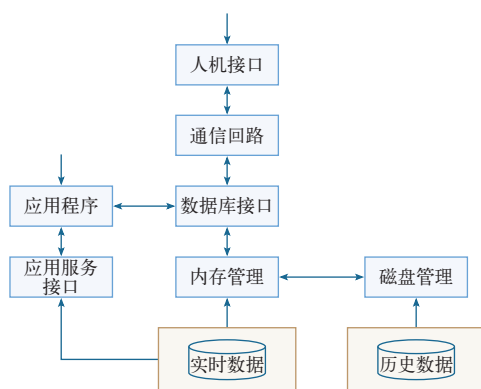


图7 实时数据库系统

3. 多模块自动加载技术

传统的嵌入式开发过程需要将各模块编译链接成一个整体, 然后下载到目标机上去运行。如果调试中发现了问题或者为了实现新的功能而修改某一模块时, 必须把软件全都重新编译链接和下载, 这样既延长了软件的开发周期, 又增加了软件开发的难度和复杂度。针对站域保护控制系统集成度高、软件模块多及开发难度大等问题, 本方案采用了基于多模块独立编译、自动加载技术, 从而大大简化了实际的工程应用, 提高了整体可靠性。

如图8所示, 多模块自动加载管理系统实现了通信管理模块、人机接口、系统平台、设备驱动和应用模块的独立编译和下载, 并在初始上电

过程中, 自动识别各软件模块, 建立各模块的初始工作环境, 自动执行软件模块的相关操作。这样, 调试升级或系统功能变化时, 只要对相关功能模块进行升级、编译和下载, 从而将设计、调试和测试等缩小到一个有限的范围, 既缩短了开发周期, 又降低了软件开发的难度和复杂度。

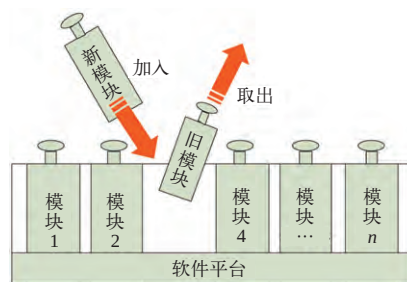


图8 多模块自动加载技术

本方案采用功能模块自动加载技术, 可支持加载多达32个保护软件模块, 装置CPU插件可以像加载传统硬插件一样随意加载保护软件模块。装置根据变电站规模灵活加载各保护功能标准模块, 满足不同变电站工程的个性化需求。

结束语

本文研究成果成功应用于重庆220 kV大石新一代智能变电站, 创新了智能变电站继电保护模式, 实现了从面向元件向面向系统转变, 从面向对象向面向功能转变, 提升了保护可靠性、灵敏性与选择性。

通过研究得到以下结论。

1) 站域保护控制装置弥补了就地级保护的不足, 使电力系统的保护与控制功能更加完善。站域保护控制装置的推广应用可望进一步提高智能变电站及电网安全稳定运行水平, 具备显著的经济与社会效益。

2) 站域保护控制装置能够采集全站的模拟量和开关量信息, 可识别变电站的拓扑结构, 采用合适的算法和控制策略可使其保护性能进一步提升。

(下转第48页)

- 电力出版社, 2009: 146-148.
- [2] 甘正佳, 刘春, 文远芳. 均匀土壤接地电阻的三维仿真 [J]. 高电压技术, 2003, 29 (6): 45-46.
- [3] 何金良, 曾嵘. 电力系统接地技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 30-40.
- [4] 王洪泽, 杨丹, 王梦云. 电力系统接地技术手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 33-55.
- [5] 姜燕, 张晚英, 周有庆, 等. Matlab在接地电阻计算中的应用 [C]. 全国电工理论与新技术学术年会, 湖南, 2007: 266-259.
- [6] 宋美云. 防雷接地工程中的接地电阻计算 [C]. 全国电网中性点接地方式与接地技术研讨会论文集, 杭州, 2005: 228-231.
- [7] 刘春, 刘鑫. 复合接地网接地电阻的3D仿真 [C]. 中国电机工程学会高压专委会 2007 年学术年会论文集, 深圳, 2007.
- [8] 徐华, 吕金煌, 文习山, 等. 杆塔冲击接地电阻的计算 [J]. 高电压技术, 2006, 32 (3): 93-95.
- [9] 王晓辉, 程海新, 张小青. 斜置接地体接地电阻计算及斜置角度的优选 [J]. 吉林电力, 2006, 34 (6).
- [10] 冯志伟, 马金福. 电位降法测量接地电阻时电压极补偿点位置分析 [J]. 电气应用, 2009, 28 (8): 18-20.
- [11] 张小青. 建筑物内电子设备的防雷保护 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.
- [12] 王晓辉. 风力发电机组雷电暂态效应的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [13] Grover F W. Inductance Calculations [M]. New York: Dover, 1998.
- [14] Elsherbiny M M, Chow Y L, Salama M M A. A fast and accurate analysis of grounding resistance of a driven rod in a two-layer soil [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 1 (2): 808-814.
- [15] 刘成华. 风力发电机组雷电瞬态模拟的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [16] Dommel H W. 电力系统电磁暂态计算理论 [M]. 李永庄, 林集明, 曾昭华, 译. 北京: 水利电力出版社, 1991.

(收稿日期: 2014-09-19) EA

(上接第27页)

参考文献

- [1] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术体系探讨 [J]. 电网技术, 2009, 33 (8): 1-5.
- [2] 张保会, 郝志国. 智能电网继电保护研究的进展 (二) 保护功能的发展 [J]. 电力自动化设备, 2010, 30 (3): 1-5.
- [3] 宋璇坤, 李敬如, 肖智宏, 等. 新一代智能变电站整体设计方案 [J]. 电力建设, 2012, 33 (11): 1-6.
- [4] 宋璇坤, 沈江, 李敬如, 等. 新一代智能变电站概念设计 [J]. 电力建设, 2013, 34 (6): 11-15.
- [5] 曹楠, 李刚, 王冬青. 智能变电站关键技术及其构建方式的探讨 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (5): 63-67.
- [6] 刘振亚. 国家电网公司输变电工程通用设计110 (66) ~ 750 kV智能变电站部分 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [7] 易永辉, 曹一家, 张金江. 基于IEC 61850标准的新型集中式IED [J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (12): 36-40.
- [8] 韩伟, 杨小铭, 仇新宏, 等. 基于数字化采样的集中式保护装置 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (11): 101-104.
- [9] 董新洲, 丁磊. 数字化集成保护与控制系统结构设计方案研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (1): 1-5.
- [10] 周良才, 张保会, 雷俊哲. 高可靠性的变电站集中式后备保护 [C]. 中国高校电力系统及其自动化专业第25届年会, 长沙, 2009.
- [11] 刘明慧, 赵晓东, 司梦. 智能变电站过程层网络流量管理方式研究与应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40 (23): 87-92.

(收稿日期: 2014-07-14) EA