

软件定义电力通信网技术

郭经红 刘 川 郁小松 陈 雷 徐 鑫 李炳林 著



科学出版社

软件定义电力通信网技术

郭经红 刘 川 郁小松 陈 雷 徐 鑫 李炳林 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

SDN是近年来网络领域的热点,业界普遍认为它是未来网络发展的方向。

本书紧跟全球能源互联网发展趋势,针对网络领域炙手可热的新技术,从总体介绍、技术与应用、标准与测试三大部分进行介绍。第一部分简述了智能电网的概念、电力通信网的发展历程和其对软件定义化的需求;第二部分介绍了SDN与SDON的核心技术体系与关键使能技术,并基于电力通信网的应用场景,开展技术应用分析;第三部分对近期SDN的研究重点与最新研究进展进行介绍,并详细分析针对SDN的测试技术。

本书由国家电网公司重大科技项目“面向电力通信多域交互的软件定义光网络关键技术研究”资助。

本书可作为电力系统一线科研人员的培训教材与参考书籍,也可作为高校电力自动化、信息通信、计算机等相关专业研究生选修课的教材与参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

软件定义电力通信网技术 / 郭经红等著. —北京: 科学出版社, 2017.6
ISBN 978-7-03-053265-7

I. ①软… II. ①郭… III. ①电力通信网 IV. ①TM73
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 128538 号

责任编辑: 潘斯斯 张丽花 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 6 月第一次印刷 印张: 11 3/4

字数: 266 000

定价: 78.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

进入新世纪后，随着新能源、分布式能源、新型共用能方式的发展与丰富，电网开始向新一阶段发展，智能电网成为全球电力行业的最大趋势。特高压输电使电网向更广域互联发展，指向全球能源互联网方向。分布式电源、汽车充电设施、微电网、新型供用电关系、配电网自动化程度提升，则引导电网向智能配电网方向发展。这两方面是电网下一阶段的主要发展方向，也是电网二次系统、电力通信网演进的动力。

电力通信网经历了电路到网络的演进过程，这一过程与电信行业有相似之处。但即使电网向网状网发展，电力通信网从 L2 局域网向更高层次的广域网发展，其工控系统通信网、垂直行业通信网的本质属性依然不会改变。因此，电力通信网向广域网发展，并不会简单地复制电信互联网从 L2 向 L3 演进的过程，而是要在广域通信网和工控通信网的融合中寻找一条新的路径。

SDN 在电信行业已经被普遍认为是未来网络发展的方向，而在电力通信网中，我们发现无论是从技术层面、建设运行层面还是生产组织层面而言，SDN 也无疑是电力通信网智能化发展的可行性方案之一。由于电力系统是承载国家经济命脉的重要工控系统，因此，其对于新技术的应用应该非常谨慎，也必将经历相对漫长的论证过程。但无论作为一种技术还是作为一种理念，我们都将不遗余力地将 SDN 逐步渗透到电力通信网智能化发展的进程中。

感谢为本书编写做出重要贡献的以下人员：

郭经红、刘川、郁小松、陈雷、徐鑫、李炳林、张刚、黄辉、黄在朝、张浩、赵永利、张杰、喻强、虞跃、吕立冬、陈磊、卜宪德、黄红兵、娄征、刘桐、王小雨、鲁旭、胡致远。

本书的第一章、第三章、第四章、第五章、第八章由全球能源互联网研究院团队编写，第二章由国网重庆市电力公司团队编写，第六章、第七章由北京邮电大学团队编写，第九章、第十章由中国信息通信研究院团队编写。

由于智能电网相关技术、SDN/SDON 相关技术发展迅速，而成书时间仓促，书中难免会有疏漏之处，敬请读者批评指正。

作 者

2017 年 3 月

目 录

前言

第一部分 总体介绍

第 1 章	智能电网概述	1
1.1	智能电网的定义与技术特征	1
1.2	电网智能化发展方向	2
1.3	智能电网的建设重点	3
第 2 章	电力通信网发展历程	5
2.1	一次电气网络	5
2.2	电网二次系统	6
2.3	电网通信系统	6
2.4	电网生产调度与电网企业经营管理	8
2.5	本章小结	8
第 3 章	电力通信网对“软件定义”的需求	9
3.1	电力通信网与电信通信网发展历程的比较	9
3.2	电力通信网的发展趋势	10
3.3	未来电力通信网在电信行业中的位置	11
3.4	软件定义网络与电力通信网的适配性	12
3.4.1	SDN 在电力通信网中的应用优势	12
3.4.2	SDN 电力应用的差异化需求	13
3.5	本章小结	14

第二部分 技术与应用

第 4 章	软件定义网络简介	15
4.1	SDN 产生背景及技术特征	15
4.2	SDN 架构定义	18
4.3	SDN 产业现状	22
4.4	本章小结	23
第 5 章	软件定义网络关键技术	24
5.1	SDN 的基本构件	24
5.2	SDN 交换机	28
5.2.1	工作原理	28
5.2.2	OpenFlow 交换机	28

5.2.3	OpenFlow 交换机与传统交换机的差异	31
5.3	SDN 控制器	32
5.3.1	SDN 控制器种类	32
5.3.2	SDN 控制器架构分析	36
5.3.3	SDN 控制器相关功能模块	37
5.3.4	不同 SDN 控制器的比较	39
5.3.5	SDN 控制器的设计要素	40
5.4	SDN 接口	40
5.4.1	南向接口	41
5.4.2	北向接口	44
5.5	OpenFlow 协议及其应用实现	46
5.5.1	OpenFlow Switch Specification 协议概述	46
5.5.2	OpenFlow Controller 实现分析	63
5.5.3	OpenFlow Controller 简单使用分析	70
5.6	本章小结	73
第 6 章	软件定义光网络简介	74
6.1	SDON 定义	74
6.2	SDON 主要技术特征及核心优势	75
6.2.1	SDON 主要技术特征	75
6.2.2	SDON 核心优势	77
6.3	SDON 关键使能技术	77
6.3.1	SDON 物理层关键使能技术	77
6.3.2	SDON 网络层关键使能技术	83
6.4	SDON 发展前瞻和面临挑战	94
6.4.1	SDON 发展前瞻	94
6.4.2	SDON 面临挑战	96
6.5	本章小结	96
第 7 章	软件定义光网络(SDON)关键技术	97
7.1	SDON 分层与功能模型	97
7.2	传送平面概述	99
7.2.1	OXC 技术	100
7.2.2	OADM 技术	102
7.2.3	ROADM 技术	103
7.2.4	硬件协议代理模块	104
7.3	控制平面概述	107
7.3.1	控制平面功能要求	107
7.3.2	控制平面的层次化控制结构	109
7.3.3	SDON 多层网络控制架构	109

7.3.4	SDON 多域网络控制架构	111
7.4	应用平面概述	111
7.4.1	基于 SDoN 应用层的业务逻辑处理模型	112
7.4.2	基于 BoD 应用的创新 APP	116
7.4.3	基于 VON 应用的创新 APP	119
7.5	本章小结	123
第 8 章	软件定义电力通信网技术应用分析	124
8.1	传输网应用分析	124
8.1.1	电力光纤的故障定位与损伤感知	125
8.1.2	电网分层分域架构下的层域协同	126
8.1.3	电力传输网网间融合	128
8.2	业务网应用分析	129
8.2.1	IP 网络中路由的集中计算	130
8.2.2	网络的全景感知与拓扑可视	130
8.2.3	电网业务流量的弹性调度	131
8.2.4	电网特色业务的策略预配置	131
8.2.5	电网企业与其他企业业务网网间对接	132
8.3	支撑网应用分析	132
8.3.1	SDN 控制器对传统网管的影响	132
8.3.2	智能控制与深度管理的融合	133
8.4	接入网应用分析	133
8.4.1	电力通信接入网发展背景下的 SDN 技术	133
8.4.2	配电可编程网络演进	134
8.5	电力 SDN 应用案例	137
8.5.1	国网公司三地数据中心 SDN 示范网络	137
8.5.2	国网上海市电力公司 SDN 试点应用	138
8.5.3	国网重庆市电力公司 SDN 试点应用	139
8.5.4	中国电科院云计算中心 SDN 网络项目	140
8.5.5	国网宁夏电力公司数据中心改造项目	141
8.5.6	国网江西省电力公司九江供电公司配网数据网项目	141
8.5.7	国网辽宁省电力公司广域网 SDN 项目	142
8.6	本章小结	143

第三部分 标准与测试

第 9 章	软件定义网络标准化现状	144
9.1	标准组织及涉及 SDN 的研究重点	144
9.1.1	开放网络基金会 ONF	144
9.1.2	国际互联网工程任务组 IETF	146

9.1.3	国际电信联盟 ITU	147
9.1.4	光网络互通论坛 OIF	148
9.2	SDN 标准组织的最新研究进展	148
9.2.1	ONF 最新研究进展	148
9.2.2	ITU 最新研究进展	149
9.3	本章小结	150
第 10 章	软件定义网络测试技术	151
10.1	软件定义网络测试需求	151
10.1.1	互联互通测试	151
10.1.2	协议一致性测试	151
10.1.3	业务功能测试	152
10.1.4	性能测试	152
10.2	测试相关的开源项目	153
10.2.1	Floodlight/OFTest	153
10.2.2	ONOS/TestOn	157
10.2.3	OpenDayLight/Integration	159
10.2.4	Cbench	161
10.3	软件定义网络测试技术	163
10.3.1	不同测试环境选择	163
10.3.2	性能测试中测试参考点的选择和技术实现	164
10.3.3	自动化测试设计	166
10.4	本章小结	168
参考文献		169
附录 缩略语		176

第一部分 总体介绍

第 1 章 智能电网概述

当前,世界各国为应对气候变化、保障能源安全,日益重视发展清洁能源和提高能源利用率,世界能源发展呈现出清洁化、低碳化、高效化的新趋势。欧美发达国家普遍加快了新能源、新材料、信息网络技术、节能环保等高新技术的研究和新兴产业的发展。作为实现低碳电力的基础与前提,智能电网技术近年来在很多国家得到快速发展,有力地促进了电网的智能化。智能电网已成为下一代电网发展的新趋势,未来还将建设“互联网+”智慧能源网^[1]。

我国电力工业也面临着新的形势,能源发展格局、电力供需状况、电力发展方式正在发生着深刻的变化。通过互联网技术将设备数据化,并将所有主体自由连接,进而打造能源互联网的“操作系统”,来统筹管理各种资源,产生显著区别于原有能源系统的业态和商业模式,必将促进能源的市场化、高效化和绿色化,促进大众创新创业。

1.1 智能电网的定义与技术特征

为了满足经济社会发展的新需求和实现电网的升级换代,以欧盟和美国为代表的一些组织和国家提出了智能电网的概念,政府机构、电力企业、电气设备生产商和 IT 业界厂商也纷纷响应。智能电网被认为是当今世界电力系统发展变革的新的制高点,也是未来电网发展的大趋势^[2]。

由于能源特点、电网特质以及社会需求的差异,各国对智能电网的定义不尽相同。如何正确认识智能电网,制定符合本国能源经济需要的电网发展规划,并明确具体的技术需求和突破点,是建设智能电网的关键^[3]。

1998 年,美国电力科学研究院(EPRI)推出了复杂交互式网络/系统(CIN/SI),这可以认为是美国智能电网的雏形。21 世纪初,EPRI 正式提出 IntelliGrid 的概念,并启动了相关项目,而美国能源部(DOE)当时则提出了 GridWise。虽然二者称谓不同,但内涵和目标基本一致。此后,在 2004~2005 年,美国智能电网研究开始蓬勃发展,DOE 先后发布了 Grid 2030、“国家输电技术路线图”等,阐述了美国未来国家电网远景和技术战略,开展了 GridWise 和“现代电网(MGI)”等项目。在随后几年中,美国电力企业开始在智能电网领域开展了一系列探索。

而欧洲则采用了 SmartGrid。为了应对近年来欧洲电力设备老化、跨欧电力市场建设,以及日益增长的可再生能源并网发电的挑战,欧洲委员会于 2005 年正式成立智能电网(Smart Grids)欧洲技术论坛,希望把电网转换成用户和运营商互动的服务网,提高欧洲输配电系统的

效率、安全性及可靠性，并为分布式和可再生能源的大规模应用扫除障碍。2006 年，论坛提出了智能电网远景，之后制定了战略研究议程，指导欧盟及其各国开展相关项目，推进智能电网的实现。

与 IntelliGrid 和 GridWise 相比，SmartGrid 更为电力业界和学术流派所认同。smart 一词最传神的内涵是“巧”，具有聪明(intelligent)和灵活(flexible)两方面的含义。灵活是指具有坚强可靠特质的灵活性，富有可持续性和应变能力。坚强平台和先进技术的有机协调才能充分提升“巧”的能力。因此，如果一味强调智能(intelligence)而忽视对物理基础的夯实，智能电网建设将会走向误区，intelligence 也只能是一种空中楼阁式的梦想，而缺乏现实可行性。建设智能电网，并不是说现在的电网就不具备智能性，事实上，电力工作者一直在为电网的智能化而努力。今后一段时间内，信息化、自动化和互动化将作为智能电网的主要特征而为人们所关注。

信息化、自动化、互动化是统一坚强智能电网的基本技术特征。信息化是统一坚强智能电网的实施基础，实现实时和非实时信息的高度集成、共享与利用；自动化是统一坚强智能电网的重要实现手段，依靠先进的自动控制策略，实现电网运行控制自动化水平的全面提高与管理水平的全面提升；互动化是统一坚强智能电网的内在要求，实现电源、电网和用户资源的友好互动和相互协调^[4]。

智能电网是适应未来发展并寄托人们美好愿望的现代先进电力系统的统称，并且首先它应当是一个坚强的电网。坚强是智能电网的基础，智能是坚强电网充分发挥作用的关键，两者相辅相成、协调统一。灵活性贯穿于电力系统全过程，如灵活接入可再生能源(包括大规模和分布式)、灵活地安排运行方式、让用户灵活地安排用电。同样，坚强可靠的网架也是电网安全灵活运行的保障^[5]。

1.2 电网智能化发展方向

随着信息通信技术的升级、智能控制技术的发展、电网运行技术的成熟、互联网技术的应用，智能化发展的内涵在不断丰富，呈现以下发展方向。

1) 电网运行控制和调度的智能化水平不断提高

信息化、自动化技术在电网运行控制和调度领域的应用不断变化，大电网建模仿真的水平也不断提高，正在推动电网观测从稳态到动态、电网分析从离线到在线、电网控制从局部到整体的技术跨越。未来先进信息通信技术、电力电子技术、优化和控制理论与技术、新型电力市场理论与技术等不断融合，成为国家泛在智能电网安全经济运行的基础，最终建立灵活、高效的能源供应和配置系统，形成安全、可靠的智能能源网络。

2) 智能电网下的互动将持续深入

互联网、物联网等网络技术的不断发展，以及电力光纤入户、智能电表等设施的不断部署和提升，大大加强了智能用电互动化的硬件平台，为用电多样化、智能化、互动化业务提供了通信保障；大数据分析、云计算等现代信息处理技术，使智能用电互动化可以充分挖掘海量数据所蕴涵的价值，推动互动业务的综合化、一体化、定制化，更好地服务于社会 and 经济发展。以分布式发电为代表，用户对于发电和用电的自主性和选择性增强，用户逐渐成为智能电网运行和互操作的重要参与主体。

3) 智能电网从单纯的电力传输网络向智能能源信息一体化基础设施扩展

智能电网本身所具有的网络化优势以及电力通信网络所积累的信息通信资源，可以在社会生产生活的诸多领域共享利用，促进能源、信息设施实现一体化的网络资源集成复用，电网的信息数据资源可以通过灵活的增值服务和商业模式创造新的价值。各类智能终端、新型用电设备将会大量接入智能电网，形成电力、信息双向流动的网络，智能电网从电网本体拓展到包含能源转化和利用设备的智能电力系统。

4) 智能电网的泛在属性越来越凸显

人类社会对于能源的充足、可靠、清洁、便捷供应的要求不断提高，促使智能电网向泛在网络的方向不断发展。用户在享受灵活供电服务的同时，也期望获得丰富多元、全方位打破时间和空间局限的服务内容，这样的需求推动智能电网的发展。智能电网以用户为中心，通过不断融合新的网络，注入新的服务、业务和应用，逐步成为服务社会公众的基础设施和泛在网络，同时提供面向行业的基础应用，形成社会资源综合优化利用的价值网络。

1.3 智能电网的建设重点

电网智能化发展的建设重点是全方位提升发电、输电、变电、配电、用电、调度、通信信息各个环节的智能化水平^[6]。

1) 发电环节

发电环节的重点是要促进电源结构优化，实现源网之间的协调，提升适应不同类型清洁能源发电接入的能力，促进清洁能源开发和消纳。它主要包括电源网厂协调、清洁能源发电并网和运行控制、大规模储能三大领域。

2) 输电环节

输电环节的重点是要应用先进输电技术，不断提升输电能力和效率，实现输电线路的可控、能控、在控，提高电力系统稳定运行水平。它主要包括先进输电技术应用、输电线路监测、输电线路管理设计三大领域。

3) 变电环节

变电环节的重点是变电站智能化升级，提高对电网优化调度和运行管理的支撑，提升变电站资产管理和运营水平。它主要包括设备智能化、变电设备监测和全站信息化三大领域。

4) 配电环节

配电环节的重点是提高配电网的供电可靠性、系统运行效率以及终端电能质量，实现分布式发电、储能与微电网的并网与协调优化运行，实现高效互动的需求侧管理。它主要包括配电网调控、分布式及微电网协调控制、配电网运维管理三大领域。

5) 用电环节

用电环节的重点是建设和完善智能双向互动服务平台和相关技术支持平台，实现与电力用户能量流、信息流、业务流的融合与双向互动。它主要包括用电信息采集与分析、多元互动服务、新型用电设备三大领域。

6) 调度环节

调度环节的重点是通过调度环节智能化建设，实现电网调度的信息化、自动化、互动化，全面提升电网调度的资源优化配置能力和安全经济运行水平。它主要包括智能调度、电网运行分析、特大型电网控制三大领域。

7) 通信信息

通信信息的重点是强化通信网络，形成支撑各个环节及业务的信息系统，搭建信息共享透明的业务协同和互操作平台，提升管理的现代化水平。它主要包括通信网络、信息系统、新技术应用三大领域。

第2章 电力通信网发展历程

电网是人类社会发展至今规模最大的实体网络之一，从最初的小范围局域电网发展到如今大区互联、高中低压结构清晰的跨区域级网络，已基本覆盖了人类活动的主要区域。这样一张巨型的实体工业网络，其生产控制、管理调度都离不开及时准确的信息交互，而电力通信网则是隐藏在其背后的基础通道网络，在电网生产管理中发挥着重要作用^[7]。

我国电网发展至今，已基本形成了结构可靠、性能稳定、覆盖全国主要区域的大型电网，正向智能电网、能源互联网发展。这一过程中，在一次电网不断完善结构、扩大规模、提升能力的同时，电网二次系统也伴随一次电网的发展节奏适时演进，从初期的电气逻辑，发展到工业现场自动化，进而向网络级的广域工控系统发展。而电力通信网则是其中的重要组成部分，同样也随着电网的发展而不断演进。

2.1 一次电气网络

上世纪三四十年代，我国的高压输电线路主要分布在东北地区城市、大型工业集中区域，其余各地主要以本地配电网为主。

上世纪五六十年代，国家社会进入工业化建设阶段，社会用电量大增，火力、水力发电事业发展迅速，大型电源点不断丰富，高压输电线路相应增加，电网逐渐从本地、局域电网向区域级的大型现代电网发展，比较典型的有东北电网向华北扩展，形成了华北电网，建成了我国首个区域级大型能源网络。

至上世纪70年代，随各地方电网的不断完善及高压输电线路的丰富，电网继续向区域级大电网发展，华北、华东、东北三大电网逐渐成形，电网也基本形成了发输配变用、220kV到380V高中低压结合的合理结构，电网已经成为各地经济社会发展的坚实基础。但由于我国幅员辽阔，各地资源结构、经济社会发展不均衡，所以不论是区域高压电网，还是中低压配电网，都常有不稳定的现象发生。

到上世纪80年代，我国电网发展经历了500kV特高压建设这一里程碑事件，500kV特高压输电线将各区域220kV电网互联，形成了区域互联的国家级电网，极大地平衡了不同地区的能源供求分布不均衡问题，我国电网从此进入以500kV-220kV为骨干架构的超大型电网时代^[8]。同时，伴随着各地配电网的持续完善，到今天，我国电网已经形成了结构合理、输电网和配电网都十分稳定的世界领先的一次电网。

进入新世纪后，在原有一次电网基础上，我国电网继续向更高电压等级、更广泛互联、交直流混合组网发展，750kV、1000kV特高压陆续出现，国家之间互联、洲际互联提上日程，特高压交直流混合组网投运，这些都反映了我国电力行业面向未来的发展决心和敢于创新的领先精神。同时，新能源、中低压分布式电源、电动汽车充放电设施等配网侧^[9]的新型供用电技术和商业项目也不断丰富，促使我国电网开始向智能电网发展，也为我国电网建设指出了一条不同于既往思路的新方向。

2.2 电网二次系统

电网二次系统与一次电气网络相伴相生,从电气工程正式走入现代意义上的电网,从开发现实意义上的商业运营开始,电网的生产管理就被提上日程,二次系统应运而生。可以说,电网二次系统的出现、发展与一次电气网络息息相关,为一次电网服务而生,而同时它又是电网通信系统的服务对象。从这个意义上说,电网二次系统是连接一次电网和电网通信网的桥梁,电力通信网的发展历程和服务目标,就是电网二次系统的发展历程和通信需求,对电网二次系统发展历程的梳理,有利于了解电网通信系统发展的规律。

我国电网二次系统伴随一次电网发展而演进。上世纪上半叶,世界还处于机械、电气时代,早期电网自动化程度并不高,二次设备主要是电厂、变电站内依附于关键一次设备上的电气逻辑设备,只能实现遥信、遥测两类用于辅助电网生产操作人员监视、管理一次设备工作状态的功能,而最终的电网生产调度决策、具体操作,都是由人工执行的。此时的电网二次系统,主要体现为电气逻辑、模拟量监测的个体设备,或者由多个这样的设备点对点简单互联形成的小型电气自动化系统,比如早期的继电保护。

上世纪 70 年代后,大规模集成电路技术、微电子技术迅猛发展,电子时代成为世界潮流,欧美发达国家电力自动化技术相应发展,电网二次设备从电力模拟逻辑设备逐渐演变为电子式传感器的数字逻辑设备。同时,伴随计算机技术的发展,二次设备向二次系统演进,出现了由远方电子电气终端和集中式微机监控主站组成的调度自动化系统,二次系统演进为工业局域自动化系统,功能也由原来的遥信、遥测辅助人工决策操作,发展出新的遥控、遥调功能,实现了全面的自动化监控。就此,新一代电力二次系统正式登场,电力生产调度自动化进入工控系统的新阶段^[10]。

上世纪 80 年代,我国电网一方面着力于一次网架全国互联、结构完善的工作,另一方面也启动了电网二次系统的提升工作。上世纪 80 年代中后期,东北、华北、华东、华中四大电网陆续引进国际最先进的调度自动化技术,拉开了我国电网新一代二次系统建设的序幕。此后,国内相关研究机构和企业持续引进技术,消化吸收,形成了自有技术和产品,目前已实现了国内自行掌握相关技术和系统开发生产能力,并参与到国际行业标准化组织的标准规划、制定工作中。

到目前,我国电网二次系统在高压调度自动化方面已处于国际领先地位。继电保护、调度自动化等系统在全国范围实现了推广应用。电力调度形成了区域电网、省电网两级调度,集中化程度高。变电站运行控制达到可无人值守程度,人工调度操作已不作为日常操作,而更多地作为应急手段,自动化程度高^[11]。电网二次系统进入一个阶段性成熟期——成熟的工控局域系统。

2.3 电网通信系统

一次电网发展引出了电网二次系统的诞生,二次系统以电网通信系统为交互信息的通信通道,因此,电网通信系统的发展与一次电网、二次系统的发展有紧密的关系。

通过前面章节中对一次电网、二次系统的演进过程梳理不难看出,一次电网经历了局域电网到区域电网两个层次的演进,其调度生产控制存在本地监测加人工操作和自动集中监控

两种状态，相应的电网二次系统则对应点对点模拟辅助监测系统和点对多点数字集中监控系统两种形式，电网通信系统的发展也可以按此分为两个阶段——电路通道阶段和局域网络阶段。

我国电网中，仍可以上世纪七八十年代为分界。前一阶段中，电网二次系统以点对点电气模拟监测系统为主，电厂、变电站内外各监测节点之间由点对点的电路通道连接，电气逻辑设备直接在物理通道上实现相连两点之间的模拟电气量或告警信息传递，仅实现遥信、遥测功能。相应使用简单的点对点电路通信方式，如四五十年代使用的载波通信、后期出现的微波通信、架空电缆、光纤等^[12]，虽然设备类型随时代发展不断变化，性能有所提升，但逻辑上定性的都是直连电路通道。此外，为服务人工调度指挥事务，电网内还出现了调度音频电话。这样，电气自动化时代的电网通信系统就形成了两条主线：用于二次系统的点对点电路通信和用于人工调度指挥的语音电话通信。

这一阶段的电网通信系统并未形成网的概念，除调度电话外，也并没有在电网中成为相对独立的环节，更多体现为二次系统的内部通道，作为二次系统的一个组成部件存在。这种状态看起来简单，但却体现了电网通信系统的根本内涵——电网通信是电网生产过程的一个环节，是从属于一次电气网络、二次自动化系统的支撑组件，必须按照电网生产流程要求而构建、运行、管理。这种垂直行业的根源性要求与目前电信行业网络强大而业务弱散，层间互盲透传的特征有很大区别。

上世纪八十年代后，随我国电网二次系统演变到集中式的局域自动化系统阶段，我国的电网通信系统也相应上升到以太网层次。在新一代调度自动化系统中，除继电保护等本地化、分布式自动化仍然采用一层电路通道外，间隔层到站控层、站控层到省级主站环节的通信网均已采用了以太网方式构建，以满足调度自动化系统集中式、网络化的信息交互和处理方式的要求^[13]。

这一阶段的电力通信网，具有了网的概念。在原来的点对点连线节点处增加网络交换机，将原本的通道连线组合为网络，这使得通信系统从线的连接变为逻辑组网层次，在电网中成为独立存在的网络平台，至少在工程上与一次电网、二次系统并列，成为相对独立的一套系统。电网通信系统正式成为电网企业的一个独立专业部门，并且将这种状态保持到现在。

以太网形式的电力通信网，是适配以调度自动化系统为代表的电网二次系统需求的组网形式。其以专网形式在变电站内部、变电站之间构建，工程成本在电网企业可接受范围内；以地市、省为规模组建，网络规模在以太网技术性能范围内。当前技术水平下，该规模下的通信速率、实时性有良好保障，能满足调度自动化系统的高速、实时要求。专网提供相对安全和可靠的保障，达到电网工业级的安全可靠要求。可以说，以太网是与现阶段高压电网调度生产自动化系统非常适配的技术体制，在当前甚至今后一定阶段，都将是我国高压调度生产自动化系统的通信组网模式^[14]。

到目前为止，与一次电网、二次自动化系统进入一个阶段性成熟期相对应，我国电网通信网也进入了一个阶段性成熟期，即电力工控局域通信系统。该通信网由 3 部分构成：以太网、电路通信系统和调度电环。以太网用于变电站、电厂到省级、区域级电力调度中心之间的通信，构成城际网级别的局域网，为调度自动化系统服务。在变电站内部的站控、间隔层也使用以太网构建本地局域网，实现变电站内部自动化。电路通道以光纤或 2M 形式为主，主要用于相邻变电站之间的继电保护等本地自动化业务。调度电话则用于人工调度指挥。虽然继电保护业务也可以纳入广义的调度自动化系统中，但三者总体上还是相对独立的，呈垂直管道结构^[15]。

2.4 电网生产调度与电网企业经营管理

前面章节按一次电网—二次自动化系统—通信系统的逻辑对电网通信网发展历程进行了梳理,总体上划分为点对点电路通道阶段和电力工控局域通信网阶段。熟悉行业情况的读者可能会注意到,这一分析思路只涉及了电网的生产运行领域,并未涉及电网企业的管理经营领域,现实中我国电网公司的通信网也远比上节中介绍的更庞大而丰富。因此,本节将就该问题进行梳理。

作为电网企业,涉及电网生产运行和企业经营管理两方面工作,二者在业务上是有较明确分界的,分别有各自的通信需求^[16]。电网生产运行始终延续工控系统路线,其通信网沿袭工控通信网路线,是本章前节中梳理的内容。而企业经营管理业务,则与目前电信行业所服务的民用、商用领域在技术上并无本质区别,可归入企业级、商业级通信范畴。在我国电网企业中,出于工作内容的重要性和企业实力的考虑,国家电网公司和南方电网公司均建设有自己的企业经营管理用通信网。

上世纪80年代,我国电网企业开始推行电子化办公,电网企业开始构建办公场所的计算机通信网络以及行政电话系统,就此启动企业经营管理用通信网建设。上世纪90年代后,各类管理系统向远程互联、互联网化发展,电网企业各大办公场所之间、各级电网企业之间逐步实现管理经营系统的互联互通,电网企业逐渐形成了企业自有的数据通信网。

目前,我国电网企业已经实现了基本覆盖全部电网办公管理场所、网段分层分级的网状数据通信网,并且,随电信技术发展和企业管理办公业务发展需要,该通信网也逐步形成了完善的承载网、业务网、支撑网结构,逐渐走向全IP、综合业务的互联网级别通信网。其总体结构与目前电信运营商网络结构相近,通信网与业务网之间为透明关系,这与前节中电网生产调度用通信网的垂直管道结构有本质的区别。

值得注意的是,电网生产调度与电网企业经营管理是截然不同的两方面工作,其信息通信业务有本质上的不同,前者是工控自动化系统,后者是企业级互联网业务系统^[17]。因此,二者所使用的通信网络在服务对象、设计思路、解决方案等方面都有重大区别,电网生产调度通信网始终坚持垂直领域路线,作为工控通信网存在,而电网企业经营管理通信网则沿袭电信行业现有思路,从电话网走向互联网。虽然出于成本、工程、技术等考虑,两张通信网在物理通道、基础设施等方面有共用、复用的情况,在管理上也有同专业、同部门、同流程的情况,甚至从发展趋势上,未来有可能采用相同、相近、相融合的技术,但总体来说它们二者是本质不同、属性不同的两张网络,一定要谨慎区分。

2.5 本章小结

本章对我国电力通信网的发展历程进行了梳理,并总体介绍了广义的电力通信网结构:电网企业的通信网由电网生产调度通信网与电网企业经营管理通信网两张通信网构成,前者是服务于电力生产的工控通信网,按照电网二次自动化系统的需求,从点对点电路通道发展到今天的工控以太网;后者则是与电信网络相同的互联网通信网。其中电网生产调度通信网具有强烈的垂直结构特征,是与电网一、二次生产调度操作紧密衔接的生产环节,是电网通信网的生产核心网络,也是我国电网企业未来推行两化融合、电力物理信息系统发展的关键问题之一。

第3章 电力通信网对“软件定义”的需求

上一章主要从电力行业的角度梳理了电网通信网的发展历程，但电网通信网技术上仍归属于电信行业。本章将从电信行业的角度对电网通信网的发展进行讨论。

3.1 电力通信网与电信通信网发展历程的比较

如前文所述，电力通信网发展经历了从电路到网络的演进过程，将这一过程与电信行业从 L1 发展到 L3 的过程相比较，将有助于理解电力通信网的发展。

电网生产调度通信网的最初形态是在电网处于电气自动化时期，电气逻辑设备之间的电路通道和人工调度操作使用的电话网络。此时电力通信网处于电路通道阶段，业务直接承载在 L1 通道上，业务、通道紧耦合。无论是所处时间，还是业务技术结构，都与电信行业物理电路通道时期的形式基本吻合。

电网生产调度通信网发展到以太网源于生产调度自动化系统演变为局域集中式工控系统^[18]。相比之下，电信行业从 L1 发展到 L2 的原因也是由于传统的电话网络、点对点通信网络业务不断丰富，L1 网络无法满足业务需求，因此在 L1 之上再抽象出 L2 技术，使得通信网进入局域网时代。这与电网生产调度业务从点对点的线路级监视向点对多点的局域级监控发展过程原理一致，也就是说，电网生产调度系统发展到局域工控系统，从电信技术的角度看，通信部分恰好就是 L2 局域网级别，这是与电网生产自动化系统处于局域工控系统的阶段相吻合的。特别值得一提的是，这种局域工控系统并不只出现在高压电网调度领域中，事实上，在 20 世纪 90 年代后，我国电网企业也陆续尝试过在配电网中开展馈线自动化、配电自动化等各类配网段的自动化实验，其通信网络也都不约而同地采用了以太网体制，只是由于在配网段开展自动化的收益成本比较低，技术复杂度也比高压网段更高，所以目前还处于试验阶段^[19]。也就是说，以太网基础上的电网调度自动化系统建议，即是出于技术考虑，更深层次也是出于企业经营考虑。配网段的自动化系统是广域网问题，其信息、通信网络势必牵引出 L3 层次的广域网化趋势。而这正是电网还未明确出现，但可以借鉴电信行业发展规律的地方。

当电网生产调度通信网发展到 L2 以太网后，就处于长期稳定状态。而电信行业则在此阶段与电网通信网拉开了距离。在 L2 局域网基础上，电信行业开始扩展业务，区域互联、广域互联促使 L2 局域网间的互联互通，信息流从过去的集中式 IPS 服务器向各用户单向传输向网络各节点复杂丰富的多向传输发展，业务日益多样和复杂，这一切都最终促使了经典七层结构和 TCP/IP 网络的出现，电信网络进入 L3 互联网时代。对比电力通信网，L2 以太网服务于集中式的局域工控系统，其能力要求又源于一次电网大电源点向用户单向输电的树型结构。相比电信网络 L3 互联网适配信息流复杂多向传输的局面，可以说，现有能源结构、电力流向情况固化了电网二次自动化系统的功能需求，也就固化了电力通信网对 L2 局域网的需求，这正是电网生产通信网长期处于 L2 局域网阶段的根源。也就是说，只有在能源结构、电力流向情况发生变化，一次电网向类似电信互联网一样的多向业务流、网状网结构发展，电网二次