

# 电力系统灵活调节服务与市场机制研究综述

王玲玲<sup>1</sup>, 刘恋<sup>2</sup>, 张镛<sup>1</sup>, 熊展<sup>1</sup>, 蒋传文<sup>1</sup>, 关舒丰<sup>1</sup>

(1. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海市 闵行区 200240;

2. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海市 虹口区 200437)

## A Review of Power System Flexible Ramping Product and Market Mechanism

WANG Lingling<sup>1</sup>, LIU Lian<sup>2</sup>, ZHANG Ke<sup>1</sup>, XIONG Zhan<sup>1</sup>, JIANG Chuanwen<sup>1</sup>, GUAN Shufeng<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion (Shanghai Jiao Tong University),

Ministry of Education, Minhang District, Shanghai 200240, China;

2. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Hongkou District, Shanghai 200437, China)

**ABSTRACT:** As the penetration rate of renewable energy in the power system continues to increase, the operation flexibility of the power system is facing new challenges. The flexible regulation potential of the power system must be fully tapped to further promote the consumption of renewable energy. For this reason, the United States has introduced flexible ramping product (FRP), a new type of auxiliary service in the electricity market, to deal with the lack of flexibility in the short term. China is in a critical period of electricity market reform, a reasonable market mechanism is of great significance to ensure the flexible operation of the power system. This paper first summarizes the definition and connotation of power system flexibility, and the approaches of improving power system flexibility. Then, FRP is compared with traditional ancillary services, and research on optimization models and market mechanisms considering FRP are summarized. In addition, two market clearing models considering FRP based on deterministic and robust optimization model are given. Finally, the issues and research topics that need to be solved in the future FRP research are prospected, and suggestions and reflections about the market mechanism of improving the flexibility of power system in China are put forward, to provide certain guidance and suggestions for the safe, economic and flexible operation of the system with high penetration of renewable energy resources.

**KEY WORDS:** renewable energy; power system; flexible ramping product; optimal dispatch; market mechanism

**摘要:** 随着可再生能源在电力系统中的渗透率不断提高, 电

力系统灵活运行面临新的挑战, 必须充分挖掘电力系统的灵活调节潜力, 以进一步促进新能源的消纳。为此, 美国在电力市场中引入了灵活调节服务(flexible ramping product, FRP)这一新型辅助服务品种, 以期在短期内解决市场缺少灵活调节资源的问题。目前, 我国正处于电力体制改革的关键时期, 合理的市场机制对于保障电力系统的灵活运行具有重要意义。首先, 对电力系统灵活性的定义与内涵以及提升灵活性的措施进行了概述。然后, 分析了 FRP 与传统辅助服务的区别, 综述考虑 FRP 的优化调度模型与市场机制的研究。接着, 给出了基于确定性优化和基于鲁棒优化的两种考虑 FRP 的电力市场出清模型。最后, 对未来 FRP 研究中亟待解决的问题与研究方向进行了展望, 对我国提升电力系统灵活性的市场机制提出建议和思考。可为高比例可再生能源系统的安全经济与灵活运行研究提供一定指导与建议。

**关键词:** 可再生能源; 电力系统; 灵活调节服务; 优化调度; 市场机制

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0846

## 0 引言

能源是经济与社会发展的基础, 面对日益突出的能源危机、全球变暖和环境污染等问题, 加快发展可再生能源, 形成以高比例可再生能源为主的能源供应体系已成为国际社会的共识<sup>[1-2]</sup>。国际能源署(International Energy Agency, IEA)发布的《2020年世界能源展望》<sup>[3]</sup>指出, 未来10年全球电力需求增量的80%将由可再生能源来满足。2060年实现“碳中和”目标的提出也决定了我国未来将进一步发展风电、光伏等可再生能源, 持续推动电力系统清洁低碳转型。截至2020年底, 我国风电和光伏装机均已突破250GW<sup>[4]</sup>。可再生能源的快速发展有助于减轻对传统能源的依赖, 但是相应地, 其出力的随机性和波动性对电力系统灵活性提出了更高的要求<sup>[5]</sup>, 灵活性已经成为含高比例可再生能源电力系

**基金项目:** 上海市科技计划项目“基于分布式资源聚合调控的公共建筑虚拟电厂关键技术研究及应用”(20dz1206200)。

Project Supported by Shanghai Science and Technology Plan “Research and Application for Key Technologies of Public Building Virtual Power Plant Based on Distributed Resource Aggregation Control” (20dz1206200).

统运行的关键, 获得了世界各国的关注<sup>[6-8]</sup>。

IEA 提出, 从电力供需平衡的角度来说, 电力系统的灵活性就是当出现变化和不确定性因素时, 系统能够调控使用各种资源, 保持安全高效、清洁经济运行的能力<sup>[9]</sup>。目前, 我国电力系统灵活性主要是由供给侧的传统发电机组来提供。随着未来可再生能源渗透率的不断提升, 能源供给方式将发生深刻变革, 仅仅由发电机组提供灵活性将无法满足不同增加的系统灵活调节能力需求, 有必要考虑引入多种形式的灵活性资源。就市场机制而言, 灵活调节服务(flexible ramping product, FRP)作为一种新型辅助产品, 在国外受到了广泛关注, 已经在美国加州独立系统运营商(California Independent System Operator, CAISO)和中部独立系统运营商(Midcontinent Independent System Operator, MISO)这两大电力市场中得到了初步应用<sup>[10-11]</sup>。相比之下, 国内对 FRP 的研究尚处于起步阶段, 主要集中在指标设计<sup>[12]</sup>、电力系统规划<sup>[13-14]</sup>和优化运行<sup>[15-16]</sup>以及电力系统灵活性评估<sup>[17]</sup>等方面, 而对 FRP 的市场化获取机制方面的研究相对不足。2019 年, 国家发展改革委和国家能源局联合发布《关于深化电力现货市场建设试点工作的意见》, 提出要合理设计电力现货市场建设方案, 建立促进可再生能源消纳的现货交易机制。如何通过合理的市场调节手段提高系统灵活性, 从而提高可再生能源的消纳, 是我国电力体制改革的目标之一。在未来高比例可再生能源电力系统中, 合理的市场机制能够激发市场主体提供 FRP 的积极性, 对考虑 FRP 的电力市场出清模型以及相关机制进行研究, 制定合理的 FRP 价格机制, 挖掘各类资源在提供 FRP 方面的潜力, 是当前值得研究的重要课题。另一方面, 由于电网规模不同, 资源禀赋不同, 国外电力市场建设经验不完全适合我国的发展需求, 需在借鉴国外经验的基础上, 构建适合中国国情的电力市场。

本文首先对电力系统灵活性的研究进行了概述, 对各类灵活性提升措施进行比较分析。然后, 综述电力系统灵活调节服务与市场机制研究, 阐述了 FRP 与传统辅助服务的区别, 分析引入 FRP 的必要性。接着, 给出了基于确定性优化和基于鲁棒优化的两种考虑 FRP 的出清模型。最后, 从挖掘用户侧资源灵活性、考虑多种灵活性资源的市场机制以及探索数字技术的应用 3 个方面对未来 FRP 研究中需要解决的问题与研究方向进行了展望, 并结合我国现状, 对我国提升电力系统灵活性的市场机制提出建议和思考。

## 1 电力系统灵活性研究概述

### 1.1 电力系统灵活性的定义与内涵

灵活性的概念, 最早是由加拿大学者 Billinton 于 20 世纪 90 年代引入电力系统领域<sup>[18]</sup>, 针对的是传统电源的不确定性规划问题, 即在一定的成本约束条件下, 通过对输电网的快速调整, 应对实际情况与初始规划场景之间的差异。北美电力可靠性协会认为, 电力系统灵活性是利用各种资源满足负荷变化的能力, 主要侧重于运行灵活性以及提高系统灵活性的方法<sup>[19]</sup>。美国 CAISO 和 MISO 的研究开展较早, 积累了一定的运行经验。MISO 根据自身运行中遇到的系统调节能力不足的问题, 将灵活性定义为在实时运行中通过调度额外的灵活性资源来满足系统潜在的爬坡/滑坡需求的能力<sup>[20]</sup>。

本质上来说, 电力系统灵活性源自电力供需实时平衡的要求, 体现了供需关系发生变化时系统保持供需平衡的能力。传统电力系统中, 影响供需平衡的主要因素是负荷的波动以及可能出现的设备故障。近年来, 面对高比例可再生能源的迅猛发展以及电网负荷峰谷差的持续增大, 电力系统灵活调节能力面临新的挑战。电力系统灵活性已成为除安全性、可靠性和经济性之外, 表征系统运行特性的重要指标, 得到了国内外学者的持续关注。文献[21]将电力系统灵活性定义为系统调配其资源来应对负荷变化的能力。文献[22]提出电力系统的灵活性与其消纳可再生能源的能力相关, 在相同的负荷和可再生能源出力场景下, 能够消纳更多可再生能源的电力系统灵活性更高。文献[23]基于鲁棒思想, 提出计及网络和系统运行约束的灵活性区间指标, 用以评估系统所能容纳的最大不确定性区间, 当系统功率波动不超过相应的范围, 则认为系统是灵活的。文献[24]认为电力系统的灵活性体现在多个方面, 如可再生能源利用率、系统运行的经济性和低碳性等。文献[25]认为电力系统灵活性包括广义和狭义两方面。广义灵活性涉及电力系统在规划、检修、运行等多个阶段, 表征在一定的经济约束条件下系统应对各种随机因素以保持可靠供电的能力; 狭义的灵活性指运行灵活性, 其更加侧重于系统运行阶段。针对供需两侧的随机性和波动性, 通过机组组合和经济调度等方法, 在合理的经济成本下保证系统安全稳定运行。文献[26]比较了电力系统灵活性平衡机制与传统电力平衡机制的差异, 指出传统电力平衡主要依靠供给侧的常规机组, 而灵活性平衡是一种双向互动, 体现在“源-网-荷-储”多

个层面。在市场和交易机制方面，文献[27]通过对德国电力市场实际运行数据进行分析，研究了当前电价机制对电力系统灵活性提升的影响。

电力系统灵活性的特征包括以下几点<sup>[28]</sup>：

1) 本质性。电力需要始终保持供需平衡，因此灵活性是电力系统所具有的本质属性，即任何电力系统都具有灵活性，其灵活性的大小与灵活性资源水平及电网强度、区域互联水平等密切相关。

2) 时间性。电力系统灵活性需要在一定的时间尺度下描述，不同时间尺度系统的灵活调节能力不同。系统运行灵活性所关注的时间尺度较短，如秒级的调频能力、分钟级的爬坡能力和小时级的机组启停调峰能力<sup>[26]</sup>。相较于运行灵活性，系统扩展规划的时间尺度延长至天、月甚至年，其灵活性体现在长时间尺度下系统应对能源结构、监管政策或者电力消费模式等变化的能力。

3) 方向性。电力系统灵活性具有方向性，其会随着机组的发电状态和负荷的变化而变化<sup>[29]</sup>，包括“上调”和“下调”两个方向，分别对应系统功率供给小于需求和供给大于需求两种情况。“上调”主要通过增加发电机组出力或者削减负荷向系统提供额外的功率；“下调”则通过减少发电机组出力或增加负荷来削减系统中多余的功率。

4) 供给多元性。电力系统灵活性体现在多方面，除了可以应对净负荷随机波动的实际物理元件，系统运行方式的改进同样可以提供灵活性，如更短时间尺度的调度以及开展新的辅助服务品种等。

## 1.2 电力系统灵活性提升措施

灵活性提升措施包含在电能传输的发输配各个环节。目前，在电力系统的实际调度中，通常只利用传统发电机组实现系统灵活性提升。实际上，实时可调度的资源都具有提供灵活性的能力<sup>[30]</sup>，如需求响应<sup>[31]</sup>以及电-气联合系统<sup>[32]</sup>。随着技术的快速发展，储能也成为电力系统不容忽视的灵活性来源，各类灵活性资源的调节特性各有不同，对于系统“上调”和“下调”发挥着不同的作用。电力系统灵活性提升措施比较<sup>[33]</sup>如图1所示。下面对各类灵活性提升措施作简要介绍。



图1 电力系统灵活性提升措施比较

Fig. 1 Comparison of different approaches to enhance power system flexibility

1) 改善运行方式。合理的运行调度能够提供电力系统灵活性，机组组合和经济调度是电力系统运行中最常见的问题，对其进行模型和算法方面的改进，是改善运行方式的核心所在。灵活的系统运行方式可以从现有电力系统中挖掘灵活性，如提高决策频率(由1h改为15、5min尺度等)，使得决策尽量接近实时(允许市场参与者在交割前修改方案)，以及与相邻地区(国家)开展协作等。一般来说，电网运行方式的改善是成本最低的提高系统灵活性的措施，因为它可以利用现有的基础设施来平衡能源需求和供应。此外，新能源预测精度的提高同样能够提高灵活性<sup>[34]</sup>。

2) 需求响应。电力需求侧分布式资源众多，在电网中接入位置及运行方式灵活，将可调度的需求侧资源纳入能源市场可以增加电网的灵活性。美国MISO规定需求响应资源可以在辅助服务中投标来提供调节服务。德州电力可靠性委员会利用大量的需求响应资源用于提供旋转储备。新兴的需求响应技术包括智能恒温控制设备、楼宇自动化系统<sup>[35]</sup>、即插即用型电动汽车等。我国华北调峰市场对电动汽车充电桩等需求侧资源参与辅助服务的交易进行了初步探索。

3) 改善电网设备。从电源侧来看，灵活性提升策略主要包括火电厂灵活性改造、大规模虚拟同步机、多品种可再生能源互补互济和大规模储能等<sup>[36]</sup>，其中电源侧储能以抽水蓄能和电化学储能为主。衡量火电机组灵活性的参数主要包括爬坡速率、启动时间和最小稳定出力等。其中爬坡速度决定了机组在不同时间尺度下的调节能力，启动时间反映了备用机组投入使用的响应速度，最小稳定出力则决定了机组能够提供的调节空间。电网侧灵活性提升策略包括柔性输电、区域互联互通、微电网等。柔性输电可以提升系统输电能力从而提高电网灵活性。区域互联互通能够扩大平衡区域范围，实现空间的扩展和互补，同样可以提高系统灵活性，保障电网安全。微电网被认为是未来大规模可再生能源接入的有效组织形式<sup>[37]</sup>，未来将在提高系统正常运行时的灵活性以及紧急状态时的韧性方面发挥重要作用。对配电系统而言，随着智能电表和传感设备的普及，先进的通信设备和信息技术也有助于平衡供需。

4) 快速调节资源。在实时操作过程中，快速调节资源，如联合循环机组、往复式发动机等，具有较短的启动时间和快速调节能力，可以提供系统所需的灵活性。

5) 储能。随着技术的快速发展, 储能也成为电力系统不容忽视的灵活性来源。储能的形式多样, 包括抽水蓄能电站、超大型电池组、压缩空气储能、飞轮等。因储能具有响应速度快等优异特点, 储能参与日前和实时市场的自动发电控制策略及相关机制逐渐得到关注<sup>[38-39]</sup>。英国对辅助服务市场进行了改革, 鼓励储能装置提供灵活调节服务。但是目前储能的成本仍然较高。

此外, 可以对可再生能源参与电力系统灵活调节进行探索研究。可再生能源虽然是导致电力系统灵活性需求提升的主要因素之一, 但其出力具有一定的可控性。通过提升新能源预测和控制技术以及完善相关市场机制, 可以实现可再生能源由“随机源”向“灵活源”的转化, 进一步提高电力系统运行灵活性。

## 2 电力系统灵活调节服务与市场机制研究

针对大规模可再生能源接入引起的系统频繁爬坡/滑坡事件, FRP 的概念应运而生, 受到了学术界与工业界的广泛关注<sup>[40-41]</sup>。FRP 包括向上灵活性 (flexible ramp-up, FRU) 和向下灵活性 (flexible ramp-down, FRD) 两种。从电力系统灵活性提升措施来说, FRP 属于改善系统运行方式。实施 FRP 不需要投入新的电网设备或设施, 且其购买价格较低, 是较为经济的一种系统灵活性提升措施。作为一种新的辅助服务交易品种, FRP 能够满足实时调度过程中两个时段净负荷的变化, 通过事先预留调节能力, 保障电力供需平衡, 从而提高系统运行的灵活性和鲁棒性。

### 2.1 灵活调节服务与传统辅助服务的区别

FRP 与传统辅助服务的区别<sup>[42]</sup>如下:

1) 目的不同。调频服务应对的是微小的供需不平衡情况, 备用服务针对的是系统运行中的偶发事故, 而 FRP 服务专注于解决由于可再生能源的增长导致的净负荷波动性越来越大的问题。各项服务各司其职, 实现了市场对资源配置的优化作用。

2) 时间尺度不同。调频服务响应时间较短, 通常在 5min 内, 运行备用的时间尺度在 10~30min, FRP 运行时间尺度为 5 或 15min。

3) 调用方式不同。FRP 是当前时段为应对下一时段系统可能的净负荷变化所预留的调节能力, 目的在于服务系统下一时段, 且各时段所需预留容量不同; 而调频与备用服务是为每个时段自身所预留, 与下一时段无关, 且其预留容量通常是固定的。

4) 价格确定方式不同。FRP 无需市场主体报

价, FRU 与 FRD 价格为功率平衡约束对应的影子价格, 由市场运营商通过实时优化计算得出。调频与备用等辅助服务, 通常需要参与主体提供报价曲线, 然后以市场边际出清价格进行结算。

FRP 的引入弥补了长久以来关于灵活调节资源的市场交易机制的缺乏, 理清了调频和备用等辅助服务与 FRP 的职责范围, 在国外电力市场中得到了初步应用。

### 2.2 考虑灵活调节服务的优化调度模型研究

关于 FRP 调度模型方面的研究, 最开始的 FRP 调度模型以传统确定性模型为基础, 通过在确定性模型中加入 FRP 最小值约束, 使调度结果在一定成本约束下能够应对一定范围内的不确定性<sup>[43]</sup>。针对欧洲集中调度系统, 文献[44]提出了一种多时间尺度的 FRP 日前调度模型, 实现了 FRP 在小时内 (分别以 30、15 和 10min 为调度周期) 的优化配置, 而能量和备用服务仍然以小时为单位进行优化。文献[43]和[44]都是基于传统确定性模型, 对灵活性需求设定值的合理性要求较高。文献[45]将考虑 FRP 需求的确定性机组组合模型与随机优化模型进行了对比, 结果表明随机优化模型的决策优于确定性模型。此外, 由于优良的鲁棒性, 鲁棒优化也被应用到考虑系统灵活性的优化调度当中。由于鲁棒优化针对的是最差场景, 文献[46]在模型中加入了灵活调节成本约束, 用来平衡鲁棒优化结果的鲁棒性和经济性。文献[47]构建了包含 FRU 和 FRD 约束的经济调度模型, 将风险定义为“失负荷概率”。文献[48-50]分别对微网、电池储能和电动汽车提供 FRP 的策略进行了研究。

### 2.3 考虑灵活调节服务的市场机制研究

除了优化调度模型的改进, 如何设计合理的市场机制来激励多种灵活性资源提供 FRP, 并与现有市场机制有效结合, 是另一个需要解决的关键问题。与系统备用类似, FRP 以边际出清价格 (marginal clearing price) 进行清算, 即拉格朗日函数对 FRU 和 FRD 需求的偏导数<sup>[51-52]</sup>。CAISO 与 MISO 已经开展了相应的 FRP 品种研究与市场机制设计, 通过市场手段调动各主体投资 FRP 的积极性。在美国加州电力市场中, 有资格提供 FRP 的市场主体在能量和辅助服务市场进行投标, CAISO 构建包含能量、辅助服务和 FRP 的市场模型, 以社会福利最大化/运行成本最小化进行市场出清, 得到相应的能量、辅助服务与 FRP 的价格及中标量。CAISO 与 MISO 的 FRP 市场机制十分相似, 但在市场参与主体、市场出清、成本分摊等方面有所区别, 如表 1 所示。

存在区别方面	CAISO	MISO
目的	应对未来 5min 内的净负荷波动和不确定性	应对未来 10min 内的净负荷波动和不确定性
市场出清阶段	15min/5min 尺度	日前和实时
参与主体	发电商、售电商、储能或电力用户等	除需求响应和储能之外的灵活性资源
价格机制	仅支付被调用的 FRP 能量费用	同时支付被调用的 FRP 补偿费用和能量费用
成本分摊机制	负荷、发电商、连锁电网共同承担 FRP 费用	负荷和外送电承担 FRP 费用

为避免 FRP 在日前市场开展导致套利空间较大, CASIO 对 FRP 的研究主要是在实时市场, 侧重于提高系统实时调度的灵活性。CASIO 仅在实时运行尺度(15min/5min 尺度)开展 FRP 交易。而 MISO 市场相对保守, 目前 MISO 在日前和实时两个市场开展 FRP 交易, 以确保 FRP 获取的充足性。CASIO 规定发电商、售电商、储能或电力用户等均可参与 FRP 交易, 而 MISO 则禁止需求响应和储能参与 FRP 交易。成本分摊机制方面, 目前两者仍采用传统的成本分摊机制。后续需研究更加合理的成本分摊机制, 使得造成不确定性的资源承担相关 FRP 费用, 真正实现“谁受益谁承担”。

除美国外, 欧洲许多国家也对考虑 FRP 的市场机制进行了探索。英国针对新能源出力高且负荷需求低的场景(通常出现在夏季夜晚以及周末的下午), 在平衡市场中设置需求开启服务(demand turn up)来提供系统向下灵活性。德国进行了在日内市场以 15min 合约拍卖的形式开展 FRP 交易的探索<sup>[53]</sup>, 通过对日前市场的小时级机组组合合约进行微调以应对小时内新能源的不确定性带来的快速爬坡问题。北欧电力市场提高灵活性的措施包括热电联产、水电等灵活资源调节以及跨国电力交换等手段。德国通过挖掘火电机组灵活性、跨省跨区跨境输电、用户侧需求响应以及配置储能等措施, 利用日前、日内与实时多级市场的协调优化, 保障了系统的安全可靠运行。此外, 欧洲很多国家正在开展地方电力市场的研究, 以期充分挖掘分布式能源(风电、光伏、储能、电动汽车以及终端用户等)的灵活性, 服务于本地市场, 减轻电能远距离输送压力、缓解线路阻塞。但是, 该方法目前处于理论研究阶段, 缺乏实际应用。

### 3 考虑灵活调节服务的市场出清模型

#### 3.1 灵活性需求分析

系统灵活性需求包括 FRU 需求和 FRD 需求两

种, 由单位时间净负荷的波动和考虑预测偏差所预留的安全裕度组成<sup>[54]</sup>, 后者可以由一定置信水平下历史净负荷预测误差的概率分布函数计算得出。根据当前和下一时刻净负荷情况及考虑的安全裕度, 系统灵活性需求方向可分为 4 种情况, 如图 2 所示。

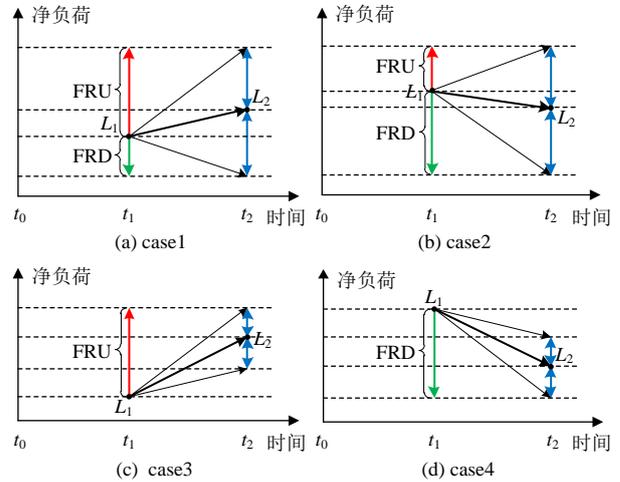


图 2 系统 FRP 需求示意图

Fig. 2 Diagram of the FRP requirements

图 2 中:  $L_1$  和  $L_2$  为  $t_1$  和  $t_2$  时刻预测的系统净负荷值; 蓝色实线为  $t_2$  时刻所需安全裕度区间; 红色和绿色实线为  $t_1$  时刻系统所需 FRU 和 FRD 需求。FRP 针对的是净负荷的时变特性, 通过在本时段预留一定的灵活调节容量, 来满足下一时刻的系统向上/向下灵活性需求, 即当前时段的灵活性需求由下一时段的净负荷水平所决定。就  $t_1$  时刻而言, case1 的  $FRU > FRD$ , 而 case2 中  $FRU < FRD$ 。注意到在 case3 中,  $t_2$  时刻预测净负荷的下界高于  $t_1$  时刻预测净负荷  $L_1$ , 因此  $t_1$  时刻没有 FRD 需求。同样地, 由于 case4 中  $t_2$  时刻预测净负荷的上界低于  $t_1$  时刻预测净负荷  $L_1$ , 所以  $t_1$  时刻没有 FRU 需求。

FRU 和 FRD 需求(均为正值)的具体计算公式如下:

$$\begin{cases} f_{FRU} = \max(L_{t+1} - L_t + R_{t+1}^U, 0) \\ f_{FRD} = \max(L_t - L_{t+1} + R_{t+1}^D, 0) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $L_t$  为  $t$  时刻预测的系统净负荷值;  $R_{t+1}^U$  和  $R_{t+1}^D$  是为了应对  $t+1$  时刻净负荷预测偏差所预留的向上和向下安全裕度(不包含方向, 因此均为正值)。

假设净负荷预测误差服从正态分布, 保证所预留的容量能够在一定的置信水平下平衡净负荷的波动, 安全裕度由置信区间的上下限决定, 如图 3 所示。通过调整  $\alpha$  的大小, 可以得到不同置信水平下系统的灵活性需求大小<sup>[55]</sup>。此外, 可以将鲁棒优化引入 FRP 优化模型中, 即考虑净负荷在一定的范围内波动, 如图 4 所示。考虑安全裕度的根本原因

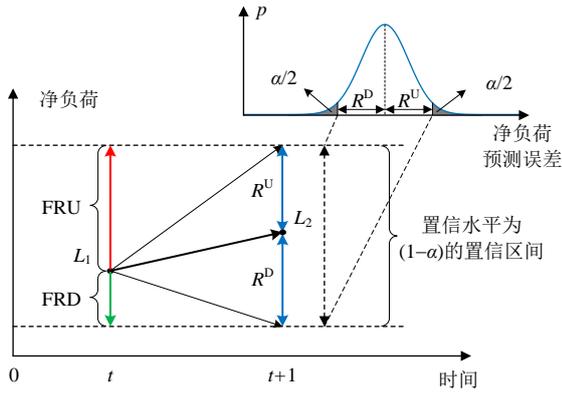


图3 基于置信区间的FRP需求示意图

Fig. 3 Diagram of the FRP requirements based on the confidence interval

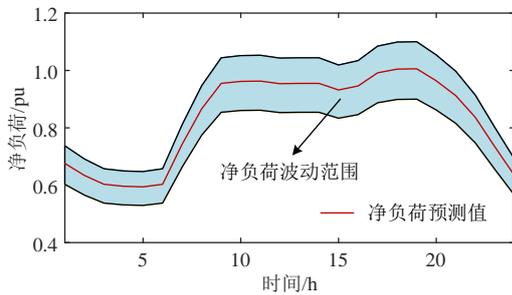


图4 基于区间的FRP需求示意图

Fig. 4 Diagram of the FRP requirements based on interval

是负荷和新能源出力预测结果存在误差<sup>[56]</sup>。

### 3.2 考虑灵活调节服务的市场出清模型

#### 3.2.1 电能量-FRP 确定性优化模型

由于各类发电资源参与电能量及其他辅助服务时，存在容量耦合关系，因此在国外电力市场运营实践中，多数采用电能量与辅助服务联合出清模型<sup>[57]</sup>。在这种模式下，系统运营商能够以经济的方式保障电力供应，同时满足辅助服务要求。对于市场参与者而言，需要在能量和辅助服务之间合理分配其容量和调节能力以获得最优的经济效益。为了突出FRP这一新型交易品种的引入对市场的影响，忽略调频与备用等传统辅助服务，构建电能量-FRP协同优化模型，如下所示：

$$\min f_{\text{cost}} = \sum_{i \in B} \sum_{t \in T} C_i^e(P_i^e(t)) + \sum_{i \in B} \sum_{t \in T} \pi_i^{r, \text{up}}(t) D_i^{\text{up}}(t) + \sum_{i \in B} \sum_{t \in T} \pi_i^{r, \text{down}}(t) D_i^{\text{down}}(t) \quad (2)$$

$$\sum_{i \in B} P_i^e(t) = \sum_{i \in B} D_i^e(t), \forall t \quad (3)$$

$$P_i^e(t) - D_i^e(t) = \sum_{j \in \nu(i)} P_{ij}(t), \forall t \quad (4)$$

$$-C_{ij} \leq P_{ij} = (\theta_i - \theta_j) / x_{ij} \leq C_{ij}, \forall i-j \in l, \forall t \quad (5)$$

$$\sum_{i \in B} P_i^{\text{up}}(t) = D^{\text{up}}(t), \forall t \quad (6)$$

$$\sum_{i \in B} P_i^{\text{down}}(t) = D^{\text{down}}(t), \forall t \quad (7)$$

式中： $B$ 为网络节点集合； $T$ 为时间周期； $P_i^e(t)$ 、 $P_i^{\text{up}}(t)$ 和 $P_i^{\text{down}}(t)$ 分别为 $t$ 时刻节点 $i$ 处机组的出力、FRU容量和FRD容量； $C_i^e(P_i^e(t))$ 为 $t$ 时刻节点 $i$ 处机组的报价曲线； $D_i^e(t)$ 、 $D_i^{\text{up}}(t)$ 和 $D_i^{\text{down}}(t)$ 分别为 $t$ 时刻节点 $i$ 处的负荷、FRU需求和FRD需求。式(3)为 $t$ 时段系统功率平衡约束；式(4)为系统支路约束； $P_{ij}(t)$ 为 $t$ 时刻支路 $i-j$ 的有功功率； $\nu(i)$ 为与节点 $i$ 相连的节点的集合； $x_{ij}$ 为支路阻抗； $\theta_i$ 为 $t$ 时刻节点 $i$ 的相角； $C_{ij}$ 为支路传输功率限值；式(6)和(7)分别为系统FRU和FRD需求约束，其对应的拉格朗日乘子即为相应的FRU价格 $\pi_i^{r, \text{up}}(t)$ 和FRD价格 $\pi_i^{r, \text{down}}(t)$ 。注意，在实际建模时还需要考虑机组爬坡等相关约束，得出更加精确的结果。由于目标函数中包含机组报价曲线，因此上述模型本质上为双层均衡模型，该类模型的求解方法可参考文献<sup>[58]</sup>，此处不再赘述。

#### 3.2.2 电能量-FRP 鲁棒优化模型

基于鲁棒优化的电能量-FRP优化模型如下：

$$\min f_{\text{cost}} = \sum_{i \in B} \sum_{t \in T} C_i^e(P_i^e(t)) \quad (8)$$

$$\sum_{i \in B} P_i^e(t) = \sum_{i \in B} D_i^e(t), \forall t \quad (9)$$

$$P_i^e(t) - D_i^e(t) = \sum_{j \in \nu(i)} P_{ij}(t), \forall t \quad (10)$$

$$-C_{ij} \leq P_{ij} = (\theta_i - \theta_j) / x_{ij} \leq C_{ij}, \forall i-j \in l, \forall t \quad (11)$$

在实时运行中，面对净负荷的波动，同样需要维持系统的功率平衡和安全运行。实时运行时的约束如式(12)–(16)所示：

$$\Gamma = \{(P_i^e(t) : \forall \Delta D_i^e(t) \in U, \exists \Delta P_i^e(t) \text{ 使得} \sum_{i \in B} (P_i^e(t) + \Delta P_i^e(t)) = \sum_{i \in B} (D_i^e(t) + \Delta D_i^e(t)), \forall t\} \quad (12)$$

$$P_i^e(t) + \Delta P_i^e(t) - (D_i^e(t) + \Delta D_i^e(t)) = \sum_{j \in \nu(i)} (P_{ij}(t) + \Delta P_{ij}(t)), \forall t \quad (13)$$

$$P_{i, \text{min}}^e \leq P_i^e(t) + \Delta P_i^e(t) \leq P_{i, \text{max}}^e \quad (14)$$

$$-C_{ij} \leq P_{ij} + \Delta P_{ij}(t) \leq C_{ij}, \forall i-j \in l, \forall t \quad (15)$$

$$U = \{-u_i \leq \Delta D_i^e(t) \leq u_i, \forall i\} \quad (16)$$

式中： $\Delta(\cdot)$ 为相关变量在实时运行中的变化值； $u_i$ 为节点 $i$ 处净负荷波动最大值，其余变量与3.2.1节中一致。由于该模型可以应对实时过程中出现的任意的净负荷波动 $\Delta D_i^e(t)$ ，因此该模型本质上为鲁棒优化模型，具体的定价机制和求解方法可参考作者之前的工作<sup>[59]</sup>，此处不再赘述。

FRP需要和主能量耦合出清，FRP不提供报价曲线，其价格为优化模型中与FRP需求相关的功率平衡约束方程所对应的影子价格，单位为\$/

(MW h)。本质上, FRP 费用是系统对市场主体为了提供灵活调节容量而不能提供其他服务所损失的机会成本的补偿<sup>[60]</sup>。因此, 不管中标的 FRP 容量在实时运行中是否被调用, 相应主体的中标容量都会获得相应的费用。在不同的运行时段, 系统对 FRU 和 FRD 的需求可能不同, 只有在相关约束起作用的情况下才存在 FRP 价格, 否则价格为 0。如果预测下一时段净负荷出现比较明显的增长, 则系统对 FRU 的需求增长, 对 FRD 的需求为 0, 此时 FRD 价格自然为 0。同样地, 若系统对 FRU 的需求为 0, FRU 价格也为 0。

## 4 电力系统灵活调节服务研究展望及对中国电力市场建设的启示

### 4.1 电力系统灵活调节服务研究展望

#### 1) 挖掘用户侧资源灵活性。

目前提供 FRP 的主要是传统发电机组, 而用户侧分布式资源众多、运行方式灵活, 是传统发电机组提高灵活性的有效补充。因此, 有必要充分挖掘用户侧资源灵活调节潜力, 以进一步促进新能源的消纳。随着我国能源供给方式的变革、智能电网的发展以及电力市场化改革的不断深入, 配电系统的运行方式将发生重大转变, 以微电网、负荷聚集商、虚拟电厂等方式<sup>[61-62]</sup>聚合管理用户侧多种灵活性资源将成为智能配电系统的一种主要手段, 各类聚合与管理技术通过虚拟控制中心将包括可中断与可转移负荷、储能和可控 DG 在内的多种分布式能源聚合为一个整体, 运用先进的协调通信技术实现对内部资源的统一调度, 可以缓解系统的不确定性, 方便上级控制器或市场运营商的管理, 为分布式能源的规模化利用提供了新的途径。

除了各类资源聚合与管理技术, 综合能源系统同样可以提高系统运行灵活性。传统电网中多种能源的规划运行互相独立, 能源利用效率不高(约 38%), 与发达国家的 70% 相比差距较大<sup>[63]</sup>。随着经济社会的发展, 用户对能源多样化的需求增加。随着综合能源系统、能源互联网等多能源理念的推广, 多种能源的综合管理必将成为未来能源系统的重要支撑平台。在冷-热-电多能耦合的背景下, 可以对综合能源园区等具有多能耦合特性的主体进行进一步研究。考虑不同主体间能量流和信息流的交互, 优化综合能源管理策略, 将进一步增加用户侧灵活调节能力。

#### 2) 考虑多种灵活性资源的市场机制设计。

用户侧分散资源参与市场需要基于一定的激

励机制, 储能、电动汽车以及新能源如何参与 FRP 市场是值得研究的话题。目前电动汽车发展迅速, 但其大规模无序充电行为将对电网产生不利影响, 需要通过合理的价格机制的引导, 使其主动参与电力系统灵活调节。储能设备参与电力系统辅助服务市场已经成为新兴的研究热点, 随着未来市场机制的不断完善, 安装在用户侧的储能设备将在电力需求侧管理中发挥更加重要的作用, 有助于提高用户侧的主观能动性, 提升系统调度的灵活性。

另一方面, 随着区块链和边缘计算等先进的信息和通信技术的大量使用, 可交易能源(transactive energy)<sup>[64]</sup>、点对点(peer-to-peer)交易<sup>[65]</sup>等分布式能源市场交易机制被视为促进能源灵活交易、维持系统供需平衡的有效机制, 得到了各国学者的广泛关注。可交易能源聚焦于配网层面, 直接面向终端用户、分布式储能和 DG 等分布式主体, 是一种去中心化的扁平交易体系。创新能源管理模式, 完善用户侧交易机制, 形成价格等驱动的用户侧分布式资源的就地管理和消纳模式, 可以进一步激发系统调节潜力, 充分释放用户侧资源的灵活性。

#### 3) 探索数字技术的应用。

当前, 以大数据、物联网、人工智能、数字孪生等为代表的数字技术得到了迅速发展。基于数字技术的智能电厂、智能电网、智能用户技术逐渐得到应用, 有助于实现对电力系统微观环节的精准认知, 实现透明电网的全系统数据透明、状态透明、态势透明, 进而实现智慧型的精准控制, 将各种不确定性和刚性转化为确定性和柔性, 帮助解决弃风弃光问题, 促进消纳可再生能源, 实现良好的经济收益。FRP 的成功实施依赖于灵活性需求的准确计算, 而灵活性需求的预测需要基于预期的未来运行条件和历史灵活性需求。在未来高比例可再生能源接入背景下, 对风能和太阳能的准确预测是制定 FRP 需求的基础。先进的机器学习方法为新能源出力的预测提供了新的思路。另一方面, 电力系统在运行中积累了大量的历史数据, 如何基于海量历史数据, 利用新兴的数字技术, 更好地服务与电力系统的各个环节, 助力电力系统清洁低碳化转型, 具有重要的实际意义。

### 4.2 对中国电力市场建设的启示

在我国电力市场改革以及新能源快速发展的背景下, 对 FRP 进行研究可以激发灵活性资源参与提高电网调节能力的积极性, 对于解决电网灵活性不足, 提高电网安全、可靠、经济运行具有重大理论和实际意义。结合国外提高电力系统灵活性的相

关研究,得到如下启示:

1) 分阶段构建考虑电力系统灵活性提升的辅助服务产品类型与市场机制。自电改九号文颁布以来,我国电力市场改革稳步推进,为灵活性资源的市场化获取奠定了基础。目前,浙江、山东等8个第一批现货市场改革试点地区结合自身实际情况编制了相应的电力现货市场规则<sup>[66]</sup>,但总的来说目前我国电力工业仍以计划管理为主,合理的市场化交易机制尚未形成。在借鉴国外成熟的辅助服务机制的过程中,需要结合我国目前的电力市场实际情况,分阶段建立合适的辅助服务市场规则,走中国特色的电力体制改革道路<sup>[67]</sup>。在市场初期,可以考虑将辅助服务与能量市场分离,以签订中长期合约的形式获取。需要注意的是,辅助服务与能量市场的分离可能会导致市场投机行为,相关监管部门应制定相应的市场监管制度,建立市场运营风险防范体系和信用体系。随着电力和辅助服务市场的发展成熟,可考虑将用户侧在内的多种资源纳入辅助服务市场,充分挖掘电力系统“源-网-荷-储”各方面的灵活调节潜力。

2) 设计合理的辅助服务市场机制。合理的市场机制是建设以新能源为主体的新型电力系统的重要基础,是保障高比例可再生能源电力系统灵活经济运行的关键所在。后续需更多关注如何将多种灵活性资源与现有的市场机制相结合,通过合理的价格机制引导其积极参与市场。2019年华北地区“两个细则”的修订,给提供辅助服务的企业一定的补偿,但缺乏有效的市场机制充分挖掘灵活性资源调节潜力。现货市场建立后,政府管制的辅助服务定价方式将不再适用,应充分发挥市场在资源优化配置中的作用。此时,可借鉴美国电力市场经验,构建考虑电能量和辅助服务联合出清的模型,基于边际价格实现对辅助服务的合理定价,为市场主体提供清晰合理的价格信号,激励市场灵活资源主动提供灵活调节服务。此外,基于合理的价格机制,新能源同样可以参与FRP市场,使得新能源供应商和系统运营商都能从中获益<sup>[68]</sup>。从长期来说,受到价格信号的激励,波动性的可再生能源发电机组可以通过技术升级改造、配备储能装置等方式,主动改善其随机波动性。

3) 考虑多种辅助服务产品,使得市场参与主体和类型更加多样化。目前国内现货市场只考虑了调频和备用辅助服务,随着市场的发展与成熟,还应丰富其他辅助服务品种,扩大服务提供主体范围,如鼓励储能、需求侧资源等参与提供辅助服务,

允许第三方参与提供辅助服务等。可再生能源的进一步发展使得传统火电机组参与市场时不具备价格优势,但火电机组是电力系统主要的灵活调节资源,为此可探索构建容量市场<sup>[69-70]</sup>,使得火电通过参与容量市场获取收益。基于完善的辅助服务补偿机制,各类灵活性资源可依据自身的调节能力与调节成本,参与不同类型的辅助服务市场,获得最优的经济效益。此外,区域互联互通能够扩大平衡区域范围,实现跨区能源优势互补,同样可以提高系统灵活性。作为国际上第一个真正意义上的跨国电力市场,北欧电力市场通过完备的跨国电力交换网络实现了各国电源互补,提高了系统的可再生能源消纳能力<sup>[71]</sup>,保障了电网的安全。未来,我国应进一步探索区域联合电力市场建设,实现可再生能源在全国电网格局下的有效消纳及电力的安全可靠供应。

4) 结合各地区实际开展相应的市场产品。我国当前呈现六大区域电网供电格局,但由于我国能源资源分布的不均衡,不同区域的电源电网结构、负荷分布和负荷特性不尽相同,电力辅助服务不能一概而论,需要充分考虑区域电网的实际情况(市场成熟度、技术可行性等),根据实际需求制定相应的辅助服务种类和数量,保障辅助服务市场的稳妥有序开展。

## 5 结语

随着“碳达峰、碳中和”目标的提出,电力系统能源结构正朝着清洁低碳化转型,未来电力系统中可再生能源渗透率将进一步提高,灵活性已成为除电力系统安全性、可靠性和经济性之外,表征系统运行特性的重要指标。

1) 在市场环境下,电力系统经济调度和FRP等辅助服务需要通过市场手段来实现,需要在传统电力市场设计思路的基础上,针对大规模可再生能源背景下的电能价值问题进行深入研究,建立科学合理的价格形成机制。

2) 用户侧分布式资源众多、运行方式灵活,是传统发电机组提高灵活性的有效补充,有必要充分挖掘用户侧资源灵活调节潜力,以进一步促进新能源的消纳。随着区块链和边缘计算等先进的信息和通信技术的发展,分布式能源市场交易机制将在分布式能源管理与电力交易中发挥更重要的作用。

3) 考虑电力系统灵活性提升的辅助服务产品类型与市场机制设计,需要在充分借鉴国外成熟市场经验的基础上,结合我国实际情况分阶段开展,

促进电力体制改革有序平稳推进, 早日实现电力系统清洁低碳化转型目标。

希望本文能够为大规模可再生能源接入背景下电力系统的灵活运行提供参考。

## 参考文献

- [1] 程耀华, 张宁, 王佳明, 等. 面向高比例可再生能源并网的输电网络规划方案综合评价[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 33-42, 57.  
CHENG Yaohua, ZHANG Ning, WANG Jiaming, et al. Comprehensive evaluation of transmission network planning for integration of high-penetration renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 33-42, 57(in Chinese).
- [2] 文云峰, 杨伟峰, 汪荣华, 等. 构建 100% 可再生能源电力系统述评与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1843-1856.  
WEN Yunfeng, YANG Weifeng, WANG Ronghua, et al. Review and prospect of toward 100% renewable energy power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1843-1856(in Chinese).
- [3] IEA. World energy outlook 2020[R]. Paris: International Energy Agency, 2020.
- [4] ZHANG C, XU Y, DONG Z Y, et al. Robust coordination of distributed generation and price-based demand response in microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4236-4247.
- [5] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2-11.  
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11(in Chinese).
- [6] 喻芸, 荆朝霞, 陈雨果, 等. 电力市场环境典型发电容量充裕性机制及对我国的启示[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2734-2742.  
YU Yun, JING Zhaoxia, CHEN Yuguo, et al. Typical generation resource adequacy mechanism in electricity market and enlightenment to China[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2734-2742(in Chinese).
- [7] 李海波, 鲁宗相, 乔颖, 等. 大规模风电并网的电力系统运行灵活性评估[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1672-1678.  
LI Haibo, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. Assessment on operational flexibility of power grid with grid-connected large-scale wind farms[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1672-1678(in Chinese).
- [8] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 147-158.  
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 147-158(in Chinese).
- [9] IRENA. Power system flexibility for the energy transition, part1: overview for policy makers [EB/OL]. [2021-4-30]. [https://irena.org/-/media/files/irena/agency/publication/2018/nov/irena\\_power\\_system\\_flexibility\\_1\\_2018.Pdf](https://irena.org/-/media/files/irena/agency/publication/2018/nov/irena_power_system_flexibility_1_2018.Pdf), 2018-12.
- [10] CAISO. Flexible ramping product: revised draft final proposal[R]. California: CAISO, 2015.
- [11] CAISO. Ramp capability for load following in MISO markets white paper[R]. Indiana: MISO, 2016.
- [12] 李则衡, 陈磊, 路晓敏, 等. 基于系统灵活性的可再生能源接纳评估[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2187-2194.  
LI Zeheng, CHEN Lei, LU Xiaomin, et al. Assessment of renewable energy accommodation based on system flexibility analysis[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2187-2194(in Chinese).
- [13] 段建民, 王志新, 王承民, 等. 考虑碳减排效益的可再生能源规划[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 11-15.  
DUAN Jianmin, WANG Zhixin, WANG Chengmin, et al. Renewable power planning considering carbon emission reduction benefits[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 11-15(in Chinese).
- [14] 刘万宇, 李华强, 张弘历, 等. 考虑灵活性供需平衡的输电网络扩展规划[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5): 56-63.  
LIU Wanyu, LI Huaqiang, ZHANG Hongli, et al. Expansion planning of transmission grid based on coordination of flexible power supply and demand[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 56-63(in Chinese).
- [15] 杨龙杰, 李华强, 余雪莹, 等. 计及灵活性的孤岛型微电网多目标日前优化调度方法[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1432-1440.  
YANG Longjie, LI Huaqiang, YU Xueying, et al. Multi-objective day-ahead optimal scheduling of isolated microgrid considering flexibility[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1432-1440(in Chinese).
- [16] 王洪坤, 王守相, 潘志新, 等. 含高渗透分布式电源配电网灵活性提升优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 86-93.  
WANG Hongkun, WANG Shouxiang, PAN Zhixin, et al. Optimized dispatching method for flexibility improvement of distribution network with high-penetration distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 86-93(in Chinese).
- [17] 周光东, 周明, 孙黎滢, 等. 含波动性电源的电力系统运行灵活性评价方法研究[J]. 电网技术, 2019, 43(6): 2139-2146.  
ZHOU Guangdong, ZHOU Ming, SUN Liying, et al. Research on operational flexibility evaluation approach of power system with variable sources[J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 2139-2146(in Chinese).
- [18] BILLINTON R, FOTUHI-FIRUZABAD M. A basic framework for generating system operating health analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(3): 1610-1617.
- [19] NAERC. Special report: accommodating high levels of variable generation[R]. American: North American Electric Reliability Corporation, 2009.
- [20] NAVID N, Rosenwald G. Ramp capability product design for MISO markets[R]. Indiana: MISO, 2013.
- [21] LANNOYE E, FLYNN D, MALLEY M O. The role of power system flexibility in generation planning[C]//2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011: 1-6.
- [22] MA J, SILVA V, BELHOMME R, et al. Evaluating and planning flexibility in sustainable power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 200-209.
- [23] ZHAO J, ZHENG T, LITVINOV E. A unified framework for defining and measuring flexibility in power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 339-347.
- [24] KRISTIANSSEN M, KORPÁS M, SVENDSEN H G. A generic framework for power system flexibility analysis using cooperative game theory[J]. Applied Energy, 2018, 212: 223-232.
- [25] 胡嘉骅. 电力系统灵活性提升方法及灵活调节产品获取机制[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [26] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 9-20.  
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 9-20(in Chinese).
- [27] NICOLOSI M. Wind power integration and power system flexibility:

- an empirical analysis of extreme events in Germany under the new negative price regime[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(1): 7257-7268.
- [28] 刘英琪. 高比例风电参与的电力市场灵活运营策略研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [29] 肖定垚, 王承民, 曾平良, 等. 电力系统灵活性及其评价综述[J]. *电网技术*, 2014, 38(6): 1569-1576.  
XIAO Dingyao, WANG Chengmin, ZENG Pingliang, et al. A survey on power system flexibility and its evaluations[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(6): 1569-1576(in Chinese).
- [30] XU L, TRETHERWAY D. Flexible ramping products[R]. California: CAISO, 2012.
- [31] HEYDARIAN-FORUSHANI E, GOLSHAN M E H, SHAFIE-KHAH M, et al. Optimal operation of emerging flexible resources considering sub-hourly flexible ramp product[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9(2): 916-929.
- [32] ZHANG X, CHE L, SHAHIDEHPOUR M, et al. Electricity-natural gas operation planning with hourly demand response for deployment of flexible ramp[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(3): 996-1004.
- [33] WANG Q, HODGE B. Enhancing power system operational flexibility with flexible ramping products: a review[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(4): 1652-1664.
- [34] AGGARWAL S, ORVIS R. Grid flexibility: methods for modernizing the power grid[R]. San Francisco: Energy Innovation, 2016.
- [35] 杨昭, 艾欣. 考虑电能共享的综合能源楼宇群分布式优化调度[J]. *电网技术*, 2020, 44(10): 3769-3778.  
YANG Zhao, AI Xin. Distributed optimal scheduling for integrated energy building clusters considering energy sharing[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(10): 3769-3778(in Chinese).
- [36] 赵东元, 胡楠, 傅靖, 等. 提升新能源电力系统灵活性的中国实践及发展路径研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(24): 1-8.  
ZHAO Dongyuan, HU Nan, FU Jing, et al. Research on the practice and road map of enhancing the flexibility of a new generation power system in China[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(24): 1-8(in Chinese).
- [37] ZHOU Q, SHAHIDEHPOUR M, PAASO A, et al. Distributed control and communication strategies in networked microgrids[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(4): 2586-2633.
- [38] CHEN Y, KEYSER M, TACKETT M H, et al. Incorporating short-term stored energy resource into Midwest ISO energy and ancillary service market[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(2): 829-838.
- [39] WANG Y, WAN C, ZHOU Z, et al. Improving deployment availability of energy storage with data-driven AGC signal models[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(4): 4207-4217.
- [40] CUI M, ZHANG J, WU H, et al. Wind-friendly flexible ramping product design in multi-timescale power system operations[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8(3): 1064-1075.
- [41] 王蓓蓓, 丛小涵, 高正平, 等. 高比例新能源接入下电网灵活性爬坡能力市场化获取机制现状分析及思考[J]. *电网技术*, 2019, 43(8): 2691-2702.  
WANG Beibei, CONG Xiaohan, GAO Zhengping, et al. Status analysis and thoughts of market-oriented acquisition mechanism on flexible ramp capability for power grid with high proportion of renewable energy[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(8): 2691-2702(in Chinese).
- [42] 郭鸿业, 陈启鑫, 夏清, 等. 电力市场中的灵活调节服务: 基本概念、均衡模型与研究方向[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(11): 3057-3066, 3361.  
GUO Hongye, CHEN Qixin, XIA Qing, et al. Flexible ramping product in electricity markets: basic concept, equilibrium model and research prospect[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(11): 3057-3066, 3361(in Chinese).
- [43] RUIZ P A, PHILBRICK C R, ZAK E, et al. Uncertainty management in the unit commitment problem[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, 24(2): 642-651.
- [44] MARNERIS I G, BISKAS P N, BAKIRTZIS E A. An integrated scheduling approach to underpin flexibility in European power systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(2): 647-657.
- [45] WANG B, HOBBS B F. Real-time markets for flexiramp: a stochastic unit commitment-based analysis[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(2): 846-860.
- [46] 张倩文, 王秀丽, 杨廷天, 等. 含风电场电力系统的鲁棒优化调度[J]. *电网技术*, 2017, 41(5): 1451-1463.  
ZHANG Qianwen, WANG Xiuli, YANG Tingtian, et al. A robust dispatch method for power grid with wind farms[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(5): 1451-1463(in Chinese).
- [47] WU C, HUG G, KAR S. Risk-limiting economic dispatch for electricity markets with flexible ramping products[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(3): 1990-2003.
- [48] WANG J, ZHONG H, TANG W, et al. Optimal bidding strategy for microgrids in joint energy and ancillary service markets considering flexible ramping products[J]. *Applied Energy*, 2017, 205: 294-303.
- [49] HU J, SARKER M R, WANG J, et al. Provision of flexible ramping product by battery energy storage in day-ahead energy and reserve markets[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2018, 12(10): 2256-2264.
- [50] ZHANG B, KEZUNOVIC M. Impact on power system flexibility by electric vehicle participation in ramp market[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(3): 1285-1294.
- [51] WANG Q, ZHANG G, MCCALLEY J D, et al. Risk-based locational marginal pricing and congestion management[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(5): 2518-2528.
- [52] CHEN Y, LEONARD R, KEYSER M, et al. Development of performance-based two-part regulating reserve compensation on MISO energy and ancillary service market[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(1): 142-155.
- [53] EPEX spot. Flexibility is the answer: European power exchange as a component of security of supply during the solar eclipse[R]. Paris, France: EPEX, 2015.
- [54] 钟佳宇, 陈皓勇, 陈武涛, 等. 含灵活性资源交易的电力市场实时出清[J]. *电网技术*, 2021, 45(3): 1032-1041.  
ZHONG Jiayu, CHEN Haoyong, CHEN Wutao, et al. Real-time clearing of electricity markets with flexible resource transactions[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(3): 1032-1041(in Chinese).
- [55] 李静轩, 周明, 朱凌志, 等. 可再生能源电力系统运行灵活性需求量化及优化调度方法[J]. *电网技术*, 2021, 45(7): 2647-2656.  
LI Jingxuan, ZHOU Ming, ZHU Lingzhi, et al. Quantifying flexibility requirement and optimal dispatching for renewables integrated power systems[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(7): 2647-2656(in Chinese).
- [56] 马静洁, 张少华, 李雪, 等. 发电系统充裕度与灵活性的随机评估[J]. *电网技术*, 2019, 43(11): 3867-3874.  
MA Jingjie, ZHANG Shaohua, LI Xue, et al. Stochastic assessment of adequacy and flexibility of power generation systems[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(11): 3867-3874(in Chinese).
- [57] Ott A L. Experience with PJM market operation, system design, and implementation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003, 18(2): 528-534.

- [58] YI Z, XU Y, ZHOU J, et al. Bi-level programming for optimal operation of an active distribution network with multiple virtual power plants[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2855-2869.
- [59] WANG L, ZHU Z, JIANG C, et al. Bi-level robust optimization for distribution system with multiple microgrids considering uncertainty distribution locational marginal price[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1104-1117.
- [60] SEDGLEY M. Tariff amendment to implement flexible ramping product[R]. California: CAISO, 2016.
- [61] 李博嵩, 王旭, 蒋传文, 等. 广泛负荷聚集市场策略建模及风险效益分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 119-126.  
LI Bosong, WANG Xu, JIANG Chuanwen, et al. Market strategy modeling and risk profit analysis of demand-side resource aggregator [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 119-126(in Chinese).
- [62] 孙国强, 钱苇航, 黄文进, 等. 考虑配电网安全性的虚拟电厂优化调度博弈模型[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(5): 7-14.  
SUN Guoqiang, QIAN Weihang, HUANG Wenjin, et al. Optimal dispatch game model for virtual power plant considering security of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5): 7-14(in Chinese).
- [63] 袁晓冬, 费骏韬, 胡波, 等. 资源聚合商模式下的分布式电源、储能与柔性负荷联合调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 17-26.  
YUAN Xiaodong, FEI Juntao, HU Bo, et al. Joint scheduling model of distributed generation, energy storage and flexible load under resource aggregator mode[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 17-26(in Chinese).
- [64] 胡俊杰, 王坤宇, 艾欣, 等. 交互能源: 实现电力能源系统平衡的有效机制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(4): 953-966.  
HU Junjie, WANG Kunyu, AI Xin, et al. Transactive energy: an effective mechanism for balancing electric energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4): 953-966(in Chinese).
- [65] CHEN S, LIU C C. From demand response to transactive energy: state of the art[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(1): 10-19.
- [66] 宋永华, 包铭磊, 丁一, 等. 新电改下我国电力现货市场建设关键点综述及相关建议[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3172-3187.  
SONG Yonghua, BAO Minglei, DING Yi, et al. Review of Chinese electricity spot market key issues and its suggestions under the new round of Chinese power system reform[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3172-3187(in Chinese).
- [67] 陈国平, 梁志峰, 董昱. 基于能源转型的中国特色电力市场建设的分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 369-379.  
CHEN Guoping, LIANG Zhifeng, DONG Yu. Analysis and reflection on the marketization construction of electric power with Chinese characteristics based on energy transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 369-379(in Chinese).
- [68] CHEN R, WANG J, BOTTERUD A, et al. Wind power providing flexible ramp product[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 2049-2061.
- [69] 王一, 朱涛, 张玉欣, 等. 适应中国电力现货市场发展的容量补偿机制初探[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(6): 52-61.  
WANG Yi, ZHU Tao, ZHANG Yuxin, et al. Preliminary study on capacity compensation mechanism adapted to development of electricity spot market in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(6): 52-61(in Chinese).
- [70] 张涛, 胡娱欧, 张晶, 等. 适应高比例新能源发展的电力市场容量保障机制分析[J]. 电力建设, 2021, 42(3): 117-125.  
ZHANG Tao, HU Yuou, ZHANG Jing, et al. Analysis of power market capacity remuneration mechanisms adapted to high penetration of renewable energy development[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(3): 117-125(in Chinese).
- [71] 樊宇琦, 丁涛, 孙瑜歌, 等. 国内外促进可再生能源消纳的电力现货市场发展综述与思考[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1729-1752.  
FAN Yuqi, DING Tao, SUN Yuge, et al. Review and cogitation for worldwide spot market development to promote renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1729-1752(in Chinese).



王玲玲

在线出版日期: 2021-11-20。

收稿日期: 2021-05-12。

作者简介:

王玲玲(1993), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向为电力系统优化运行、电力市场、可再生能源, E-mail: himalayart@163.com;

刘恋(1988), 女, 工程师, 研究方向为电力系统经济调度、电动汽车最优充电策略、电力市场等, E-mail: liankid@163.com;

张镛(1998), 女, 博士研究生, 研究方向为电力市场、分布式能源运行与管理, E-mail: kelsey\_zhang@sjtu.edu.cn;

熊展(1994), 女, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电力市场、综合能源系统、电力系统优化运行, E-mail: xiongz5104416@sjtu.edu.cn。

(责任编辑 王金芝)