

Large-scale Interactive System with Source-Grid-Load
Friendly Coordination

大规模源网荷 友好互动系统

国网江苏省电力有限公司 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

Large-scale Interactive System with Source-Grid-Load
Friendly Coordination

大规模源网荷 友好互动系统

国网江苏省电力有限公司 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书依托国网江苏省电力有限公司的大规模源网荷友好互动系统示范工程建设及现有研究成果,以大规模源网荷友好互动的业务形态和市场机制为主线,阐述了其基础理论、实现技术、实现机制、关键装备、工程实践等内容。其中,工程实践重点介绍了江苏大规模源网荷友好互动系统总体设计、技术实践和机制实践,并对下阶段工程进行了展望。

本书是第一本系统介绍大规模源网荷友好互动技术和工程应用方面的专著,可为从事相关技术研究、工程建设、设计、调试、运行维护的技术人员提供参考,同时可为行业管理部门和政府相关部门的电力安全、运行、市场管理人员提供参考,也对电力体制改革大背景下的不同业务创新设计具有一定参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

大规模源网荷友好互动系统 / 国网江苏省电力有限公司编著. —北京: 中国电力出版社, 2017.11
ISBN 978-7-5198-1323-9

I. ①大… II. ①国… III. ①电网互联—研究 IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 264942 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号(邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 刘丽平(liping-liu@sgcc.com.cn) 卓谷颖

责任校对: 王开云

装帧设计: 张俊霞 左 铭

责任印制: 邹树群

印 刷: 北京九天众诚印刷有限公司
版 次: 2017 年 12 月第一版
印 次: 2017 年 12 月北京第一次印刷
开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本
印 张: 16.5
字 数: 350 千字
印 数: 0001—2000 册
定 价: 85.00 元



版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

编 委 会

编委会主任 尹积军

编委会副主任 李作锋 韩 冰 陈 庆 陈 刚

编委会成员 王海林 王啸峰 黄 清 陆 晓 李瑶虹 崔恒志
孙大雁 许海清 罗建裕 苏大威 陈振宇 寇英刚
杨晓梅 王建明 秦 健 王 勇 王 旭 林汉银
陈 晟 芮松华 姜 宁 张 玮 张志昌 彭祖辉
方 泉 戴 锋 朱 进

编写组组长 陈 刚

编写组副组长 许海清 杨晓梅 王建明

编写组成员 袁晓冬 袁宇波 李虎成 孙 蓉 李海峰 徐青山
杨 斌 洪 亮 江叶峰 费益军 罗凯明 陈向东
徐春雷 陈志刚 范 洁 许道强 许栋栋 朱海兵
刘 林 张振华 张华成 吴海伟 孙国强 汤 奕
卫志农 陈 楚 陈 霄 张刘冬 陈 亮 朱道华
朱卫平 陈久林 王忠东 张小易 周 前 鲍丽山
胡昊明 郑明忠 李 澄 熊 政 蒋一泉 陆玉军
王伏亮

在我国国民经济“创新发展、协调发展、绿色发展、开放发展、共享发展”的背景下，能源变革的核心是能源结构的转型发展。依据习近平总书记“四个革命、一个合作”战略思想和李克强总理能源改革创新发展的重要指示，国家电网公司积极构建全球能源互联网，通过特高压电网实现能源的大范围优化配置，以提升清洁能源消纳并实现大规模化石能源的替代。

电能的远距离、大容量输送带来了电网安全运行的新挑战，因不可抗力造成设备故障、输送通道故障等新的系统性风险逐步集聚，极端情况下有可能发生大面积停电事件。清洁能源的大规模、间歇性发电带来了电网平稳运行的新挑战，显著增加了电网供需平衡的难度。用电量以及空调负荷比例的持续增长导致电网峰谷差不断加大，给电网的高效运行带来了新挑战，削峰填谷亟需新的手段。

在此背景下，国网江苏省电力有限公司勇挑重担、敢于创新、率先实践，成功实施了大规模源网荷友好互动系统（简称新系统）。新系统基于“互联网+”发展理念、融合智能电网技术、借助经济激励机制、遵循市场交易规则将全社会海量分布的可中断负荷资源通过集中汇聚、策略引导和集中控制，形成规模化按需应变的虚拟发电资源，在各空间范围和时间尺度上支持电网的平衡高效运行。

新系统的成功实施将带来巨大的安全效益、经济效益和社会效益，可有效抵御电网大面积停电的风险，提升了电网大规模电能平衡和清洁能源的消纳能力，节约数百亿元的调峰电厂投资，并大幅降低了温室气体和污染物的排放。各级政府和行业主管部门也对新系统给予了高度评价，表示新系统立足安全，有效缓解和解决了大电网风险；着眼创新，开辟了电网发展的新空间；江苏省探索了以市场化手段

代替行政命令，推进能源变革的经验和路径值得支持和肯定。

为进一步提高大规模源网荷友好互动的推广示范价值，国网江苏省电力有限公司组织专业技术人员编著了《大规模源网荷友好互动系统》一书，从基础理论、关键技术、核心装备、工程实践等方面进行了系统性的论述和总结。本书填补了我国在大规模源网荷友好互动技术和工程应用领域专著的空白，可为从事相关技术研究、工程设计、建设、调试、运行维护的技术人员提供参考。本书对大规模源网荷友好互动的业务形态和市场机制进行了较为深入的描述，可以为行业管理部门和地方政府相关部门的电力安全、运行、市场管理人员提供参考。本书也对源网荷系统未来的发展进行了初步展望，对电力体制改革大背景下新型电力市场主体和创新创业实体的业务创新设计具有一定的参考价值。

期望本书的出版发行，能够对我国大规模源网荷友好互动技术的应用和推广起到积极推动作用，并进一步支撑全球能源互联网建设，推动能源变革发展，为我国电网实现“世界一流电网”的目标做出贡献。

2021年11月



前言

近几年，国家电网公司积极响应国家能源变革的号召，全力构建以特高压为骨干网架，以智能电网为基础，以输送清洁能源为主导的全球能源互联网，推进大型清洁能源的远距离输送，缓解了外送通道不足，跨区送电困难的问题，清洁能源利用比例日益提高。到 2020 年，江苏通过特高压电网引入的区外来电最大将超过 3700 万 kW，约占江苏总负荷 31%；全省新能源容量约 2150 万 kW，其中风电 1000 万 kW、光伏发电 900 万 kW。

随着能源变革的深入推进，电网发展形态也在不断发生变化，电网安全稳定运行面临新的挑战。一方面，能源的大范围配置给电网带来较大风险，受端电网要求具备承受突然失去大容量区外来电的弹性承受力和恢复力，而现有的区域电网的动态调节能力和备用容量难以满足需求；另一方面，由于清洁能源的随机性、间歇性特点，使得电网峰谷差加大，增加了电网调控不确定性，维持电网供需平衡难度加大。在此形势下，为提升清洁能源消纳而进行的远距离、大容量电能输送需要智能化、快速化的电网安全能力支持；未来，以可再生清洁能源为主的电能结构需要规模化、常态化的电网互动能力支持。源、网、荷三者之间实现友好互动是电网发展的迫切需求。

目前，国外主要通过相对成熟的辅助服务市场，提供强制性辅助服务和商业化辅助服务以实现电力供需的动态平衡，但在应对能源大范围配置带来的系统性风险和旋转备用不足背景下清洁能源快速增长带来的随机性挑战方面尚无成熟的经验可借鉴。近几年，国网江苏省电力有限公司积极开展创新实践，在全国首次开展了大规模源网荷友好互动系统的研究和建设。通过技术和机制的创新，构建规模化按需应变的虚拟发电资源，实现不同时间尺度的集中控制和快速响应，达到广域分布的源、网、荷实时动态匹配，提升了电网应对突发严重故障和移峰填谷能力，使大面积停电预警和应急处置先期响应的从分钟级缩短至毫秒级，显著提高了电网的弹性。

2016 年，国网江苏省电力有限公司在全省建立了 376 万 kW 的秒级精准切负荷能力，

其中具备 100 万 kW 的毫秒级精准切负荷能力,实施了 352 万 kW 的需求响应。预计到 2020 年,系统将形成 1000 万 kW 负荷精准控制能力。

本书从大规模源网荷友好互动背景需求、内涵和发展趋势入手,从大规模源网荷友好互动的基础理论、实现技术、实现机制、关键装备和工程实践等方面展开,全面介绍了大规模源网荷友好互动系统。第一章介绍了大规模源网荷友好互动产生的背景、内涵和发展趋势。第二章阐述了大规模源网荷友好互动基础理论,包括理论框架、技术架构以及态势感知、优化决策、协调控制、负荷恢复等关键技术体系。第三章介绍了大规模源网荷友好互动实现技术,包括需求和场景分类、刚性场景和柔性场景下的源网荷互动技术。第四章从运行主体、市场主体两个方面介绍了源网荷友好互动的实现机制,包括虚拟电厂、价格及激励机制。第五章介绍了电源侧、电网侧、负荷侧、信息通信等方面涉及的源网荷友好互动关键装备。第六章从总体设计、技术实践、机制实践和下阶段工程展望等方面介绍了大规模源网荷友好互动的工程情况。

江苏大规模源网荷友好互动系统的建设运行得到了国家电网公司舒印彪董事长、张智刚副总经理及国网华东分部主要领导的大力关心支持;国务院参事团、国家能源局、省经信委、省能监办给予了高度的关注、鼓励和肯定;中国能源研究会史玉波常务副理事长、江苏能监办郑逸萌专员、省经信委李强副主任等领导和专家提出了宝贵的建议和意见;在系统建设过程中得到了苏州地区大用户的支持。结合大规模源网荷友好互动系统的建设,依托国家电网公司重点实验室——“变电站智能设备检测技术实验室”和“智能变电站关键设备现场检测与评估技术”的科技攻关团队,国网江苏省电力有限公司牵头组织了本书的编写,得到了中国能源研究会、东南大学、河海大学等单位的支持。在此,对相关单位、领导和专家一并表示衷心的感谢!

希望通过本书,使广大读者对大规模源网荷友好互动系统涉及的技术、机制和工程实践有全面的了解,并期待得到同行的宝贵建议和意见,为下一步深化推广应用源网荷友好互动系统提供有益的帮助,共同推进我国电力发展。

由于编写时间仓促,编者水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,恳请读者批评指正。

编写组

2017 年 11 月

目录

序 前言

第一章 概述	1
第一节 源网荷友好互动的背景需求	1
第二节 大规模源网荷友好互动的定义	4
第三节 大规模源网荷友好互动的内涵	4
第四节 源网荷友好互动的发展历程	8
第二章 大规模源网荷友好互动基础理论	20
第一节 大规模源网荷友好互动理论框架	21
第二节 大规模源网荷友好互动技术架构	35
第三章 大规模源网荷友好互动实现技术	44
第一节 源网荷友好互动的需求和场景分类	44
第二节 刚性场景下的源网荷友好互动技术	47
第三节 柔性场景下的源网荷友好互动技术	76
第四章 大规模源网荷友好互动实现机制	95
第一节 源网荷友好互动的运行主体机制	96
第二节 源网荷友好互动的市场驱动机制	109
第五章 大规模源网荷友好互动系统的关键装备	158
第一节 电网侧关键装备	159
第二节 电源侧关键装备	171

第三节	负荷侧关键装备	178
第四节	信息通信关键装备	185
第五节	关键装备的展望	187
第六章	大规模源网荷友好互动系统工程实践—————▶	191
第一节	江苏大规模源网荷友好互动系统总体设计	191
第二节	江苏大规模源网荷友好互动系统技术实践	194
第三节	江苏大规模源网荷友好互动系统机制实践	221
第四节	江苏大规模源网荷友好互动系统下阶段工程展望	225
结语	—————▶	236
附录 A	名称解释—————▶	237
附录 B	中英文对照表—————▶	241
参考文献	—————▶	244

本章以能源领域的“四个革命”^①战略指导思想为出发点，具体分析了能源消费侧、能源供给侧、能源技术侧和能源体制侧转型革命而引发的一系列清洁能源接入、效率提升、市场化发展等背景需求，并阐明了大规模源网荷友好互动系统顺应能源转型需求、推进能源革命深化的现实意义和历史意义。随后，从物理、技术和管理三个视角给出系统定义，并依次阐述大规模、友好和源网荷互动的具体内涵。最后，以源网荷友好互动的发展历程为主线，描述了源网荷互动的发展现状和表现形式。

第一节 源网荷友好互动的背景需求

能源产业是国民经济的基础产业，能源安全是国家战略安全的重要基础，能源发展是实现国民经济可持续发展的重要保障。我国能源产业持续发展，能源生产量和消费量均已居世界前列，但在能源安全供给和可持续发展方面仍面临挑战。主要表现为：能源供给结构不合理，化石能源依赖度过高；可再生能源开发利用率低，存在较严重的弃风、弃光、弃水现象；能源安全利用水平有待提高，大电网安全挑战日益严峻等问题。以清洁、可靠、互动、高效的方式推动能源生产和消费革命，从而应对能源供需格局变化、顺应能源发展趋势、保障国家能源安全，是我国能源发展的基本国策，也是习近平总书记关于“四个革命、一个合作”战略思想的核心内容。

我国能源转型的大背景对电力系统提出了以下需求：

一、电网需要具备更强的消纳能力

能源供给结构转型提出的大规模清洁能源接入需求，使得电网需要具备更强的消纳能力。我国是世界能源消费第一大国，正经历从化石能源向清洁能源的转型变革。目前我国清洁能源开发总量已达世界第一，并仍在快速增长。根据《电力发展“十三五”规划》，2020年我国光伏装机将达到1亿kW，风电装机达到2.1亿kW。清洁能源的发展已经成

^① 2014年6月，中央财经领导小组召开第六次会议，聚焦能源安全战略，习近平总书记提出推动能源消费、能源供给、能源技术和能源体制四方面的革命，简称“四个革命”。

为能源供给侧结构性改革的关键，并将有力推动国民经济的可持续发展。

新形势下，清洁能源的发展面临的一系列现实问题：

(1) 弃风弃光形势严峻。根据中国电力企业联合会电力发展分析数据，2016 年全国弃水电量达到 635 亿 kWh，弃风电量达到 396 亿 kWh，弃光电量 69 亿 kWh，总电量达到 1100 亿 kWh，超过当年三峡电站发电量约 170 亿 kWh。我国弃风、弃光主要集中在“三北”地区，全国弃风、弃光地区中，弃风、弃光率超过 20% 的主要有甘肃、新疆、吉林和内蒙古，弃风率分别为 43%、38%、30% 和 21%。从时间分布来看，全国 67%、东北地区 90% 以上的弃风电量发生在供暖期，负荷低谷弃风电量又占总弃风的 80%。我国弃风、弃光的地域集中、季节集中、时段集中的特点十分突出。弃风弃光的根本原因是新能源资源富余区本地消纳能力弱，外送通道不足，跨区送电困难。

(2) 电能大范围配置带来电网系统性挑战。我国正利用特高压电网将西部、北部清洁能源远距离输送至东部负荷中心，为解决弃风弃光问题提供治本之策。但特高压骨干线路距离长，遭受不可抗力影响的几率随之上升；输送功率大，要求更高的送端和受端电网的弹性承受力和弹性恢复力。

(3) 清洁能源的随机性、间歇性带来电网供需平衡问题。实时的能量供需平衡是电网运行的基本要求。随着清洁能源的大规模接入，电网电源侧随机性持续提升；随着分布式能源的大量接入，负荷侧开始具备电源特性，电网供需平衡的难度持续增大。

二、电网需要具备更多的运行弹性

能源消费形态转型提出的电能配置效率提升需求，使得电网需要具备更多的运行弹性。随着中国城镇化进程的推进和极端气候的频繁出现，空调负荷持续快速增长的现象十分突出，将成为长期趋势；同时，受电力需求持续快速增长、水电减发等因素的影响，华东、华中及南方等大部分省市电力供应偏紧，部分省市电力供应缺口扩大，极大地影响电网的安全稳定运行。华北地区最大空调负荷占用电负荷峰值的比例已超过 20%，华中、华东、南方地区已超过 30%，北京、上海、广州等中心城市甚至接近 50%，且电网高峰负荷集中出现在夏季的数百小时内。受空调负荷影响，各电网用电负荷迅速增长，峰谷差进一步拉大。

系统的网荷互动能力重塑了行业生态：一方面，传统发电企业不再是电网调峰的单一资源，发电厂调峰能力的不足可以由网荷互动予以弥补；另一方面，发电厂具有大量的可中断辅机负荷，将以源网互动和网荷互动的双重能力参与厂网协调。这将解决长期困扰电网的高峰时段旋转备用和事故备用不足的问题，并释放高效、低排放发电机组的运行束缚，提高高效率机组的发电小时数，提升电网运行效率，降低污染排放。

三、电网需要具备更强的安全运行保障能力

能源技术创新转型推进了电网规模和结构的转型发展，使得电网需要具备更强的安全运行保障能力。当前，国家电网公司系统已实现全部电网通过交直流互联，是世界上唯一

同时运行特高压交直流的电网，特高压交直流混联、电力大规模跨区输送已成为国家电网典型特征。随着特高压交直流混联电网的初步形成，电网大范围优化配置资源能力显著提升。2016年，复奉、锦苏、宾金、灵绍、哈郑五大特高压直流输电线路累计输送电量1472.3亿kWh，促进了四川清洁水电和西部地区清洁能源资源大规模集中开发和安全高效外送。与此同时，电网一体化特征不断加强，电网送受端、交直流之间耦合日趋紧密，电网运行呈现许多新特点。

为应对电网结构性变革引发的挑战，新一代电网系统保护势在必行。系统保护包括发电侧调整、元器件保护和负荷响应等方面的重要功能。大规模源网荷友好互动系统是国家电网系统保护的重要组成部分，在华东电网的系统保护中，源网互动机制能够提升机组的调频能力，网间互动机制能够进行多直流协同调制，网荷互动机制能够进行负荷精准切除、抽蓄电站切泵。以上机制的建设能够显著提高电网对抗扰动的抗御力，将大面积停电预警和应急处置先期响应的时间从分钟级缩短至毫秒级，有效应对大电网安全挑战。

四、电网需要具备持续丰富供给和激发需求的能力

我国能源体制革命的电力市场化改革，使得电网需要具备持续丰富供给和激发需求的能力，形成市场决定资源配置的新局面。当前，电力体制改革迅速深化，电力交易机构基本做到全覆盖，电力交易市场化加速推进，部分试点省份2016年发用电计划放开比例接近50%，直接交易电价降幅明显。总体来看，新一轮电力体制改革将深入推动发电侧与售电侧的有效竞争，推动电网电源的协调健康发展，使电力市场更有活力、更有效率、更加公平、更加便利。未来将逐步形成电网辅助服务市场化交易机制，在电能市场供给侧建立厂网协调和网荷协调同步竞价的局面，在需求侧扩大电价形成机制的动态范围，以市场的力量引导资源合理配置，形成源网荷系统发展的内生动力。

“互联网+”催生的共享经济新形态在各行各业快速涌现，重塑了传统产业的资产配置、供需关系和运营门槛。大规模源网荷友好互动系统将逐步形成平台效应，支持广大工商业和居民用户建立基于“用电优先权转让”的共享经济模式。这将进一步还原电能的商品属性，极大扩充系统互动资源的供给，极大激发互动资源的需求，形成丰富多彩的电力行业生态共同体，是推进电力体制改革深化发展的重要积极因素。

综上所述，能源转型革命对电网提出了加大电能平衡能力、优化电能配置效率、提高电网安全能力和激发供需互动能力的全方位需求。大规模源网荷友好互动系统应运而生，它以灵活大电网为桥梁，通过电源侧快速调控和虚拟电厂多时间尺度群控，实现广域分布的源网荷实时动态匹配和高效稳定运行。大规模源网荷友好互动系统的及时建设，符合我国能源革命的需要，顺应当前全球能源网及四个能源革命发展和技术创新趋势，具有重要的现实意义和长远的历史意义。

第二节 大规模源网荷友好互动的定义

大规模源网荷友好互动是基于互联网+发展的创新理念，结合多种通信技术和调控手段，通过发电企业、电网企业和电力用户三者的柔性互动，实现电网的刚性与柔性调控，达到电网可调度资源最大化利用。

物理层面上，大规模源网荷友好互动系统是通过先进的信息通信技术和多样化的源网荷调控手段，实现电网供需紧张时的刚性调控以及电网供需充裕时的柔性调控，在电源、电网和负荷充分友好互动的基础上，达到电网可调度资源最大化利用的目标，提升电力系统的稳定性、容错性和自愈性。

技术层面上，大规模源网荷友好互动系统的创新实质是基于“互联网+”发展理念，结合计算机技术，通信技术和智能电网技术，借助创新激励机制、遵循市场规则将全社会海量分布的随机可中断负荷资源通过虚拟汇聚、策略引导和集中控制，形成规模化按需应变的虚拟发电资源。

管理层面上，大规模源网荷友好互动系统是发电企业、电网企业和电力用户三者之间相互尊重各自权益、柔性互动的业务新形态；是解决清洁能源开发和使用比例提高带来的电网平衡问题、极大地提高清洁能源完全替代化石能源的可能性并最终完全替代化石能源的必要手段；是习近平总书记提出的“四个革命、一个合作”战略思想在电力行业的具体实践；是国家“互联网+”战略在电网企业的具体运用；将引领国际能源变革发展潮流。

第三节 大规模源网荷友好互动的内涵

一、宏观层面

基于智能电网技术，集合创新机制，借助市场规则，将电力系统大量分布的无序资源通过虚拟汇聚、策略引导和集中控制形成规模化的有序资源，就是大规模源网荷友好互动系统的实质。

1. 大规模源网荷友好互动系统是智能电网创新技术的集合

我国是全球能源互联网战略的倡导者。近年来，我国在可再生能源和分布式能源等电源技术、特高压远距离输电等电网技术、智慧用电等负荷技术以及相关的通信技术等领域建立了完整而坚实的技术体系。技术的量变催生了创新的质变，究其本质，大规模源网荷友好互动系统是一系列智能电网关键技术的协同和整合，形成了大电网层面系统化和规模化的态势感知、智能决策、协调控制和信息交互能力。

2. 大规模源网荷友好互动系统是电力系统创新运行管理机制的集合

随电网规模发展，大电网安全运行的挑战越来越大，可再生能源接入、远距离输电、负荷特征的多样化急需电网具备按需应变的备用容量。大规模源网荷友好互动系统建立了

一系列创新的运行管理机制，等同于在电网部署了众多随时、随地、按需投运的虚拟电厂，是对电网“旋转备用”“事故备用”的有益补充，提高了发电利用效率，且快速响应能力比传统的发电侧备用提高一个数量级，有效应对电网运行挑战。虚拟电厂概念自 1997 年被提出近 20 年后，大规模源网荷友好互动系统赋予了它全新的意义，其集中控制能力和技术能力的独特优势支持了全省乃至跨区电量的集中控制。

3. 大规模源网荷友好互动系统是电力市场化的支撑性平台

市场化是电力体制改革的主旋律，电能转让的过程中，电能品质不变，质量满足要求，实质是用电权的转让，或者说是用电权的回购，还原了电能商品实质，可以交易。大规模源网荷友好互动系统是一个开放、公平的业务互动平台，对电力市场的开放交易、公平交易和繁荣交易起到了关键性支持作用。

二、微观层面

源网荷友好互动本质上是一种能够实现电力资源利用最大化的运行模式。其中，“大规模”是实现互动的价值，“友好”是重要保障，源网荷是“互动”的载体，如图 1-1 所示。

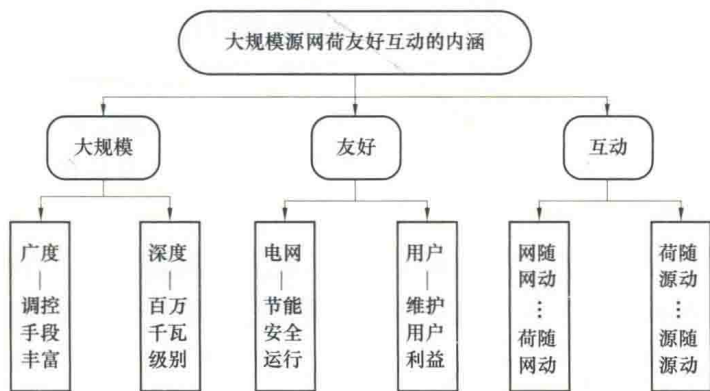


图 1-1 大规模源网荷友好互动的内涵

（一）“大规模”的内涵

大规模是指在含有大规模可再生能源的电源侧、建有复杂交直流混联输配电网的电网侧以及接入大规模柔性负荷的需求侧三者间，进行友好交互时，调控的手段丰富，容量大。

1. 从广度上定义

目前，电力系统电源、电网和负荷侧关键技术以及信息通信得到了很大的发展，调控的手段丰富，为大规模的源网荷友好互动提供了可行性。

1) 电源：常规电源的源网协调，如电网一次调频、自动发电控制（AGC）、自动电压控制（AVC）、备用和涉网保护等技术日趋成熟；可再生能源的源网协调，如可再生能源机组的频率控制、风电场和光伏电站集群有功控制、大规模新能源基地的无功电压控制、新能源与常规电源的协调控制、新能源与储能的协调控制等技术飞速发展。间歇式电源和柔性电源相协调，向着可预测、可调控的方向发展。

2) 电网：随着我国特高压建设的快速发展，交直流电网的动态特性呈现越来越复杂的局面。为优化交直流电网控制方式，改善电网电压频率稳定，近年来新型的电网柔性控制方法，如广域电网控制、直流电网控制和交流电网控制得到了广泛的应用。目前，调度控制中心可以综合各种先进技术和智能化手段，如广域监测系统、广域测量预警控制系统等对电网进行主动的监视、分析、预警、辅助决策和自愈控制，辅助调度员应对电网可能出现的各种扰动，为电源和负荷的友好互动提供强有力的技术支撑。灵活交直流输电系统的广泛应用也为现代电网的安全、经济、可靠和优质运行提供有效的手段，静止无功补偿器（SVC）、统一潮流控制器、基于电压源换流器的高压直流输电装置等先进电力电子装置具有快速调整有功、无功功率的能力，能够灵活调节和动态优化电网潮流分布，提升电网运行的可控性和弹性。

3) 用户：用户侧一般以柔性负荷为代表。柔性负荷是指能够主动参与电网运行控制，可以与电网双向互动，并且具备需求弹性的可调节或可平移的负荷。柔性负荷的类别主要有以下三种：一是具有与电网双向互动能力的柔性负荷，如电动汽车、分布式电源、储能、智能家电等，带有“源荷”双重特征的新型负荷在电力负荷中的比重呈不断上升趋势；二是传统负荷也能够根据激励或者电价来进行电力需求响应，具备“虚拟电厂”或者“能效电厂”的特性；三是用户侧存在着大量能与电网友好合作的可平移负荷，可平移负荷的供电时间可按计划进行变动，如电动汽车、洗衣机、消毒柜等。柔性负荷可以主动响应电网需求并在一定范围内进行用电调整，确保电网安全、经济、可靠的运行。目前，江苏电网已经在全国率先完成省级集中的电力负荷管理系统，并且在全国率先实现有序用电全过程在线监测和智能决策。为了实现负荷的刚性、柔性和刚柔并济控制，国网江苏省电力有限公司在全省范围内与用电客户协调，并签订相关协议，当进行负荷切除后，客户的关键和不可间断的生产和安全保障用电不受任何影响，最大程度地保障企业产能和电网设备安全。

2. 从深度上定义

1) 能源大范围优化配置给电网运行带来新问题，接受区外来电最大达到千万千瓦级别。我国利用特高压电网将清洁能源输送至东部经济发达地区，为解决“三弃”问题提供治本之策。但随着清洁能源替代化石能源步伐加快，远距离输电规模不断增加，东部受端电网接受区外来电比例相应增大，区外来电达到数千万千瓦。如果区外来电发生大幅波动，受端电网将出现瞬时电力平衡困难，严重时会导致大面积停电。为应对能源大范围优化配置给受端电网带来的新问题，需要在技术上创新突破，提升电网瞬时平衡能力。

2) 清洁能源的随机性、间歇性带来电网供需平衡问题，风电、光伏发电波动达到数千万千瓦级别。风电、光伏等受天气影响，具有较强的随机性和间歇性，清洁能源大规模接入给电网供需平衡带来较大难度。从全国来看，风电、光伏发电波动达到数千万千瓦。为适应清洁能源发电出力的随机性和间歇性，需要建设灵活性资源，增强平衡调节能力。

（二）“友好”的内涵

“友好”是源网荷互动的重要保障，通过对负荷的柔性调控，减小对电网和用户的影响，实现故障处置友好和新能源接入友好。实现友好的重要途径是完善虚拟电厂机制和价格激励机制。源网荷的互动不仅要注重国家关于电力体制相关的政策和计划在保障电网安全性和有序能源发展中的作用，也要注重激励补偿机制在电力市场建设和电网应急处置中的重要作用，充分体现源网荷互动的友好性。

1. 对电网友好

有效控制间歇性能源大规模并网及分布式接入电网时的不友好特性，减小对配电网的冲击。可采取以下措施：

1) 提高新能源消纳能力，更好完成调峰调频，保障电网安全运行。大规模和分布式可再生能源的快速发展，未来电动汽车充放换电设施的大量接入，以及储能和微网的不断发展，都对电网造成了不同程度的冲击。风电具有典型的反调峰特性，风电并网规模的扩大，必然要求全网的调峰需求相应增加。解决可再生能源消纳等新问题，电源、电网、负荷才能形成真正的友好互动，发挥智能电网的作用。

2) 提高清洁能源的比重，节能减排。源网荷友好互动将能源互联网的能源开发、能源输送、能源需求与使用等几个环节协调统一为一个有机整体，实现能源资源的优化配置，同时能促进清洁能源的高效开发利用，提高清洁能源在终端能源消费中的比重，响应能源清洁化变革及节能减排的号召。

2. 对用户友好

降低电网事故对用户的冲击，维护用户的利益。可采取以下措施：

1) 积极探索基于现有价格机制的互动模式。针对尖峰电量算法较为单一、用户交互内容不够丰富、响应与补贴模式不够清晰等问题，需要对尖峰电价政策进行优化和完善，让客户合理安排生产，降低用户的成本。例如增加温度分区、增加季节性低谷电价机制、动态调整尖峰电价执行时段。

2) 分阶段实施用户需求响应。第一阶段，主要通过激励补贴机制（例如现金和积分奖励方式），实现用户负荷柔性调控；第二阶段，在电力市场放开，国家理顺用户电价交叉补贴后，可以通过尖峰电价、实时电价等措施，保障用户利益，引导用户积极加入源网荷互动。

3) 提高用户负荷的恢复速度。建议在负荷恢复过程中，通过电话、短信、终端信息、手机 APP 等多种渠道及时告知用户，并同步下达允许合闸指令，由用户接到告知后，尽快自主合闸恢复正常用电，确保用户侧的人身和设备安全。

（三）“源网荷互动”的内涵

源网荷互动概念非常丰富，智能调度、主动配电网、需求侧管理等均属于源网荷互动的范畴。从需求侧管理方面来说，以往的有序用电、负荷柔性调控、需求响应以及负荷快速响应等措施均属于源网荷互动的不同形式。互动的形态主要包括网随网动、荷随网动、荷随源动、源随源动、源随荷动/源随网动等多种形态。