

# 分层集群的新型电力系统运行与控制

陈皓勇<sup>1</sup>, 谭碧飞<sup>1</sup>, 伍亮<sup>1</sup>, 林镇佳<sup>1</sup>, 杨苹<sup>2</sup>, 李立涅<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学电力学院, 广东省广州市 510641;

2. 华南理工大学广东省绿色能源技术重点实验室, 广东省广州市 510641)

## Operation and Control of the New Power Systems Based on Hierarchical Clusters

CHEN Haoyong<sup>1</sup>, TAN Bifei<sup>1</sup>, WU Liang<sup>1</sup>, LIN Zhenjia<sup>1</sup>, YANG Ping<sup>2</sup>, LI Licheng<sup>1</sup>

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong Province, China;

2. Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, South China University of Technology,

Guangzhou 510641, Guangdong Province, China)

**ABSTRACT:** The development of new power systems will inevitably lead to major changes in the patterns of the power systems. With the constantly growing renewable energy penetration and the widespread application of power electronic equipment, the types of energy sources and loads accommodated in the power systems will continuously increase in the future, and the complexity of operation and control will also rise sharply. This paper describes a new paradigm of the large-scale power systems divided into multi-level smaller-scale power systems containing distributed resource clusters. Each resource cluster has the capability of electric power supply, consumption and exchange, and manages to achieve power balance and autonomously optimal operation. This paper proposes the three-layer network (energy network, information network, value network) architecture and overall research design of the new hierarchical cluster power systems. At the energy network level, the technical characteristics and patterns of the new hierarchical cluster power systems are proposed, and China's current relevant policy support is introduced. At the information network level, after introducing the problem of distributed sensing and information fusion in the new power systems, the focus is put on the application of swarm intelligence and cooperative control theories and technologies (especially the frequency control problem). At the value network level, new transaction mechanisms and business models such as distributed resource peer-to-peer transactions

and virtual power plants are introduced. Finally, the frontier research directions of new power systems are discussed from the perspective of complex system theories based on multidisciplinary research.

**KEY WORDS:** hierarchical cluster; renewable energy; swarm intelligence; cooperative control; electricity markets

**摘要:** 新型电力系统的发展必将导致电力系统形态的重大调整。随着可再生能源渗透率的不断提升、电力电子设备的广泛应用,未来电力系统容纳的电源与负荷种类将不断攀升,运行与控制的复杂度也将急剧升高。首先,描述将大规模电力系统划分为多层级的含分布式资源集群的小规模电力系统的新形态。各个资源集群皆具有电力供给、消纳及功率交换的能力,并尽量实现集群内的发用功率平衡和自治优化运行。其次,提出分层集群的新型电力系统的3层网络(能量网络、信息网络、价值网络)架构及整体研究思路。在能量网络层面,提出分层集群的新型电力系统的技术特征和形态结构,并介绍我国当前的相关政策支持;在信息网络层面,在介绍新型电力系统分布式感知和信息融合问题后,重点探讨集群智能与协同控制理论、技术在新型电力系统(特别是频率控制)中的应用;在价值网络层面,介绍分布式资源端对端交易、虚拟电厂等新型交易机制和商业模式等。最后,从复杂系统理论和多学科交叉研究的角度探讨新型电力系统的前沿研究方向。

**关键词:** 分层集群; 可再生能源; 集群智能; 协同控制; 电力市场

## 0 引言

中共中央总书记、国家主席习近平在2020年9月22日召开的第七十五届联合国大会一般性辩论上表示:“中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于2030

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51937005); 国家重点研发计划项目(2022YFB2403500); 中国工程院战略研究与咨询项目(2021-XBZD-13-17)。

Project Supports by National Natural Science Foundation of China (51937005); National Key R&D Program of China (2022YFB2403500); Strategic Research and Consulting Project of Chinese Academy of Engineering (2021-XBZD-13-17).

年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和。”(本文简称为“双碳”目标)。2021年3月15日,习近平总书记在中央财经委员会第九次会议上特别强调,“实施可再生能源替代行动,深化电力体制改革,构建以新能源为主体的新型电力系统。”2021年10月24日,国务院印发《2030年前碳达峰行动方案》,提出加快建设新型电力系统的一系列举措,包括“大力提升电力系统综合调节能力,加快灵活调节电源建设,引导自备电厂、传统高载能工业负荷、工商业可中断负荷、电动汽车充电网络、虚拟电厂等参与系统调节,建设坚强智能电网,提升电网安全保障水平。积极发展“新能源+储能”、“源-网-荷-储”一体化和多能互补,支持分布式新能源合理配置储能系统”。

同时近年来国际局势动荡加剧,对能源消费与交易领域造成深远影响。以俄乌冲突期间为例,受天然气供应不足影响,欧洲部分地区天然气期货价格上涨64%至335欧元每兆瓦时,猛烈冲击了当地能源市场,并引发电力市场危机。由于分布式能源系统灵活性高、环境友好和易于本地化控制的特点,已成为应对气候变化、保障能源安全的重要内容,也是新型电力系统的重要组成部分<sup>[1-3]</sup>。国际能源署(international energy agency, IEA)将接入配电网或位于负荷中心附近的天然气分布式能源、分布式可再生能源及分布式储能、需求侧响应和能效技术等均纳入分布式能源(distributed energy resource, DER)的范畴。日本分布式项目以冷热电联供和太阳能光伏发电为主,分布式发电总装机容量约3600万kW,占全国总量的13.4%。丹麦在Bornholm示范工程中面向2000余居民商业用户实施了5min的实时电力市场,配电网向各分布式电源聚合商下发实时价格,后者依据电价信号做出响应参与市场。一些电力市场向分布式能源聚合商开放,如美国PJM允许负荷削减服务商(curtailment service provider, CSP)参与其批发市场<sup>[4]</sup>。相比于传统电力系统,集成了负荷与分布式电源的微电网集群是优良的控制单元,能根据需要切换联网或孤岛模型,实现区域内的自治优化并参与大电网运行。海量分布式资源(高不确定性可再生能源、多种柔性负荷、分布式储能等)接入给电力系统运行与控制带来挑战,源侧低惯性和低短路比特征突出,安全稳定支撑能力不断被削弱;荷侧动态特性越来越复杂;网侧交直流、多直流间耦合更加紧密。电力系统受扰

后的稳定特性由传统机电模式主导向机电-电磁多模式耦合交互影响演化,系统稳定分析与控制问题受到广泛关注<sup>[5]</sup>。如近年来,国外发生了几起电网设备故障诱发的大停电事故,引起热烈讨论。2016年9月28日,澳大利亚南澳电网发生了历时50h的全州大停电事故<sup>[6]</sup>。2019年8月9日英国发生的大面积停电事故约有100万人受到停电影响<sup>[7]</sup>。2016年3月16日南方电网公司进行云南异步联网工程试验时,发生了由水轮机调速器引起的周期为20s的超低频振荡<sup>[8]</sup>。由此可见,电力系统稳定(特别是频率稳定)控制的结构困境日趋明显,迫切需要调动各种资源按照新型电力系统的要求深度参与其运行与控制。

## 1 分层集群的新型电力系统的概念及研究问题

电力与能源的生产、传输、消费往往需要通过各种类型的网络来进行,如电网、热网、燃气网等。由于本质上这些网络传递的都是能量,只是表现形式不同,所以统称为能量网络<sup>[9]</sup>。能量网络包含不同类型能源的子网(电网、热网、燃气网等),而各种子网之间又通过能量转换设备(比如发电机、泵、空调和热水器等)相连。由于信息通信技术(information communication technology, ICT)的飞速发展,在物理层面的能量网络的基础上,又可建立基于传统自动化、互联网技术和“云大物移智链”等新兴技术的信息网络,以对能源生产、储运和利用设备进行调控。而电力与能源商品在实际运行的交易及价值传递则形成价值网络。价值网络是电力与能源价格体系的基础,并且受能量网络的物理规律制约。因此,新型能源体系与新型电力系统将形成如图1所示的3层网络结构,这3层网络是紧密耦合、相互关联的<sup>[10]</sup>。

与传统电力系统相比,新型电力系统的结构形态将发生较大的变化。在传统电力系统中,大容量发电机组往往建在一次能源资源富集的地区,并通过超/特高压远距离输电技术输送到负荷中心。而从传统电网至未来新型电力系统的转变过程,根据国家“双碳”目标和保障能源安全的要求,传统能源的逐步退出必须在新能源安全可靠替代的基础上,随着低碳、无碳能源与负荷的渗透率的逐步提升,电力系统转型将是1个先立后破的过程。在电力系统转型过程中,电力企业与其他市场主体将逐步提

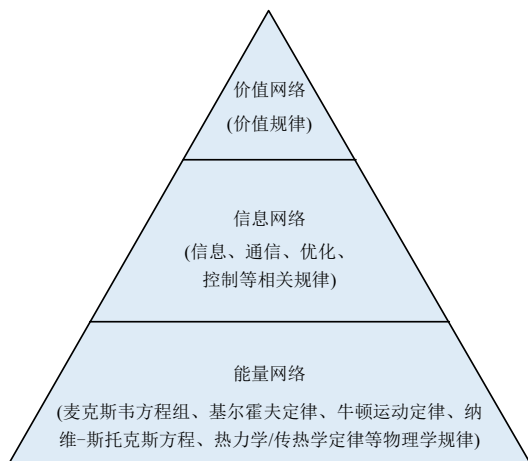


图 1 新型电力与能源系统的 3 层网络结构

Fig. 1 Three-layer network architecture of new power and energy systems

升分布式电源在电力系统，尤其是在用户侧与配电网的利用率。这意味着配电网的形态将会发生变化，特别是分布式电源、电动汽车、储能、柔性负荷等将大量接入。比如，南方电网公司《关于进一步支持光伏等新能源发展的指导意见》中指出太阳能、风力和海洋能等新建新能源项目所生产的电能主要以自用和就地利用为主，多余电力送入当地配电网的项目。

以光伏发电为例，我国光伏装机总量呈逐年快速递增的趋势。从 2016 年至今，新增和累计装机容量均为全球第一。鉴于我国在光伏产业的优势地位，较低的成本与成熟的本地产业链可驱使市场聚合商主动参与光伏的推广过程。为使在广大沙漠、荒漠、工矿废弃地、农村地区发展的光伏生态、农光互补皆能实现稳定供能，应提高其灵活性与便利性，大幅降低对现有发电与配电设备的规划与运行的影响。6 月 20 日，国家能源局下发《关于组织申报整县(市、区)屋顶分布式光伏开发试点方案的通知》，文件明确指出整县分布式光伏开发被视作实现“碳达峰、碳中和”与乡村振兴两大国家战略的重要举措。社会各界在此指导下将基于资本、融资、经销经验与渠道资源大力推进分布式光伏发展。以海南为例，海南电网公司提出在“十四五”时期推动实现海南光伏、海上风电等新增装机 520 万 kW，清洁能源装机占比由 2020 年的 67% 提升至 80% 以上，这意味着清洁能源发电量占比由 2020 年的 50% 提升至 70% 以上。

在新型电力系统中，风、光等可再生清洁能源将处处存在，意味着电源将遍布于整个电力系统，电力系统形态结构将发生重大变化。余贻鑫院士等

提出分层分群电网体系结构，即“将系统分解为群集(clusters)的层次结构和全局协调”和“每个集群(cluster)都保持自己的净功率平衡和局部自优化”<sup>[1]</sup>。为清晰起见，本文将具有这种结构特征的电力系统称为“分层集群的新型电力系统”，并进一步探讨其运行与控制问题。分层集群的新型电力系统也呈现出如图 1 所示的 3 层网络架构并与其他能源系统紧密相连。

相应的，分层集群的新型电力系统的运行与控制问题可以分为物理机理(“能量网络”层面)、运行控制(“信息网络”层面)和市场交易(“价值网络”层面)3 个层面的问题，是典型的多学科交叉问题，如图 2 所示。

在能量网络层面，需根据各层级源、荷、储的分布，研究新型电力系统中区域集群的聚合方式，并分析新型电力系统的动态特性，为分层集群的新型电力系统运行与控制奠定基础。在信息网络层面，需研究新型电力系统运行状态和调控能力的在线监测理论与方法，并攻克含电源侧、电网侧与负荷侧多种资源的高动态、高维度、多智能主体、分布式协同控制的难题，以充分调动各资源合理、自主、协同、智能地参与系统运行控制。在价值网络层面，需深入研究多种灵活性资源和新型辅助服务的定价理论、交易机制和商业模式，为各类资源自主参与系统运行控制提供公平合理的激励机制和制度保障。通过能量网络、信息网络和价值网络的多学科交叉研究，调动各类资源深度参与电网运行控制与灵活调节，提升大电网安全稳定水平，为分层集群的新型电力系统建设和可再生能源的大规模开发利用提供关键技术支撑和体制机制保障。本文将围绕上述 3 个方面理论与技术(特别是运行控制问题)的研究现状和发展趋势展开叙述。

## 2 分层集群的新型电力系统物理机理(“能量网络”层面)

新型电力系统是 1 个包含多种资源和控制方法的多层级的复杂工程系统。由于风、光等可再生能源与用户侧灵活性资源的分布特征与运行模式，电源设备其将遍布于整个电力系统，未来电力系统中源与荷、供给方与需求方、输电网与配电网的边界将变得模糊<sup>[1]</sup>。

### 2.1 分层集群的新型电力系统技术基础

大电网作为电能大范围优化配置枢纽平台的

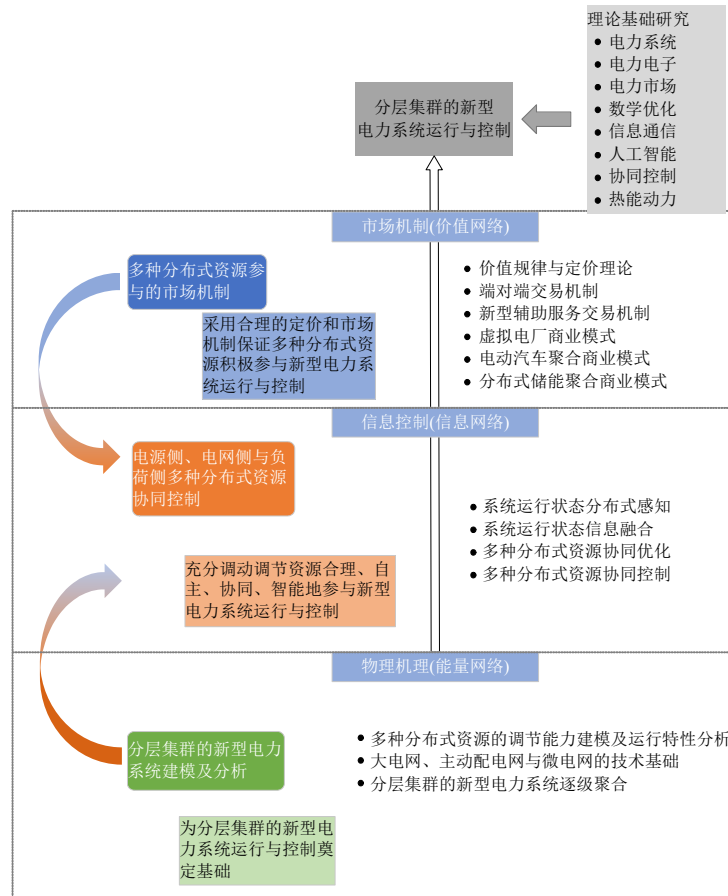


图2 分层集群的新型电力系统研究问题

Fig. 2 Research design of the new power systems based on hierarchical clusters

主体作用不变,但对其运行的灵活性、安全性、可靠性等方面的要求将极大提高。大电网的作用相对减弱,同步电网规模相对缩小,输电网与配电网的关系由主从依附转变为相互支撑,为用户侧安全可靠获取电力提供保障。在输电网层,电力自平衡能力大幅提升,通过柔性直流和柔性交流形成灵活安全的柔性互联格局。在保持足够安全能力的前提下,新能源、储能与电动汽车等快速发展,实现从“消纳新能源发电”到“以新能源发电为主体”的电网形态转型。

作为对输电网的支撑与调节单元,主动配电网以分布式电源和用户为主体,电力就地生产、就地消费,形成具有供需平衡能力的电力交换网络,实现电力用户的灵活互动。同时,其形态多样化,交流配电网、直流配电网和交直流混合配电网协调发展,实现分布式发电的经济高效集成和利用。用电侧还可建立以电力为枢纽的电/冷/热/气/储等多类型能源耦合网络,实现终端能源消费结构的优化管理与灵活互济。跟以往大电网单向地给各地配电网输送电能的情形不同,新型电力系统中配电系统可

以平稳地向附近层级的电网输送或者吸收功率。

随着能源危机、环境污染问题日益突出,含风能、太阳能等可再生能源的微电网以其能源利用率高、供电可靠性高、环境污染小等优点而逐渐受到广泛重视和应用,是智能电网建设的重要组成部分。微电网系统中的电源类型、运行控制特性、电能质量约束等,与传统大电网存在较大的差异<sup>[2]</sup>,而且随着可再生能源(风电、光伏等)比例日益提高,出力呈现随机性和间歇性的特点,易受气候、温度等环境因素的影响,给现行的调度技术带来了新的挑战,因此在条件具备的地区往往作为大电网的1个单元并网运行。

## 2.2 分层集群的新型电力系统逐级聚合

在以大型能源基地、超/特高压远距离大容量输电为主要特征的传统电力系统中,往往采用“自顶向下”的垂直一体化管理模式和调控方式。而在未来的新型电力系统中,由于可再生能源处处存在、配用电侧柔性化和智能化,源、网、荷、储各环节都将呈现出“自底向上”逐级聚合的特征。

在未来新型电力系统中,同一层级的分布式资



源由于电气相邻、通信便利、利益共享等因素自发地形成由网络结构与地理距离划分的、由若干聚合商运营的资源集群，各个资源集群都具备自己的能量管理系统(energy management system, EMS)以及和外界交换功率的能力，并力图实现集群内电力电量的自平衡。同一层级的多个集群能进一步聚合为更高层级的集群，直至形成完整大电网，如图 3 所

示。资源集群内分布式电源、储能及可调负荷等设备具有容量小、种类多、参数各异、点多面广等特点，难以直接参与电网运行。因此，各集群通过先进的信息通信、调度控制及市场交易手段聚合大量分布式资源，作为整体参与电网调度运行，也可参与电力市场电能量交易和调峰、调频、调压、备用、阻塞消除等辅助服务交易。

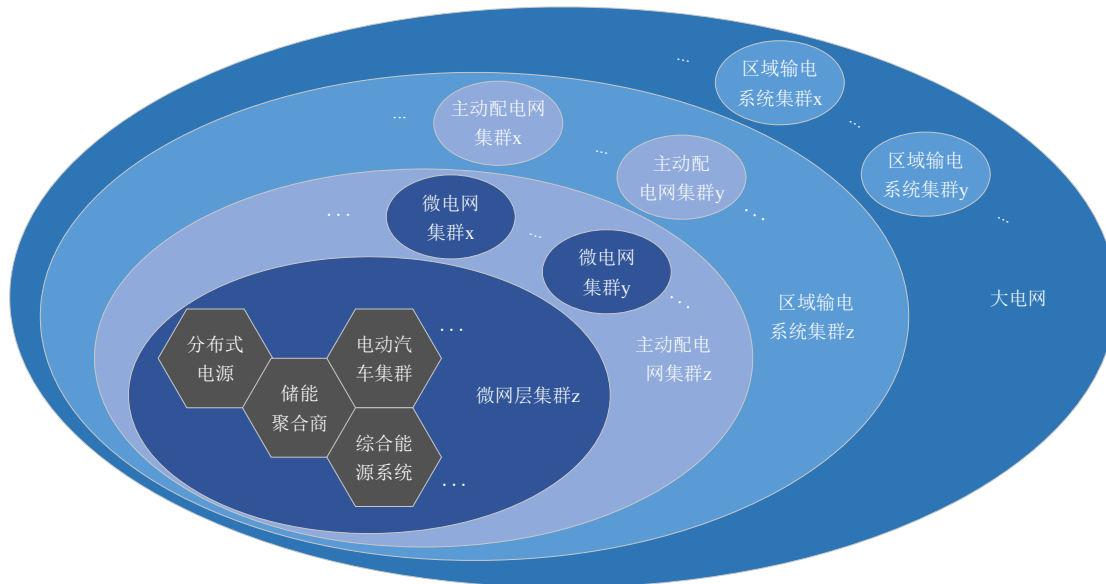


图 3 分层集群的新型电力系统逐级聚合

Fig. 3 Hierarchical clusters of the new power systems

为充分发挥分布式资源的价值，实现新型电力系统的灵活高效运行，需要进行分布式资源的分层分区动态聚合。从外部条件来看，当系统内分布式资源组成及运行状态、拓扑结构、季节气候等条件变化时，分区策略需要动态变化以达到更好的运行效果。从内部需求来看，当业务场景变化时，集群所对应调控的资源也需要改变，通过优化资源组合，实现不同业务场景下的响应。在分层分区动态聚合过程中，需考虑分布式资源的运行特性相似度、空间分布集中度和耦合效应契合度等要素是否达到相应标准，并根据电网运行状态以及业务类型对分布式资源进行动态分组，以满足不同调控业务的需求。

2021 年 2 月 25 日，国家发展改革委、国家能源局发布《关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见》，提出“两个一体化”（即“源网荷储一体化”和“风光水火储一体化”）<sup>[12]</sup>。“源-网-荷-储”一体化实施路径将通过优化整合本地电源侧、电网侧、负荷侧资源，以先进技术突破和体制机制创新为支撑，探索构建“源-网-荷-储”高度融合的新型电力系统发展路径，主要包括区域

（省）级、市（县）级、园区（居民区）级“源网荷储一体化”等具体模式。多能互补实施路径利用存量常规电源，合理配置储能，统筹各类电源规划、设计、建设、运营，优先发展新能源，积极实施存量“风光水火储一体化”提升，稳妥推进增量“风光水（储）一体化”，探索增量“风光储一体化”，严控增量“风光火（储）一体化”。“两个一体化”的发展模式初步体现了分层集群的新型电力系统的雏形。

### 3 分层集群的新型电力系统运行控制（“信息网络”层面）

实现电力电量平衡、维持频率电压稳定是电力系统运行控制的基本任务，长期以来得到了学术界、工业界的密切关注和深入研究。传统的电力系统有功功率平衡过程是当负荷功率发生变化时，电源及时调整出力使得系统在转动惯量的缓冲作用下达达到有功平衡的 1 个连续变化过程（即“源随荷动”）。分层集群的电力系统中由于风电、光伏和储能等间歇性可再生能源的接入和高压大功率电力电子元件的普及，传统的电力系统功率调节过程发生了巨大的变化，如可再生能源的功率输出将不再

可控、对需求响应能力的要求急剧提升、对于送端系统视为负荷的外送直流系统将具备大规模功率调节的能力等等,电力系统调度模式也将向“源荷互动”转变。此外,传统电力系统在高比例电力电子设备接入的条件下将呈现出新的动态特性。

随着分层集群的新型电力系统的发展和完善,集群智能(swarm intelligence, SI)与协同控制(cooperative control, CC)前沿理论和技术可以应用于其运行控制<sup>[13]</sup>。集群智能与协同控制是新一代人工智能的重要研究领域。集群智能是单体智能未来发展的必然趋势,指一定数量的智能体之间通过局部感知和相对简单的交互方式,完成个体不易实现的任务过程中所涌现出的复杂、强大的集群宏观行为。协同控制可为集群智能涌现提供时空协调保障,是集群智能涌现的核心关键技术和制高点技术<sup>[13]</sup>。为完成某一复杂任务,集群智能控制系统的每一智能体可以根据从通信网络所获得的信息作出自主决策,也可以共享信息、相互协作并共同完成工作任务。近年来,我国日渐重视基于个体智能、集群聚合、协同优化等思想的前沿技术。2022年4月2日国家能源局和科学技术部发布的《“十四五”能源领域科技创新规划》文件中明确提到开展智能微网关键技术攻关,实现分布式储能与分布式电源协同聚合,以及推广协同控制与区域能源管理技术<sup>[14]</sup>。协同控制具有以下优点:

- 1) 有效解决大规模复杂系统的控制问题;
- 2) 通过集合多个能力较弱的智能体的控制功能可以实现  $1+1>2$  的协同效果;
- 3) 整个系统具有较高的鲁棒性,在发生大干扰的情况下,每个智能体仍有可能独立完成各自的控制任务。

集群智能与协同控制理论能为分层集群的新型电力系统的运行控制提供有效的解决方案,重点在于构建包括电源侧、电网侧与负荷侧(含储能)多种资源的协同控制方案和策略。如图4所示,协同控制框架由3大方面构成,包括分布式感知、信息融合和控制策略。

### 3.1 分层集群的新型电力系统分布式感知

新型电力系统是信息网络与物理网络高度融合的信息物理系统,智能终端需要采集的数据变得更加多元化、小型化,数据数量更为庞大。随着智能传感技术和电源管理单元(power management unit, PMU)、广域测量系统(wide area measurement

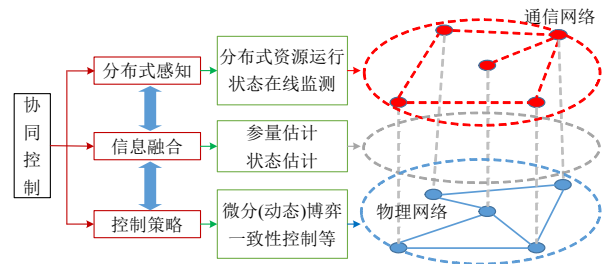


图4 分层集群的新型电力系统协同控制框架

Fig. 4 Cooperative control framework for the new power systems based on hierarchical clusters

system, WAMS)等的快速发展,将获取到反映大规模、复杂、高维的新型电力系统实时动态的海量数据集。

新型电力系统的状态监测可基于传感器网络进行,而每个传感节点由于受取能方式、计算能力以及感知范围的约束,只能感知大规模新型电力系统的局部状态,因此需要在监测区域内大量部署传感节点,并实现信息融合。

区别于传统电力系统的集中调度,新型电力系统的各集群间为了实现高效地数据资源共享,必须采用直接交换信息的通信方式。为了掌握系统的整体运行状态,传统方法是在收集所有传感器的量测值之后,集中估计系统运行状态,即采用集中式信号处理方式。但是,若在大规模新型系统中采用集中式信号处理,海量信号的接收与异质灵活性资源出力计划的求解会对能量管理系统形成挑战,使其面临中心式算法安全性和鲁棒性不够、节点通信能力不足等问题。而分布式信号处理通过不同区域内分布式估计器的相互协作来实现系统运行状态的估计/检测,无需经过协调中心即可完成整个系统的状态估计。分布式信号处理具有以下特点:鲁棒性更强,节点可以随时进出网络,保密性更强,均匀分配计算和通信负担等,相比集中式信号处理更适应大规模系统<sup>[15-18]</sup>。

近年来,随着PMU技术的发展,基于PMU的WAMS测量系统逐渐凸显优势,但海量系统量测数据的处理难题也随之而来。基于WAMS的状态估计主要分为集中式和分布式2种,集中式模式难以满足状态估计的实时性要求,可靠性和可扩展性不强。而分布式状态估计(distributed state estimation, DSE)可以避免海量数据繁杂的集中式处理,具有更快的计算速度、更小的通信开销,以及更好的可靠性与可扩展性<sup>[15-18]</sup>。现有的DSE结构主要分成2大类:分层式结构与分散式结构,如图5所示。

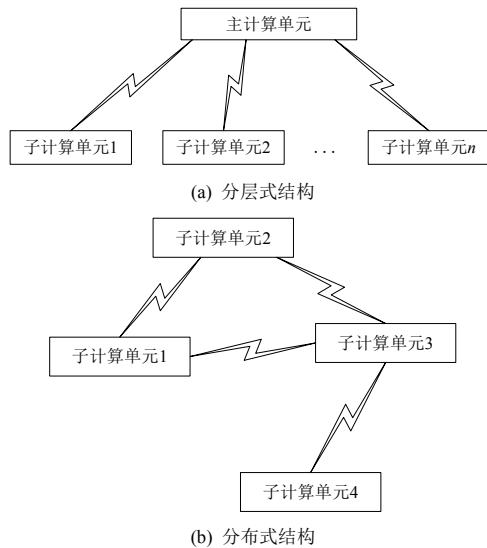


图 5 新型电力系统的分布式状态估计  
Fig. 5 Distributed state estimation for the new power systems

### 3.2 分层集群的新型电力系统信息融合

分层集群的新型电力系统的分布式信号处理就是 1 个“盲人摸象”的过程，通过传感器只能感知完整系统的 1 个部分，如何利用传感器量化压缩后的信号形成动态系统的整体状态是分布式信号处理的关键。在分布式信号处理中，1 组传感器共同观测环境状态的信息。由于成本、频谱带宽限制和计算复杂度等因素的影响，传感器将自身的观测数据进行压缩，只将部分信息传输至融合中心，再对环境状态进行融合估计。

多源信息融合(multi-source information fusion, MIF)又称为多传感信息融合，是 20 世纪 70 年代提出来的概念，首先应用于军事领域<sup>[19]</sup>。由于早期的融合方法研究是针对数据处理的，所以有时也把信息融合称为数据融合(data fusion, DF)。在多传感器系统中，各种传感器提供的信息可能具有不同的特性(时变的或非时变的、实时的或非实时的、确定的或随机的、精确的或模糊的等)。多传感信息融合系统将充分利用多个传感器资源，通过对各种观测信息的合理支配与使用，在空间和时间上把互补与冗余信息依据某种优化准则结合起来，产生对观测环境的一致性解释或描述，同时产生新的融合结果。其目标是运用各种传感器的分离观测信息，通过对信息的优化组合导出更多的有效信息，最终目的是利用多个传感器共同或联合操作的优势来提高整个系统的有效性。运用信息融合技术，将分层集群的新型电力系统中广泛分布的大量传感器的观测信息整合起来以获得整个系统的准确运行状态，是

新型电力系统运行控制的基础。

### 3.3 分层集群的新型电力系统协同控制

分层集群的新型电力系统的运行控制是 1 个极富挑战性的任务。新型电力系统必将是 1 个包含多种不同资源(传统同步发电机、新能源机组、高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)、微电网、储能、负荷等)的系统。传统依靠调节同步发电机组输出来调节系统能量偏差的方法难以应对高比例可再生能源接入带来的稳定性问题。另一方面，随着海量风、光等新能源机组通过电力电子设备并入电网，高比例可再生能源和高比例电力电子设备(即“双高”)正成为新型电力系统发展的重要趋势和关键特征，并对当前电力系统的动态行为产生重大变化，导致了新的稳定性问题，比如电力电子设备之间及其与电网之间相互作用引起的宽频带振荡等。

近年来“协同优化”与“协同控制”思想被广泛应用于电力(能源)系统优化与控制中<sup>[20]</sup>。作为协同优化的代表性方法之一，协同进化方法将新型电力系统分解为相关联的两个或者多个资源集群，并建立基于关联参数的协调项来确保整体收敛。协同进化方法具有优良的复杂嵌套系统解耦能力，因此能够对包含大量变量的系统进行优化，对动态变化的系统结构也具有很强的适应性。文献[21]将协同进化方法应用于多微网鲁棒调度中，将多微网决策变量划分为不同的种群并进行调度策略的交替迭代，实现了高度复杂的不确定集解耦化，提高了鲁棒调度模型在涉及冷、热、电负荷以及多种可再生能源等复杂不确定环境下的收敛性能。文献[22]基于多目标优化模型提出了 1 种双层求解算法，该算法由多微网层基于分解和差分进化的自适应多目标进化算法和单微网层快速经济调度的改进一致性算法组成。文献[23]使用基于神经网络的方法，从大量历史数据中生成特征不确定集，从而能够在保持高可靠性的同时降低历史场景的数据量，同时提出了 1 个双层分布式鲁棒优化模型来优化不确定环境下的“车辆-电网”(vehicle-to-grid, V2G)充放电调度策略。

微分博弈理论是求解协同控制问题的崭新思路。该理论起源于 20 世纪 50 年代美国空军开展的军事对抗中双方追逃问题的研究，是最优控制与博弈论的结合<sup>[24]</sup>。微分博弈指的是在时间连续的系统内，多个参与者进行持续的博弈，力图最优化各自独立、冲突的目标，最终获得各参与者随时间演变

的策略并达到纳什均衡,是研究多主体动态协同决策问题的基本方法。

近年来,基于微分博弈理论的电力系统协同控制已成为热点研究方向。本课题组在此领域进行了比较系统的研究。文献[25]将开环纳什均衡策略用于一、二次调频间的协调控制。文献[26-27]针对2个区域和3个区域的负荷频率控制问题,设了反馈纳什均衡控制策略,并仿真验证该控制器在平衡各调频资源利益下的良好控制效果。文献[28]考虑了同一区域内不同类型发电机组的负荷频率博弈控制,并将风电造成的扰动视为博弈的一方,有效抑制了系统能量平衡偏差。文献[29]提出了1种微分博弈跟踪控制用于区域电网负荷频率控制。所提模型和方法已应用于南方电网公司云南异步联网工程中超低频振荡的分析与控制<sup>[30]</sup>,并正在逐步推广应用于新型电力系统的其他稳定问题<sup>[31]</sup>。文献[32-33]提出了基于人工智能的微分博弈策略最优求解方法,并应用于系统负荷频率协同控制。文献[34-35]设计了静止同步补偿器内部的2个控制器的博弈协同控制方法。文献[36]基于原对偶内点法的两层迭代算法求解了多区域电压协同控制问题的博弈均衡解。

从目前的电力系统微分博弈研究进展来看,目前的研究还存在以下一些局限性。首先,多数研究局限于对系统线性模型的求解,微分博弈在非线性系统模型下是否能够获得最优解仍需进一步的研究,人工智能技术应有助于这一问题的解决。其次,如何建立1个含多种分布式资源的分层集群的新型电力系统协同控制模型值得进一步研究,这一模型应能反应实际系统的动态响应特性,并尽可能减少系统的维度从而降低最优解求取的难度。此外,一致性控制等其他前沿控制理论也能为新型电力系统协同控制提供解决方案。

#### 4 分层集群的新型电力系统市场机制(“价值网络”层面)

传统电力系统由大型集中式电厂生产电能并经由多级升压和降压的输配电网到达电力用户,相应的集中式电力市场机制也形成电能商品从发电侧批发市场经大电网至用电侧零售市场的产供销体系。而在分层集群的新型电力系统中分布式电源处处存在,不同层级集群的聚合商们也将参与到面向电力批发市场或本地电力零售市场的电能交易,

并且出现“产销者”(Prosumer,即电力生产者同时也是电力消费者)的新角色。包括分布式发电、储能和柔性负荷在内的分布式资源一方面将削弱大型发电企业对电能供应的垄断地位、提供灵活调节资源,另一方面所引发的复杂时变潮流也将给不同层级电网的规划、运行和保护带来新的挑战,并且催生全新的交易机制和商业模式,本文拟对此进行初步探讨。

##### 4.1 分布式资源端对端交易机制

近年来端对端能源交易(peer-to-peer energy trading)正吸引越来越多的关注。在端对端能源交易中,拥有分布式能源的用户(产消者)可以直接进行能源交易和共享。相比以自然垄断和规模效应为特点的传统电力市场,端对端能源交易可以看作是“共享经济”(sharing economy)的1个范例,使用户可以与其他用户共享多余的本地发电或电力灵活性,实现能源生产者和消费者实现经济利益上的双赢。文献[37]总结分析了端对端能源交易的全球发展现状,讨论了端对端能源交易的5个主要方面:市场机制设计、交易平台、物理和信息通信基础设施、社会科学视角以及政策法规,并就未来的发展方向做出了展望。文献[38]通过响应家用电器(如热泵、制冷设备和储能装置)实施住宅需求响应。开发了端对端的能源交易平台,并采用双重拍卖机制。文献[39]基于合作博弈理论,提出了两种计算效率高的机制来构建参与端对端交易的固定消费者联盟。

另外,新型数字技术的应用进一步提高了端对端交易的可靠性。基于区块链技术的端对端可信交易可以免除传统能源交易所需的第三方中介,从而减少间接费用以及对于第三方中介的信任问题。文献[40]研发了1个优化模型和基于区块链的体系结构,用于管理具有端对端能源交易聚合能源系统的运行,并提出了1种两阶段算法用于集群运行自优化。端对端能源交易可以适应各层级的市场环境。因此,可以基于目前存在的资源集群(如虚拟电厂、微网等)进行端对端的实际运行开展研究。

##### 4.2 新型辅助服务交易机制

国内外现有辅助服务市场的交易品种一般不包括一次调频和惯性,其中一次调频一般作为强制提供的基本辅助服务。为改善高比例可再生能源接入条件下的电力系统频率动态特性和提高调频能力,近年来美国德州、澳大利亚、英国等电力市场



在积极讨论将惯性、一次调频等纳入辅助服务品种的可能性。部分国家和地区针对电力系统的低惯性问题，设计了快速频率响应(fast frequency response, FFR)产品，可在系统频率突然变化时快速注入有功功率，与同步惯量一起阻止扰动下短时间内频率的快速变化，以弥补其调频调峰容量的不足<sup>[41-42]</sup>。在2011年，爱尔兰和北爱尔兰在2011年启动了包含FFR辅助服务的项目DS3，并于2018年完成了该项FFR服务的市场化<sup>[43]</sup>。在中国国内电力市场中，一次调频是强制提供的基本辅助服务，而二次调频则已经纳入市场化运行。目前一次调频由同步机强制义务提供，通过“两个细则”对其动作性能进行评价，只要其满足基本调节性能即算合格，无法合理体现某些优质调频资源的贡献价值。因此，需要结合国外辅助服务市场实践及我国电力系统实际情况，研究在我国建立一次调频辅助服务市场机制的可行性。

应结合我国电力系统结构特点和电力市场建设现状，对一次调频、快速频率响应和惯性等新型辅助服务进行更为深入的研究，探索适合国情的市场机制，保障新型电力系统的安全稳定。对于新型辅助服务如何合理定价的问题的研究目前尚为空白，可结合基于连续时间商品模型的电力市场定价等理论，研究新型辅助服务品种的合理定价问题<sup>[44]</sup>。考虑发电厂、用户成本和电网的安全经济效益，基于在线监测数据，建立新型辅助服务的交易机制、考核和补偿机制、费用分摊机制等，并基于协同进化算法智能模拟<sup>[45]</sup>和实验经济学<sup>[46]</sup>等方法开展市场仿真研究。

#### 4.3 虚拟电厂商业模式

分布式电源、储能及可调负荷等灵活性资源具有容量小、种类多、参数各异、点多面广等特点，难以直接参与电网运行。虚拟电厂(virtual power plant, VPP)可通过聚合大量分布式资源，参与电网调峰、调频、调压、备用、阻塞消除等辅助服务和电能交易，促进“源-网-荷-储”互动运行。文献[47]针对电力市场参与者和配电网运行序列图，提出各参与者互动和通信时间表。通过优化调整虚拟电厂资源的有功和无功功率可以缓解配电网阻塞，同时最大限度地接纳可再生能源。文献[48]研究了考虑风电出力、备用分布、电力市场交易等多种不确定性的虚拟电厂日前自调度问题，将其建模为1个随机自适应鲁棒优化问题并使用列生成算

法求解。作为虚拟电厂的初级形态，空调、电蓄热锅炉等用户侧灵活性可控负荷是调节配电网负荷峰谷差的有效途径。同时，电动汽车的快速发展也会对配电网运行产生显著影响。

根据虚拟电厂参与调峰、调频、调压、备用、阻塞消除等辅助服务和电能交易等不同交易品种的需求，多个聚合商之间将形成集中式、分散式、分布式模式相结合的复杂交易网络。根据虚拟电厂所处大电网的运行状况及电能、辅助服务等市场交易需求，需研究多聚合商参与大电网电能与辅助服务市场等的交易机制与策略。虚拟电厂中可能包括冷热电三联供等综合能源设备<sup>[49]</sup>，在虚拟电厂运行控制和交易中应予以考虑。此外，在“双碳”目标下，还应研究考虑碳市场影响的聚合商参与电力市场交易的策略，并探索分布式资源的电碳协同机制。

#### 4.4 电动汽车聚合商业模式

随着V2G技术的发展，电动汽车作为分布式能源参与电力系统运行与控制的关注度近年来不断提高<sup>[50]</sup>。然而，与传统的分布式电源或电力负荷不同，在新型电力系统中电动汽车与电网之间的互动通常是通过电动汽车聚合商(EV aggregator)为特定区域内大量个体电动汽车服务的模式实现的，该聚合商旨在优化V2G过程以实现经济效益最大化，并通过管理充电/放电操作来使电动汽车用户受益。文献[51]提出的等效时变存储模型可以推广到不同的市场和不同的柔性负荷。文献[52]基于旅行商问题，提出了1种新的电动汽车最优路径模型，该模型考虑了电力市场分时电价下的快速充电和定期充电来最小化电动汽车路线的总配送成本。文献[53]提出了1种参与电能和调频市场的电动汽车聚合商的实时充电管理框架。根据不断变化的电动汽车充电优先级为电动汽车分配充电设定点，并化简为可以非常快速求解的线性问题。文献[54]研究了无线充电和电动汽车移动对基于节点边际电价的电力批发市场的影响，以及基于电力系统节点边际电价变化的定价机制。

#### 4.5 分布式储能聚合商业模式

分布式储能技术可以有效地解决配电网所面临的负荷峰谷差和电压质量问题，并延缓配电网的设备扩容。在新型电力系统中，整合和利用分布式储能也可以大幅提高系统的动态稳定性能。

目前分布式储能在我国的收益主要依靠峰谷

电价套利<sup>[55]</sup>，而在美国、日韩、德国、澳大利亚的国家则依靠初装补贴和可再生能源发电带来的电费节约。

目前部分公司探索得到具体商业模式可包括“以租代售”(如美国 STEM 公司)<sup>[56]</sup>、社区储能模型(如德国 Sonnen 公司)<sup>[57]</sup>、以及虚拟电厂模式(广泛应用)。而考虑到分布式储能普遍存在容量小、相互距离较远的特点，聚合商的重要性逐渐体现。其通过整合特定区域的如风电储能、光伏储能等设备统一安排能量管理计划，实现储能设备的快速响应以及整体经济利益或环境利益的最大化。目前如英国、美国、德国等已调整规则以提高市场竞争力<sup>[58]</sup>。文献<sup>[59]</sup>提出了基于多智能体的储能系统聚合，作为将能量管理扩展到具有分布式储能系统的低压微电网的1种手段。并且为具有分布式电池和超级电容器储能系统的交流微电网开发了1种分层控制策略。文献<sup>[60]</sup>提出了1种通用方法来选择符合本地能源网络需求的储能单元的最佳位置和额定值，来帮助分布式储能聚合商在电力市场中做出快速决定。文献<sup>[61]</sup>提出了1种分布式算法来实现分布式储能的最优协调。所提出的方法基于 Dantzig-Wolfe 分解和列生成算法，从而允许聚合商集成能用混合整数线性规划建模的任何类型的资源。

不同于传统的集中式运营的储能电站，分布式储能具有占地面积小、投资成本低、部署灵活等优点。但是，单个分布式储能的充放电功率小、容量有限，难以被电网调度中心直接调控。相比之下，聚合后的分布式储能调控灵活、可调控潜力大，具有参与电力市场交易的可行性。因此，有必要引入分布式储能聚合的商业模式，使其在精细化、个性化地控制策略下，以1种易实现易调控的模式参与电力市场。

## 5 结论

本文提出了分层集群的新型电力系统的3层网络(能量网络、信息网络、价值网络)架构及整体研究思路。在能量网络层面，提出了分层集群的新型电力系统的技术特征和形态结构，并介绍了我国当前的相关政策支持。在信息网络层面，在介绍了新型电力系统分布式感知和信息融合问题后，重点探讨了集群智能与协同控制理论、技术在新型电力系统(特别是频率控制)中的应用。在价值网络层面，介绍了分布式资源端对端交易、虚拟电厂等新型交

易机制和商业模式。

未来新型电力系统的电力电子化已成为必然趋势，“源-网-荷-储”设备的智能化、数字化也使它们能够更加主动地参与系统的运行和控制，适合采用集群智能和协同控制理论和方法来解决。集群智能和协同控制充分融合人工智能、系统工程、协同控制、指挥与控制、导航制导与控制、通信与探测等多个学科的理论和技术，在航空、航天、能源、电力、制造、化工、交通、信息等不同行业得到广泛应用，其理论与方法可相互借鉴，并且在新型电力系统的构建中具有广阔的应用前景，值得关注和深入研究。

为应对气候变化，全球已有130多个国家宣布了“碳中和”的方案，其关键在于能源转型，而新型电力系统是实现能源转型的重要载体。新型电力系统及与之耦合的能源系统是1个大规模、随机性、混杂性、分布式、网络化的复杂系统。其建模、分析、优化与控制是1个典型的多学科交叉问题，涉及电力系统、电力电子、热能动力、优化与控制、信息与通信、经济管理、人工智能等不同学科，并对传统电力理论提出了挑战<sup>[62]</sup>。实现碳达峰碳中和是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革，需要在新型电力系统基础理论与方法方面开展“从0到1”的原始创新，并且紧密结合工程应用开展研究<sup>[63]</sup>。

## 参考文献

- [1] 国际能源署. 中国分布式能源前景展望[M]. 北京: 石油工业出版社, 2017.  
International Energy Agency. Prospects for distributed energy systems in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2017(in Chinese).
- [2] 付学谦, 陈皓勇, 刘国特, 等. 分布式电源电能质量综合评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4270-4276.  
FU Xueqian, CHEN Haoyong, Liu Guote, et al. Power quality comprehensive evaluation method for distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4270-4276(in Chinese).
- [3] 沈泽宇, 陈思捷, 严正, 等. 基于区块链的分布式能源交易技术[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(11): 3841-3851.  
SHEN Zeyu, CHEN Sijie, YAN Zheng, et al. Distributed energy trading technology based on blockchain[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(11): 3841-3851(in Chinese).

- [4] LANGBEIN P L. Demand response participation in PJM wholesale markets[C]//Proceedings of 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference . Washington: IEEE, 2012: 1-3.
- [5] ZHANG Cong, CHEN Haoyong, LIANG Zipeng, et al. Reactive power optimization under interval uncertainty by the linear approximation method and its modified method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4587-4600.
- [6] OPERATOR A . Black system south Australia 28 September 2016: final report[R]. Bella Vista: Australian Energy Market Operator Limited, 2017.
- [7] BIALEK J. What does the GB power outage on 9 August 2019 tell us about the current state of decarbonised power systems?[J]. Energy Policy, 2020, 146: 111821.
- [8] 张建新, 刘春晓, 陈亦平, 等. 异步联网方式下云南电网超低频振荡的抑制措施与试验[J]. 南方电网技术, 2016, 10(7): 35-39.  
ZHANG Jianxin, LIU Chunxiao, CHEN Yiping, et al. Countermeasures and experiments on ultra-low frequency oscillation of Yunnan power grid in asynchronous interconnection mode[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(7): 35-39(in Chinese).
- [9] 陈皓勇, 文俊中, 王增煜, 等. 能量网络的传递规律与网络方程[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(10): 66-76.  
CHEN Haoyong, WEN Junzhong, WANG Zengyu, et al. Transfer laws and equations of energy networks[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(10): 66-76(in Chinese).
- [10] 陈皓勇. 从限电限产透视“能源不可能三角”[J]. 中国电力企业管理, 2021, 34: 44-47.  
CHEN Haoyong. Perspective of "The Energy Trilemma" from power and production curtailment[J]. China Power Enterprise Management, 2021, 34: 44-47(in Chinese).
- [11] 余贻鑫, 刘艳丽, 秦超, 等. 分层分群电网体系结构[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 1-8.  
YU Yixin, LIU Yanli, QIN Chao, et al. Layered and clustered grid architecture[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 1-8(in Chinese).
- [12] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见[EB/OL]. (2021-02-25). [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-03/06/content\\_5590895.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-03/06/content_5590895.htm).  
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Guiding opinions on promoting the integration of power sources, networks, loads and storage and the development of multi-energy complementarity[EB/OL]. (2021-02-25). [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-03/06/content\\_5590895.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-03/06/content_5590895.htm) (in Chinese).
- [13] 陈皓勇, 任章, 张承慧, 等. “集群智能与协同控制”专刊前言[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(7): 873-874.  
CHEN Haoyong, REN Zhang, ZHANG Chenghui, et al. Special issue on swarm intelligence and cooperative control preface[J]. Control Theory & Applications, 2021, 38(7): 873-874(in Chinese).
- [14] 国家能源局, 科学技术部. 关于印发《“十四五”能源领域科技创新规划》的通知[EB/OL]. (2022-04-02). [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-04/03/content\\_5683361.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-04/03/content_5683361.htm).  
National Energy Administration, Ministry of Science and Technology. 14th Five-Year plan for science and technology innovation in energy area[EB/OL]. (2022-04-02). [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-04/03/content\\_5683361.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-04/03/content_5683361.htm)(in Chinese).
- [15] 陈皓勇, 王晓娟, 蔡永智, 等. 复杂电力(能源)系统的分布式感知与协同估计/检测研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 1-10.  
CHEN Haoyong, WANG Xiaojuan, CAI Yongzhi, et al. Distributed sensing and cooperative estimation/detection of complex power/energy and energy systems[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 1-10(in Chinese).
- [16] 蔡永智, 陈皓勇, 郭曼兰. 采用有限时间平均一致性协议的电力系统分布式状态估计[J]. 控制理论与应用, 2016, 33(8): 1007-1014.  
CAI Yongzhi, CHEN Haoyong, GUO Manlan. Distributed power system state estimation using finite-time average consensus protocol[J]. Control Theory & Applications, 2016, 33(8): 1007-1014(in Chinese).
- [17] 蔡永智, 陈皓勇, 万楚林. 基于局部信息融合和估计投影法的多区域电力系统状态估计[J]. 电工技术学报, 2017, 32(1): 69-77.  
CAI Yongzhi, CHEN Haoyong, WAN Chulin. Multi-area power system state estimation based on partial information fusion and estimate projection [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(1): 69-77(in Chinese).
- [18] 蔡永智, 陈皓勇, 万楚林. 基于最小二乘估计融合的分布式电力系统动态状态估计[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 29-35, 113.  
CAI Yongzhi, CHEN Haoyong, WAN Chulin. Distributed dynamic state estimation for power systems based on least square estimation fusion[J]. Automation of Electric Power

- Systems, 2016, 40(8): 29-35, 113(in Chinese).
- [19] 韩崇昭, 朱洪艳, 段战胜, 等. 多源信息融合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 1-4.  
HAN Chongzhao, ZHU Hongyan, DUAN Zhansheng, et al. Multi-source information fusion[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010: 1-4(in Chinese).
- [20] 陈皓勇, 王锡凡, 别朝红, 等. 协同进化算法及其在电力系统中的应用前景[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(23): 94-100.  
CHEN Haoyong, WANG Xifan, BIE Zhaohong, et al. Cooperative coevolutionary approaches and their potential applications in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(23): 94-100(in Chinese).
- [21] TAN Bifei, CHEN Haoyong, ZHENG Xiaodong. Hierarchical two-stage robust optimisation dispatch based on co-evolutionary theory for multiple CCHP microgrids[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(19): 4121-4131.
- [22] TAN Bifei, CHEN Haoyong. Multi-objective energy management of multiple microgrids under random electric vehicle charging[J]. Energy, 2020, 208: 118360.
- [23] TAN Bifei, CHEN Haoyong, ZHENG Xiaodong, et al. Two-stage robust optimization dispatch for multiple microgrids with electric vehicle loads based on a novel data-driven uncertainty set[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 134: 107359.
- [24] BATHER J A. Differential games: a mathematical theory with applications to warfare and pursuit, control and optimization[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series A(General), 1966, 129(3): 474-475.
- [25] 叶荣, 陈皓勇, 娄二军. 基于微分博弈理论的频率协调控制方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 41-46.  
YE Rong, CHEN Haoyong, LOU Erjun. A coordinated frequency control method based on differential game theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 41-46(in Chinese).
- [26] CHEN Haoyong, YE Rong, WANG Xiaodong, et al. Cooperative control of power system load and frequency by using differential games[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(3): 882-897.
- [27] 叶荣, 陈皓勇, 卢润戈. 基于微分博弈理论的两区域自动发电控制协调方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 48-54, 67.  
YE Rong, CHEN Haoyong, LU Runge. A differential games theory based method for coordinating two-area automatic generation control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18): 48-54, 67(in Chinese).
- [28] 伍亮, 杨金明. 基于微分博弈理论的含多电源区域电力系统负荷频率控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2676-2683.  
WU Liang, YANG Jinming. Load frequency control of area power system with multi-source power generation based on differential games theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2676-2683(in Chinese).
- [29] WU Liang, YANG Jinming. Load frequency control of area power system with multi-source power generation units based on differential games tracking control[C]//Proceedings of 2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Hong Kong, China: IEEE, 2013.
- [30] MO Weike, CHEN Yiping, CHEN Haoyong, et al. Analysis and measures of ultralow-frequency oscillations in a large-scale hydropower transmission system[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(3): 1077-1085.
- [31] WU Liang, CHEN Haoyong. Spanning-tree-based synchronization conditions for second-order kuramoto networks[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs[J], 2021, 68(4): 1448-1452.
- [32] MU Chaoxu, WANG Ke, NI Zhen, et al. Cooperative differential game-based optimal control and its application to power systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(8): 5169-5179.
- [33] YAN Ziming, XU Yan. A multi-agent deep reinforcement learning method for cooperative load frequency control of a multi-area power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4599-4608.
- [34] 杨鑫, 陈皓勇, 卢润戈, 等. 基于微分博弈理论的静止同步补偿器协同控制[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(21): 53-57, 113.  
YANG Xin, CHEN Haoyong, LU Runge, et al. Cooperative control of STATCOM based on differential game theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(21): 53-57, 113(in Chinese).
- [35] 陈清, 陈皓勇, 杨鑫. 基于反馈微分博弈的STATCOM协同控制研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(5): 23-27.  
CHEN Qing, CHEN Haoyong, YANG Xin. Cooperative control of STATCOM based on feedback differential games[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(5): 23-27(in Chinese).
- [36] 徐玄浩, 陈皓勇, 华栋, 等. 基于动态博弈理论的多区域电压协同控制方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(19): 15-22.  
XU Xuanhao, CHEN Haoyong, HUA Dong, et al.



- Multi-area voltage cooperative control method based on dynamic game theory[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(19): 15-22(in Chinese).
- [37] ZHOU Yue, WU Jianzhong, LONG Chao, et al. State-of-the-art analysis and perspectives for peer-to-peer energy trading[J]. *Engineering*, 2020, 6(7): 739-753.
- [38] LIU Weijia, QI Donglian, WEN Fushuan. Intraday residential demand response scheme based on peer-to-peer energy trading[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(3): 1823-1835.
- [39] LI Jing, YE Yujian, PAPANASKALOPOULOS D, et al. Computationally efficient pricing and benefit distribution mechanisms for incentivizing stable peer-to-peer energy trading[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(2): 734-749.
- [40] WANG Shen, TAHA Ahmad F., WANG Jianhui, et al. Energy crowdsourcing and peer-to-peer energy trading in blockchain-enabled smart grids[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, 49(8): 1612-1623.
- [41] 王宝财, 孙华东, 李文锋, 等. 考虑动态频率约束的电力系统最小惯量评估[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(01): 114-127.
- WANG Baocai, SUN Huadong, LI Wenfeng, et al. Minimum inertia estimation of power system considering dynamic frequency constraints [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(01): 114-127(in Chinese).
- [42] 葛晓琳, 刘亚, 符杨, 等. 考虑惯量支撑及频率调节全过程的分布鲁棒机组组合[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(12): 4043-4058.
- GE Xiaolin, LIU Ya, FU Yang, et al. Distributed robust unit commitment considering the whole process of inertia support and frequency regulations [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(12): 4043-4058(in Chinese).
- [43] EIRGRID S. DS3 system services qualification trials process outcomes and learnings 2017[R]. Dublin: EirGrid, 2017.
- [44] 陈皓勇, 韩励佳. 基于连续时间商品模型的电力市场定价理论[J]. *中国科学: 信息科学*, 2018, 48(10): 1287-1299.
- CHEN Haoyong, HAN Lijia. Electricity pricing theory based on continuous time commodity model[J]. *Scientia Sinica: Informationis*, 2018, 48(10): 1287-1299(in Chinese).
- [45] CHEN Haoyong, WONG K P, et al. Analyzing oligopolistic electricity market using co-evolutionary computation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006, 21(1): 143-152.
- [46] CHEN Haoyong, WANG Xifang. Strategic behavior and equilibrium in experimental oligopolistic electricity markets[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2007, 22(4): 1707-1716.
- [47] KORAKI Despina, STRUNZ Kai. Wind and solar power integration in electricity markets and distribution networks through service-centric virtual power plants[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(1): 473-485.
- [48] BARINGO Ana, BARINGO Luis, ARROYO José M. Day-ahead self-scheduling of a virtual power plant in energy and reserve electricity markets under uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(3): 1881-1894.
- [49] 陈皓勇, 李明, 邱明, 等. 时变能量网络建模与分析[J]. *中国科学: 技术科学*. 2019. 49: 243-254.
- CHEN Haoyong, LI Ming, QIU Ming, et al. Modeling and analysis of time-varying energy network[J]. *Sci Sin Tech*, 2019, 49: 243 - 254(in Chinese).
- [50] PAUL Subho, PADHY Narayana Prasad. Resilient scheduling portfolio of residential devices and plug-in electric vehicle by minimizing conditional value at risk[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(3): 1566-1578.
- [51] PERTL Michael, CARDUCCI Francesco, TABONE Michaelangelo, et al. An equivalent time-variant storage model to harness EV flexibility: forecast and aggregation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(4): 1899-1910.
- [52] YANG Hongming, YANG Songping, XU Yan, et al. Electric vehicle route optimization considering time-of-use electricity price by learnable partheno-genetic algorithm[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(2): 657-666.
- [53] VAGROPOULOS S I., KYRIAZIDIS D K., BAKIRTZIS A G. Real-time charging management framework for electric vehicle aggregators in a market environment[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(2): 948-957.
- [54] OU Chia-Ho, LIANG Hao, ZHUANG Weihua. Investigating wireless charging and mobility of electric vehicles on electricity market[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(5): 3123-3133.
- [55] 武利会, 岳芬, 宋安琪, 等. 分布式储能商业模式对比分析[J]. *储能科学与技术*, 2019, 8(5): 960-966.
- WU Lihui, YUE Fen, SONG Anqi, et al. Business models for distributed energy storage[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2019, 8(5): 960-966(in Chinese).

- [56] JOHN J S T. Stem extends its reach in California's distributed energy storage market[EB/OL]. (2014-10-01). [2021-12-02].  
<https://www.greentechmedia.com/articles/read/stem-extends-its-reach-in-californias-distributed-energy-storage-market>.
- [57] VONSIEN Silvia, MADLENER Reinhard. Li-ion battery storage in private households with PV systems: analyzing the economic impacts of battery aging and pooling[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 29, 101407.
- [58] SHIVAKUMAR A, DEANE P, NORMARK B, et al. Business models for flexible production and storage[R]. *InsightE*, 2015.
- [59] MORSTYN T, SAVKIN A V, HREDZAK B, et al. Scalable energy management for low voltage microgrids using multi-agent storage system aggregation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(2): 1614-1623.
- [60] TENTI P, CALDOGNETTO T. A general approach to select location and ratings of energy storage systems in local area energy networks[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 55(6): 6203-6210.
- [61] ANJOS M F, LODI A, TANNEAU M. A decentralized framework for the optimal coordination of distributed energy resources[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(1): 349-359.
- [62] ZHANG Cong, CHEN Haoyong, NGAN Honwing, et al. A mixed interval power flow analysis under rectangular and polar coordinate system[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(2): 1422-1429.
- [63] CHEN Haoyong, NGAN Honwing, ZHANG Yongjun.

Power system optimization: large-scale complex systems approaches[M]. Hoboken: John Wiley & Sons-IEEE Press, June 2016.



陈皓勇

在线出版日期: 2022-07-14.

收稿日期: 2021-12-29.

作者简介:

陈皓勇(1975), 男, 博士, 教授, 主要研究方向包括新能源发电与智能电网技术、综合能源系统与能源物联网、电力经济与电力市场等, [eehychen@scut.edu.cn](mailto:eehychen@scut.edu.cn);

谭碧飞(1994), 男, 博士研究生, 研究方向为新能源与负荷功率预测、新能源电力系统优化调度、微电网等, [tanbifei0487@hotmail.com](mailto:tanbifei0487@hotmail.com);

伍亮(1984), 男, 博士, 研究方向为电力系统稳定分析及控制、复杂网络同步分析, [wuliang\\_hn@163.com](mailto:wuliang_hn@163.com);

林镇佳(1992), 男, 博士, 研究方向为新能源电力系统优化调度, [epjack.lin@mail.scut.edu.cn](mailto:epjack.lin@mail.scut.edu.cn);

杨苹(1967), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源发电、微电网、电力市场等, [eppyang@gmail.com](mailto:eppyang@gmail.com);

李立涅(1941), 男, 教授, 中国工程院院士, 研究方向为电网工程、直流输电和交直流并联电网运行技术等, [lilc@scut.edu.cn](mailto:lilc@scut.edu.cn).

(责任编辑 乔宝榆)

# Operation and Control of the New Power Systems Based on Hierarchical Clusters

CHEN Haoyong<sup>1</sup>, TAN Bifei<sup>1</sup>, WU Liang<sup>1</sup>, LIN Zhenjia<sup>1</sup>, YANG Ping<sup>2</sup>, LI Licheng<sup>1</sup>

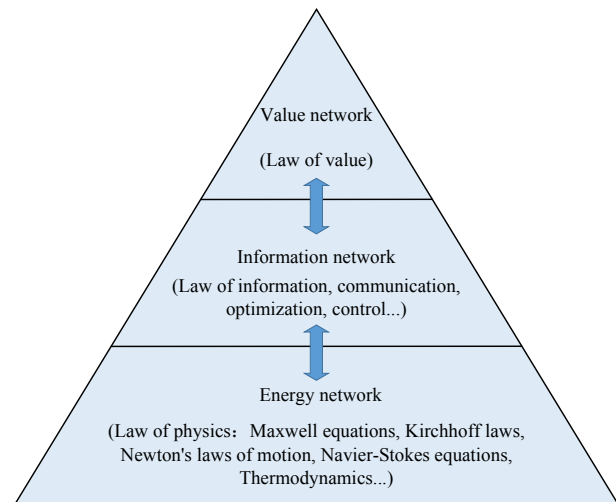
(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology; 2. Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, South China University of Technology)

**KEY WORDS:** hierarchical cluster; renewable energy; swarm intelligence; cooperative control; electricity markets

The integration of massive distributed resources (highly uncertain renewable energy, multiple flexible loads, distributed energy storage, etc.) brings challenges to the operation and control of power systems. The characteristics of low inertia and low short circuit strength at the source side are prominent, and the support ability of safety and stability is continuously weakened. On the other hand, the dynamic characteristics of load side are becoming more and more complex. Furthermore, the AC/DC and multi-DC coupling at the grid side becomes more tightly.

Therefore, in the new power systems, renewable energy such as wind and solar power will exist everywhere, which means that the power sources will be distributed over the whole power systems. The hierarchical and clustered power grid architecture is proposed, namely "the hierarchical structure and global coordination of the system decomposed into clusters" and "each cluster maintains its own net power balance and local autonomous optimization". For the sake of clarity, this paper calls the power systems with this structural feature as "new power system with hierarchical clusters", and further discusses its operational and control issues. The new power systems with hierarchical clusters exhibit a three-layer network architecture and are closely connected with other energy systems.

Accordingly, the operation and control of the new power system with hierarchical clusters can be divided into problems of three levels: physical mechanism ("energy network" level), operation & control ("information network" level) and market transaction ("value network" level). They are typical interdisciplinary problems, as shown in Fig. 1.



**Fig. 1 Three-layer network architecture of new power and energy systems**

At the energy network level, the patterns and technical characteristics of new hierarchical cluster power systems are proposed, and China's current relevant policy support is introduced. At the information network level, after introducing the problem of distributed sensing and information fusion in the new power systems, the focus is put on the application of swarm intelligence and cooperative control theories and technologies (especially frequency control problem). At the value network level, new transaction mechanisms and business models such as distributed resource peer-to-peer transactions and virtual power plants are introduced.

Extensive application of power electronic equipment in new power systems has become an inevitable trend. The digitization of "source - network - load - storage" equipment also enables them to actively participate in the operation of the systems, which is suitable to be solved by using the theories and methods of swarm intelligence and cooperative control. The study of complex power and energy systems by using multidisciplinary approaches is of special importance.