

# 智能电网调度控制系统现状与技术展望

辛耀中<sup>1</sup>, 石俊杰<sup>2</sup>, 周京阳<sup>3</sup>, 高宗和<sup>4</sup>, 陶洪铸<sup>1</sup>, 尚学伟<sup>5</sup>,  
翟明玉<sup>4</sup>, 郭建成<sup>1</sup>, 杨胜春<sup>3</sup>, 南贵林<sup>1</sup>, 刘金波<sup>1</sup>

(1. 国家电网公司国家电力调度控制中心, 北京市 100031; 2. 国网四川省电力公司, 四川省成都市 610041;

3. 中国电力科学研究院, 北京市 100192; 4. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏省南京市 211106;

5. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院)(北京), 北京市 100192)

**摘要:** 首先回顾了中国电网调度自动化系统的发展历程, 然后阐述了智能电网调度控制系统的总体结构, 接着总结了智能电网调度控制系统取得的主要技术创新与应用成效, 包括特大电网的可观测性大幅提高、特大电网的可控制性得以加强、多调度中心协同运行和在线安全预警的能力大大提升、电网运行的经济性和新能源消纳的能力持续提高、电网调度抵御重大自然灾害和集团式网络攻击的能力显著增强等。最后, 展望了智能电网调度控制系统需要进一步研究的关键技术。

**关键词:** 智能电网调度控制系统; 特大电网; 安全性; 经济性; 新能源消纳

## 0 引言

纵观中国电网调度自动化技术的发展, 一直伴随着电网的发展而不断进步。近 30 年来, 大体经历了三个阶段: 一是消化吸收阶段, 解决了各级调度技术支撑之急需; 二是发展创新阶段, 满足了全国联网初期调度控制的需要; 三是赶超先进阶段, 支撑了建设世界一流的坚强智能电网调度机构<sup>[1-9]</sup>。

第一阶段自 20 世纪 80 年代中期开始。为了满足跨省区域电网调度运行监控技术的需求, 电力部组织从国外引进了“四大网”(华北、华东、华中、东北)能量管理系统(EMS)及开发技术, 主要基于通用小型计算机 VAX、专用操作系统 VMS、专用网络协议 DECnet 等。当时的中国电力科学研究院和南京自动化研究所(现国网电力科学研究院)等开发单位, 以引进工程为依托, 以引进技术为基础, 进行了全面消化吸收和技术再创新, 并研制了适用于各级调度的数据采集与监控(SCADA)系统。

第二阶段为 20 世纪 90 年代中后期。为了满足全国互联电网初期调度运行的需要, 经过十余年的消化吸收和技术积累, 开始奋起直追。恰值精简指令计算机(RISC)、开放操作系统(UNIX)、因特网技术等在国际上迅速发展, 为中国奋起直追提供了重大技术机遇。中国电力科学研究院开发了新一代调度自动化系统 CC-2000(荣获 2000 年国家科技进步

一等奖), 国电自动化研究院(现国网电力科学研究院)研发了 SD-6000, OPEN-2000 调度自动化系统(后来于 2005 年升级为 OPEN-3000 系统, 荣获 2007 年国家科技进步二等奖)。这 2 个系统推出后, 迅速占领了国内市场的大部分份额, 其技术水平总体上与国际业内巨头西门子公司的 SPECTRUM 系统、ABB 公司的 SPIDER 系统等持平, 在适应中国国情的应用方面已经超过了上述国外系统。

第三阶段始于 21 世纪初。2003 年 8 月 14 日北美大停电事故发生后, 各国都开始研究大电网在线安全稳定分析预警技术, 国家电网公司于 2004 年立项开展了基于大规模并行计算技术的大电网动态稳定分析和预警的研究, 验证了多路多核集群服务器可适应电网调度控制业务需求。2008 年初, 中国大范围冰灾对电网造成严重破坏, “5·12”汶川地震更是对电力设施造成毁灭性破坏, 但当时的调度自动化系统难以满足多级调度联合处置重大电网事故的要求, 调度中心也缺乏异地容灾备用的能力。地震发生后, 国家电网公司快速决策, 立即着手新一代调度控制系统的研发。根据全球电网发展趋势, 国家电网公司于 2009 年全面启动智能电网发展战略, 在调度控制领域重点推动智能电网调度控制系统(其基础平台简称 D5000 平台)的技术研发与集成应用。2010 年底, 10 家试点单位的智能电网调度控制系统上线运行。至 2013 年底, 智能电网调度控制系统已部署到国家电网公司全部 32 个省级以上调度控制中心, 并迅速推广应用到 59 个地市调度控制

收稿日期: 2014-10-08; 修回日期: 2014-11-28。

国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA05A118)。

中心,覆盖了国家电网公司范围内全部国家等级保护四级系统,实现了特大电网多级调度控制业务一体化协同运作,促进了大规模可再生能源有效消纳,为特大电网调度提供了须臾不可或缺的重要技术手段,已成为坚强智能电网的重要组成部分。

## 1 系统总体结构

智能电网调度控制系统由国家电网公司总部统一组织、集中研发,中国电力科学研究院和国网电力科学研究院等科研单位负责具体研制,各级调度控制中心参加总体设计和功能设计。总体技术路线是:立足安全性高的软硬件,采用多核计算机集群技术提高系统运行可靠性和处理能力,采用面向服务的体系结构(SOA)提升系统互联能力,将原来一个调度中心内部的10余套独立的应用系统,横向集成成为由一个基础平台和四大类应用(实时监控与预警、调度计划、安全校核和调度管理)构成的电网调度控制系统,如图1所示。同时,纵向实现国、网、省三级调度业务的协调控制,支持实时数据、实时画面和应用功能的全网共享,如图2所示。

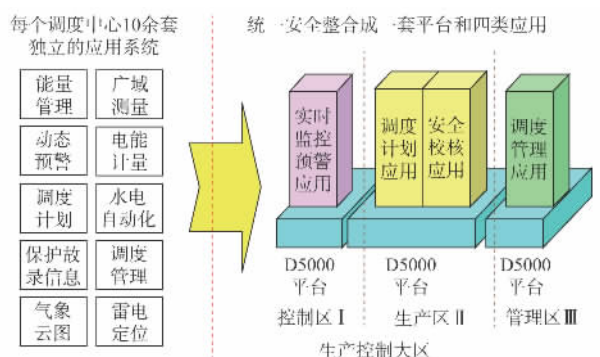


图1 智能电网调度控制系统结构

Fig.1 Architecture of smart grid dispatching and control systems

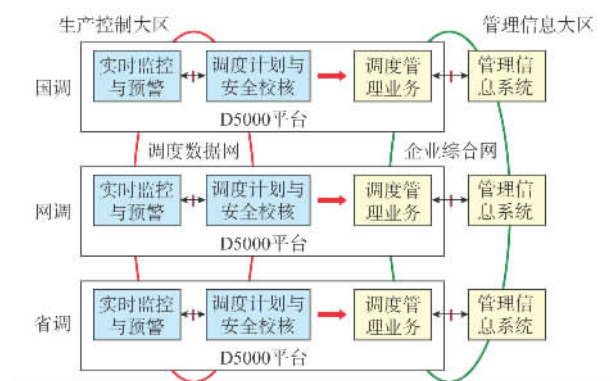


图2 多级电网调度的协调控制

Fig.2 Coordinated control of multi-level power grid control centers

智能电网调度控制系统在世界上首次研究并实现了满足特大电网调度需求的大电网统一建模、分布式实时数据库、实时图形远程浏览等关键技术,攻克了多级调度协同的大电网智能告警及协调控制、全网联合在线安全预警等重大技术难题。

随着智能电网调度控制系统成功开发和规模化应用,推动了电网调度控制技术的升级换代,实现了电网调度业务的“横向集成,纵向贯通”,实现了特大电网的实时监测从稳态到动态、稳定分析从离线到在线、事故处置从分散到协同、经济调度从局部到全局的重大技术进步,提高了调度机构驾驭大电网的能力、大范围资源优化配置能力以及应对重大电网故障的处理能力,保障了电网的安全、稳定、经济、环保运行。

## 2 重大技术突破与应用成效

智能电网调度控制系统之所以能够开发成功并快速实现规模化应用,主要得益于以下几个方面:①目标明确,满足了智能电网调度控制的业务需求;②勇于创新,在技术层面取得重大突破;③团结协作,统一组织全行业技术力量联合攻关。该系统完成的大量技术突破和应用成效如下。

### 2.1 特大电网的可观测性大幅提高

针对特大电网多级调度中心的全网实时数据共享和调度业务协同需求,制定了多项行业、国家和国际标准,研发了分布式实时数据库、图形界面高效远程浏览和大电网统一建模等关键技术,研发了支撑电网调控业务、统一标准的一体化D5000平台,率先解决了特大电网多个控制中心实时工况共享的重大技术难题。其中,实现的技术突破主要包括如下几个方面。

1)研发了开放安全的D5000平台,实现了调度控制业务的横向集成和纵向贯通,支撑了特大电网多级调度的协调运作。

2)研发了高效的安全服务总线、动态消息总线、跨安全区邮件总线和广域流转的工作流引擎,实现了电网调控中心内部以及电网调控中心之间的安全高效数据传输与交换。

3)研发了面向电力系统设备、支持公共信息模型(CIM)标准、广域分布、直接定位的实时数据库技术,建立了覆盖国家电网220 kV以上设备的分布式实时数据库,解决了多级调度高效共享实时数据的世界级难题。

4)研发了支持海量数据存储的时间序列实时库

和无损压缩的时间序列历史库,实现了大电网动态数据的高效存储与访问。

5)提出了国际标准 IEC 61970-555“CIM Based Efficient Model Exchange Format(CIM/E)”,研发并应用了特大电网统一建模技术,实现了电网模型数据在多级调度中心的源端维护、全网共享和在线使用。

6)提出了国际标准 IEC 61970-556“CIM Based Graphic Exchange Format(CIM/G)”,研发并应用了多级调度及变电站图形界面远程浏览技术,实现了可视化与地理信息系统(GIS)融合的图形界面通用集成环境,极大地提升了图形生成、交换、浏览和维护的效率。

## 2.2 特大电网的可控制性得以加强

通过研究多级调度协同的大电网实时监控、综合智能告警和安全控制技术,实现了国家电网 500 kV及以上电网故障的全网联动实时告警,率先解决了特大电网多级调度协调控制和故障联合处置的世界性难题。其中的技术突破主要包括如下几个方面。

1)研发并应用了面向电网事件及统一支持 IEC 61970, IEC 61968 和 IEC 61850 等多种对象模型的电网运行实时监控功能,有效支撑了大电网调度的一体化协调运行和分布式备用。

2)研发了基于安全标签、数字证书和硬件加密的安全远方控制功能,实现了人机登录、服务链接、命令传输、命令执行的全过程安全通信和访问控制。

3)研发并应用了考虑电网安全约束、多区域、多目标的自动发电控制(AGC)和自动电压控制(AVC)技术,实现了特大电网多级调度的有功无功协调控制。

4)提出了多级调度协同的大电网综合智能告警方法,构建了面向全网的电网故障实时告警体系,实现了多级调度告警信息的实时共享,增强了大电网故障的全景感知和协同处理能力。

5)提出并建立了基于服务的广域测量系统(WAMS)分布式应用体系,构建了世界上规模最大的电网动态监测系统(覆盖 1 500 多个厂站),实现了电网实时监控从稳态到动态、从局部到全局的重大技术突破。

## 2.3 多调度中心协同运行和在线安全预警的能力大大提升

研发了基于特大电网实时实测运行工况、事件触发、多级调度互动的在线动态安全预警技术,提高

了特大电网安全状态评估的及时性,解决了长过程多重连锁故障预警处置的重大难题<sup>[10]</sup>。其中的技术突破主要包括如下几个方面。

1)研发并应用了国、网、省三级调度联合互动的在线动态预警功能,建立了大规模跨区潮流数据在线共享、任务并行处理和计算分布协同机制,解决了特大电网动态预警分析的数据快速准备和多级调度协同计算的技术难题。

2)研发并应用了基于事件触发和周期启动的大电网多重相继故障动态跟踪预警功能,实现了跨区电网静态安全、暂态稳定、电压稳定、短路电流和小干扰稳定的在线计算,为调度应对多重相继故障提供了技术手段。

3)研发并应用了低频振荡预警和在线小干扰稳定分析相结合的低频振荡综合分析功能,提高了低频振荡在线监测与分析的精准性。

4)研发并应用了综合考虑电压水平、开机方式和负荷分布等多种因素的输电断面裕度在线分析功能,实现了电网断面稳定水平的在线校核。

5)研发并应用了基于轨迹灵敏度法<sup>[11]</sup>、考虑发电机动态功角特性的暂态稳定辅助决策功能,实现了调度对大电网及时有效的预防预控。

## 2.4 电网运行经济性和新能源消纳能力持续提高

研发了适应节能与经济等多种调度模式、考虑新能源消纳、兼顾安全与经济的发电计划模型与方法,开发了日前、日内和实时发电计划优化决策软件,实现了自适应负荷变化的多目标发电计划优化决策和精细化安全校核,解决了大规模间歇性可再生能源发电的有效消纳和节能发电调度等重大技术难题,填补了国内技术空白。

1)研发并应用了多目标、多时段的安全约束机组组合(SCUC)和安全约束经济调度(SCED)关键技术,解决了时空耦合、兼顾安全与经济的特大电网发电计划协调优化难题。

2)研发并应用了多时间尺度母线负荷预测关键技术,采用多模式自适应方法,提升了预测精度,为发电计划和安全校核提供了高质量的基础数据。

3)提出了发电计划静态、动态和暂态三位一体的安全校核方法,实现了对发电计划的功角稳定、电压稳定和小干扰稳定安全校核,实现了大电网安全运行的预防预控。

4)研发并应用了日前、日内和实时发电计划的自适应滚动优化技术,结合短期和超短期风电/光伏功率预测,提高了大电网消纳可再生能源发电能力。



5) 提出并建立了国、网、省三级调度计划协调优化机制,研发了多级调度计划编制的协调优化技术,提升了特大电网运行的经济性、安全性、节能性和可再生能源消纳能力。

## 2.5 电网调度抵御重大自然灾害和集团式网络攻击的能力显著增强

按照国家等级保护四级结构化安全要求,基于安全可靠软硬件研发了电网调度控制系统,创造性地构建了省级以上分组分布式备调体系,基于分层虚拟专用网(VPN)建立了调度专用数据网双平面,构建了更加坚强的电力二次系统纵深安全防护体系。

1) 研发并应用了满足国家等级保护第四级安全要求的电网调度控制系统,研制了基于椭圆曲线密码体系(ECC)的调度数字证书、调度安全标签、内网安全监控、新型安全通信网关等专用安全设施,提高了调度控制系统抵御集团式网络攻击的能力。

2) 建立了基于 VPN 的大规模调度专用数据网络,骨干网采用独立双平面组网,多层接入网采用双归方式接入骨干网,网络覆盖了各级电网调度机构、110 kV 及以上主要变电站和发电厂,保障了电力生产控制业务实时数据通信和控制指令的安全传输。

3) 研发并应用了“国调网调异地互备、省级调度异地共备,地县调数据独立采集、业务上为下备”的分布式备调核心技术,已建成省级以上协调运作的分布式特大型备调系统,实现了数据、系统、业务、场所和人员等 5 个层面的容灾备用,提高了电网调度抵御重大自然灾害、重大事故及外部攻击破坏的能力。

## 3 技术展望

虽然智能电网调度控制系统取得了一系列重大的技术突破和显著的应用成效,但是,特大电网的安全经济运行、大规模可再生能源的高效消纳、市场化改革的步伐加快、快速发展的 IT 技术、不断恶化的网络安全形势等,都不断对调度控制业务提出新的要求,调度控制技术本身也在不断发展,因此还有许多技术需要进一步深入研究。

1) 平台与应用的集群化和服务化技术。虽然 D5000 平台的体系结构是按集群化目标设计的,在线稳定分析(DSA)实现了数百、上千个处理器的大规模并行计算,离线稳定分析和次日调度计划安全校核也采用了大规模集群服务器,网关服务器和前置服务器也采用了任务动态分担的自动均衡技术。

然而,还有一些传统应用程序如 SCADA/AGC、计量、水电、计划、调度运行管理系统(OMS)等,仍然是单进程运行于双机或多机热备用服务器,既没有发挥本机多核的处理能力,也没有利用多机集群的冗余能力。后续可以考虑首先实现传统应用进程的多线程化,然后实现多机集群的功能分担和负载均衡,继而优化调整系统架构,进而实现基于集群的并行处理和冗余备用,大幅提高系统可靠性和处理能力。另一方面,虽然 D5000 平台和应用功能都是按照 SOA 设计和开发的,而且专门为应用功能提供了标准化的服务总线,大大简化了应用程序的服务化改造。但是仍有不少安全 II 区和安全 III 区的传统应用程序尚未完成服务化改造,有的改造还很不彻底,造成这些应用程序之间难以相互协同,多级调度之间难以纵向贯通。因此,下一步将加快推进 D5000 平台上所有应用程序的服务化改造。根据业务性质和接口标准,各类应用均可改造为以下三种类型的服务之一:自动提供式服务(如 SCADA 等)、订阅推送式服务(如事件告警等)和请求响应式服务(如画面浏览等)。

2) 变电站模型与电网模型互动映射技术。IEC 61970 定义了电力系统设备和网络结构公用模型,IEC 61850 定义了变电站一次设备和二次设备的分相详细模型。多年来相关专家一直试图实现这两个标准模型之间的相互转换。实际上,IEC 61970 描述的是整个电网模型,主要为电网运行控制服务,而 IEC 61850 描述的是设备分相模型,主要为变电站设备运行服务,两者之间的关联是电网一次设备,因此直接映射即可,不需转换。但是,如何实现变电站模型与电网模型的映射与互动,还有待进一步研究,特别是如何将变电站配置文件(SCD)中的电网模型提炼出来实现电网和变电站的模型与图形的“即插即用”、模型与图形的相互转换以及如何建立相应技术标准等。

3) 实时通用服务协议。在 SOA 中,主要以文本方式进行服务访问,效率较低,难以支持实时服务;而实时数据通信的应用层协议众多,包括 IEC 60870-5-101, IEC 60870-5-102, IEC 60870-5-103, IEC 60870-5-104 及 TASE.2 等,需要统一;变电站的 IEC 61850 系列标准具有自描述特性,定义了变电站详细模型和 60 类典型服务,已经广泛应用,但也暴露出实时效率低、与模型关联太紧、单个数据编码没有面向对象等问题。实时通用服务协议正是为了解决这些问题而开发的,其基本原理是将从 IEC

61850 继承并扩展的几十类服务及报文结构直接映射到 TCP/IP 上,采用面向对象的二进制 M 编码技术,实现服务和报文数据结构的动态自定义,机制简单、容易实现、实时性强、可靠性高,并能兼容以往各类实时通信协议。

4) 基于 NoSQL 的集群数据库技术。近年来关系型数据库技术发展很快。在数据库访问方式方面,传统结构化查询语言(SQL)主要是为方便事务(transaction)处理的原子性而设计的,非常接近自然语言,语法灵活,但解析复杂,效率较低。目前业界正从 Old SQL 发展到 New SQL,进而发展到 NoSQL。对于电网调度控制业务而言,关系型数据库和 SQL 主要应用于历史数据、调度计划、能量计量和 OMS 等非实时业务处理,确实存在库体结构性差和访问效率低等问题,需要继续跟踪研究进行优化。在数据共享方式方面,主要有 3 种方式受到关注:共享磁盘方式、无共享方式和两者相结合方式。目前,在电力系统应用中,多采用基于磁盘阵列的双机热备用方式,切换时间较慢,可靠性不高,处理效率较低,急需研究开发 NoSQL 的集群式关系数据库,大幅提高系统可靠性和处理效率。

5) 可信计算和安全免疫技术。电力二次系统安全防护体系由结构安全、本体安全、基因安全、物理安全和安全管理等 5 个方面构成,细分为 11 个层次。其中,结构安全分为 4 个层次,包括安全分区、网络专用、横向隔离和纵向认证;本体安全分为 4 个层次,包括业务无恶意软件、软件无恶意漏洞、整机无恶意芯片和芯片无恶意指令;基因安全是基于可信计算技术实现全系统的安全免疫和版本管理;物理安全是对核心业务系统进行数据、系统、场所和业务等冗余备份;安全管理是对核心业务进行全系统、全过程、全环节和全人员的安全管理。安全防护技术非常重要,但“三分技术,七分管理”,一些技术上做不到或近期难以实现的安全措施,只有依靠更加严密的安全管理来弥补。随着网络攻击和安全防护技术的不断发展,一个时期是“道高一尺、魔高一丈”,另一时期是“魔高一尺、道高一丈”,安全防护是一个永无休止且攻防互长的发展过程,因此安全防护体系也要不断发展并逐步完善。

6) 实时数据采集的整秒同步和分级闭环时间同步监测。目前各级调度 SCADA 稳态数据的时间同步性不是很高,大多采用变化传输,基本上是随来随送,多级转发的总体时延可能达 10 s 以上,这意味着稳态实时潮流数据并不是严格同一时刻的实测数

据,尤其是联络线两端功率的不同时性表现得尤为明显,容易对后续的电网在线稳定分析造成不利影响。此问题不仅与全网时钟同步精度有关,更与厂站数据采集方式及调度数据转发方式密切相关。其实,目前变电站侧合并单元输出的 4 kbit/s 数据流中,已经对采样值(SV)数据帧进行了编号标识,0 ms 时刻对应于 0 编号,但后续处理模块并没有对此重要信息予以利用。不同厂站内及同一厂站内不同合并单元的时间同步性可通过基于乒乓原理(三时标或四时标)的分级闭环监测体系实现在线监视,即各级调度控制中心监测管理直调厂站和下级调度的时间同步状况,厂站监控系统监测管理站内主要二次设备的时间同步状况,从而实现电力系统时间同步的闭环管理,进而提升不同厂站内及同一厂站内不同合并单元的时间同步性。另外,部分调度机构前置系统转发程序的定时器设置方式过于简单,大多没有考虑整分整秒问题。这些问题解决后,有望实现全系统稳态实时数据采集的整秒同步。

7) 数值天气预报技术深化应用。目前数值天气预报主要用于风电功率预测和光伏功率预测,空间分辨率已达  $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ ,时间周期达到 15 min。除了风电和光伏之外,数值天气预报还可以用于水情预报;宏观尺度的数值天气预报可用于系统级负荷预测,微观尺度的数值天气预报可用于母线负荷预测;与雷电定位系统相结合可用于电网故障的快速判断等。

8) 保护定值单的标准化及导入导出。传统继电保护定值为纸质盖章的文本文件,正本由直接调度机构下发到继电保护运维管理单位,由其人工输入继电保护装置,同时由调度台将副本传真到厂站运维单位,用于进行定值核对。显然这种方式已经难以适应技术进步和业务需求,急需将继电保护定值单电子化。可以依据 IEC 61850 的规则统一继电保护装置名称和定值项目名称,采用 CIM/E 技术实现定值单的标准化描述,利用调度数字证书和安全标签对定值单进行数字签名,包括制单、审核、批准、执行和校核等各环节,通过安全 I 区传输到保护装置,保护装置根据预先存入的相关调度机构和人员的公钥鉴别并导入包含数字签名的定值单,同时保护装置导出装置定区中的定值单,以便于定值校核。

9) 配电网数据通信技术。目前的调度数据网络是建立在基于同步数字序列(SDH)技术的电力特种光缆(OPGW 等)传输网之上的调度控制专用业

务网络。之所以采用 SDH 技术,是由于继电保护的快速响应和等时延的特殊需求所决定的。然而在 10 kV 配电网,继电保护的响应速度比主网低,在随电缆沟道铺设的光纤传输介质上不再建设 SDH 设备,转而采用无源光以太网(EPON)或工业以太网交换技术。在统计复用的技术体制下,如何确保调度控制业务与其他业务的安全隔离,需要深入研究。同时,还需要进一步研究如何将汇集到 35 kV 变电站的多条 EPON 线路转接到调度机构,至少存在电路层、网络层和应用层等 3 种方式需要进行深入论证。

10)在线稳定计算的动态解耦技术。目前,大电网潮流的分网解耦计算技术已经非常成熟<sup>[12-13]</sup>,大电网稳定的分网解耦计算已用于故障集不大的离线计算。实验表明,在万兆以太网上,将电网分为 14 块时隐式积分法计算速度最快,加速比为 7.4 倍,但分网更多时,计算速度反而下降,当分网到 24 块以上时,计算速度比不分网时还低。因此,该方法还不适应于故障集很大的在线应用。另一方面,电网等值技术已经应用于潮流计算,但无法适应电网稳定计算。为了支持在线稳定分析,目前的措施是全网共享 220 kV 及以上电网模型和实时数据,各级调度重点分析自身所关心的故障集,计算结果全网共享。但是该方式对实时数据和模型数据的汇集、传输、存储和维护的要求较高,同时对电网分析计算程序速度、收敛性等的要求也较高,运行压力较大。因此,需要进一步研究在线稳定计算的动态解耦技术,实现根据电网地理位置的动态解耦,同时还需要进一步研究故障集过滤技术,仅对临界故障进行详细时域仿真计算。

11)运行方式自描述及动态解析技术。电网运行方式是指导调度运行控制的主要技术依据。目前,年度运行方式(含夏季方式和冬季方式)、月度方式和特殊方式等,均为纸质盖章的运行控制管理规定,调度计划人员据此安排发电计划、交易计划和检修计划等,调度运行人员据此进行实时调度指挥和控制操作。现在的运行方式是给人看的,由人执行的。然而,随着电网规模的不断增大,运行约束日益复杂,大规模可再生能源带来更多的随机性,传统纸质的运行方式越来越难以适应,迫切需要电子化的运行方式描述,在保留人可读的基础上,实现机器可读,进而实现电网运行状态的动态识别、运行方式的动态解析以及两者的动态匹配,同时也可完成在线稳定分析中实时断面与安控策略的自动匹配,对保

障电网安全稳定运行意义重大。

12)短期电力市场的多级多时段优化技术。中国电力市场的发展几起几落,总体上落后于欧美的电力市场。虽然智能电网调度控制系统中设计了支持日前电力市场和实时电力市场的模块,省级以上调度控制系统具备了支持短期电力市场运行的能力,但毕竟还没有实际测试验证的环境,也没有明确的市场规则,缺乏实际电力市场运行考验。特别是,中国多级电力市场的空间结构和多时段电力市场之间协调配合等问题,都需要密切结合电力市场的实际情况加以逐步研究与完善。

#### 4 结语

智能电网调度控制系统是智能电网运行的神经中枢。本文阐述了智能电网调度控制系统的总体结构,从大电网可观测性、可控制性和多级调度的协同性、电网运行经济性及提升新能源消纳能力、系统自身安全性等方面系统总结了智能电网调度控制系统取得的主要技术突破与应用成效。结合未来电网的发展需求,从基础平台、基础数据、分析与计算、电力市场发展、配电网等方面全面阐述了智能电网调度控制系统迫切需要进一步研究的技术问题,并展望了相关技术的应用前景。

#### 参考文献

- [1] 辛耀中,米为民,蒋国栋,等.基于 CIM/E 的电网调度中心应用模型信息共享方案[J].电力系统自动化,2013,37(8):1-5.  
XIN Yaozhong, MI Weimin, JIANG Guodong, et al. Scheme of application model information sharing between control centers based on CIM/E [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 1-5.
- [2] 王益民,辛耀中,向力,等.调度自动化系统及数据网络的安全防护[J].电力系统自动化,2011,25(21):5-8.  
WANG Yimin, XIN Yaozhong, XIANG Li, et al. Security and protection of dispatching automation systems and digital network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 25(21): 5-8.
- [3] 姚建国,杨胜春,单茂华.面向未来互联网的调度技术支持系统架构思考[J].电力系统自动化,2013,37(21):52-59.  
YAO Jianguo, YANG Shengchun, SHAN Maohua. Reflections on operation supporting system architecture for future interconnected power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 52-59.
- [4] 张伯明,孙宏斌,吴文传,等.智能电网控制中心技术的未来发展[J].电力系统自动化,2009,33(17):21-28.  
ZHANG Boming, SUN Hongbin, WU Wenchuan, et al. Future development of control center technologies for smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 21-28.
- [5] 张伯明,孙宏斌,吴文传.三维协调的新一代电网能量管理系统

- [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(13): 1-7.  
ZHANG Boming, SUN Hongbin, WU Wenchuan, et al. New generation of EMS with 3-dimensional coordination [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(13): 1-7.
- [6] WU F F, MOSLEHI K, BOSE A. Power system control centers: past, present, and future [J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(11): 1890-1908.
- [7] 汪际峰, 沈国荣. 大电网调度智能化的若干关键技术问题 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 10-16.  
WANG Jifeng, SHEN Guorong. Some key technical issues on intelligent power dispatching of bulk power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1): 10-16.
- [8] 阮前途, 何光宇, 柳明, 等. AEMS 及其在上海电网的应用 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 17-24.  
RUAN Qiantu, HE Guangyu, LIU Ming, et al. Advanced EMS and its application to Shanghai power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14): 17-24.
- [9] 翟明玉, 王瑾, 吴庆曦, 等. 电网调度广域分布式实时数据库系统体系架构和关键技术 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(2): 67-71.  
ZHAI Mingyu, WANG Jin, WU Qingxi, et al. Architecture and key technologies of wide-area distributed real-time database system for power dispatching automation system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 67-71.
- [10] 严剑峰, 于之虹, 田芳, 等. 电力系统在线动态安全评估和预警系统 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 87-93.  
YAN Jianfeng, YU Zhihong, TIAN Fang, et al. Dynamic security assessment & early warning system of power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 87-93.
- [11] 常乃超, 陈得治, 于文斌, 等. 基于受控微分代数系统灵敏度分析的紧急控制 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(17): 19-22.  
CHANG Naichao, CHEN Dezhi, YU Wenbin, et al. Emergency control based on sensitivity analysis of controlled differential-algebraic systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(17): 19-22.
- [12] 陈颖, 沈沉, 卢强. 基于改进 Jacobian-Free Newton-GMRES( $m$ ) 的电力系统分布式潮流计算 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(9): 5-8.  
CHEN Ying, SHEN Chen, LU Qiang. Distributed power flow calculation based on an improved Jacobian-Free Newton-GMRES( $m$ ) method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 5-8.
- [13] CHEN Ying, SHEN Chen, WANG Jian. Distributed transient stability simulation of power systems based on a Jacobian-free Newton-GMRES method [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(1): 146-156.
- 辛耀中(1956—), 男, 通信作者, 博士, 教授级高级工程师, 副主任, 主要研究方向: 电力系统自动化。E-mail: xin-yaozhong@sgcc.com.cn
- 石俊杰(1963—), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 电力系统自动化。
- 周京阳(1962—), 女, 教授级高级工程师, 主要研究方向: 电力系统自动化。

(编辑 姜海)

### Technology Development Trends of Smart Grid Dispatching and Control Systems

XIN Yaozhong<sup>1</sup>, SHI Junjie<sup>2</sup>, ZHOU Jingyang<sup>3</sup>, GAO Zonghe<sup>4</sup>, TAO Hongzhu<sup>1</sup>, SHANG Xuewei<sup>5</sup>, ZHAI Mingyu<sup>4</sup>, GUO Jiancheng<sup>1</sup>, YANG Shengchun<sup>3</sup>, NAN Guilin<sup>1</sup>, LIU Jinbo<sup>1</sup>

(1. National Electric Power Dispatching and Control Center, State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

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

5. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute) (Beijing), Beijing 100192, China)

**Abstract:** Firstly, the development history of power grid dispatching automation systems in China is reviewed. The architecture of smart grid dispatching and control systems is described. Then the main technical breakthroughs of smart grid dispatching and control systems are summarized, including improvement of the observability and controllability of ultra large power grids, the coordinated ability of control centers, the early warning ability of on-line dynamic security of ultra large power grids, the economic operation efficiency of ultra large power grids, the ability for power grids to accommodate new energy generation, and the ability of the control centers of power grids to withstand major natural calamities and group cyber-attacks. Finally, further research areas of smart grid dispatching and control systems are outlined.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A118).

**Key words:** smart grid dispatching and control systems; ultra large power grids; security; efficiency; new energy accommodation