智能电网调度控制架构和概念发展述评

张　强[1],张伯明[1],李　鹏[2]
(1. 清华大学 电力系统国家重点实验室,北京 100084;
2. 中国南方电网 电力调度通信中心,广东 广州 510623)

摘要:智能电网是未来电力系统的理想解决方案。调度环节是智能电网的神经中枢,最需要智能化也最能体现智能特征。分 3 部分对电网调度控制架构和概念发展进行述评。第 1 部分分析评价自 20 世纪 60 年代到 21 世纪初不同时期有代表性的研究应用成果,包括电网安全控制模式、EMS 软硬件平台、电网安全防御体系、新一代 EMS 的理论和实践等;第 2 部分对智能调度控制领域研究新进展和新概念进行探讨,包括智能调度控制架构、核心特征等发展思路,自愈电网、多代理系统、动态安全预警等具体技术;第 3 部分从功能特征、关键技术、实施步骤 3 个方面展望智能电网背景下的调度控制发展思路。

关键词:电力系统;智能电网;调度控制;能量管理系统
中图分类号:TM 76　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1006-6047(2010)12-0001-06

1　智能电网介绍

当今电力系统比以往任何时候都更多地受到来自运行安全可靠性、资源环境问题、电力市场化 3 个方面的压力和挑战,急需审视和规划未来电力系统的发展方向和建设形态。为此,欧美发达国家近年提出 SmartGrid、IntelliGrid 等概念和研究计划[1-2],国内普遍将其译为"智能电网"。中国国家电网公司和南方电网公司也都在积极组织智能电网研究和相关试点工作。

1.1　智能电网概念的认识

智能电网是人们为未来电力系统设定的理想解决方案。目前不同人对"智能"有不同的理解,并不一致。这里的"智能"不应简单理解为人类智能,可能有更好、更快、更全面、具有适应性或弹性等含义;电网也不应是狭义的电网,还应包括其他相关的系统形成的网。相比传统电网形态,智能电网这一概念具有明显的先进性,目前业界对其建设意义和目的的认识是一致的;但由于智能电网这一概念同时又具有极强的包容性,因此难以也不可能给出统一明确的定义。各国国情不同、网情各异,各级电网覆盖范围和承担任务不一样,相应的智能电网建设内容和思路也不尽相同,必须根据自身情况探索合适的具体发展道路。

1.2　调度控制环节在智能电网建设中的地位和作用

智能电网内涵丰富,包括电力系统的发、输、配、用和调度等各个环节。其中调度环节通过信息的获取、传输、处理和反馈等,实现对一次电力系统运行的监视、分析和控制,保障电能量流通的安全、经济和质量,在智能电网体系中起到"神经中枢"的作用。其他各环节的变化,尤其发电和用电侧新角色的加入(大规模可再生能源发电、分布式发电等)都要与调度环节发生关联,都对电网调度控制提出新的挑战,必须依靠更加智能的调度控制。

因此,电网调度控制环节是最需要智能化也最能体现智能特征的,是智能电网建设的重要和关键一环,这是其发展的必要性。可能性体现在:

a. 经过多年的积累,国内电网的调度控制基础设施相对比较完善,基本具备了进一步发展智能调度控制系统的建设基础;

b. 该领域是信息技术应用密集领域,可以充分利用信息技术的发展速度来实现自身的快速发展,不断提高智能化程度。

本文对不同时期电网调度控制架构和概念发展进行回顾与分析,有助于总结经验、理清思路,为智能电网调度控制发展建设提供借鉴。对该领域新进展和新概念的探讨,以及对智能电网背景下调度控制系统功能特征、关键技术和实施步骤的思考则可以深化对智能电网的认识,不断明晰其发展方向,找准未来需要重点研发的关键技术和实现思路,从而为全面建设智能电网调度控制系统提供理论支持。

2　电网调度控制架构和概念发展历程

电网调度控制的发展总是与一次电力系统的运行、管理需求相适应,同时伴随着信息技术的进步而不断升级和更新换代。架构和概念发展体现了调度控制发展的整体水平,反映了人们的综合认知程度和技术能力,决定着系统结构和功能的先进与否。几十年来,电力工作者结合当时电网控制需求和技

收稿日期:2009-12-10;修回日期:2010-01-14
基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(K0812)

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

术发展程度,从不同角度陆续提出了很多有价值的观点,不断推动着电网调度控制的发展和进步。

1967年,Dy-Liacco博士首次从全系统的角度提出电网安全控制基本模式[3],如图1所示。他将电力系统运行状态分为正常(安全正常和不安全正常)、紧急和恢复3种,把对每个状态的控制分为直接(当地,小于秒级)、优化(控制中心,分钟级)和自适应(控制中心,小时或日级)3层,将约束分为负荷约束(等式)和运行约束(不等式)2类[4],论述系统在不同运行状态下的约束组合和相应的电网控制策略,明确提出了系统安全的概念,从而显著区别于此前的传统控制模式,使电网调度控制水平提升到一个新的层次。Dy-Liacco博士这一时期的研究成果奠定了当今电网调度控制模式的基础,一直沿用至今,促进了调度控制从"经验型"向"分析型"的过渡。

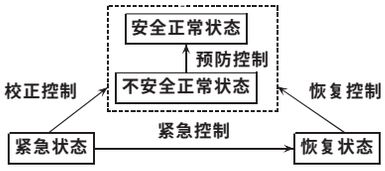

图1 电力系统运行状态分类及其转化过程

Fig.1 Classification and transformation of power system operational states

20世纪90年代以前,电网调度控制系统主要采用集中式的主备机模式,主机负担重,系统可靠性不高,而且扩展功能十分困难。90年代,"开放分布式"的观点开始为人们所理解和接受,并逐渐主导控制中心EMS架构设计[5]。目前,国内外均完全采用了开放分布式的系统结构设计,硬件采用通用计算机,软件可以跨平台,应用软件遵循IEC61970国际标准,实现不同厂家应用软件的互联、互通和互操作[6]。

90年代中期,Dy-Liacco又提出了新控制中心设计和建设的建议[7],包括将控制中心各种功能分散在拥有独立功能的若干个工作区内;将EMS与配电管理系统(DMS)互联、DMS与用户服务互联,实现信息的交流与反馈;将电力公司内所有控制中心连接成一个控制中心网络,考虑建设备用控制中心;将控制中心网络与电力企业中负责规划、检修和营销的部门网络互联;他的这些观点广泛体现在随后的电力控制中心设计中,其优势被后续的应用证实。

随着信息技术的快速发展,人们积极探讨信息技术将给电力系统带来的变化。2000年,文献[8]从电力系统仿真的角度提出"数字电力系统"概念,为电力系统控制的未来勾画了一幅美好蓝图。2004年,美国的Anjan Bose教授撰文分析控制中心在电网事故中的作用,指出可靠性标准虽已在电力系统规划和运行中广泛适用,但在监视和控制中的应用则急需加强[9]。2005年,香港大学Felix F. Wu教授等指出[10],传统的控制中心太集中、太独立、不灵活而且封闭,未来控制中心的主要特征应是分散、综合、灵活和开放,并据此勾画了未来控制中心愿景。他所提出的"灵活"、"开放"等特征契合未来电网控制需求。2006年,文献[11]提出了"时空协调防御架构",目的是将传统的静态电网安全防御体系扩展成动态电网安全防御体系,极大地提高了电网安全防御水平。上述观点从宏观层面提出了调度控制的未来发展方向,规划了该领域的远景目标。

除此以外,国内科研院所、高校、电网调度机构研究人员也纷纷从各自不同角度进行思考并提出很多新的观点。

文献[12]提出将目前调度二次系统整合为"完全自动化、高度智能化、调度主动性、策略实用性"的智能化电网调度辅助决策系统。文献[13]进行大电网安全防御体系的策略研究,提出进行控制中心对弈式的安全预演仿真概念,有助于电力系统调度层面风险防控体系的建立和完善。文献[14]指出,新一代EMS在继承传统EMS成果的基础上,应解决好调度与交易、实时信息与管理信息、预防性控制与紧急和恢复控制的3个"一体化"问题。文献[15]提出采用统一系统平台和数据中心重新构建电网调度控制系统的体系结构,重新划分系统的应用区域,重新整合和优化业务功能(功能群)的全新设计理念,为新时期省级电网调度自动化系统的发展和建设提供了参考思路。

2003年以来世界先进电网发生了一系列大停电事故,这促使人们深刻反思电网调度控制系统的适应性。文献[16]提出,现代能量控制中心的概念应当扩展,功能应由安全发展为安全与经济的协调,局部控制发展为全局分层控制,离线分析发展为在线分析,开环控制发展为闭环控制,在线稳态分析发展为在线暂态分析。2006年文献[17]提出电网控制中心安全预警和决策支持系统按时间、空间和对象等3个维度进行设计的思想,并于2007年提出三维协调的新一代EMS系统概念[18],从空间、时间和控制目标等3个维度分析了新一代电网EMS的设计原理,给出了EMS的三维协调的设计框架,研究了每个维度的协调技术,提出有效的解决方法。三维协调是要通过技术手段来满足电网运行的物理规律,这方面过去未得到充分重视,应用实践也很薄弱,需要加强。

随着信息技术的快速发展,电力系统也逐渐被信息化和数字化。控制中心EMS作为大规模、复杂的实时信息系统,包含了信息运动的几乎所有过程,是信息科学在电力系统应用的一个典型代表。文献[19]将通信领域信息学原理引入EMS,在控制中心信息处理中取得有价值的研究成果。

从调度控制架构和概念的发展历程看,电网运行面临的问题和需求是调度控制技术发展的源动力,系统分析和控制理论与IT技术的进步则为其提供了发展可行性;从发展程度看,传统电网调度控制

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

已相对成熟，但未来内外部环境的变化对调度控制提出了全方位、更高的要求，急需探索适应未来需求的智能调度控制系统。

3　智能电网调度控制研究新进展

智能电网概念自提出以来，在调度控制领域引发了人们对其架构和概念的新一轮广泛、深入探讨，已经并将有力推动电网调度控制系统的发展进步。

国外对智能电网的研究和实践工作启动较早。美国 San Diego 地区智能电网研究报告指出[20]，智能电网控制中心要加强预警功能，快速响应系统输入，有效融合分布式电源，为运行人员提供高级可视化工具。美国电科院(EPRI)是全球最早一批开展智能电网研究的，他们提出智能电网调度控制系统应具有自愈、交互、优化、预测、协同、集成、安全等特征[2]，具有代表性。Anjan Bose 教授指出[21]，智能调度控制系统在数据采集上应迅速加强同步相量测量，在通信上应采用具备标准中间件的高带宽通信方式，控制中心应在线应用基于分布式的实时数据库平台，广域控制急需研发相适应的仿真工具，需要发展基于 PMU 的状态估计等。他为智能电网背景下调度控制系统的研究与实践提供了一整套有价值的思路。

相比之下，国内智能电网研究起步较国外晚，但在该领域投入了更多精力，发展更为迅速。

文献[22]从信息流动的角度分析并提出智能电网调度控制架构，论述信息分层、调度中心与厂站的互动、信息在时间尺度的协调问题；探讨了智能电网背景下控制中心的变革，并结合中国实际，提出含特高压输电的智能电网控制中心技术的解决思路。该研究突出系统层面的三维协调和互动，强调电网调度控制技术需要适应一次物理电网的特点进行全面协调。文献[23]提出一种电网智能控制中心架构，由系统级支撑平台、应用支撑集合、应用集合组成。该架构以现有系统为基础，强调对多信息流的有效融合、智能分析；强调用全局信息替代局部信息，通过信息的有效利用，提高控制中心分析水平，通过机器学习等手段提升控制中心智能水平。

在智能调度控制系统的核心特征和关键技术方面，国内也进行了很多探索，启发人们进一步思考。文献[24]综述了系统快速仿真与模拟、智能预警技术、优化调度技术、预防控制技术、事故处理和事故恢复技术、智能数据挖掘技术、调度决策可视化技术是智能电网调度控制的重点技术发展方向。文献[25]认为面向中国的智能电网调度控制应具备如下特征：可靠、弹性、协调、绿色、高效和智能。文献[26]提出智能调度的关键技术包括：一体化智能应用支撑、特大电网智能运行控制、一体化调度计划运作平台、大型可再生及分布式能源接入控制、一体化调度管理等 5 方面。

多代理系统(MAS)技术是近年来得到较多关注和应用的工具，其在大规模系统的资源分配和协调处理方面有用武之地。文献[27]提出借助智能代理的计算处理机制来解决控制中心计算任务和资源之间的分配，开发出基于集群计算机的分布式并行计算平台，实现中采用的是基于 MAS 的软件开发范式。文献[28]提出基于 MAS 的分布协调理念可广泛用于各级 EMS、DMS、厂站自动化系统之间的分布协调控制。文献[29]设计了电力系统智能型调度的集中－分布式框架，指出 MAS 是实现这一框架的解决途径之一，并设计了执行、监督、寻优、协调、中央代理的 5 层体系结构。

电网“自愈”功能被认为是未来智能电网的一个重要特征。20 世纪 80 年代一名以色列 F－15 战机发生事故后，飞行员成功驾驶残机实现安全着陆，就此美国华盛顿大学的一个研究组在美国航空航天局和波音公司领导下，发展了“损害自适应智能飞行控制系统(IFCS)”。IFCS 奠定了自愈(self-healing)电力系统的概念基础，如何实现电力系统的自愈功能成为研究的焦点。

文献[30]概述了自愈电网的提出和研发过程，指出自愈电网的关键技术为：事件响应的快速仿真决策和分布协调／自适应控制。文献[31]认为，电网自愈控制以面向过程的预防控制为主要手段，以电网不失负荷为控制目标，强调工况适应，强调全局与局部的协调；提出了由双环控制逻辑、3 层控制结构、6 个控制环节构成的电网自愈控制体系结构。鉴于新的网络状态分析方法在电网自愈研究中的重要作用，文献[32]将用于运行控制的过程状态估计和用于在线监测的断面状态估计相结合，提出了面向过程的状态估计的概念和模型，并给出了自愈电网中的状态估计模式。目前，虽然在配电网自愈方面已有不少研究，但是对输电网自愈的研究还处在初级阶段，未来需要得到更大的发展。

故障诊断是实现电网自愈的前提，目前的研究更多集中在这方面。安全预警是为了预防和避免事故的发生，是提高电网运行可靠性的关键，更需要优先研究。“动态稳定监测预警系统”实现了将电网的计算分析由离线转变为在线，从而可及时根据电网实际运行情况确定电网稳定水平和控制策略，可有效提高现有电网输送能力、减少联络线输电阻塞、扩大电力电量的交换[33]。南方电网“协调防御框架体系”实现了电网安全分析从静态到动态、从离线到在线、从定性到定量、从固定设置到自适应优化，其中特别强调相继故障的风险预警[34]。江苏省电力公司和南瑞合作开发的“安全稳定实时预警及协调防御系统(EACCS)”实现了功角、电压、频率安全评估和稳定极限计算的在线应用，整合了稳态和动态数据，可为实际运行状态和预想故障下的安全稳定提供在

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

线监视和预警。清华大学研发的“综合安全预警与辅助决策系统”实现了“实时在线”、“连续跟踪”、“自动智能”和“递归计算”的控制中心自动安全预警新模式[17]。

上述新观点和新概念在人们对传统电网调度控制认识的基础上,针对新形势下的新需求,从功能和特征上进一步丰富了电网调度控制的内涵,为未来智能电网调度控制系统建设做了理论上的储备。

4 关于智能电网调度控制的思考

4.1 功能特征

智能调度控制系统借助先进的计算机软硬件技术、通信技术、电力系统分析和控制理论及技术,实现对一次电力系统的实时监视、分析和控制,以保证大电网的安全、经济运行和良好的电能质量。应该说,其任务和功能与传统电网调度控制系统并无本质区别,加上“智能”一词一方面是强调需要做得更好,另一方面是因为电网调度控制的环境和需求发生了变化,相应地赋予了其新的特征。本文认为,智能调度控制系统的“智能”至少应体现在5个方面。

a. EMS性能提升。这包括提高监控范围和质量;提升控制中心分析处理能力;具备防控大规模级联事故的强抗扰动能力,事故时具备快速自愈能力。

b. 灵活。大量可再生能源发电将逐步接入电网,可再生能源的特性(如风电的间歇性和随机性)要求调度控制具备更加灵活的调控手段和应对措施。

c. 兼容性强。体现在2个方面:一是有效容纳大量分布式发电的接入,实现集中式发电与分布式发电并存下的系统合理调度;二是具备电力市场实施过程中不同阶段的适应能力,实现市场环境下多种运行模式的无缝兼容和即插即用。

d. 优化能力。从全局角度加强优化技术的运用,在安全和经济间取得最佳平衡;通过优化的运行调度,挖掘现有发输电设备潜力提高资源利用效率。

e. 加强协调。就像互联网的出现将分散在世界各地的计算机连接,产生$1+1+1>N$的效果一样,智能电网也含有将现有电力资源和技术整合的理念。这其中加强协调是核心和关键。就调度控制而言,包括控制中心之间、控制中心与变电站之间的协调,也包括控制中心内部计算机之间、人与计算机之间、EMS高级应用之间的协调,变电站内部系统级和设备级的协调,还包括调度控制各专业之间的协调等。

4.2 关键技术

为实现智能调度控制的目标,6个方面的技术需要并有望得到大力研发。

4.2.1 数据采集

数据采集上,一方面要提高基于PMU的同步相量测量的质和量;另一方面要加强RTU/SCADA与PMU/WAMS的协调利用和统一管理。另外,传统基于集中控制的SCADA未来将有可能向分布式智能控制方向发展。厂站内元件装上独立的带操作系统的处理器,能够作为独立的智能体与其他处理器通信和合作,从而形成一个大的分布式计算平台。每个处理器都与连在元件上的传感器相连,能够感知系统元件运行状态信息,通过通信路径与邻近处理器交互,并报告给中央控制计算机。由此,电力系统监控的范围、速度、质量都有望得到大的提升。而且,由于元件实现了“即插即用”功能,无需运行人员人工维护新增元件设备,确保了数学模型数据与电网物理结构的实时一致性。就配电网而言,高级测量设施(AMI)将得到推广,用于提升配电网运行质量,并实现用户的更有效参与。

4.2.2 运行分析

运行分析上,研究适应调度管理体制的网络在线分布式建模技术;研究电网分析高级应用由稳态到动态、由离线到在线的实现,加强在线动态安全分析与预警的研究和应用;研究MAS等新型人工智能技术的应用;利用心理学、认知学等理论,充分融合现有运行状态分析与显示研究成果,构建基于地理信息系统(GIS)、人机工程及认知工程等的人机交互体系;研究系统在事故面前的自我感知、动态预警、自愈恢复能力;研究大规模可再生能源并网后的运行调度问题;推进运行风险评估技术的研究及应用。

4.2.3 控制决策

控制决策上,研究如何站在全局高度,借助优化技术,基于实时网络分析,加强在时间、空间、目标维度的协调,实现完整的电网闭环控制,这是智能调度控制的高级阶段。

4.2.4 变电站

变电站层面,深入研究、有序推广基于IEC61850的数字化变电站;研究变电站现有功能的整合;研发厂站内状态估计等厂站层面高级应用功能。

4.2.5 综合通信

综合通信上,大力发展光纤复合架空地线(OPGW)、光纤复合相线(OPPC)等光缆通信基础设施;研究基于“应用层组播”等的高性能广域通信中间件技术,实现即插即用的开放式架构和全面集成的高速双向通信。

4.2.6 调度管理

调度管理上,研究更有效的设备参数管理、生产运行管理制度;研究基于信息化的高效流程管理措施;专业管理上研究调度各专业的协调办公机制。

4.3 实施步骤

作为智能电网的神经中枢,电网调度控制系统的先进性和实用性是决定智能电网建设水平的关键之一。该领域的未来发展需要新观念和新技术的支持,但其建设过程不是各种先进技术的简单堆砌和加和,也不存在放之四海而皆准的一套系统。因此,

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在智能调度控制的探索上,笔者认为:首先要针对电网调度实际做好需求分析,注重特点和差异性,明确建设目标和重点;在此基础上,依据现有电网调度控制系统建设基础,根据电网公司人、财、物等资源状况,从条件相对成熟的地区和业务着手,有步骤、有重点地开展其智能调度系统建设试点,并在应用成熟后有序推广,逐步提升调度控制系统的智能化程度。

目前,世界各先进电网已经按步骤率先开展了智能调度控制的研究和实践,其中美国 PJM 互联电网的工作具有代表性[35],体现在:

a. 运行模式上,实现了"高级实时运行"目标,既包括机组调度系统(UDS)、暂态稳定分析和控制系统(TSA&C)、智能告警处理(IAP)等高级实时分析工具的常态化使用,也体现在控制中心内部运行方式分析、调度操作、市场运行的一体化办公模式;

b. 高级控制中心(AC^2)建设以开放、模块化的软件架构,灵活、标准化的应用服务功能,致力于解决极具挑战性的技术问题,既体现长远战略目标,又注重业务发展的连续性和可持续性;

c. 未来 Smart Grid 建设理念是通过整合信息技术和运行技术,合并发、输、配、用自动化数据,以实现"端对端"的系统观点,应该说,在智能调度控制的探索上,PJM 提供了先进的和有价值的经验,尽管国内各地智能电网建设的基础和环境不同,但上述理念对中国的智能电网建设具有启发意义。

智能电网的提法以及智能电网建设的推进对中国电力系统的科技进步有良好的推动作用,这是一次千载难逢的机遇,也是挑战,需要积极地在多方面开展研究工作。目前,南方电网公司已经立项开展"智能电网调度自动化发展方向及关键技术"研究,面向未来发展需求,立足南方电网实际,并积极吸纳各方先进经验,探索适合南方电网特点的调度智能化工作思路,为后续智能电网建设做准备。

5　结语

智能电网建设正在进行,智能调度控制系统建设是其中的重要和关键一环。为了进一步理解和把握智能调度控制技术的未来发展,本文回顾了电网调度控制架构和概念发展历程,综述了智能电网背景下调度控制研究新进展,并从功能特征、关键技术、实施步骤几方面提出了关于未来建设的思考[36-39]。

智能调度控制系统建设是一个长期和渐进的过程,新架构和概念的提出需要经过实践的检验并不断修正。中国的智能电网建设,一次电网的坚强与二次调度控制系统的智能是相辅相成的,技术层面和管理层面问题也是相辅相成的,均需要协调发展。

参考文献:

[1] European Commission. Strategic research agenda for Europe's electricity networks of the future[R]. Paris,France:European Commission Smart Grid Working Group,2007.

[2] EPRI. IntelliGrid:smart power for the 21st century[R]. Palo Alto,USA:EPRI,2006.

[3] DY-LIACCO T E. The adaptive reliability control system[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems,1967,86(5):517-531.

[4] DY-LIACCO T E. Real-time computer control of power system[J]. Proceedings of the IEEE,1974,62(7):884-891.

[5] DY-LIACCO T E. Modern control centers and computer networking[J]. IEEE Computer Application in Power,1994,7(4):17-22.

[6] 辛耀中. 新世纪电网调度自动化技术发展趋势[J]. 电网技术,2001,25(12):1-10.
XIN Yaozhong. Development trend of power system dispatching automation technique in 21st century[J]. Power System Technology,2001,25(12):1-10.

[7] DY-LIACCO T E. On the open road to enhancing the value of control centers to system operation and the utility enterprise[C]//IEE 2nd International Conference on Advances in Power System Control,Operation and Management. Hongkong,China:IEE,1993:24-29.

[8] 卢强. 新世纪电力系统科技发展方向——数字电力系统(DPS)[J]. 中国电力,2000,33(5):15-18.
LU Qiang. Digital power system-the power system technological trend in the new century[J]. Electric Power,2000,33(5):15-18.

[9] BOSE A. Control centers and their role in the blackout[C]// 2004 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Danver,USA:IEEE,2004:577-578.

[10] WU F F,KHOSROW M,BOSE A. Power system control centers:past,present,and future[J]. Proceedings of the IEEE,2005,93(11):1890-1908.

[11] 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.

[12] 杨胜春,姚建国,高宗和,等. 基于调度大二次系统的智能化电网调度辅助决策的研究[J]. 电网技术,2006,30(增刊):176-180.
YANG Shengchun,YAO Jianguo,GAO Zonghe,et al. Intelligent dispatching decision-making system based on integration of power dispatching automation system[J]. Power System Technology,2006,30(Supplement):176-180.

[13] 杨以涵,张东英,马骞,等. 大电网安全防御体系的基础研究[J]. 电网技术,2004,28(9):23-27.
YANG Yihan,ZHANG Dongying,MA Qian,et al. Study on the architecture of security and defense system of large-scale power grid[J]. Power System Technology,2004,28(9):23-27.

[14] 王明俊. 新一代能量管理系统的开发和分布式问题求解的新途径[J]. 电网技术,2004,28(17):1-5.
WANG Mingjun. Development of a new generation of energy management system and new approach to distributed problem solving[J]. Power System Technology,2004,28(17):1-5.

[15] 储真荣. "十一五"期间省级电网调度自动化系统的整体设计[J]. 华东电力,2007,35(2):28-31.
CHU Zhenrong. Integrated design for provincial grid dispatch automation system during "11th Five-Year" period[J]. East China Electric Power,2007,35(2):28-31.

[16] 张伯明. 现代能量控制中心概念的扩展与前景展望[J]. 电力系统自动化,2003,27(15):1-6.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

ZHANG Boming. Concept extension and prospects for modern energy control centers[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(15):1-6.

[17] 张伯明,吴素农,蔡斌,等. 电网控制中心安全预警和决策支持系统设计[J]. 电力系统自动化,2006,30(6):1-5.
ZHANG Boming,WU Sunong,CAI Bin,et al. Design of an early warning and security countermeasure system for electric power control centers[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(6):1-5.

[18] 张伯明,孙宏斌,吴文传. 3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):1-6.
ZHANG Boming,SUN Hongbin,WU Wenchuan. New generation of EMS with 3-dimensional coordination[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(13):1-6.

[19] 孙宏斌,张伯明. 能量管理系统中的电力信息学[J]. 电力系统自动化,2002,26(1):1-4.
SUN Hongbin,ZHANG Boming. Electrical informatics as applied to energy management system[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(1):1-4.

[20] SAIC Smart Grid Team. San Diego smart grid study final report[R]. San Diego,USA:Energy Policy Initiatives Center,2006.

[21] Bose A. The smart transmission grid[R]. Guangzhou,China: Southern Grid Power Dispatching and Communication Center, 2009.

[22] 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.

[23] 马韬韬,郭创新,朱传柏,等. 一种电网智能控制中心架构研究[J]. 电力科学与技术学报,2009,24(2):15-19.
MA Taotao,GUO Chuangxin,ZHU Chuanbai,et al. A novel architecture of power grid control center[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2009,24(2):15-19.

[24] 陈树勇,宋书芳,李兰欣,等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术,2009,33(8):1-7.
CHEN Shuyong,SONG Shufang,LI Lanxin,et al. Survey on smart grid technology[J]. Power System Technology,2009,33(8):1-7.

[25] 孙宏斌,张伯明,吴文传,等. 面向中国智能输电网的智能控制中心[J]. 电力科学与技术学报,2009,24(2):3-7.
SUN Hongbin,ZHANG Boming,WU Wenchuan,et al. Smart control center for Chinese smart transmission grids[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2009,24(2):3-7.

[26] 严胜,姚建国,杨志宏,等. 智能电网调度关键技术[J]. 电力建设,2009,30(9):1-4.
YAN Sheng,YAO Jianguo,YANG Zhihong,et al. Study on key technologies in smart grid dispatching[J]. Electric Power Construction,2009,30(9):1-4.

[27] 赵传霖,吴文传,张伯明. 面向新一代能量管理系统的集群计算中间件[J]. 电力系统自动化,2008,32(18):14-19.
ZHAO Chuanlin,WU Wenchuan,ZHANG Boming. Cluster-based distributed middleware for new generation of EMS[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(18):14-19.

[28] 张文亮,刘壮志,王明俊,等. 智能电网的研究进展及发展趋势[J]. 电网技术,2009,33(13):1-11.
ZHANG Wenliang,LIU Zhuangzhi,WANG Mingjun,et al. Research status and development trend of smart grid[J]. Power System Technology,2009,33(13):1-11.

[29] 艾琳,华栋. 电力系统智能型调度[J]. 电力自动化设备,2008,28(10):83-86.
AI Lin,HUA Dong. Power system intelligent dispatch[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(10):83-86.

[30] 王明俊. 自愈电网与分布能源[J]. 电网技术,2007,31(6):1-7.
WANG Mingjun. Self-healing grid and distributed energy resource[J]. Power System Technology,2007,31(6):1-7.

[31] 郭志忠. 电网自愈控制方案[J]. 电力系统自动化,2005,29(10):85-91.
GUO Zhizhong. Scheme of self-healing control frame of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(10):85-91.

[32] 任江波,郭志忠. 电网自愈控制中的状态估计模式研究[J]. 电网技术,2007,31(3):59-63.
REN Jiangbo,GUO Zhizhong. A study on state estimation model for self-healing control of power grid[J]. Power System Technology,2007,31(3):59-63.

[33] 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.

[34] 赵建国,薛禹胜. 南方电网综合防御框架的构思[J]. 南方电网技术,2008,2(1):1-7.
ZHAO Jianguo,XUE Yusheng. Design of blackout defense framework for China southern power grid[J]. Southern Power System Technology,2008,2(1):1-7.

[35] TONG Jianzhong. Advanced real time operation concept towards smart grid[R]. Guangzhou,China:China Southern Grid Power Dispatching and Communication Center,2009.

[36] 韩学山,杨明,张利. 价值调度推进智能化电网发展的思考[J]. 电力系统自动化,2010,34(2):5-9.
HAN Xueshan,YANG Ming,ZHANG Li. Contemplation of smart grid development promoted by value based dispatch[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(2):5-9.

[37] 张智刚, 夏清. 智能电网调度发电计划体系架构及关键技术[J]. 电网技术,2009,33(20):1-8.
ZHANG Zhigang,XIA Qing. Architecture and key technologies for generation scheduling of smart grid[J]. Power System Technology,2009,33(20):1-8.

[38] 李威,丁杰,姚建国. 智能电网发展形态探讨[J]. 电力系统自动化,2010,34(2):24-28.
LI Wei,DING Jie,YAO Jianguo. The essential cause and technical requirements of the smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(2):24-28.

[39] 林宇锋,钟金,吴复立. 智能电网技术体系探讨[J]. 电网技术,2009,33(12):8-14.
LIN Yufeng,ZHONG Jin,WU Felix. Discussion on smart grid supporting technologies[J]. Power System Technology,2009,33(12):8-14.

(编辑:康鲁豫)

作者简介:

张 强(1980-),男,山东郯城人,博士后,目前从事电网运行与控制、智能调度相关工作(E-mail:zq8027@sina.com);

张伯明(1948-),男,山西霍县人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统分析和调度自动化(E-mail:zhangbm@tsinghua.edu.cn);

李 鹏(1973-),男,湖南永兴人,教授级高级工程师,博士,目前从事电网运行与控制、调度自动化相关工作(E-mail:lipeng@csg.cn)。

(下转第35页 continued on page 35)

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

519[C]// Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference. Chicago, USA: [s.n.], 2002: 950-954.

（编辑：李　玲）

作者简介：

金维刚（1983－），男，河南郑州人，博士研究生，研究方向为电能质量分析与控制（E-mail：jin101866@163.com）；

刘会金（1952－），男，湖北大冶人，教授，博士研究生导师，研究方向为电能质量分析与控制；

李智敏（1966－），男，河南三门峡人，高级工程师，硕士，长期从事电力生产技术监督和技术管理工作；

乔中华（1965－），男，河南三门峡人，高级工程师，长期从事电力生产技术监督和技术管理工作；

季安平（1973－），男，河南三门峡人，高级工程师，长期从事电力生产技术监督和技术管理工作；

王惠丽（1969－），女，河南三门峡人，工程师，长期从事电力生产技术监督工作。

Interharmonic measurement of three typical interharmonic sources and result analysis

JIN Weigang[1], LIU Huijin[1], LI Zhimin[2], QIAO Zhonghua[2], JI Anping[2], WANG Huili[2]

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. Sanmenxia Power Supply Company, Sanmenxia 472000, China)

Abstract: The interharmonic detection equipment is introduced, including the iterative DFT algorithm, hardware and software design, calibration method and experimental results. The concept of "interharmonic record" is presented to measure the interharmonic content of power grid. Practical interharmonic measuring is carried out for three kinds of typical interharmonic sources and the experimental results are analyzed, which shows that different interharmonic sources have different interharmonic components. According to the experimental results, it is pointed out that IEC61000 standards have defects in applications and four frequency intervals should be set and each has its own limit value.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (50677045).

Key words: interharmonic source; interharmonic record; measurement; interharmonic standard; frequency interval; limit value

（上接第 6 页 continued from page 6）

Review of structure and concept evolution of dispatch and control system for smart grid

ZHANG Qiang[1], ZHANG Boming[1], LI Peng[2]

(1. State Key Lab of Power System, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. CSG Power Dispatching and Communication Center, Guangzhou 510623, China)

Abstract: Smart grid is the ideal solution for future power system. As the nerve center of smart grid, the dispatch section, mostly, should be intelligent to embody the intelligence features. The structure and concept evolution of dispatch and control system are reviewed in three parts: the representative researches from 1960s to the beginning of 21st century are reviewed, including the power system security control mode, the hardware and software platform of EMS (Energy Management System), the security defense system of power grid and the theory and practice of new generation EMS; the new developments and concepts of smart grid dispatch and control are discussed, including the architecture and core features of smart grid dispatch and control system and the specific techniques such as self-healing power grid, multi-agent system and dynamic security warning; the future development of smart grid dispatch and control system is prospected in three aspects, including the functional characteristics, key technologies and implementation steps.

This work is supported by the China Southern Power Grid Projects (K0812).

Key words: power system; smart grid; power dispatch and control; energy management system

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net