

[编者按]为适应新形势下电网发展和运行要求,国家电网公司组织制定《国家电网公司继电保护技术发展纲要》,明确了未来一段时间国家电网公司继电保护技术发展的基本原则、目标和方向。围绕其中保护就地化重点发展方向,已开展了大量技术研究、设备开发与应用实践,取得了丰富成果。为集中、及时地报道相关工作进展,《电力系统自动化》策划了“即插即用就地化保护”专辑,力图从继电保护面临的挑战与展望、保护就地化总体方案、平台设计、关键设备研发、核心技术研究等方面对成果进行体系化呈现,以飨读者。《电力系统自动化》编辑部衷心感谢国家电力调度控制中心、国网浙江省电力公司、国网电力科学研究院、国家电网许继集团有限公司、国电南京自动化股份有限公司等多家单位对本专辑的大力支持,以及专家学者为本专辑顺利刊出所做的贡献!希望本专辑能有助于进一步推动就地化保护技术的研究与应用。

## 继电保护面临的挑战与展望

陈国平<sup>1</sup>,王德林<sup>1</sup>,裘愉涛<sup>2</sup>,王松<sup>2</sup>,戚宣威<sup>2</sup>

(1. 国家电力调度控制中心,北京市 100031; 2. 国网浙江省电力公司,浙江省杭州市 310007)

**摘要:**结合中国电网交直流混联、电力电子化、清洁能源接入等发展态势,分析了现代复杂电网故障特性发生的改变,提出了当前继电保护技术面临的形势与挑战,总结了继电保护技术发展需要坚持的原则,探讨了“即插即用的就地化保护”、“优化配置的后备保护”、“智能化运维体系”、“三大继电保护技术支撑平台”、“直流控制保护”、“继电保护前瞻性技术”等重点发展方向。

**关键词:**电力系统; 继电保护; 就地化保护; 交直流混联; 电力电子化电力系统

### 0 引言

国家电网公司已实现全网交、直流互联,形成华北—华中—西南、华东、东北、西北四大同步电网,跨区跨省输电能力达 1.59 亿 kW。到 2016 年底,特高压运行规模达到“六交五直”。中国电网已成为世界上前所未有的交直流复杂混联大电网。

随着中国电网的飞速发展,交直流混联格局已逐步形成,清洁能源并网容量持续增长,电网电力电子化特征日趋明显。这些电网发展新态势使得系统特征及其故障特性发生显著改变,对继电保护技术提出了新的挑战<sup>[1-4]</sup>。

电网安全关系国家安全。继电保护是电网安全运行的第一道防线,是保障电网稳定、设备安全的关键技术手段。继电保护专业要对电网运行的风险有清醒地认识,准确把握面临的形势和挑战,科学谋划专业发展方向,坚持创新引领,探索前沿技术,破解发展难题,全面构筑现代复杂电力系统的安全运行防线<sup>[5-8]</sup>。

本文立足电网发展现状与趋势,分析了当前继电保护技术面临的形势与挑战,总结了继电保护技术发展应该坚持的原则,同时结合相关前沿技术,探

讨并展望了未来继电保护技术的重点发展方向。

### 1 当前继电保护技术面临的形势与挑战

#### 1.1 复杂大电网故障特性发生显著变化

##### 1.1.1 交直流混联电网故障全局化特征明显

随着特高压、直流输电建设的快速推进<sup>[9-43]</sup>,复杂大电网一体化特征不断加强,电网故障复杂化、全局化特征日趋明显。交直流电网耦合紧密,交流线路故障、重合闸、主变空充等常见扰动或常规操作均可能造成近区直流换相失败<sup>[14-49]</sup>,引发交直流系统连锁性故障,导致巨大暂态能量冲击,影响范围广,已远超常规交流、直流  $N-1$  故障对电网的影响。在大容量直流集中接入近区故障,换相失败问题已成为制约系统稳定运行的重要因素。电网故障全局化特性对继电保护的速动性与可靠性、直流控制保护系统的抗换相失败能力以及交直流系统保护的协同配合提出了更加严苛的要求。

##### 1.1.2 电力电子化电网的故障暂态特性复杂多变

随着大规模新能源发电的集中式和分布式接入<sup>[20-23]</sup>、多回大容量直流馈入<sup>[24-26]</sup>、柔性直流以及新型 FACTS 设备的广泛应用<sup>[27-33]</sup>,电力电子装置已高度渗透至电力系统发电、输电、变电、配电及用电等各个环节,电网电力电子化特征日益凸显<sup>[34-35]</sup>。大量电力电子设备的接入改变了系统的

收稿日期: 2017-02-19; 修回日期: 2017-05-21。

上网日期: 2017-07-04。

结构与参数,其本体控制保护系统在故障期间具有离散性、非线性的动态响应过程又将进一步增加故障暂态过程的复杂性和多变性,使得短路电流和正常负荷电流的差异变小,并包含大量的暂态谐波分量。传统继电保护的配置方案、整定原则有待进一步改进以适应电力电子化电网安全运行需求。

## 1.2 现有继电保护技术存在的问题

### 1.2.1 现有交流保护难以完全满足当前电网新需求

对于传统交流电网,目前的继电保护技术已日臻成熟,但随着交直流混联电网的形成,交流保护对电网特性变化的适应性亟待提升,主要包括两方面。

1) 在传统交流电网中,开关故障拒动和电流互感器(TA)死区故障等故障由安全稳定第三道防线处理,导致故障切除延时过长。若在直流近区发生上述故障,将引发多回直流连续两次以上换相失败,巨大功率冲击导致送端电网存在崩溃风险。

2) 后备保护性能亟待提升。在当前交直流混联电网中,一旦出现全站直流电源消失等极端情况,故障只能依靠远后备保护清除,动作时间长,如果故障发生在直流近区,将引发多回特高压直流同时换相失败,导致系统发生灾难性后果。

### 1.2.2 直流控制保护设计对大电网运行的适应性不足

截至目前,国家电网公司已有5回特高压直流、12回常规直流投入运行,换流容量达6575万kW,馈入华东电网直流容量达到3980万kW。交直流、送受端已经呈现强耦合关系,直流输电系统运行可靠性对系统的安全稳定运行影响重大,直流控制保护系统作为直流输电核心部分,其缺陷可能引起直流系统异常运行或闭锁,严重情况下存在导致系统安全稳定破坏的风险。

目前直流控制保护设计仅从自身考虑,未能统筹考虑系统安全稳定的要求,多回直流间缺乏有效相互配合,存在单一交流故障导致近区多回直流同时闭锁的风险。直流控制保护系统的标准化程度低,功能逻辑不统一,工程差异化大,软件版本缺乏有效技术管控手段,存在较大安全隐患。直流控制保护系统结构复杂,装置模块之间耦合紧密,单一元件异常有可能造成双极停运等严重故障。直流控制保护装置可靠性和整体技术水平有待进一步提升。

### 1.2.3 智能变电站继电保护技术有待进一步提升

智能变电站发展迅速,有力推动了继电保护技术创新<sup>[36]</sup>,但也暴露出一些问题,甚至突破了继电保护“四性”基本原则,给电网运行带来诸多潜在风险,主要包括以下问题。

1) 保护速动性和可靠性降低。采用“常规互感器+合并单元”的保护方案,增加了中间环节,导致继电保护的整组动作时间延长了5~10ms,降低了主保护的速动性与可靠性,使得电网运行于稳定极限的边界。智能站内多套保护共用合并单元、智能终端,单一元件可能引起多套保护不正确动作,与快速保护独立性原则相悖。

2) 运行检修难度明显增加。智能变电站以光缆和软件逻辑代替二次回路,以系统配置文件描述二次设备连接关系,二次“虚回路”无法直观可视、检修隔离没有明显断开点,增大了现场检修风险<sup>[37-38]</sup>;设备改造涉及全站配置文件的修改和验证,调试时间长,停电影响范围大,现场检修困难;变电站系统配置文件缺乏技术管控手段,存在配置文件错误导致保护不正确动作风险。

### 1.2.4 继电保护技术支撑手段不足

随着“三集五大”体系的建成,调控一体化和变电站无人值守对继电保护技术支撑手段提出了更高的要求,主要包括以下方面。

1) 整定计算和在线校核智能化水平有待提升<sup>[39-40]</sup>。上下级电网数据共享和交互能力不足,整定计算辅助决策的智能化程度较低,在线校核实用化水平不高,未实现整定计算与在线校核的闭环贯通,难以动态适应电网运行方式变化。

2) 继电保护设备的状态评估精细化程度不够<sup>[41-43]</sup>。基础数据主要依靠人工录入,数据共享程度低,挖掘深度有限,装置状态评估和检修决策高度依赖人工经验,精益化程度不足,无法实现全网的大数据分析和优化决策。

3) 继电保护在线监视与分析实用化程度不高<sup>[44-47]</sup>。故障数据采集未能实现全覆盖,缺乏有效技术手段实现对故障的综合智能分析,信息展示全面性和针对性不强,对调控运行业务支撑能力有待提升。

## 1.3 新技术为继电保护发展提供机遇

近年来,集成芯片、信息通信、计算机、传感器等领域的技术迅速发展,为继电保护新技术的发展创造了有利条件。

芯片技术的发展使集成电路性能大幅提升,芯片的处理能力比10年前提升了10倍以上,功耗降低了80%以上,为保护装置硬件集成化、小型化,提升继电保护装置的速动性与可靠性奠定了基础。

现代通信技术的进步使得通信速率、数据带宽成倍增长,可靠性不断提高;电子式互感器等先进传感器技术可以更加准确的获取保护所需的测量信息。上述优势使得继电保护可以处理和利用更多的信息资源,从而能从根本上改善传统基于就地或者

有限间隔内信息的后备保护、断路器失灵(包括TA死区)等保护的動作性能。

云计算、大数据、人工智能等先进的信息处理和分析技术可以在设备状态评价、整定计算、在线监视与智能诊断等方面全面提升继电保护专业的技术支持能力,为继电保护的专业管理奠定坚实基础<sup>[7 48-52]</sup>。物联网、移动物联网、虚拟现实技术有力地促进了智能变电站和直流换流站运维检修的技术创新和模式变革,有助于构建智能化的运检体系。

## 2 继电保护技术发展应该坚持的原则

### 2.1 必须坚持继电保护“四性”

继电保护“四性”是指“可靠性、快速性、选择性、灵敏性”,是由几代电力工作者根据几十年的电网运行经验总结提炼出来的,是制造、设计、建设及运行各个环节必须坚持的基本原则。这“四性”之间,有的相辅相成,有的则相互制约。在不同的历史时期,针对不同的电网结构,会有不同的侧重,但都是以保障电网安全为根本目标。在继电保护技术创新的情况下,要站在电网的角度,始终坚持继电保护“四性”,牢记“保障电网稳定,保障设备安全”使命。

当前交直流混联电网相互影响特征明显,呈现简单故障全局化趋势,故障的快速可靠清除显得尤为重要,电网安全稳定运行对继电保护速动性和可靠性的要求提升至前所未有的高度。

### 2.2 坚持快速保护的独立原则

快速保护属于电网安全稳定的第一道防线,在当前交直流混联电网中,由于直流换相失败现象的存在,快速切除故障尤为重要。

集中式保护存在处理环节多、回路复杂等方面的不足,速动性无法满足当前电网稳定的要求;保护测控一体化装置存在异常后保护和远方控制功能同时失效的风险,造成一次设备长时间无保护运行。因此,必须坚持快速保护独立配置原则。

### 2.3 坚持适应电网发展原则

随着电网的发展,当前电网单一故障全局化、调节能力和抗干扰能力弱化特征凸显,传统交流线路重合闸方式及时间、开关失灵或TA死区故障切除时间,已与当前电网特性要求不匹配,无法满足电网稳定要求。继电保护要站在电网发展、电网安全的高度,主动适应电网运行特性变化,把握技术发展方向,积极解决电网和设备运行中存在的问题,满足电网安全稳定要求。

### 2.4 坚持创新引领原则

继电保护要坚持以问题为导向,增强创新意识,实现创新驱动,服务大电网安全稳定运行。积极开展大电网故障特性的研究,不断提升继电保护核心

技术的自主创新能力,吸收芯片和通信等相关领域技术发展成果,丰富继电保护核心装备的创新手段,推动继电保护技术更新换代,重点培育一批国际领先的技术成果,实现技术引领。

## 3 重点发展方向

### 3.1 即插即用的就地化保护

智能变电站由于合并单元以及智能终端的处理延时,使得保护的整组动作时间接近系统稳定计算边界。二次系统接线复杂、配置多变,缺乏统一的接口标准,安装调试及运维检修工作量大、技术难度高。特别是随着电网规模的迅速扩张,二次系统运维的人员承载问题日益突显。电网亟须快速可靠、便于运维的继电保护新技术。

开展以就地化为特征的继电保护新技术研究,构建适应电子式互感器接入、满足继电保护“四性”要求、不依赖变电站配置描述(SCD)文件配置的继电保护体系,研制高可靠性、高防护的就地化保护系列装置,提升继电保护的可靠性和速动性,适应电网新特性对继电保护提出的要求,推动智能变电站技术进步。

#### 3.1.1 即插即用的就地化保护技术特征

结合新一代智能变电站技术发展,形成以“采样数字化、保护就地化、元件保护专网化、信息共享化”为特征的继电保护体系是未来智能变电站技术的发展方向<sup>[53-54]</sup>,主要有以下技术特点。

1) 采样数字化。保护装置直接接收电子式互感器输出数字信号,不依赖外部对时信号实现保护功能。

2) 保护就地化。保护装置采用小型化、高防护、低功耗设计,实现就地化安装,缩短信号传输距离,保障主保护的独立性和速动性。

3) 元件保护专网化。元件保护分散采集各间隔数据,装置间通过光纤直连,形成高可靠无缝冗余的内部专用网络,保护功能不受变电站SCD文件变动影响。

4) 信息共享化。智能管理单元集中管理全站保护设备,作为保护与变电站监控的接口,采用标准通信协议,实现保护与变电站监控之间的信息共享。

#### 3.1.2 通过技术创新提升管理和检修水平

就地化保护按电压等级双重化配置智能管理单元,对保护信息进行集中管理,完成保护与变电站监控之间的信息交互,实现全站保护装置的智能管理,支撑保护装置的自动测试功能。变电站SCD文件变动只在智能管理单元上修改,不影响保护功能。

利用就地化保护接口标准、更换便捷的优势,积极推动继电保护“工厂化调试+更换式检修”的管

理创新。开展“工厂化”调试,集中仿真调试平台,模拟现场实际环境,实现全站保护装置集中调试和单装置检验测试,提升工作效率。开展现场“更换式”检修,装置的配置及测试工作在调试中心完成,现场整机更换,实现自动寻址、自动配置、一键测试、自动对点和全回路传动功能,提升现场作业效率,降低“三误”事故概率。

### 3.1.3 关键技术支撑

即插即用保护技术需要研究和应用高集成度一体化板卡、高可靠防护装置、标准化连接器、元件保护高可靠专用网络等四大关键支撑技术。

1) 高集成度一体化板卡。应用最新的芯片技术,实现板卡的一体化、集成化设计,实现完整的继电保护功能,压缩装置尺寸;采用先进工艺,提升保护装置抗干扰能力,为装置小型化和就地化奠定基础条件。

2) 高可靠防护装置。设计高可靠性、高防护、低功耗的保护硬件防护装置,满足 IP67 防护等级、电磁兼容的最高标准以及  $-40 \sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$  环境温度的运行要求,适用于高寒、高温、潮湿、盐雾、高海拔等极端运行环境,实现保护装置的无防护就地安装;保护装置与就地智能控制柜的预制方法、安装方式和端口布置统一标准,实现一体化设计,模块化安装、调试。

3) 标准化连接器。基于装置接口标准化设计理念,实现快速、可靠插接以及不同厂家保护装置的通用互换,满足防水、防尘等严苛要求。连接器采用防误插拔技术,现场作业简单高效,降低人员“三误”事故概率。

4) 元件保护高可靠专用网络。采用高可靠无缝冗余的元件保护内部专用网络,确保主变和母线保护装置内部通信的可靠性。

## 3.2 优化配置的后备保护

随着电网规模扩大,运行方多变,后备保护配合日益复杂,开关失灵保护切除故障时间长;自耦变压器、超短线路或短线路群的大量应用,导致整定配合困难,远后备保护灵敏度严重不足。现有保护主要依赖就地或者有限的远方信息,且按照预先整定的固定特性形成动作决策,往往导致故障过长延时和过大范围的切除,增加了直流换相失败的风险,其性能难以满足现代复杂大电网运行要求<sup>[55-57]</sup>。需要遵循“强化主保护、优化后备保护”原则,研究提升后备保护适应复杂大电网的能力。

网络化通信和信息共享技术在智能变电站的应用使继电保护和控制系统可以获取更加丰富的信息资源,为改善传统继电保护和控制系统的性能提供了有利契机。利用多维信息共享的技术优势,可以

从原理上进一步提升后备保护的动作性能,是提高复杂交直流电网安全稳定运行水平的重要措施。

### 3.2.1 开展断路器保护失灵及死区保护优化研究

对于开关 TA 单侧布置,目前无法技改的 500 kV 变电站,研究加装光 TA 差动保护和基于站域信息的开关失灵(死区)保护的两种技术方案:在不破坏现有变电站一二次设备结构的前提下,兼顾设备成本、安装难度等制约因素,通过在配置单 TA 的断路器加设光 TA,构建专用的死区差动保护,以克服死区故障无法判断的难题;基于变电站多间隔电压电流、保护动作等综合信息共享,重构故障间隔 TA 电流,实现故障快速选串,克服互感器拖尾问题。基于上述技术,达到将死区故障完全切除时间压缩至 105 ms 以内、开关失灵切除时间压缩至 200 ms 以内的目标,减少直流系统发生连续换相失败次数,防止引发电网稳定破坏事故。

### 3.2.2 研究推广零序反时限保护

反时限零序电流保护动作特性与故障电流具有天然配合能力,越临近故障点,切除故障越快,对电网稳定越有利。全网采用相同特性的反时限零序电流曲线,通过平移动作曲线,能很好地实现电网各级线路零序电流保护的配合,具有整定计算简单,电网方式适应能力强的优点,推广应用反时限零序电流保护,可有效提升后备保护整体性能。

反时限零序电流保护已成为“六统一”保护装置的标准配置,在公司 220 kV 及以上电网全面推广应用反时限零序电流保护具有重要的现实意义。

### 3.2.3 深化站域控制保护技术的研究与应用

结合大电网运行的特点和需求,统筹考虑变电站二次系统整体方案,科学、合理地制定变电站二次系统的优化与重构方案。基于站域信息共享实现变电站内控制保护功能的全局优化。

研究自适应站域备自投技术,缩短主备电源切换时间、提高备自投成功率,提高系统的供电可靠性。结合局部电网负荷和电源容量,同时根据站内进出线负荷和拓扑结构,实现备自投、低频低压减载等功能的智能协同控制,提升电网的自愈能力。基于站域信息共享,集成多间隔保护功能,实现中低压系统保护的双重化配置,在提高可靠性的同时节约整体设备成本。

### 3.2.4 基于多维信息改善后备保护动作性能

通过对变电站内和站间多点多间隔信息的综合分析,与融合处理,准确辨识故障元件,识别以直接形成保护动作决策,克服传统后备保护动作性能缺陷,包括简化甚至取消整定配合、提高选择性和动作速度、加强对系统运行状况变化的自适性、避免潜在的连锁误动作风险等。

根据现有的站域保护体系,研究基于周边有限间隔内信息和站域信息的后备保护新原理,采用专用站间通信和站域保护等实用技术,构建有限后备保护系统,减轻通信或信息处理负担,推动基于多维信息保护的工程应用。

针对目前变电站直流电源失电导致的事故扩大问题,研究变电站内直流电源失电判断方法以及应急供电方案,并通过专用站间通道加速相邻变电站远后备保护动作,实现失电故障的快速隔离,降低电网灾变风险。

### 3.3 智能化运维体系

基于物联网、移动互联网技术推动继电保护运维技术创新和模式变革,强化智能站配置文件管控,构建以信息化装备、自动化巡视、智能化检修为特征的智能运维检修体系,实现由“传统装备”向“信息装备”、由“人工巡视”向“自动巡视”、由“经验检修”向“智能检修”的跨越,提高继电保护工作人员的单兵作业能力,提升运维工作的自动化、智能化水平。

#### 3.3.1 加强智能站文件管控,提升变电站建设运行水平

1) 强化智能站配置文件管理。构建基于业务流程建模的智能站配置文件管控平台,建立省调—省电科院—地市/省检修公司的智能站配置文件分级管控体系,管理智能站配置文件版本,确保运行智能站配置文件投运后技改、大修以及检修等过程的正确性及一致性<sup>[58]</sup>。

2) 提升配置的智能化水平。研究基于系统描述的继电保护虚端子关联的自动化生成方法,根据SCD文件中变电站系统描述的一二次模型关联自动产生二次装置之间的通信关联,实现继电保护信息系统的自动配置,简化智能站配置流程。

3) 开发基于标准工程文件的智能应用。综合应用光纤标示、工程文件信息,建立基于标准工程文件的继电保护数据、模型、图形的一体化展示平台,对二次设备实现自动精益化评估。

#### 3.3.2 实施智能化高效检修,实现智能站可观、可控、可维护

针对智能站二次回路不可视、安全措施复杂、测试时间长等问题,构建智能检修模式,通过“装置智能诊断、远程终端支持、安措自动执行、二次回路可视、检修综合决策”等技术,实现变电站可观、可控、可维护,提升现场工作效率和防误水平。

1) 装置智能诊断。综合利用装置自诊断及相关状态信息,结合电网实时运行数据,对装置硬件及二次回路状态进行评估,实现装置硬件和二次回路异常的故障定位;根据保护温度、光强、电平变化趋

势、突变监测等技术,实现隐性故障预警、二次系统异常状态推演、故障和异常信息推送,提高运行检修人员快速诊断和处理设备缺陷的能力。

2) 远程终端支持。利用检修智能头盔和移动平板等视频和通信设备将现场影像信息传送至远方专家,达到专家亲临现场的指导效果。

3) 安措自动执行。建立标准的安全措施数据库,自动生成检修工作的安全措施票;应用顺序控制实现压板投退等安全措施的自动执行与校核。

4) 二次回路可视。基于SCD文件将二次虚回路、软压板以图形化显示,为运维人员提供直观的状态确认手段,增强二次回路的可观性与可控性,进一步提升变电站运维的智能化和效率。

5) 检修综合决策。建立智能站检修策略辅助决策专家库,为设备停电检修计划、安全措施等提供支撑;建立典型缺陷库,提供相关缺陷处理方法,提高消缺效率;构建主网检修决策系统,对继电保护检修工作实现从计划、批准、实施到竣工验收的闭环管理。

#### 3.3.3 研发信息化单兵装备,提高现场智能感知和作业能力

研究、推广手持终端、智能穿戴设备等基于物联网技术的信息化单兵装备,提高现场智能感知和作业能力,实现继电保护设备和人员的双向互动、现场和远程的双向互动,提升现场工作的质量、效率和应急抢修能力。

1) 智能移动设备。利用物联网和电子标签技术确认工作地点和工作对象,防止误入间隔;利用互联网技术实时下发工作任务、自动提示作业内容,实现作业指导书电子化和操作顺序实时可控;智能采集、识别和比对红外热成像、环境温湿度、保护状态、保护压板及空开投退等现场信息,提升现场工作效率;实时查询设备台账、定值单、设计图纸、说明书等技术资料,图形化展示SCD文件及故障录波数据,辅助现场检修工作开展;通过实时视频对话,实现专家远程在线指导。

2) 智能可穿戴设备。应用智能检修头盔、智能装备工作服等可穿戴设备,通过增强现实技术,实现误入间隔报警、高压范围报警、作业内容自动提示,同时结合红外测温、无线通信、工作照明等智能辅助功能应用,提高现场智能感知和作业能力,提升现场工作的便利性。

#### 3.3.4 开展自动化无人巡视,提升巡视质量和效率

利用人工智能技术,建立二次设备机器人巡视和远方巡视相结合的自动化巡视模式,有效提高巡视效率,减轻现场人员压力。

1) 机器人巡视。搭载图像采集、红外测温设备,自动采集、识别指示灯状态和压板、把手位置,自动测量运行温度,按照既定路线和巡视计划自动开展变电站自动巡视工作,发现异常及时报警提示运维检修人员处理。

2) 远方巡视。基于变电站监控视频以及保护设备在线监视系统,应用先进的图像技术,智能识别变电站内开关、刀闸机械位置,实现变电站内的自动可视化巡视;基于保护设备在线监视系统,定期采集站端保护设备开关量输入、模拟量采集、差动保护差流、运行温度及光口光强等信息,动态掌握装置运行健康水平,辅助决策保护装置运行状况。

### 3.4 三大继电保护技术支撑平台

应用大数据、物联网、移动互联网等信息技术,推动继电保护专业管理信息化,构建“保护设备运行管理平台、智能整定与在线校核平台、设备在线监视与智能预警平台”三大支撑平台,实现由“经验管理”向“精细管理”、“人工整定”向“智能整定”、“离线分析”向“在线分析”的跨越,进一步提升继电保护专业管理水平。

#### 3.4.1 继电保护设备运行管理平台

根据各级管理机构的工作需求,依托调控云技术,构建一体化的继电保护设备运行管理平台,实现继电保护统计分析技术创新,全面支撑电网保护设备的专业管理。

从保护装置源端至变电站端、调度端自动采集及管理保护装置信息。为全网保护设备制定身份标签,实现全网保护设备数据的唯一识别,支撑基于身份信息关联的高级应用。基于大数据技术,构建保护设备全生命周期信息模型。依托调控云整合设备基础数据、运行数据、故障信息等海量数据,实现继电保护大数据的存储、处理,实现保护信息的全面共享应用。

基于继电保护设备运行管理平台的海量数据,应用大数据的关联分析和挖掘分析技术,开展保护设备的状态评价,支撑状态检修,主要有以下方面。

1) 精准技改设备隐患,降低电网安全风险。基于运行数据持续开展保护装置运行缺陷及动作分析,提出保护不正确动作的原理性问题和软硬件风险,实现精准技改,大幅降低电网安全运行隐患。

2) 定向优化保护配置,保障电网安全运行。基于一次设备配置、保护配置、动作情况等大量数据,分析保护配置合理性、双重化效果、后备保护作用,提出保护配置、整定、策略的优化方案,定向优化保护性能。

3) 评价设备健康状况,辅助决策状态检修。根据设备缺陷信息、检修信息、动作信息、巡检记录、告

警信息等数据评价设备当前健康状况及其发展趋势,对状态劣化和趋势不良的设备及时发布状态预警消息,通过综合优化检修策略模型提出状态检修决策。

#### 3.4.2 智能整定与在线校核平台

基于调控云实现一体化的整定计算技术,统一全网数据、模型和图形标准,统一基础数据平台、统一整定计算原则,实现不同调控机构间整定计算管理的相互贯通和高效协同,确保继电保护定值的正确性,提升全网继电保护定值的配合性能。

1) 提升定值整定一体化和智能化水平。统一整定计算基础数据、基本运行方式、图形、保护配置及定值,形成全网规范统一的继电保护整定计算基础数据和图形,实现不同地区电网整定计算数据的实时修正与异地协同。规范整定计算原则、定值模板和计算方法,实现整定计算业务和流程的标准化。研究基于调控云的全网一体化整定计算配合与协同,实现保护整定范围、保护配合关系的全网优化,支撑不同调控机构间整定计算管理的相互贯通和并行处理。

2) 定值在线校核及预警技术。实时获取电网接线拓扑、元件参数、检修状态等在线运行信息,基于电网潮流的在线方式和预想方式下的故障计算技术,开展保护灵敏性、选择性、距离保护躲负荷能力等校核,准确及时掌握保护定值适应性,实现继电保护定值在线预警和风险预控。自动获取日检修计划方式,开展检修预想方式的保护定值校核,确保各种检修方式下保护定值的适配性。

3) 实现继电保护定值闭环管理。研究离线整定计算与在线实时校核交互技术,实现整定计算结果经在线校核后闭环反馈,确保整定计算定值的准确性和适应性。

#### 3.4.3 保护在线监视与智能诊断平台

建设保护在线监视与智能诊断平台,对子站内能支持 IEC 61850 标准、网络 103 规约等多种通讯协议,实现站内过程层、站控层网络信息的共享,集成故障录波、二次回路可视化、网络记录分析、保护信息子站“四合一”功能,解决多种数据集成问题,实现站内不同专业数据的综合采集与统一处理。收集处理全站继电保护的動作事件记录、動作简报、故障录波、裝置状态、网络报文、回路状态等信息,同时将站内在線監視信息上传至区域电网监测主站进行综合分析和挖掘,实现电网故障的快速处理和保护装置异常的智能诊断,达到电网二次设备的实景可展示、状态可观测、电网故障可分析的目标,全面支撑调控一体化。

1) 远方全景可视化。可视化展示保护装软压

板、告警灯和二次回路可视化,实现定值、软压板召唤 构建面向一次设备的保护投入状态实时监视系统,方便调控人员掌握电网设备状态。

2) 电网故障快速定位和辅助决策。综合保护和录波数据,依托人工智能决策技术,实现精确、快速的电网故障定位,故障类型判别及处理辅助决策(区分雷击、山火、树枝等)和基于主接线图的故障全景展示及预警。

3) 电网故障记录、分析和全过程反演。基于面向对象的分散式故障录波器,形成全网同步的全景录波,辅以保护装置的动作信息,准确记录故障过程和时序,从电网层面分析故障形态和连锁故障过程,实现电网事故的准确记录、分析和全过程反演。

4) 保护装置动作行为分析和动作逻辑回放。综合分析动作事件顺序记录、动作简报和内部录波等信息,对保护中间结果信息进行分析解读,实现保护动作逻辑回放、分层推演以及装置故障定位和隐性故障辨识预警,提高运行检修人员快速诊断和处理设备缺陷的能力。

### 3.5 直流控制保护

从保障交直流大电网系统整体安全的层面出发,提升直流二次系统的标准化、模块化与可靠性,建立直流控制保护可靠性评价系统,开发换流站全息实景展示及故障反演系统,推进柔性直流控制保护新技术研究,不断夯实对电网安全运行的基础保障作用。

#### 3.5.1 提升直流控保系统模块化、标准化水平

梳理现有直流控制保护系统架构,理清控制功能及保护逻辑的实现方式、接口范围和功能参数,按照核心功能、输入输出、系统参数等方面对程序进行模块划分,生成控制和保护软件标准化模块,固化核心逻辑、开放参数界面,避免因控制保护系统逻辑复杂、关联度高,在某些参数进行修改时导致软件修改错误的弊端。在程序实现模块化设计的基础上,实现装置标准化设计和定型工作,进一步提升直流控制保护装置的规范程度。

#### 3.5.2 发展软件可视化页面校验技术

采用直流控制保护系统软件可视化页面校验码技术,达到每个软件页生成一个唯一校验码的目的。开发校验码自动比对和错误识别功能,自动比对功能完成现场软件修改前后的整体比对,防止超范围修改;错误识别功能保证现场修改软件页与通过检测软件页的一致性,确保软件修改的正确性。

#### 3.5.3 构建直流控制保护可靠性评价系统

建立控制保护装置、处理板卡、二次回路的评价模型,通过对控制保护装置各种动作信息和运行缺陷信息自动分类采集,实现对控制保护装置及其内

部板卡和二次回路的量化评价,准确把握装置健康运行水平,并形成装置可靠性评价报告,用以指导现场运行检修工作开展。同时定期将问题反馈至成套设计单位,形成运行与设计的良性沟通机制,杜绝已发现的缺陷在新建工程中重复出现的现象,进一步提升直流工程建设和运行水平。

#### 3.5.4 开发换流站反事故可视推演技术

采用虚拟现实以及基于可视化逻辑建模技术实现特高压换流站一二次设备的全方位再现,根据直流控制保护逻辑建立异常和故障算法模型,实现录波回放、故障重现和自动分析功能,为快速分析定位故障原因及确定解决措施提供技术支撑。基于换流站反事故可视推演技术,对调度、运行及检修人员进行专业化培训,辅助调控机构及运维单位编制反事故预案、开展反事故演习。

#### 3.5.5 研究适用于柔性直流的新型控制保护技术

提出适应多端柔直的子模块损耗率、内部环流抑制、可控充电及不控充电算法。开展多站有功、无功协调控制策略,交直流电网故障及耦合特性研究,确定控制及保护协调配合策略。结合直流断路器技术的发展与应用,研究提出直流线路故障的有选择性超高速保护方法(动作时间小于2ms)与动作策略,提升柔性直流电网运行的可靠性和灵活性<sup>[59-60]</sup>。

### 3.6 继电保护前瞻性技术

针对电网可再生能源大规模接入、电力电子化特征日趋凸显、半波长及超导等新型输电方式逐步应用的发展趋势,开展基于故障暂态量的故障预警与保护、柔性交流输电等电力电子设备控制保护技术、分布式电源接入的快速保护技术、半波长输电保护、超导输电保护等前瞻性技术研究,不断提升继电保护技术水平,满足未来电网的安全防护需求。

#### 3.6.1 发展基于故障暂态分量的故障预警、保护新原理

将保护利用的信息由稳态工频量扩展至宽频带暂态信息,促进继电保护理论的完善与提升,为继电保护学科提供更加广阔的发展空间。通过充分挖掘利用故障暂态信息,支撑设备故障预警,提升运行人员掌控风险的能力;构建适应有源配电网的分层自愈控制体系,进一步提升供电可靠性;研发电力电子化电网的快速保护新原理,保障未来复杂电网的安全稳定运行。

构建高频暂态量录波器及仿真系统,实现全频域暂态信息的高速无损采样、广域同步测量;基于大数据、云计算等前沿技术,研究电网暂态信息的全频域录波(兆赫兹级)、大容量存储和高效处理办法,开展电网大范围、长过程和发展性故障的研究,

揭示设备故障、局部放电和雷电等过程的时频特征,实现系统不同类型暂态扰动的快速检测与识别;发展主动式预保护技术,利用设备绝缘损坏初期局部放电时频特征实现故障快速预警,预防事故产生和扩大。

针对有源配电网控制保护的难题,研发基于中性点柔性接地的配电网故障快速消弧新技术。在中性点处安装有源电力电子设备等新型接地消弧装置,通过调节注入暂态电流,精确补偿配网故障全电流,同时抑制弧光过电压,实现瞬时性故障的有效抑制和电网不断电无扰自愈;研究基于暂态量的配电网保护新技术,实现持续性故障的准确选线与灵敏保护<sup>[61]</sup>。

电力电子化电网故障过程复杂多变,且含有大量的谐波分量,基于工频相量、叠加定理的保护原理已难以适应。为此,发展基于故障暂态信息的输电线路快速保护新技术,利用线路内外部故障的不同时频特征,实现输电线路全线速动保护新原理。

### 3.6.2 研究柔性交流输电等电力电子设备控制保护技术

针对新型电力电子设备高度渗透带来的设备本体及其接入电网的控制保护新问题,研究统一潮流控制器(UPFC)、可控串补(TCSC)、短路电流限制器(FCL)、可控移相变压器等各种柔性交流输电元件(FACTS)的结构参数、运行原理及其电磁暂态行为,揭示新型FACTS元件本体故障特征,分析FACTS本体故障与系统故障的交互影响机理,研究FACTS设备的保护方案及其与外部电网保护的协调配合策略,在保障FACTS设备本体安全运行的同时,实现电网的灵活控制与高效运行。

### 3.6.3 推进分布式电源接入的快速保护技术研究

风电、光伏、光热等分布式电源并网容量持续增长,使得电源特性和故障特征发生了显著变化,传统保护原理难以适应。揭示不同类型分布式电源故障时的电气特性,研究适应分布式电源接入的快速保护新原理、配置原则和整定计算方法,确保电网的安全稳定运行。

### 3.6.4 推进半波长输电线路保护新技术研究

随着全球能源互联网的发展和建设,半波长输电技术已成为解决超远距离输电问题的优选方案。但是,超长距离的输电线路使得呈现显著的分布参数特性,使得传统基于集中参数的故障分析方法和保护原理难以适应。开展半波长输电线路保护新技术研究,对于保障能源超大容量、超远距离的安全输送具有重要的意义<sup>[62]</sup>。

分析半波长输电线路沿线电压分布、测量阻抗等电气特征,揭示线路区内、外发生各种故障情况下

的暂态特征,提出适用于半波长输电线路的主后备保护原理、整定配合方案、重合闸策略以及针对半波长双回路输电的故障选相方法。

针对含半波长输电线路的交流系统,制定继电保护整体配置方案、整定计算方法以及运行管理策略,提出各类保护及自动装置的协调配合原则。研制半波长输电线路保护装置,结合半波长输电的示范工程建设,开展适用于半波长输电线路的保护和控制技术的现场应用。

### 3.6.5 探索超导输电继电保护原理与技术方案

超导输电技术具有大容量、低损耗、体积小、重量轻、系统可靠性高、节约资源、环境友好等优势,有望在未来电网中发挥重要作用<sup>[63]</sup>。探索超导输电继电保护原理与技术方案是实现超导输电技术工程化应用的技术保障。结合电气量(如电流、电压)、非电量(如冷却介质温度、压力、流速等)以及制冷设备工作情况,研究超导本体故障及失超的监测方法与分层保护方案,通过判断异常运行工况严重程度,采取自适应的保护措施,在确保超导本体设备安全运行的同时,兼顾电力系统稳定性。研究采用在电缆结构中增加金属分流层、串联故障电流限制器(SCFL)等限流措施,避免失超事故发生或扩大。

## 4 结语

继电保护技术的发展工作要立足于现代电网的安全保障需求,注重结合应用最新的前沿技术,从基础理论、构建模式、硬件设备、运维检修等方面统筹推进新技术的研究。

本文分析了继电保护面临的挑战,总结了保护技术发展必须遵循的原则,探讨了“即插即用的就地化保护”、“优化配置的后备保护”、“智能化运维体系”、“三大继电保护技术支撑平台”、“直流控制保护”、“继电保护前瞻性技术”等重点发展方向。未来要根据发展方向的重要程度和技术难度,科学、合理地制定实施计划和研究项目,稳步、有序推进继电保护的技术进步。

## 参考文献

- [1] 舒印彪,刘泽洪,袁骏,等. 2005年国家电网公司特高压输电论证工作综述[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 1-12.  
SHU Yinbiao, LIU Zehong, YUAN Jun, et al. A survey on demonstration of UHV power transmission by state grid corporation of China in the year of 2005 [J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 1-12.
- [2] 舒印彪. 中国直流输电的现状与展望[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 1-2.  
SHU Yinbiao. Present status and prospect of HVDC transmission in China [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 1-2.
- [3] 舒印彪,张文亮. 特高压输电若干关键技术研究[J]. 中国电机



- 工程学报 2007 27(31):1-6.  
SHU Yinbiao, ZHANG Wenliang. Research of key technologies for UHV transmission [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(31): 1-6.
- [4] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社 2015.
- [5] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架: (一) 从孤立防线到综合防御[J]. 电力系统自动化 2006 30(1):8-16.  
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part I from isolated defense lines to coordinated defending [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 8-16.
- [6] 易俊, 周孝信. 电力系统广域保护与控制综述[J]. 电网技术, 2006 30(8):7-12.  
YI Jun, ZHOU Xiaoxin. A survey on power system wide-area protection and control [J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 7-12.
- [7] 薛禹胜, 赖业宁. 大能源思维与大数据思维的融合: (二) 应用及探索[J]. 电力系统自动化 2016 40(8):1-13. DOI: 10.7500/AEPS20160311004.  
XUE Yusheng, LAI Yening. Integration of macro energy thinking and big data thinking: Part two applications and explorations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 1-13. DOI: 10.7500/AEPS20160311004.
- [8] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架: (二) 广域信息: 在线量化分析和自适应优化控制[J]. 电力系统自动化 2006 30(2):1-10.  
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part II reliable information, quantitative analyses and adaptive controls [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 1-10.
- [9] 张文亮, 周孝信, 郭剑波, 等.  $\pm 1\ 000\ \text{kV}$  特高压直流在我国电网应用的可行性研究[J]. 中国电机工程学报 2007 27(28):1-5.  
ZHANG Wenliang, ZHOU Xiaoxin, GUO Jianbo, et al. Feasibility of  $\pm 1\ 000\ \text{kV}$  ultra HVDC in the power grid of China [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(28): 1-5.
- [10] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报 2014 34(29):4999-5008.  
ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [11] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相. 电网和电网技术发展的回顾与展望——试论三代电网[J]. 中国电机工程学报 2013 36(22):1-11.  
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang. Review and prospect for power system development and related technologies: a concept of three-generation power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 36(22): 1-11.
- [12] 舒印彪. 我国特高压输电的发展与实施[J]. 中国电力 2005, 38(11):1-8.  
SHU Yinbiao. Development and execution of UHV power transmission in China [J]. Electric Power, 2005, 38(11): 1-8.
- [13] 舒印彪, 胡毅. 交流特高压输电线路关键技术的研究及应用[J]. 中国电机工程学报 2007 27(36):1-7.  
SHU Yinbiao, HU Yi. Research and application of the key technologies of UHV AC transmission line [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(36): 1-7.
- [14] 何朝荣, 李兴源, 金小明, 等. 高压直流输电系统换相失败判断标准的仿真分析[J]. 电网技术 2007 31(1):20-24.  
HE Chaorong, LI Xingyuan, JIN Xiaoming, et al. Simulation analysis on commutation failure criteria for HVDC transmission systems [J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 20-24.
- [15] 李新年, 陈树勇, 庞广恒, 等. 华东多直流馈入系统换相失败预防和自动恢复能力的优化[J]. 电力系统自动化 2015 39(6):134-140. DOI: 10.7500/AEPS20140305002.  
LI Xinnian, CHEN Shuyong, PANG Guangheng, et al. Optimization of commutation failure prevention and automatic recovery for East China multi-infeed high-voltage direct current system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015 39(6): 134-140. DOI: 10.7500/AEPS20140305002.
- [16] 汪隆君, 王钢, 李海锋, 等. 交流系统故障诱发多直流馈入系统换相失败风险评估[J]. 电力系统自动化 2011 35(3):9-14.  
WANG Longjun, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Risk evaluation of commutation failure in multi-infeed HVDC systems under AC system fault conditions [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(3): 9-14.
- [17] 朱韬析, 宁武军, 欧开健. 直流输电系统换相失败探讨[J]. 电力系统保护与控制 2008 36(23):116-120.  
ZHU Taoxi, NING Wujun, OU Kaijian. Discussion on commutation failure in HVDC transmission system [J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(23): 116-120.
- [18] 王晶, 梁志峰, 江木, 等. 多馈入直流同时换相失败案例分析及仿真计算[J]. 电力系统自动化 2015 39(4):141-146. DOI: 10.7500/AEPS20140314007.  
WANG Jing, LIANG Zhifeng, JIANG Mu, et al. Analysis and simulation of commutation failure in multi/infeed HVDC transmission systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 141-146. DOI: 10.7500/AEPS20140314007.
- [19] 项玲, 郑建勇, 胡敏强. 多端和多馈入直流输电系统中换相失败的研究[J]. 电力系统自动化 2005 29(11):29-33.  
XIANG Ling, ZHENG Jianyong, HU Minqiang. Study on commutation failure in MTDC and MIDC systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(11): 29-33.
- [20] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报 2017 37(1):1-9.  
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-9.
- [21] 毕天姝, 刘素梅, 薛安成, 等. 逆变型新能源电源故障暂态特性分析[J]. 中国电机工程学报 2013 33(13):165-171.  
BI Tianshu, LIU Sumei, XUE Ancheng, et al. Fault characteristics of inverter-interfaced renewable energy sources [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 165-171.
- [22] 陈树勇, 徐林岩, 孙栩, 等. 基于多端柔性直流输电的风电并网控制研究[J]. 中国电机工程学报 2014 34(21):32-38.  
CHEN Shuyong, XU Linyan, SUN Xu, et al. The control of wind power integration based on multi-terminal high voltage DC transmission with voltage source converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(21): 32-38.
- [23] YUAN Xiaoming. Overview of problems in large-scale wind integrations [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013, 1(1): 22-25.
- [24] 宋国兵, 高淑萍, 蔡新雷, 等. 高压直流输电线路继电保护技术综述[J]. 电力系统自动化 2012 36(22):123-129.  
SONG Guobing, GAO Shuping, CAI Xinlei, et al. Survey of relay

- protection technology for HVDC transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 123-129.
- [25] 索南加乐, 张健康, 焦在滨, 等. 交直流混联电网交流系统故障特征分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1461-1467.  
SUONAN Jiale, ZHANG Jiankang, JIAO Zaibin, et al. AC fault characteristic analysis of AC-DC hybrid transmission grid [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1461-1467.
- [26] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760-1771.  
TANG Guangfu, PANG Hui, HE Zhiyuan. R&D and application of advanced power transmission technology in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760-1771.
- [27] 任必兴, 杜文娟, 王海风, 等. UPFC 接入对江苏特高压交直流混联电网的动态交互影响研究[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2654-2661.  
REN Bixing, DU Wenjuan, WANG Haifeng, et al. Dynamic interaction investigation on a UPFC connecting to Jiangsu UHV AC/DC hybrid power system [J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2654-2661.
- [28] 孔祥平, 袁宇波, 高磊, 等. 含 UPFC 线路的距离保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5219-5226.  
KONG Xiangping, YUAN Yubo, GAO Lei, et al. Study of distance protection scheme for transmission line including UPFC [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5219-5226.
- [29] 徐政, 薛英林, 张哲任. 大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5051-5062.  
XU Zheng, XUE Yinglin, ZHANG Zheren. VSC-HVDC technology suitable for bulk power overhead line transmission [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5051-5062.
- [30] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.  
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [31] 王一振, 赵彪, 袁志昌, 等. 柔性直流技术在能源互联网中的应用探讨[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3551-3560.  
WANG Yizhen, ZHAO Biao, YUAN Zhichang, et al. Study of the application of VSC-Based DC technology in energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3551-3560.
- [32] 祁万春, 杨林, 宋鹏程, 等. 南京西环网 UPFC 示范工程系统级控制策略研究[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 92-96.  
QI Wanchun, YANG Lin, SONG Pengcheng, et al. UPFC system control strategy research in Nanjing Western Power Grid [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 92-96.
- [33] TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. R&D and application of voltage sourced converter based high voltage direct current engineering technology in China [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(1): 1-15.
- [34] 袁小明, 程时杰, 胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5145-5154.  
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154.
- [35] 潘垣, 尹项根, 胡家兵, 等. 论基于柔直电网的西部风光能源集中开发与外送[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3621-3629.  
PAN Yuan, YIN Xianggen, HU Jiabing, et al. Centralized exploitation and large-scale delivery of wind and solar energies in West China based on flexible DC grid [J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3621-3629.
- [36] 朱炳铨, 王松, 李慧, 等. 基于 IEC 61850 GOOSE 技术的继电保护工程应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 104-107.  
ZHU Bingquan, WANG Song, LI Hui, et al. Application of IEC 61850 GOOSE technology on protective relaying [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 104-107.
- [37] 王松, 裘愉涛, 侯伟宏, 等. 智能变电站继电保护 GOOSE 网络跳闸探讨[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(18): 258-259. DOI: 10.7500/AEPS20150204013.  
WANG Song, QIU Yutao, HOU Weihong, et al. Discussion of GOOSE network trip for smart substation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(18): 258-259. DOI: 10.7500/AEPS20150204013.
- [38] 孙一民, 裘愉涛, 杨庆伟, 等. 智能变电站设计配置一体化技术及方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(14): 70-74.  
SUN Yimin, QIU Yutao, YANG Qingwei, et al. Configuration design integration technology and scheme for smart substation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(14): 70-74.
- [39] 段献忠, 杨增力, 程道. 继电保护在线整定和离线整定的定值性能比较[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 58-61.  
DUAN Xianzhong, YANG Zengli, CHENG Xiao. Performance analysis of relay settings determined according to off-line calculation and on-line calculation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 58-61.
- [40] 段斌, 谭成, 刘艳, 等. 基于 IEC 61850 和多代理技术的保护定值在线追踪系统[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(7): 70-76. DOI: 10.7500/AEPS20130802011.  
DUAN Bin, TAN Cheng, LIU Yan, et al. An online tracking system of protection settings based on IEC 61850 and multi-agent technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(7): 70-76. DOI: 10.7500/AEPS20130802011.
- [41] 熊小伏, 陈星田, 郝昌圣, 等. 继电保护系统状态评价研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 51-58.  
XIONG Xiaofu, CHEN Xingtian, ZHENG Changsheng, et al [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 51-58.
- [42] 何桦, 柴京慧, 许文庆, 等. 继电保护数据库的统一建模新方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(18): 66-69.  
HE Hua, CHAI Jinghui, XU Wenqing, et al. New integrated protection modeling design method for database in the energy management system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(18): 66-69.
- [43] 陈星田, 熊小伏, 齐晓光, 等. 一种用于继电保护状态评价的大数据精简方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 538-548.  
CHEN Xingtian, XIONG Xiaofu, QI Xiaoguang, et al. A big data simplification method for evaluation of relay protection operation state [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 538-548.
- [44] 熊小伏, 刘晓放. 基于 WAMS 的继电保护静态特性监视及其隐藏故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 11-15.  
XIONG Xiaofu, LIU Xiaofang. Monitoring of static characteristics and diagnosis of hidden failures in protection system based on WAMS [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 11-15.
- [45] 熊小伏, 陈星田, 曾星星, 等. 基于广义变比辨识的继电保护电流测量回路故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2014,

- 34( z1 ): 76-84.  
XIONG Xiaofu, CHEN Xingtian, ZENG Xingxing, et al. Fault diagnosis method of current measurement circuit in protection based on the identification of generalized ratio [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34( z1 ): 76-84.
- [46] 叶远波, 孙月琴, 黄太贵, 等. 智能变电站继电保护二次回路在线监测与故障诊断技术 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44( 20 ): 148-153.  
YE Yuanbo, SUN Yueqin, HUANG Taigui, et al. Online state detection and fault diagnosis technology of relay protection secondary circuits in smart substation [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44( 20 ): 148-153.
- [47] 李宝伟, 倪传坤, 李宝潭, 等. 新一代智能变电站继电保护故障可视化分析方案 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38( 5 ): 73-77. DOI: 10. 7500/AEPS20130816002.  
LI Baowei, NI Chuankun, LI Baotan, et al. Analysis scheme for relay protection fault visualization in new generation smart substation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38( 5 ): 73-77. DOI: 10. 7500/AEPS20130816002.
- [48] 王继业, 王德林, 杨国生, 等. 大数据技术在继电保护领域的研究与应用 [J]. 电力信息与通信技术, 2016, ( 12 ): 1-8.  
WANG Jiye, WANG Delin, YANG Guosheng, et al [J]. Research and application of big data technology in relay protection [J]. Electric Power ICT, 2016, ( 12 ): 1-8.
- [49] 彭小圣, 邓迪元, 程时杰, 等. 面向智能电网应用的电力大数据关键技术 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35( 3 ): 503-511.  
PENG Xiaosheng, DENG Diyuan, CHENG Shijie, et al. Key technologies of electric power big data and its application prospects in smart grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35( 3 ): 503-511.
- [50] 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 等. 云计算: 构建未来电力系统的核心计算平台 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34( 15 ): 1-8.  
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Cloud computing: implementing an essential computing platform for future power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34( 15 ): 1-8.
- [51] 薛禹胜, 赖业宁. 大能源思维与大数据思维的融合: (一) 大数据与电力大数据 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40( 1 ): 1-8. DOI: 10. 7500/AEPS20151208005.  
XUE Yusheng, LAI Yening. Integration of macro energy thinking and big data thinking: Part one big data and power big data [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40( 1 ): 1-8. DOI: 10. 7500/AEPS20151208005.
- [52] 赵庆周, 李勇, 田世明, 等. 基于智能配电网大数据分析的状态监测与故障处理方法 [J]. 电网技术, 2016, 40( 3 ): 774-780.  
ZHAO Qingzhou, LI Yong, TIAN Shiming, et al. A state estimation and fault processing method based on big data analysis of smart distribution network [J]. Power System Technology, 2016, 40( 3 ): 774-780.
- [53] 裘愉涛, 王德林, 胡晨, 等. 无防护安装就地化保护应用与实践 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44( 20 ): 1-5.  
QIU Yutao, WANG Delin, HU Chen, et al. Application and practice of unprotected outdoor installation protection [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44( 20 ): 1-5.
- [54] 李岩军, 艾淑云, 王兴国, 等. 继电保护就地化及测试研究 [J]. 智能电网, 2014( 3 ): 16-21.  
LI Yanjun, AI Shuyun, WANG Xingguo, et al [J]. Locally installed mode and test research of relay protection [J]. Smart Grid, 2014( 3 ): 16-21.
- [55] 柳焕章, 王德林, 周泽昕. 继电保护的柔性动作特性 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40( 13 ): 1-4. DOI: 10. 7500/AEPS20151201003.  
LIU Huanzhang, WANG Delin, ZHOU Zexin. Flexible operation features of relay protections [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40( 13 ): 1-4. DOI: 10. 7500/AEPS20151201003.
- [56] YIN Xianggen, ZHANG Zhe, LI Zhenxing, et al. The research and the development of the wide area relaying protection based on fault element identification [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1( 1 ): 1-13.
- [57] 尹项根, 李振兴, 刘颖彤, 等. 广域继电保护及其故障元件判别问题的探讨 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40( 5 ): 1-9.  
YIN Xianggen, LI Zhenxing, LIU Yingtong, et al. Study on wide area relaying protection and fault element identification [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40( 5 ): 1-9.
- [58] 王松, 宣晓华, 陆承宇. 智能变电站配置文件版本管理方法 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37( 17 ): 95-98.  
WANG Song, XUAN Xiaohua, LU Chengyu. Version management method of smart substation configuration file [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37( 17 ): 95-98.
- [59] 李斌, 何佳伟, 李晔, 等. 多端柔性直流系统直流故障保护方案 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36( 17 ): 4627-4637.  
LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. DC fault protection strategy for the flexible multi-terminal DC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36( 17 ): 4627-4637.
- [60] 李斌, 何佳伟. 多端柔性直流电网故障隔离技术研究 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36( 1 ): 87-95.  
LI Bin, HE Jiawei. Research on the DC fault isolating technique in multi-terminal DC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36( 1 ): 87-95.
- [61] 曾祥君, 王媛媛, 李健, 等. 基于配电网柔性接地控制的故障消弧与馈线保护新原理 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32( 16 ): 137-143.  
ZENG Xiangjun, WANG Yuanyuan, LI Jian, et al. Novel principle of faults arc extinguishing & feeder protection based on flexible grounding control for distribution networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32( 16 ): 137-143.
- [62] 杜丁香, 王兴国, 柳焕章, 等. 半波长线路故障特征及保护适应性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36( 24 ): 6788-6795.  
DU Dingxiang, WANG Xingguo, LIU Huanzhang, et al. Fault characteristics of half-wavelength AC transmission line and its impact to transmission line protection [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36( 24 ): 6788-6795.
- [63] 严陆光, 周孝信, 甘子钊, 等. 关于发展高温超导输电的建议 [J]. 电工电能新技术, 2014, 33( 1 ): 1-9.  
YAN Luguang, ZHOU Xiaoxin, GAN Zizhao, et al. Proposal for development of high-temperature superconducting power transmission [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2014, 33( 1 ): 1-9.

( 下转第 26 页 continued on page 26 )

LI Jungang, SONG Xiaohui, DI Junfeng, et al. Communication network redundancy design of intelligent substation based on IEC 62439-3 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(10): 70-73.

[16] 许铁峰, 徐习东. 高可用性无缝环网在数字化变电站通信网络的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(10): 121-125.

XU Tiefeng, XU Xidong. Application of high-availability seamless ring in substation communication network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(10): 121-125.

郑玉平(1964—)男,通信作者,博士,教授级高级工程师,博士生导师,主要研究方向:电力系统继电保护与控制。E-mail: zhengyuping@sgepri.sgcc.com.cn

吴通华(1977—)男,博士研究生,高级工程师,主要研究方向:电力系统继电保护。E-mail: wutonghua@sgepri.sgcc.com.cn

戴魏(1981—)男,硕士,工程师,主要研究方向:电力系统继电保护。E-mail: daiwei@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 代长振)

## Discussion on Network Architecture of Outdoor Installation Protection System in Substation

ZHENG Yuping<sup>1,2,4</sup>, WU Tonghua<sup>1,2,3,4</sup>, DAI Wei<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Hualiang<sup>1,2,3</sup>, HU Guo<sup>2,3</sup>, LI Yanxin<sup>2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China;

2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

3. NARI Technology Development Co. Ltd., Nanjing 211106, China;

4. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** For the installation configuration and telecommunication network problems and challenges confronted by substation secondary device outdoor installation, the principles of the secondary device outdoor installation configuration are proposed first, which include relay protection within both standalone bay and across bays, bay control unit and public terminal, etc. In addition, two telecommunication solutions are also given based on the above, which include two aspects, the first is the network architecture with MMS/SV/GOOSE network all in one based on parallel redundancy protocol (PRP), and the second is high-availability seamless redundancy (HSR) network which is independent of the switch. Finally, network performance is estimated and compared quantitatively.

This work is supported by State Grid Corporation of China.

**Key words:** outdoor installation; network architecture; high-availability seamless redundancy (HSR); parallel redundancy protocol (PRP); public terminal; synchronous sampling

(上接第 11 页 continued from page 11)

陈国平(1965—)男,博士,教授级高级工程师,主要研究方向:电力系统调度运行与控制。

王德林(1972—)男,教授级高级工程师,主要研究方向:继电保护及高压直流输电技术。

裘愉涛(1967—)男,硕士,教授级高级工程师,主要研

究方向:继电保护运行管理。

戚宣威(1988—)男,通信作者,博士,主要研究方向:电力系统继电保护。E-mail: 814512663@qq.com

(编辑 代长振)

## Challenges and Development Prospects of Relay Protection Technology

CHEN Guoping<sup>1</sup>, WANG Delin<sup>1</sup>, QIU Yutao<sup>2</sup>, WANG Song<sup>2</sup>, QI Xuanwei<sup>2</sup>

(1. National Electric Power Dispatching and Control Center, Beijing 100031, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, China)

**Abstract:** Considering the new developmental tendency of the state grid including hybrid AC/DC power grids, the access of clean energy, and the power electronics dominated power systems, the changed fault characteristics of modern power systems are analyzed, meanwhile, the challenges and development situation faced by relay protection technology are proposed. Based on this, the principles to be persevered for relay protection technology development are summarized. The emphatic development directions are discussed in detail, namely, the plug-and-play outdoor installation protection, the optimally configured back-up protection, the intelligent operation and maintenance system, three technical supporting platforms of relay protection; the control and protection of high voltage direct current (HVDC) transmission; the forward technologies of relay protection.

**Key words:** power systems; protection relaying; outdoor installation protection; hybrid AC/DC power grids; power electronics dominated power system