

考虑灵活性资源的多园区能量共享优化运行

赵云¹, 吴晓锐^{2,3}, 蔡梓文¹, 陈卫东^{2,3}, 陆煜铨¹, 吴宁¹

(1. 南方电网科学研究院, 广州 510663; 2. 广西电网有限责任公司电力科学研究院, 南宁 530023; 3. 广西电力装备智能控制与运维重点实验室, 南宁 530023)

摘要: 在建设新型电力系统背景下, 能量共享是提高园区运行效率的有效手段。园区之间通过联络线的连接实现能量的流动与共享, 有效促进了资源的优化配置。然而, 源、荷侧的不确定性可能导致电力供应不稳定, 增加了园区之间能量共享的复杂性。为应对分布式光伏和柔性负荷不确定性带来的风险, 考虑了含分布式光伏、生物质发电、微型燃气轮机、储能设备、电动汽车、柔性负荷在内的多种灵活性资源, 使用梯形模糊隶属度参数描述分布式光伏与柔性负荷响应的不确定性, 建立了电功率平衡的模糊机会约束模型, 并转化为清晰等价类。以园区用能成本最低为目标函数, 构建了含多种灵活性资源的多园区能量共享模型, 使用交替乘子算法对各园区目标交替求解, 保护了各园区内部运行的信息。算例结果表明, 能量共享有效协调多种灵活性资源相配合, 减少了用能成本与负荷用电的峰谷差, 其中弃光率降低了 16.4%, 提高了园区运行的稳定性、经济性与环保性。

关键词: 灵活性资源; 优化调度; 能量共享; 模糊机会约束; 交替乘子算法

Optimal Operation of Multi-Park Energy Sharing Considering Flexible Resources

ZHAO Yun¹, WU Xiaorui^{2,3}, CAI Ziwen¹, CHEN Weidong^{2,3}, LU Yuxin¹, WU Ning¹

(1. Electric Power Research Institute, CSG, Gaungzhou 510663, China; 2. Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Intelligent Control and Maintenance of Power Equipment, Nanning 530023, China)

Abstract: In the context of building a new power system, energy sharing is an effective means to improve the operational efficiency of the park. The connection between parks through connecting lines enables the flow and sharing of energy, effectively promoting the optimal allocation of resources. However, the uncertainty of the source and load sides may lead to unstable power supply, increasing the complexity of energy sharing between parks. To cope with the risks brought by the uncertainty of distributed photovoltaics and flexible loads, various flexible resources are considered, including distributed photovoltaics, biomass power generation, micro gas turbines, energy storage equipment, electric vehicles, and flexible loads. The trapezoidal fuzzy membership parameter is used to describe the uncertainty of the response of distributed photovoltaics and flexible loads, and a fuzzy chance constraint model for power balance is established and transformed into a clear equivalence class. A multi-park energy sharing model with multiple flexible resources is constructed with the objective function of minimizing energy consumption costs in the park. The alternating direction method of multipliers(ADMM) is used to solve the objectives of each park alternately, protecting the internal operation information of each park. The calculation results show that energy sharing effectively coordinates multiple flexible resources to reduce energy costs and peak valley differences with load electricity consumption. Among them, the abandoned photovoltaic rate is reduced by 16.4%, improving the stability, economy, and environmental protection of the park operation.

Key words: flexible resources; optimal scheduling; energy sharing; fuzzy chance constraint; ADMM

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52067004); 中国南方电网有限责任公司科技项目(GXKJXM20222044)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52067004); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (GXKJX M20222044).

0 引言

在“双碳”目标下,建设新型电力系统是推进能源供给侧改革的重要途径^[1]。随着新型电力系统的发展,大规模的灵活性资源并网改变了园区传统的用能方式^[2-5],电能不仅能在电网与园区间传输,还能实现邻近园区之间的交易共享。园区间的能量共享有利于减少能源的浪费、提高能源的就地消纳能力^[6-7]。然而,固定生产原料的灵活性资源设备可按需调度,分布式光伏、电动汽车、需求响应等具有不确定性,对园区的能量共享与调度计划带来一定的挑战。研究与掌握各灵活性资源的特性对提升园区运行的稳定性与经济性、提高园区间能量共享的效率具有重要意义。

目前对于能量共享的研究多集中于采用不同的方案提高电能的就近消纳的水平及运行的经济性。文献[8]基于清洁能源发电的智能建筑集群运营商建立了电能日前共享模型,降低了建筑群与电网交易成本;文献[9]构建了园区微网两阶段鲁棒模型,通过电能共享提高了风电的消纳;文献[10]考虑电动汽车用户的有限认知心理,提出了商业楼宇之间能量共享的分布式优化策略;文献[11]基于混合整数线性规划构建了社区能量管理系统共享模型,显著降低了社区运行成本。

作为重要的灵活性资源,分布式光伏的发电功率易受光照、天气等因素影响,具有不确定性。针对可再生能源发电出力的不确定性,现有研究主要采用随机优化、机会约束规划以及鲁棒优化等方法进行处理^[12]。在随机优化方面,文献[13]基于历史数据的伊藤过程描述光伏、风电随机特性,为后续的系统运行控制提供了参考;文献[14]基于场景决策将太阳辐射强度参数的定义空间划分为具有特定权重的可数有限场景,生成概率密度函数;文献[15]基于多场景法将光伏的不确定出力转化为确定的出力计划。在鲁棒优化方面,文献[16]基于Wasserstein距离使用分布鲁棒优化方法应对光伏出力的不确定性;文献[17]构建了基于区间概率不确定集的自适应鲁棒优化调度模型,有效抵御光伏出力的波动。在机会约束规划方法层面,文献[18]使用三角形隶属度函数表示光伏发电不确定性,并对不同置信水平的经济性进行了分析;文献[19]使用梯形函数构建光伏发电模糊数据集,并转换为确定

性出力,降低了日内优化调度的计算复杂度;文献[20]结合温度因素,使用梯形模糊变量表征光伏出力。相对其他两种方法,机会约束规划方法不过分依赖充分的信息构造概率密度函数,且构建的调度计划对于风险与经济性的平衡取决于置信水平,供决策者优化的范围较广。

此外,作为用户侧重要的灵活性资源,需求响应对应于平衡供需、提升电网运行灵活性具有重要作用。由于用户的用电行为难以准确把握,其参与需求响应具有模糊性^[21],采用模糊数描述其不确定性是一种有效的方法。文献[22]使用三角形模糊参数表征虚拟柔性负荷响应量的不确定性,在不确定性下完成调度任务的同时提高了电网的安全高效运行;文献[23]使用三角形模糊参数描述可中断负荷削减率的不确定性,并计及高阶不确定性,使决策方案更稳健;文献[24]使用三角模糊参量表述可中断负荷,建立用户可响应容量模型,实现该灵活性资源的优化调度。然而三角模糊数的隶属度最大值仅对应某一点,梯形模糊数隶属度最大值为一个区间,灵活性更高、可拓展性更强^[25],对于不确定性场景的拟合更接近现实情况。

分布式光伏发电、柔性负荷响应的不确定性使多园区能量的共享供需出现偏差,严重影响电力分配的效率与稳定性。为应对这种不确定性,需要引入多种灵活性资源来平衡供需。基于此,本文提出一种考虑多种灵活性资源的多园区能量共享优化运行方法。首先,建立园区能量共享架构,分析多园区、电网之间电能流动方式;分析各种灵活性资源的运行特性,使用梯形模糊数描述分布式光伏、柔性负荷响应的不确定性。然后,以用能成本最低为目标函数,根据约束条件构建多园区能量共享模型。将模糊机会约束转化为清晰等价类,并使用交替乘子算法(alternating direction method of multipliers, ADMM)对模型进行求解。最后,通过算例分析验证所提模型与运行方法的有效性。

1 含灵活性资源园区的能量共享结构

1.1 多园区能流架构

灵活性资源是指具有快速响应调度能力、维持系统动态供需平衡的各类资源,能根据园区的实际需求进行快速调整、响应。在包含多园区的能量共享中,通过下发调度命令,灵活性资源快速响应,

如发电设备在短时间内多发电能供共享使用,用电设备、用户根据能量共享计划在短时间内增加或减少用电功率,以适应供需平衡。本文构建的多园区能量共享架构如图 1 所示。

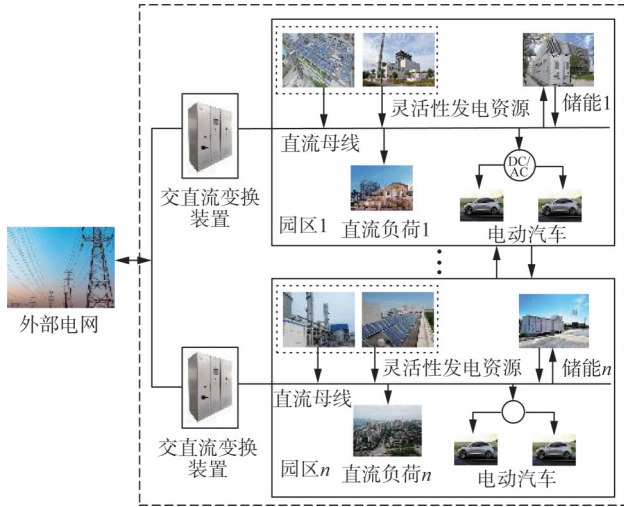


图 1 多园区能量共享架构

Fig. 1 Energy sharing architecture of multi-park

每个园区内含直流配电系统,由灵活性发电资源、储能设备、电动汽车以及其他用电负荷组成。在园区内部,采用碳排放量较低的分布式发电设备,通过分布式光伏发电、生物质发电、微型燃气轮机等可为负荷提供电能,多余的电量可售卖给电网或其他园区,电能供应不足时可向外部电网或其他园区购电;储能设备可吸纳多余的电能,并可在用电高峰时为用户提供电能支撑;电动汽车作为可灵活调控的资源,通过分析其充电特性进行调度控制。在园区外部,各园区之间优先进行电能的交互,促进能源的就地消纳;若电能的交互不能满足园区的需求或有电能剩余,可从上级电网购电或将多余的电能上网。

1.2 灵活性资源运行特性

1.2.1 分布式光伏不确定性描述

用户侧分布式光伏多为园区内建筑屋顶光伏,分布较为分散,出力受光照、温度等因素影响,实际的发电功率具有不确定性。使用梯形模糊数表示光伏出力的不确定性如式(1)所示。

$$\begin{cases} \tilde{P}_{pv,t} = (P_{pv,t}^1, P_{pv,t}^2, P_{pv,t}^3, P_{pv,t}^4) \\ P_{pv,t}^k = \omega_{pv,t}^k P_{pv,pre,t}^k, k = \{1, 2, 3, 4\} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\tilde{P}_{pv,t}$ 为 t 时刻光伏出力的模糊表达式; $P_{pv,t}^k$ 为

t 时刻光伏发电功率的第 k 个隶属度参数; $\omega_{pv,t}^k$ 为 t 时刻光伏发电的第 k 个梯形比例系数; $P_{pv,pre,t}^k$ 为 t 时刻光伏发电功率的第 k 个预测值。

1.2.2 柔性负荷不确定性描述

柔性负荷(flexible loads, FL)作为需求响应的一种手段,分为可激励负荷和可削减负荷:在用电负荷处于低谷时段,可激励负荷参与响应,增加用电量,提高电能的利用率;在用电负荷处于高峰时段,可削减负荷参与响应,减少负荷用电功率,减轻电力系统运行负担。

然而,在电力系统实际的运行中,用户实时的用电量受工作、生活等方面的影响,负荷参与响应量往往无法与调度计划相一致,用户参与需求响应的功率具有不确定性。

$$P_{L,t} = P_{L,plan,t} + \tilde{P}_{exc,t} + \tilde{P}_{cut,t} \quad (2)$$

式中: $P_{L,t}$ 为 t 时刻考虑柔性负荷不确定性的实际负荷用电功率; $P_{L,plan,t}$ 为 t 时刻计划负荷用电功率; $\tilde{P}_{exc,t}$ 、 $\tilde{P}_{cut,t}$ 分别为 t 时刻考虑不确定性的可激励负荷、可削减负荷功率。

使用梯形模糊数分别描述可激励负荷和可削减负荷参与需求响应的不确定性。

$$\begin{cases} \tilde{P}_{exc,t} = (\omega_{exc,t}^1, \omega_{exc,t}^2, \omega_{exc,t}^3, \omega_{exc,t}^4) P_{exc,pre,t} \\ \tilde{P}_{cut,t} = (\omega_{cut,t}^1, \omega_{cut,t}^2, \omega_{cut,t}^3, \omega_{cut,t}^4) P_{cut,pre,t} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\omega_{exc,t}^k$ 、 $\omega_{cut,t}^k$ ($k = \{1, 2, 3, 4\}$) 分别为 t 时刻可激励负荷、可削减负荷的第 k 个梯形比例系数; $P_{exc,pre,t}$ 、 $P_{cut,pre,t}$ 分别为 t 时刻时可激励负荷、可削减负荷的预测功率。

1.2.3 电动汽车充电特性

电动汽车充电特性与用户用车习惯密切相关。各用户出行习惯、充电喜好的不同,使得电动汽车接入充电具有随机性,大大增加了电网系统调度运行的复杂性和难度。但是,在同一园区中,用户的生活工作习惯相近,可将其中的所有电动汽车用户集合为电动汽车集群,对于集群的充电数据,可通过概率密度函数进行描述。

一般情况下,用户会在结束充电时将电动汽车电量充至期望值及以上。通过对用户到达充电时间、离开时间、结束充电时的电量期望上下限建模,可对电动汽车用户充电功率进行调控。本文构建第 i 个园区中第 n 台电动汽车充电特征集合 $E_{ev,i}^n$ 如式(4)所示。

$$E_{ev,i}^n = \{t_1, t_2, E_{soc,0}, E_{soc,min}, E_{soc,max}\} \quad (4)$$

式中: t_1 、 t_2 分别为第 n 台电动汽车开始充电、结束充电的时间; $E_{soc,0}$ 为电动汽车充电开始时的电量; $E_{soc,min}$ 、 $E_{soc,max}$ 分别为电动汽车结束充电时电量的期望最小值、最大值。

式(4)中所构建电动汽车充电特征集合中的元素符合正态分布^[26]。

$$E_{ev,i,v}^n \sim N(\mu_v, \sigma_v^2) \quad (5)$$

式中: $E_{ev,i,v}^n$ 为第 i 个园区中第 n 台电动汽车充电特征集合中第 v 个元素; μ_v 为电动汽车充电特征集合中第 v 个元素所服从正态分布的数学期望; σ_v^2 为电动汽车充电特征集合中第 v 个元素所服从正态分布的方差。其中, μ_v 、 σ_v 随不同园区的用电习惯而变化。

1.2.4 生物质发电

生物质发电利用各种生物质资源,通过生物质燃烧等技术转换为电能的一种可再生能源发电方式。生物质资源分布广泛,获取方式更为方便,具有作为分布式发电的潜力,且现有技术的进步使得发电过程产生的碳排放量大大降低,符合低碳排放的环保理念。生物质发电功率与生物质原料用量、燃烧热值等密切相关^[27]。

$$P_{bio,t} = \frac{Q_{bio,t} \eta_{bio} C_{bio} \times 1000}{D \times 860} \quad (6)$$

式中: $P_{bio,t}$ 为 t 时刻生物质发电功率; $Q_{bio,t}$ 为 t 时刻用于燃烧的生物质原料质量; η_{bio} 为燃烧效率; C_{bio} 为生物质燃烧热值; D 为生物质发电机组每日工作时间。

1.2.5 微型燃气轮机

微型燃气轮机通过燃烧天然气发电,碳排放量较传统的燃煤发电更低,是可用于用户侧的重要分布式电源。其发电功率与天然气耗气量、燃烧效率等因素有关^[28-30]。

$$P_{gt,t} = \eta_{gt} L_{gas} P_{gas,t} \quad (7)$$

$$\eta_{gt} = aP_{gt,t}^3 + bP_{gt,t}^2 + cP_{gt,t} + d \quad (8)$$

式中: $P_{gt,t}$ 为 t 时刻微型燃气轮机的发电功率; η_{gt} 为燃气轮机发电效率; L_{gas} 为天然气的低热值; $P_{gas,t}$ 为 t 时刻消耗天然气功率; a 、 b 、 c 、 d 为机组发电相关系数。

2 多园区能量共享模型

2.1 目标函数

本文以各园区的最低用能成本为目标函数构建

能量共享模型。某一园区用能成本 C 包含分布式光伏的发电成本 C_{pv} 、生物质发电成本 C_{bio} 、微型燃气轮机发电成本 C_{gt} 、与电网功率交互成本 C_{grid} 、储能充放电成本 C_{es} 、电动汽车充电成本 C_{ev} 、柔性负荷参与需求响应费用 C_{dr} 以及园区间能量交互成本 C_{ij} , 如式(6)所示。

$$C = \min \{ C_{pv} + C_{bio} + C_{gt} + C_{grid} + C_{es} + C_{ev} + C_{dr} + C_{ij} \} \quad (9)$$

$$C_{pv} = \sum_{t=1}^T r_{pv} \tilde{P}_{pv,t} \quad (10)$$

$$C_{bio} = \sum_{t=1}^T r_{bio,mat} Q_{bio,t} + r_{bio,ope} P_{bio,t} \quad (11)$$

$$C_{gt} = \sum_{t=1}^T r_{gas} P_{gas,t} + r_{gt,ope} P_{gt,t} \quad (12)$$

$$C_{grid} = \sum_{t=1}^T (r_{grd-b,t} P_{buy,t} + r_{grd-s} P_{sell,t}) \quad (13)$$

$$C_{es} = \sum_{t=1}^T (r_{es-cha} P_{cha,t} + r_{es-dis} P_{dis,t}) \quad (14)$$

$$C_{ev} = \sum_{t=1}^T r_{ev-cha} P_{ev,t} \quad (15)$$

$$C_{dr} = \sum_{t=1}^T (r_{cut} \tilde{P}_{cut,t} + r_{exc} \tilde{P}_{exc,t}) \quad (16)$$

$$C_{ij} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J (r_{share} P_{ij,t}) \quad (17)$$

式中: r_{pv} 为分布式光伏发电的单位成本; $\tilde{P}_{pv,t}$ 为 t 时刻考虑不确定性的光伏发电功率; $r_{bio,mat}$ 为生物质原料单价; $r_{bio,ope}$ 为生物质发电设备单位运维价格; r_{gas} 为购买天然气单价; $r_{gt,ope}$ 为燃气轮机设备单位运维成本; $r_{grd-b,t}$ 为 t 时刻建筑群向电网购电单价; r_{grd-s} 为向电网售卖电能单价; $P_{buy,t}$ 、 $P_{sell,t}$ 分别为 t 时刻向电网购入、售卖电能功率; r_{es-cha} 、 r_{es-dis} 分别为储能设备充电、放电功率单位成本; $P_{cha,t}$ 、 $P_{dis,t}$ 分别为 t 时刻储能设备充电、放电功率; r_{ev-cha} 为电动汽车充电单价; $P_{ev,t}$ 为 t 时刻建筑群内电动汽车充电功率; r_{cut} 、 r_{exc} 分别为可削减负荷、可激励负荷的补偿单价; $\tilde{P}_{cut,t}$ 、 $\tilde{P}_{exc,t}$ 分别为 t 时刻考虑不确定性时参与需求响应的可削减、可激励负荷功率; r_{share} 为建筑群之间电能共享的单价; $P_{ij,t}$ 为 t 时刻建筑群 i 与建筑群 j 之间交互的功率值,该值为正时,建筑群 i 向建筑群 j 购入电能,该值为负时,建筑群 i 向建筑群 j 售出电能; T 为调度时段集合。

2.2 约束条件

2.2.1 考虑光伏、FL 不确定性的模糊机会约束

分布式光伏出力、柔性负荷参与需求响应的不确定性对园区原有的确定性调度计划造成较大影响, 1.2.1 与 1.2.2 节将分布式光伏发电与柔性负荷功率进行模糊处理, 产生机会约束条件, 使园区内电功率平衡满足一定的置信水平。

$$\text{Cr} \left\{ \begin{array}{l} \tilde{P}_{pv,t} + P_{bio,t} + P_{gt,t} + P_{buy,t} - \\ P_{sell,t} - P_{dis,t} + P_{cha,t} + P_{ev,t} - \\ \tilde{P}_{cut,t} + \tilde{P}_{exc,t} + P_{ij,t} - P_{Load,i,t} \geq 0 \end{array} \right\} \geq \alpha \quad (18)$$

式中: $\text{Cr}\{\cdot\}$ 为事件发生的可信性; α 为置信水平, 一般大于 0.5; $P_{Load,i,t}$ 为 t 时刻园区 i 用电负荷功率。

2.2.2 生物质发电功率约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{bio,t} \leq P_{bio,max} \\ 0 \leq t_{bio,ope} \leq t_{bio,max} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $P_{bio,max}$ 为生物质发电功率最大值; $t_{bio,ope}$ 为生物质发电机组实际满负荷运行的小时数量; $t_{bio,max}$ 为每日最大满负荷运行小时数量。

2.2.3 微型燃气轮机功率约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{gt,t} \leq P_{gt,max} \\ 0 \leq t_{gt,ope} \leq t_{gt,max} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $P_{gt,max}$ 为微型燃气轮机发电功率最大值; $t_{gt,ope}$ 为微型燃气轮机实际满负荷运行的小时数量; $t_{gt,max}$ 为每日最大满负荷运行小时数量。

2.2.4 与电网交互功率约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{buy,t} \leq u_b \eta_{AC-DC} P_{buy,max} \\ 0 \leq P_{sell,t} \leq u_s \eta_{DC-AC} P_{sell,max} \\ u_b + u_s \leq 1 \end{cases} \quad (21)$$

式中: $P_{buy,max}$ 、 $P_{sell,max}$ 分别为园区向电网购电、售电功率上限; η_{AC-DC} 为电能转换装置交流转直流的效率; η_{DC-AC} 为电能转换设备直流转交流的效率; u_b 、 u_s 分别为购电、售电标识, 二者为二进制变量, 对购售电进行约束, 在同一个时刻不能同时向电网购电与售电。

2.2.5 储能设备运行约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{cha,t} \leq P_{cha,max} \\ 0 \leq P_{dis,t} \leq P_{dis,max} \\ S_{es,t} = S_{es,t-1} + \eta_{es} P_{cha,t} - \frac{P_{dis,t}}{\eta_{es}} \\ S_{es,0} = S_{es,T} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $P_{cha,max}$ 、 $P_{dis,max}$ 分别为储能设备充电、放电功率最大值; $S_{es,0}$ 、 $S_{es,t}$ 、 $S_{es,T}$ 分别为初始时刻、 t 时刻、调度日最终时刻 T 储能设备所含电量; η_{es} 为储能设备充放电效率。

2.2.6 电动汽车充电约束

$$\begin{cases} E_{soc,t}^n = E_{soc,0}^n + \eta_{ev} P_{ev,t}^n t_{ev}^n \\ E_{soc,min}^n \leq E_{soc,t}^n \leq E_{soc,max}^n \\ 0 \leq t_{ev}^n \leq |t_2^n - t_1^n| \end{cases} \quad (23)$$

式中: $E_{soc,t}^n$ 、 $E_{soc,0}^n$ 分别为园区内第 n 辆电动汽车在 t 时刻、接入充电时电池电量; η_{ev} 为电动汽车充电效率; $P_{ev,t}^n$ 为第 n 辆电动汽车在 t 时刻充电功率; t_{ev}^n 为第 n 辆电动汽车充电时长; t_1^n 、 t_2^n 分别为第 n 辆电动汽车开始、结束充电的时间; $E_{soc,min}^n$ 、 $E_{soc,max}^n$ 分别为第 n 辆电动汽车结束充电时电量的期望最小值、最大值。

2.2.7 园区间能量交互约束

园区间进行能量共享, 可向其他园区售电或购电。若园区电能供应盈余、无需向外部电网购电且可向电网售电时, 此时可将剩余的电量售卖给其他园区; 反之, 园区内电能供应不足时, 可向电网购入电量或从其他园区购电, 满足式(14)约束。

$$-u_{s,i,t} u_{b,j,t} P_{ij,max} \leq P_{ij,t} \leq u_{b,i,t} u_{s,j,t} P_{ij,max} \quad (24)$$

式中: $u_{s,i,t}$ 、 $u_{b,i,t}$ 分别为园区 i 在 t 时刻售电、购电标识; $u_{s,j,t}$ 、 $u_{b,j,t}$ 分别为园区 j 在 t 时刻售电、购电标识; $P_{ij,max}$ 为园区 i 与园区 j 之间电能交互功率最大值。

3 求解方法

3.1 模糊机会约束的转化

式(18)中所含模糊机会约束, 为方便求解, 本文将其转化为清晰等价类, 再使用交替乘子算法求解园区能量共享模型。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{pv,t} \leq (2 - 2\alpha)(P_{pv,t}^3 - P_{pv,t}^2) + (2\alpha - 1)(P_{pv,t}^4 - P_{pv,t}^1) \\ 0 \leq P_{exc,t} \leq (2 - 2\alpha)(\omega_{exc}^3 - \omega_{exc}^2)P_{exc,da,t} + (2\alpha - 1)(\omega_{exc}^4 - \omega_{exc}^1)P_{exc,da,t} \\ 0 \leq P_{cut,t} \leq (2 - 2\alpha)(\omega_{exc}^3 - \omega_{exc}^2)P_{cut,da,t} + (2\alpha - 1)(\omega_{cut}^4 - \omega_{cut}^1)P_{cut,da,t} \end{cases} \quad (25)$$

转化为清晰等价类后的园区电功率满足约束:

$$\begin{aligned} & P_{pv,t} + P_{bio,t} + P_{gt,t} + P_{buy,t} - \\ & P_{sell,t} - P_{dis,t} + P_{cha,t} + P_{ev,t} + \\ & P_{ij,t} + P_{exc,t} - P_{cut,t} - P_{Load,i,t} \geq 0 \end{aligned} \quad (26)$$

3.2 ADMM算法

本文采用交替乘子算法(ADMM)的对多个园区之间的能量共享问题进行求解,将每个园区的求解目标视作一个优化子问题,对多个子问题进行交替迭代求解,在收敛参数原始残差与对偶残差达到期望的值时停止迭代。各园区在每次迭代中仅需向其他园区公布电能共享的功率,无需透露园区内其他设备运行情况,有效保护了园区内的运行信息。

1) 建立多园区的增广拉格朗日函数。

$$L = \sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i} L(P_i, P_{ji}, \lambda_{ij}) \quad (27)$$

式中: L 为多园区的增广拉格朗日函数; $L(\cdot)$ 为园区 i 与园区 j 之间的局部增广拉格朗日函数; N 为园区数量; P_i 为园区 i 的运行计划; P_{ji} 为园区 j 与园区 i 之间进行的功率交互计划; λ_{ij} 为拉格朗日乘子集合。

2) 根据式(6)所示目标函数,建立园区 i 子问题的增广拉格朗日函数。

$$L(P_i, P_{ji}, \lambda_{ij}) = C_i + \sum_{t=1}^T \sum_{j \in N, j \neq i} \lambda_{ij,t} (P_{ij,t} + P_{ji,t}) + \sum_{t=1}^T \sum_{j \in N, j \neq i} \frac{\rho_i}{2} \|P_{ij,t} + P_{ji,t}\|_2^2 \quad (28)$$

式中: C_i 为园区 i 的目标函数; ρ_i 为园区 i 子问题的惩罚参数。

3) 初始化各园区运行计划 $P_{i,0}$, 拉格朗日乘子 $\lambda_{ij,0}$, 令迭代次数 $k = 0$ 。

$$P_{i,k} = [P_{pv}, P_{bio}, P_{gt}, P_{buy}, P_{sell}, P_{dis}, P_{cha}, P_{ev}, P_{ij}, P_{exc}, P_{cut}] \quad (29)$$

式中: $P_{i,k}$ 为园区 i 在第 k 次迭代后得出的运行计划; P_{pv} 为光伏发电功率; P_{bio} 为生物质发电功率; P_{gt} 为微型燃气轮机发电功率; P_{buy} 为园区向电网购电功率; P_{sell} 为园区向电网售电功率; P_{dis} 为储能设备放电功率; P_{cha} 为储能设备充电功率; P_{ev} 为电动汽车充电功率; P_{ij} 为园区 i 与园区 j 之间电能交互功率; P_{exc} 为可激励负荷功率; P_{cut} 为可削减负荷功率。

4) 开始第 $(k+1)$ 次迭代,以第 k 次迭代中所求解得出的其他园区 j 对本园区 i 的电能共享功率 $P_{ji,k}$ 与拉格朗日乘子为已知量,交替优化求解,更新自身运行计划。

$$\begin{cases} P_{i,k+1} = \arg \min \{ L(P_i, P_{ji,k}, \lambda_{ij,k}) \} \\ P_{j,k+1} = \arg \min \{ L(P_j, P_{ij,k+1}, \lambda_{ji,k}) \} \end{cases} \quad (30)$$

5) 更新拉格朗日乘子。

$$\lambda_{ij,k+1} = \lambda_{ij,k} + \rho_i (P_{ij,k} + P_{ji,k}) \quad (31)$$

6) 判断原始残差 ε_1 与对偶残差 ε_2 是否满足式(32),若满足,求解结束;若不满足,则回到步骤继续迭代求解。

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \|P_{ij,k+1} + P_{ji,k+1}\|_2 \leq \theta_1 \\ \varepsilon_2 = \|P_{ij,k+1} - P_{ij,k}\|_2 \leq \theta_2 \end{cases} \quad (32)$$

式中: ε_1 、 ε_2 分别为迭代求解过程中的原始残差和对偶残差; θ_1 、 θ_2 分别为预先设定的原始残差收敛阈值与对偶残差收敛阈值。

4 算例分析

4.1 算例参数

本文所构建的考虑灵活性资源的多园区能量共享模型,以1h为一个调度时段。3个园区中均有分布式光伏、储能设备、电动汽车等,园区2中含有生物质发电机组以及微型燃气轮机机组。其中,生物质发电额定功率为2MW,效率为0.65,最大满负荷运行小时数为12h;微型燃气轮机发电额定功率为250kW,最大满负荷运行小时数为15h;3个园区电动汽车数量分别为100、50、80,各园区电动汽车充电特征设置表1—2所示,其中表1的 μ_1 — μ_5 分别为电动汽车开始充电时间、结束充电时间、充电开始时的初始电量,以及结束充电时电量的期望最小值与最大值所服从正态分布的数学期望;表2的 σ_1 — σ_5 分别为上述变量所服从正态分布的标准差。通过蒙特卡洛方法生成电动汽车的充电需求。园区向外电网功率购电价格设置为峰、谷、平电价,如表3所示。

表1 各园区电动汽车参数 μ
Tab. 1 Parameter μ of EV of each park

μ	园区1	园区2	园区3
μ_1	18.00	9.00	7.50
μ_2	8.50	20.00	20.00
μ_3	0.10	0.20	0.15
μ_4	0.40	0.50	0.50
μ_5	0.80	0.85	0.80

在MATLAB R2016b下调用Gurobi 11.1进行求解。设定ADMM算法最大迭代次数为100,置信水平设为0.85。各园区负荷、分布式光伏功率预测曲线如图2—3所示。

表 2 各园区电动汽车参数 σ
Tab. 2 Parameter σ of EV of each park

σ	园区 1	园区 2	园区 3
σ_1	3.30	3.30	3.30
σ_2	3.24	3.24	3.24
σ_3	0.05	0.05	0.05
σ_4	0.10	0.10	0.10
σ_5	0.10	0.10	0.10

表 3 园区与电网功率交互价格
Tab. 3 Power interaction prices between park and grid

元/kWh			
时段	时间段	购电单价	售电单价
谷时段	22:00—07:00	0.36	0.32
平时段	07:00—10:00	0.75	0.32
	20:00—22:00		
峰时段	10:00—20:00	1.08	0.32

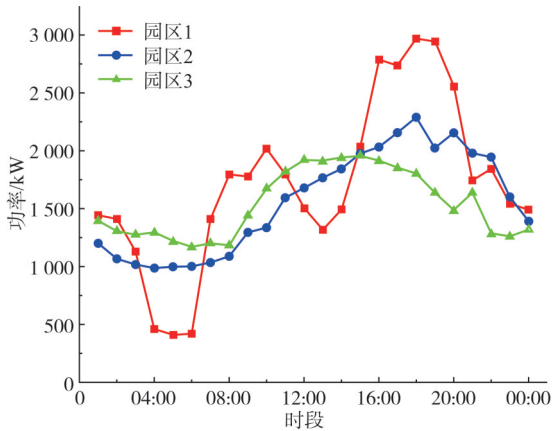


图 2 各园区负荷预测曲线
Fig. 2 Load prediction curves of each park

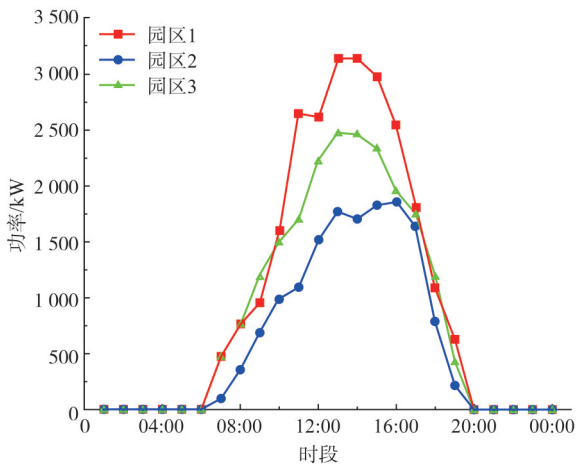


图 3 各园区光伏预测曲线
Fig. 3 PV prediction curves of each park

4.2 结果分析

4.2.1 多园区共享运行结果分析

图 4 展示了 3 个园区之间能量共享情况，图中曲线为负表示该园区将多余电量售出，曲线为正表示的部分该园区从其他园区购入电量。15:00—16:00 时段为园区 1 售出电量最大的时段，此时园区内光伏发电量较大，售出电量 360 kWh，其中园区 2 与园区 3 分别购入了 180 kWh。在 08:00—11:00 时段，园区 2 通过生物质发电与微型燃气轮机发电产生较多的电能，且此时段园区内负荷较小，可将多余的电量与其他园区共享，3 个时段均售出 350 kWh 电量，其中园区 1 购入 200 kWh 电量，园区 3 购入 150 kWh 电量；在 17:00—23:00 时段，此时园区 1、3 负荷用电量较大、电价较高，从园区 2 中购电的电价低于峰时电价，园区 2 每个小时内均产生 350 kWh 电量，其中园区 1 购入 200 kWh，园区 3 购入 150 kWh。园区 1、3 发电结构相似，与园区 2 之间实现了能源消纳在不同时间段的互补。

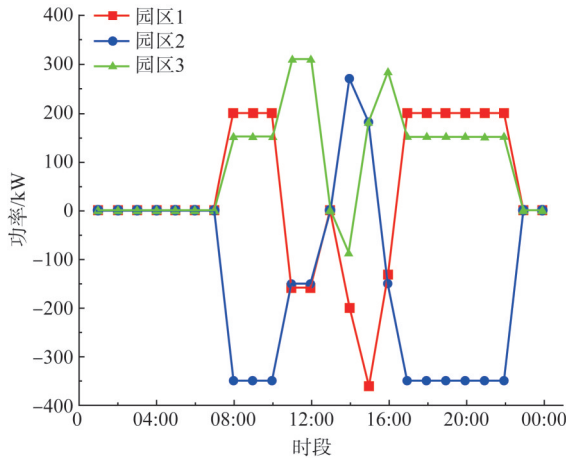


图 4 各园区能量共享结果
Fig. 4 Energy sharing results of each park

园区共享前后的运行成本与弃光量对比如表 4 所示。产生过剩电量的园区可售给其他园区，从而获得利润；自身发电量无法满足需求的园区，可从其他园区以低于电网电价的价格购入电能，减少了向电网的购电功率，费用得到了降低。通过能量共享，3 个园区的运行成本分别降低了 18.39 %、4.59 %、11.14 %。同时，过剩的光伏电能得到了一定的利用，总弃光量减少了 693.17 kWh，降低了 16.4 %。

3 个园区的设备运行情况如图 5 所示。在电价

表4 园区共享前后成本和弃光量情况

Tab. 4 Costs and wasted PV before and after park sharing

时段	园区1成本 /元	园区2成本 /元	园区3成本 /元	总弃光量 /kWh
共享前	28 728.93	17 600.65	25 179.97	4 226.22
共享后	23 446.39	16 792.37	22 374.48	3 533.05

处于谷时段(22:00—00:00、00:00—07:00)时,此时电价较低,且光伏设备发电功率为0,3个园区内的负荷需求主要通过向电网购电满足。在白天时段(08:00—18:00)电价较高,光伏发电量较多,各园区优先通过光伏发电满足负荷需求。园区1的光伏发电量在11:00—16:00时段较大,部分多余的电能通过与其他园区共享、向电网售电、储能充电等方式消纳;在16:00—17:00时段,光伏发电、储能设备释电量与其他园区共享;在17:00—20:00时段,除了向园区2购买电量,储能设备也释电量,减少峰时段的向电网购电功率。园区2中,由于生物质发电机组与微型燃气轮机满负荷运行小时数的限制,其运行时间均处于平时段与峰时段,两者与园区内光伏协同发电,在满足本园区负荷的同时,多余的电量上网或参与能量共享,售卖给其他园区。园区3则与园区1相似,在负荷用电以及电动汽车充电功率较大的时段,优先使用光伏发电以及通过共享购入的电能,在10:00—12:00时段,通过能量共享购入的电量最多,达到310 kWh。

4.2.2 EV与柔性负荷运行结果分析

根据表1—2中各园区电动汽车充电特征,使用蒙特卡洛方法模拟生成的最小充电需求与最大充电需求如图6虚线部分所示;各园区电动汽车实际充电情况如图6实线部分所示,对应图5中电动汽车充电情况。图中虚线部分上方、下方虚线分别表示园区内所有车主充电结束时,所有车辆电量均达到最大、最小期望值的充电负荷曲线,两虚线之间的区域为电动汽车充电功率的可调度范围,若电动汽车不参与优化调度,用户则会根据充电量达到最大期望值的曲线进行充电。通过对3个园区充电功率的调控,在满足了电动汽车用户的最低充电需求的同时,减少了对电网产生的冲击。

图7为能量共享前后的负荷优化曲线对比,该

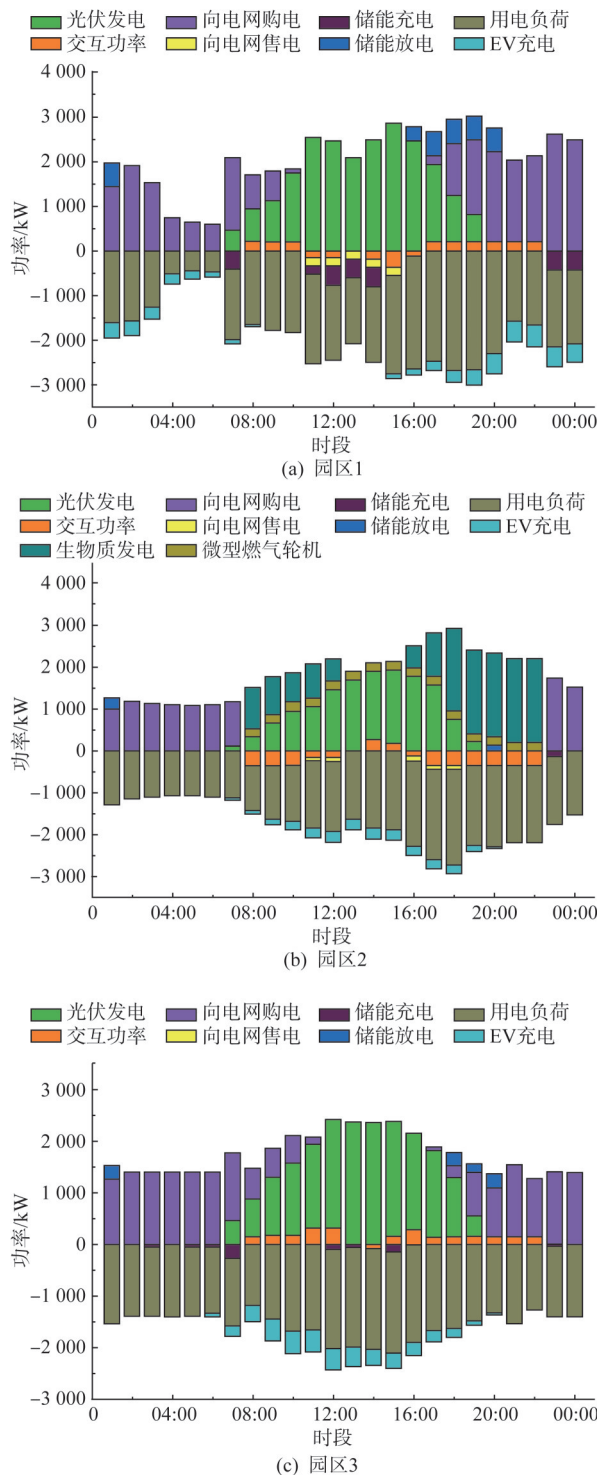


图5 各园区功率分配

Fig. 5 Power distribution of each park

负荷曲线为3个园区用电负荷功率以及电动汽车充电功率的叠加曲线,负荷预测曲线按照负荷预测功率和电动汽车充电电量达到最大期望的充电功率叠加。通过3个园区的能量共享,在00:00—09:00、

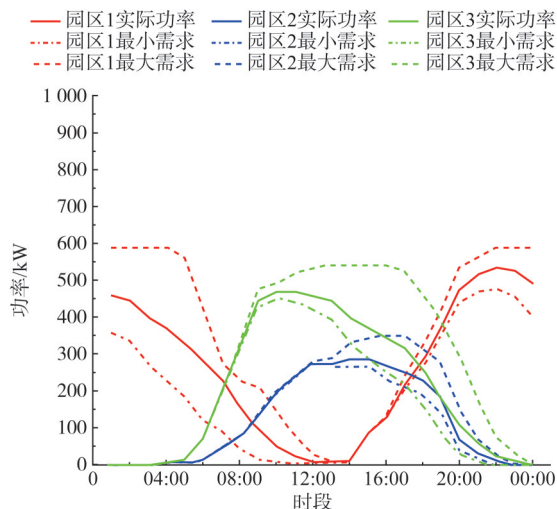


图6 各园区EV充电情况

Fig. 6 EV charging situation of each park

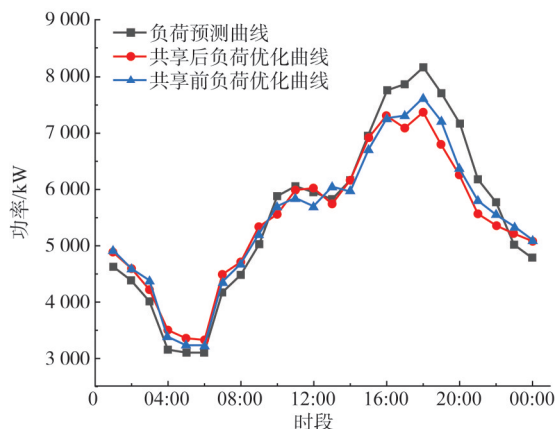


图7 负荷功率曲线对比

Fig. 7 Comparison of power load curve

23:00—24:00时段电价处于谷时段或平时段,购电价格较低、3个园区的总负荷功率以及线路运行压力较小,此时,可激励负荷参与调度,在05:00—06:00时段,用电功率最小值由3 098.69 kW增加到3 326.25 kW,提高了谷时段的用电量;在用电负荷最大的时段(15:00—22:00)电价处于峰时段,线路运行压力较大且用电价格较高,各园区通过电能共享交互、储能释放电能等方式减少了向电网购电量,可削减负荷参与调度,在负荷用电功率最高的17:00—18:00时段,实际用电功率由8 153.67 kW降低到7 364.51 kW,降低了峰时段的用电量,经过3个园区的共享优化,总负荷的峰谷差降低了1 016.72 kW。园区能量共享前后相比,共享后各园区的发电、用电结构得到进一步优化,总负荷的

峰谷差较共享前降低了355.30 kW,削峰填谷效果有所提升。

4.2.3 不同置信水平下结果分析

在多园区共享的场景下,为分析置信水平对园区运行的影响,表5给出了置信水平 α 从0.65至0.9的优化结果。随着置信水平的不断升高,决策者对于风险把控程度越高,而风险源自光伏发电、用户实际参与柔性负荷调度的不确定性,对于光伏发电以及柔性负荷响应功率的决策更加谨慎。置信水平较高时,多园区难以同时兼顾运行的稳定性与光伏消纳、柔性负荷的响应,致使弃光率升高、柔性负荷的补偿费用降低,与 $\alpha=0.65$ 相比, $\alpha=0.9$ 时柔性负荷响应的积极性更低,补偿费用降低了14.17%,弃光量增加了3 430.35 kWh;对光伏发电量利用率的下降,使得园区之间共享的电量更少,向电网购电量增加,各园区的总运行成本更高,置信水平为0.9时的总运行成本较0.65时增加了1 899.61元。

表5 不同置信水平下费用和弃光量

Tab. 5 Costs and wasted PV under different confidence levels

α	总运行成本/元	FL补偿费用/元	总弃光量/kWh
0.90	62 897.70	4 432.89	4 226.22
0.85	62 613.24	4 494.38	3 533.05
0.80	62 427.01	4 862.08	3 059.59
0.75	62 036.47	4 945.76	2 041.08
0.70	61 503.16	5 057.47	1 059.81
0.65	60 998.09	5 164.62	795.87

5 结论

本文构建了含分布式光伏、生物质发电、微型燃气轮机、电动汽车等多种灵活性资源运行特性的多园区能量共享模型,并使用梯形模糊隶属度函数描述了光伏发电、柔性负荷的不确定性,对多园区能量共享的运行方式进行了仿真。通过算例分析,得到以下结论。

1)与园区单独运行相比,多园区之间能量共享运行降低了各园区的用能成本,园区过剩的电能通过共享的方式与其他园区交互,减少了从外部电网购电的成本,有效提高了运行的经济性。同时,园区间的能量共享降低了弃光量,提高了园区运行的环保性。

2)通过多园区的能量共享,多种灵活性资源的运行得到了优化,在发电侧,分布式光伏、生物质发电、微型燃气轮机相配合,使不同园区的电能得到互补,实现电能的就地消纳;在用电侧,对电动汽车充电策略、柔性负荷参与需求响应的调控,改善了用户的用电结构,减少了用电负荷峰谷差。

3)使用模糊数描述分布式光伏与柔性负荷响应的不确定性,置信水平是影响园区运行的重要因素。置信水平越高,则决策者作出的策略越谨慎,承受发电与用电功率不平衡的风险越低,但是牺牲了一定的经济性,降低了光伏的消纳与柔性负荷响应的积极性。设置合理的置信水平,可实现风险的把控,对园区运行的稳定性与经济性具有积极意义。

参考文献

- [1] 国家能源局. 新型电力系统发展蓝皮书[M]. 北京: 中国电力出版社, 2023.
- [2] 高瑞阳, 王新宝, 高娴, 等. 考虑灵活性资源和多能共享的低碳区域综合能源系统联盟-配电网博弈优化调度[J]. 南方电网技术, 2024, 18(2): 77-88.
GAO Ruiyang, WANG Xinbao, GAO Xian, et al. Optimal dispatching of low-carbon regional integrated energy system alliance and distribution network game considering flexible resources and multi energy sharing[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(2): 77-88.
- [3] 陈心宜, 胡秦然, 石庆鑫, 等. 新型电力系统居民分布式资源管理综述[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(5): 157-175.
CHEN Xinyi, HU Qinran, SHI Qingxin, et al. Review on residential distributed energy resource management in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(5): 157-175.
- [4] JOSE I, SOARES F. An energy-as-a-service business model for aggregators of prosumers[J]. Applied Energy, 2023(347): 121487.1-121487.11.
- [5] 司方远, 张宁, 韩英华, 等. 面向多元灵活资源聚合的区域综合能源系统主动调节能力评估与优化: 关键问题与研究架构[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(6): 2097-2119.
SI Fangyuan, ZHANG Ning, HAN Yinghua, et al. Fundamental problems and research framework for assessment and optimization of the functional regulation capacity of the regional integrated energy system under the aggregation of diversified and flexible resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2097-2119.
- [6] WANG Y, MAUREE D, SUN Q, et al. A review of approaches to low-carbon transition of high-rise residential buildings in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020(131): 109990.1-109990.9.
- [7] 王杰, 刘念. 多主体综合能源系统分布式优化运行方法[J]. 南方电网技术, 2018, 12(3): 98-104, 115.
WANG Jie, LIU Nian. Distributed optimal operation method of integrated energy system with multi-agents[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(3): 98-104, 115.
- [8] 任文诗, 高红均, 刘友波, 等. 智能建筑群电能日前优化共享[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2568-2577.
REN Wenshi, GAO Hongjun, LIU Youbo, et al. Optimal day-ahead electricity scheduling and sharing for smart building cluster[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2568-2577.
- [9] 李驰宇, 高红均, 刘友波, 等. 多园区微网优化共享运行策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 29-36.
LI Chiyu, GAO Hongjun, LIU Youbo, et al. Optimal sharing operation strategy for multi park-level microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 29-36.
- [10] 于浩, 沈运帷, 林顺富, 等. 考虑用户心理的商业楼宇集群能量共享优化策略[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4423-4436.
YU Hao, SHEN Yunwei, LIN Shunfu, et al. Optimization strategies for energy sharing in commercial building clusters considering user psychology[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4423-4436.
- [11] GOMES I L R, RUANO M G, RUANO A E. From home energy management systems to communities energy managers: the use of an intelligent aggregator in a community in Algarve, Portugal[J]. Energy and Buildings 2023 (298): 113588.1-113588.12.
- [12] 王维庆, 李笑竹, 褚龙浩. 大规模可再生能源发电友好并网与运行调控技术研究综述[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2024, 41(2): 129-144, 156.
WANG Weiqing, LI Xiaozhu, CHU Longhao. A review of research on friendly grid connection and operation control technology for large scale renewable energy generation[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2024, 41(2): 129-144, 156.
- [13] 陈晓爽, 林今, 刘锋, 等. 新能源发电的伊藤随机过程模型[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 83-95, 376.
CHEN Xiaoshuang, LIN Jin, LIU Feng, et al. Itô stochastic process model for renewable generations[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 83-95, 376.
- [14] 黄勤坤, 邱瑜, 王飞, 等. 考虑多重不确定性的虚拟电厂随机优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(11): 8-16, 26.
HUANG Qinkun, QIU Yu, WANG Fei, et al. Stochastic optimal scheduling of virtual power plants considering multiple uncertainties[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(11): 8-16, 26.
- [15] 吕海鹏, 希望·阿不都瓦依提, 孟令鹏. 计及源-荷预测不确定性的微电网双级随机优化调度[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(9): 70-78.
LÜ Haipeng, XIWANG Abuduwaiti, MENG Lingpeng. Two-level stochastic optimal scheduling of microgrid considering uncertainty of source-load prediction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(9): 70-78.
- [16] 赵会茹, 王学杰, 李兵抗, 等. 考虑能量共享的多社区光储系统分布鲁棒优化调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(9): 21-31.
ZHAO Huiru, WANG Xuejie, LI Bingkang, et al. Distributionally robust optimal dispatch for multi-community photovoltaic and energy storage system considering energy sharing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9): 21-31.
- [17] 王灿, 张雪菲, 凌凯, 等. 基于区间概率不确定集的微电网两阶段自适应鲁棒优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44

- (5): 1750 – 1764.
WANG Can, ZHANG Xuefei, LING Kai, et al. Two-stage adaptive robust optimal scheduling based on the interval probability uncertainty set for microgrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(5): 1750 – 1764.
- [18] 栗世玮, 练睿青, 尤熠然, 等. 考虑不确定性的多能互补系统双层优化调度[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2022, 47(5): 1231 – 1243.
SU Shiwei, LIAN Ruiqing, YOU Yiran, et al. Two-layer optimal scheduling of multi-energy complementary systems considering uncertainty [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2022, 47(5): 1231 – 1243.
- [19] 李国庆, 李欣彤, 边竞, 等. 计及光伏-负荷预测不确定性的直流跨省互联网双级调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4763 – 4776.
LI Guoqing, LI Xintong, BIAN Jing, et al. Two level scheduling strategy for inter-provincial DC power grid considering the uncertainty of PV-load prediction [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4763 – 4776.
- [20] 于永军, 韩华玲, 张磊, 等. 计及光伏出力模糊性和旋转备用的电力系统环境经济调度[J]. 可再生能源, 2017, 35(8): 1188 – 1194.
YU Yongjun, HAN Hualing, ZHANG Lei, et al. Environmental economic dispatch of power system considering PV output fuzzy and rotating reserve [J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(8): 1188 – 1194.
- [21] 杨世博, 孙亮, 陈立东, 等. 计及分时电价的含冷热电联供型微网的配电网系统协调优化调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 15 – 23.
YANG Shibao, SUN Liang, CHEN Lidong, et al. Coordinated optimal scheduling of distribution network with CCHP-based microgrid considering time-of-use electricity price [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 15 – 23.
- [22] 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.
- [23] 张晶晶, 李淑杨, 齐先军, 等. 计及模糊随机不确定性的聚合商调度策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(6): 160 – 167.
ZHANG Jingjing, LI Shuyang, QI Xianjun, et al. Dispatching strategy of aggregator considering fuzzy random uncertainty [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(6): 160 – 167.
- [24] 林嘉琳, 王俐英, 李华, 等. 计及碳排放约束及源荷不确定性的电力系统协调优化配置研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(10): 46 – 57.
LIN Jialin, WANG Liying, LI Hua, et al. Research on optimal allocation of power system considering carbon emission constraints and source-load uncertainty [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(10): 46 – 57.
- [25] 王森, 陈莉, 张洁. 基于项目模糊相似度的协同过滤推荐算法[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(3): 696 – 701.
WANG Sen, CHEN Li, ZHANG Jie. Collaborative filtering recommendation algorithm based on item fuzzy similarity [J]. Application Research of Computers, 2021, 38(3): 696 – 701.
- [26] 李怡然, 张妹, 肖先勇, 等. V2G 模式下计及供需两侧需求的电动汽车充放电调度策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 129 – 135, 143.
LI Yiran, ZHANG Shu, XIAO Xianyong, et al. Charging and discharging scheduling strategy of EVs considering demands of supply side and demand side under V2G mode [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 129 – 135, 143.
- [27] AKINTE O O, PLANGKLANG B, PRASARTKAEW B, et al. Energy storage management of a solar photovoltaic-biomass hybrid power system [J]. Energies, 2023, 16(13): 5122.1 – 5122.33.
- [28] 范建斌, 孟昭军, 单沫文, 等. 综合能源系统关键技术与国际标准化综述[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(12): 1 – 9.
FAN Jianbin, MENG Zhaojun, SHAN Mowen, et al. A review of key technologies and international standardization of multi energy coupling systems [J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(12): 1 – 9.
- [29] 段俊东, 李秀琦. 考虑需求响应的电转氨综合能源系统优化调度[J]. 广东电力, 2025, 38(9): 23 – 35.
DUAN Jundong, LI Xiuqi. Optimal scheduling of power-to-ammonia integrated energy systems considering demand response [J]. Guangdong Electric Power, 2025, 38(9): 23 – 35.
- [30] 朱群波, 郝思鹏. 基于运行成本的园区综合能源系统优化调度[J]. 电测与仪表, 2024, 61(2): 34 – 40.
ZHU Qunbo, HAO Sipeng. Collaborative optimal dispatching of integrated energy system in industrial park [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(2): 34 – 40.

收稿日期: 2024-06-27; 网络首发日期: 2025-01-28

作者简介:

赵云(1985), 男, 高级工程师(教授级), 博士, 研究方向为电力营销与智能用电, zhaoyun@csg.cn;

吴晓锐(1994), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为电能质量及综合能源技术应用;

蔡梓文(1991), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为电力营销与智能用电。