

文章编号: 2095-4980(2025)04-0416-07

基于多目标优化的源网荷储协调调度求解

宋明曙¹, 苏常胜¹, 吴茂乾¹, 宋 炜², 何 凯^{*2}

(1. 国网新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2. 北京清能互联科技有限公司, 北京 100080)

摘 要: 针对当前源网荷储协调调度过程中单目标优化算法导致新能源消纳能力较差的问题, 结合多目标优化算法, 提出源网荷储协调调度问题求解优化方法。以最小调度成本和最大可再生能源消纳量为目标, 定义源网荷储协调调度多目标优化函数; 从能源元件、主网能源购买、柔性负荷响应、储能装置 4 方面, 分别设置合理的约束条件, 在粗糙集理论的辅助下, 确定每个调度优化目标函数的权重系数, 并引入非线性权重的改进鲸鱼优化算法求解多目标优化函数, 得出最优协调调度方案。实验结果表明: 依托于所提方法生成的调度优化方案应用后, 主动配电网的新能源消纳百分比达到 97.25%, 极大提升了电力系统的新能源消纳能力。

关键词: 多目标优化算法; 源网荷储; 协调调度; 新能源消纳; 约束; 改进鲸鱼优化算法

中图分类号: TM734

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2023262

Solution for coordinated scheduling of source-grid-load-storage based on multi-objective optimization

SONG Mingshu¹, SU Changsheng¹, WU Maoqian¹, SONG Wei², HE Kai^{*2}

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Co., LTD., Urumqi Xinjiang 830017, China;

2. Beijing Qingneng Interconnection Technology Co., LTD., Beijing 100080, China)

Abstract: Aiming to address the issue of poor new energy accommodation capacity caused by single-objective optimization algorithms in the current coordinated dispatch process of source-grid-load-storage, a multi-objective optimization algorithm is combined to propose an optimized solution method for the coordinated dispatch problem of source-grid-load-storage. With the goals of minimizing dispatch costs and maximizing renewable energy accommodation, a multi-objective optimization function for coordinated dispatch of source-grid-load-storage is defined. Reasonable constraints are set from four aspects: energy components, main grid energy procurement, flexible load response, and energy storage devices. With the assistance of rough set theory, the weight coefficients of each dispatch optimization objective function are determined. An improved whale optimization algorithm with nonlinear weights is introduced to solve the multi-objective optimization function and derive the optimal coordinated dispatch plan. Experimental results show that after applying the dispatch optimization plan generated by the proposed method, the new energy accommodation percentage of the active distribution network reaches 97.25%, significantly enhancing the new energy accommodation capacity of the power system.

Keywords: multi-objective optimization algorithm; source-grid-load-storage; coordinated dispatch; new energy accommodation; constraints; improved whale optimization algorithm

城市用电负荷不断攀升, 传统的集中式发电模式难以满足需求, 新能源如风能、太阳能等逐渐成为电网的重要组成部分^[1]。新能源发电具有间歇性和随机性, 使配电网的调度面临巨大挑战^[2-3]。为解决这一问题, 人们开始探索将柔性负荷设备、储能设备等加入到配电网中, 形成主动配电网。主动配电网能够更好地应对新能源的波动, 提高电力系统的稳定性, 但实现主动配电网的高效运行, 需解决源网荷储协调调度问题。这涉及到发电资源的合理配置、电力负荷的调度、储能设备的充放电管理等多个方面。在满足电力需求的同时, 还需考虑

收稿日期: 2023-09-15; 修回日期: 2024-01-06

*通信作者: 何 凯 email:dynastykai1314@sina.com

新能源的消纳，系统的稳定性、经济性等多个目标。

对于源网荷储协调调度优化这一研究项目，目前已取得了有意义的研究成果。罗首权等^[4]考虑区域源网荷储系统中包含的主体，以满足不同主体的利益为目标，建立协调调度双层优化模型，得到最优的协调调度计划，但该调度优化方法的应用拓展性较差。刘海南等^[5]在考虑新能源发电波动性的情况下，构建基于双层优化原理的源网荷储协调调度模型。以满足最大风电消纳和最小调度成本为目标，求解出最优协调调度方案，但该优化调度方案的风电消纳能力较差。罗金满等^[6]提出了考虑源网荷储聚合交易的区域电热综合能源系统优化调度方法，该方法降低了调度成本，缓解了调度压力，提高了系统运行的经济性，但在虚拟电厂聚合热资源进行交易时，可控热负荷和电采暖叠加后热交易量基础腰线上出现局部的交易峰值，一定程度上影响热交易量的平稳性。杨冬梅等^[7]提出了一种考虑源网荷储的主动配电网运行协同调度方法，实现了经济性和新能源消纳的大幅提升，但该方法在建模时只考虑时间尺度，未考虑空间尺度，结果有一定局限性。

基于以上问题，本文提出一种结合多目标优化算法的协调调度问题求解优化方法。同时，通过引入非线性权重系数的改进鲸鱼优化算法，对多目标调度优化目标进行求解，生成最符合要求的调度方案，提高主动配电网的运行效率，不仅满足日益增长的电力需求，还能促进新能源的发展，为实现绿色能源转型提供支持。

1 运用多目标优化算法设计源网荷储协调调度问题求解优化方法

1.1 基于多目标优化算法建立协调调度优化目标

在优化源网荷储协调调度计划时，应用多目标优化算法，同时考虑调度成本和可再生能源消纳能力，确定建立协调调度优化目标^[8]。在定义以最小调度成本为核心的优化目标时，需先考虑源网荷储协调调度结构，明确协调调度成本的来源。对于可执行源网荷储协调调度功能的配电网结构，其核心控制器件为能源路由器，如图 1 所示。

从图 1 中可以看出，协调调度成本的计算需考虑能源元件的运维成本。基于此，定义最小源网荷储协调调度成本目标函数为：

$$\min f_1 = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \quad (1)$$

式中： f_1 为日协调调度成本目标函数； C_1 为元件的运维成本； C_2 为电力购买成本； C_3 为柔性负荷响应成本； C_4 为弃风光成本：

$$\begin{cases} C_1 = \sum_{t=1}^{24} E_{L,t} \varepsilon_i \\ C_2 = \sum_{t=1}^{24} (Q_{1,t} \omega_1 + Q_{2,t} \omega_2) \\ C_3 = \sum_{t=1}^{24} (\bar{C}_1 P_{1t} + \bar{C}_2 P_{2t} + \bar{C}_3 P_{3t}) \\ C_4 = \sum_{t=1}^{24} (\rho \lambda_t) \end{cases} \quad (2)$$

式中： t 为时间； i 为元件； E 为能源元件负荷； ε 为单位负荷运行费用； Q_1 、 Q_2 分别为电和天然气的购买量； ω_1 为电的单位购买价格； ω_2 为天然气的单位购买价格； \bar{C}_1 、 P_1 分别为可转移电负荷的补贴成本和响应功率； \bar{C}_2 、 P_2 分别为可削减负荷的补贴成本和响应功率； \bar{C}_3 、 P_3 分别为可调节负荷的补贴成本和响应功率； ρ 为单位弃风光成本； λ 为弃风光量。

定义可再生能源消纳量最大协调调度优化目标函数为：

$$\max f_2 = \sum_{t=1}^T (\psi_1' + \psi_2') \quad (3)$$

式中： T 为调度周期； ψ_1 为风电场的有功出力； ψ_2 为光伏电站的有功出力。

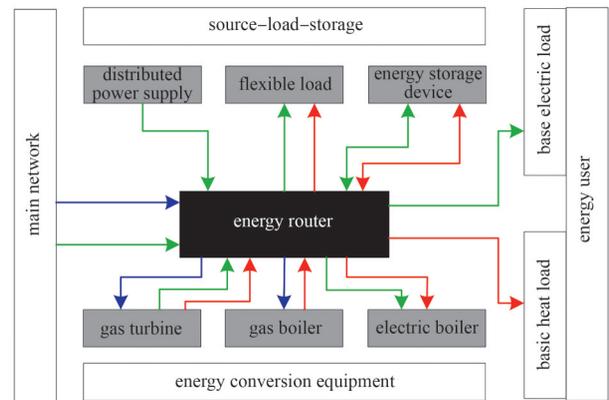


Fig.1 Structure diagram of source-grid-load-storage

图 1 源网荷储协调调度结构图

在模型构建过程中考虑了最小化调度成本和最大化可再生能源消纳量 2 个目标。调度成本的计算中, 考虑了能源元件的运维成本、电力和天然气的购买成本、柔性负荷响应成本和弃风光成本等。这充分反映了实际调度过程中的主要开销, 使模型能够更准确地反映实际应用场景。

1.2 设置源网荷储协调调度优化约束条件

为保证优化后源网荷储协调调度方案的合理性, 根据实际调度中的各种限制, 考虑电网运行特点、能源元件的出力约束、电力和天然气的购买约束、柔性负荷响应约束以及储能约束等。针对建立的多目标优化函数, 设置一系列约束条件。对于能源元件, 其出力约束表示为:

$$S_i^{\min} \leq S_{t,i} \leq S_i^{\max} \quad (4)$$

式中: S 为元件的调度量; S_i^{\min} 、 S_i^{\max} 分别为 S 下限和上限。

源网荷储协调调度问题求解优化过程中, 将电力能源购买约束条件表示为:

$$\begin{cases} Q_1^{\min} \leq Q_{1t} \leq Q_1^{\max} \\ Q_2^{\min} \leq Q_{2t} \leq Q_2^{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中: Q_1^{\min} 、 Q_1^{\max} 分别为电力购买的下限和上限; Q_2^{\min} 、 Q_2^{\max} 分别为天然气购买的下限和上限。

将柔性负荷响应约束、储能约束条件分别表示为:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{1t} \leq P_{1t}^{\max} \\ 0 \leq P_{2t} \leq P_{2t}^{\max} \\ 0 \leq P_{3t} \leq P_{3t}^{\max} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} 0 \leq \vartheta_t^o \leq \vartheta_{t,\max}^o \\ 0 \leq \bar{\vartheta}_t^o \leq \bar{\vartheta}_{t,\max}^o \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_{1t}^{\max} 为可转移电负荷的最大响应功率; P_{2t}^{\max} 为可削减负荷的最大响应功率; P_{3t}^{\max} 为可调节负荷的最大响应功率; o 为储电/储热装置; ϑ 、 $\bar{\vartheta}$ 分别为储能量和储热量; $\vartheta_{t,\max}^o$ 、 $\bar{\vartheta}_{t,\max}^o$ 分别为充、放能上限。

1.3 计算调度优化目标函数权重

由于优化源网荷储协调调度方案时定义了 2 个目标函数, 为同时满足两方面的调度需求, 在求解调度方案时, 先计算每个目标函数的权重系数, 以此判断该目标函数的决策属性^[9], 从而得到最优调度方案。本文采用粗糙集理论计算目标函数权重, 具体计算过程中先定义其中一个目标函数权重为 0~1 之间的随机值, 基于此推算出另一个调度优化目标函数的权重取值, 以二者为基础构造多个目标函数求解最佳取值, 并将其看做决策属性。

从 2 个目标函数的知识库 R_1 、 R_2 入手, 基于粗糙集基数 d , 计算二者之间的依赖程度。

$$\varphi_{R_1}(R_2) = \frac{d[R_1([\Phi]_{R_2})]}{d(U)} \quad (8)$$

式中: φ 为依赖程度; Φ 为决策向量; U 为去除决策属性前的样本数量。

随后, 求解原始知识库对去掉决策属性后知识库的依赖度:

$$\varphi_{R_1-|a|}(R_1) = \frac{d[R_1-|a|([\Phi]_{R_1})]}{d(U)} \quad (9)$$

式中 a 为决策属性。

以式(8)~(9)计算结果为依据, 求解出目标函数的权重系数。

$$w_l = \frac{\varphi_{R_1}(a_l) - \varphi_{R_1-|a|}(a_l)}{\sum_{l=1}^2 [\varphi_{R_1}(a_l) - \varphi_{R_1-|a|}(a_l)]} \quad (10)$$

式中: l 为协调调度优化目标函数; w 为权重系数。

1.4 求解最优源网荷储协调调度方案

明确每个调度优化目标函数的权重后，采用鲸鱼优化启发式搜索算法，模拟鲸鱼捕食行为，对多目标调度优化目标函数进行求解，得到最优源网荷储协调调度方案。实际求解过程中，需考虑多约束条件和多决策变量。为提升鲸鱼优化算法的全局搜索能力，引入 2 个非线性权重系数，得到改进的鲸鱼优化算法。其中，2 个非线性权重分别负责在递增和递减过程中，提高全局搜索的收敛速度，2 个非线性权重系数的数学表达式为：

$$\begin{cases} \tau_1 = -\gamma \left[\cos \left(v \times \frac{b}{B} - \zeta \right) \right] \\ \tau_2 = \gamma \left[\cos \left(v \times \frac{b}{B} - \zeta \right) \right] \end{cases} \quad (11)$$

式中： τ_1 、 τ_2 为非线性权重； γ 为非线性权重的取值范围； v 为随机数； b 为当前迭代次数； B 为最大迭代次数； ζ 为取值间隔。

引入非线性权重后，得到改进鲸鱼优化算法求解过程中，鲸群个体位置更新模型：

$$X(b+1) = X'(b) - \tau_2 \times g \times h \quad |g| < 1 \quad (12)$$

$$X(b+1) = \tau_1 \left[h \times e^{yu} \times (\cos 2u) + X'(b) \right] \quad (13)$$

$$X(b+1) = \bar{X}(b) - \tau_2 \times g \times |h \times \bar{X}(b) - X(b)| \quad |g| \geq 1 \quad (14)$$

式中： X 为鲸群个体的位置空间； X' 为鲸群最优个体所处位置； g 、 h 为系数； u 为随机数； e 为底数； y 为常数； \bar{X} 为选择猎物的鲸鱼所处位置。

根据鲸群变化特点，从上述 3 个模型中选择对应的模型实现鲸群个体位置更新。利用这一算法，按照图 2 所示的流程完成多目标协调调度优化求解后，即可得到最优源网荷储协调调度方案。

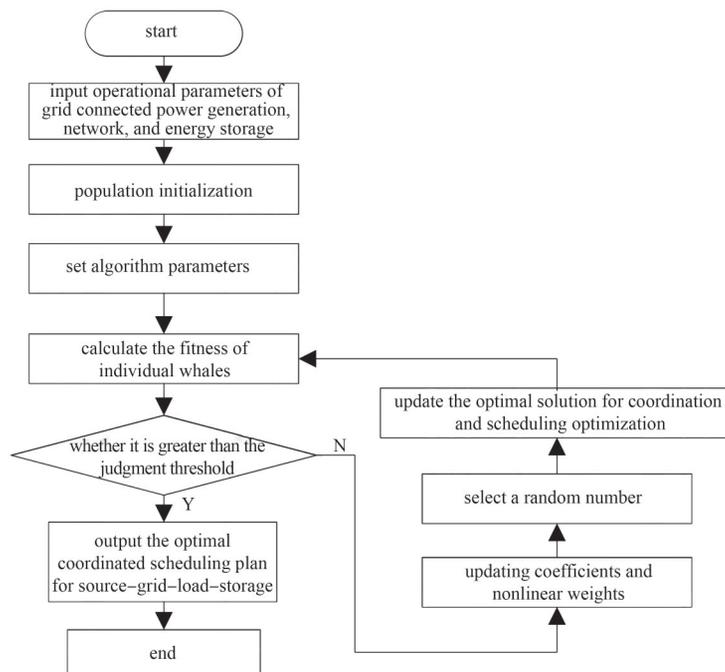


Fig.2 Coordinated scheduling optimization solution process based on the improved whale optimization algorithm

图 2 基于改进鲸鱼优化算法的协调调度优化求解流程

改进的鲸鱼优化算法在运算复杂度方面具有较好的性能。该算法采用鲸鱼群体进行搜索，每个鲸鱼个体代表一个解，通过不断更新鲸鱼个体的位置寻找最优解。与传统的优化算法相比，改进的鲸鱼优化算法避免了复杂的数学运算和矩阵运算，降低了运算复杂度。在该算法中引入非线性权重，使算法在搜索过程中能够根据迭代次数的增加，自适应地调整搜索策略。这有助于加快算法的收敛速度，减少迭代次数，从而缩短求解时间。非线性权重的引入，使算法在全局搜索和局部搜索之间找到一个平衡点，既能够快速寻找最优解的方向，又

能够在最优解附近精细地搜索,提高了搜索效率。同时,该算法通过引入非线性权重和选择合适的参数设置,能够在保证收敛速度的同时,提高收敛精确度。此外,通过调整非线性权重的取值范围和取值间隔等参数^[10],可进一步优化算法的收敛精确度。改进的鲸鱼优化算法在求解多目标调度优化问题时,能够获得较为理想的最优解,满足实际应用的需求。

2 实验验证

2.1 实验准备

为验证协调调度优化方法的实际应用效果,以 IEEE33 节点系统为例,在实验室内模拟该配电网结构,并在节点 6、7、12、24、29、31 处,分别连接储能设备(Energy Storage System, ESS)、柔性负荷设备(Flexible Load, FL)、电动汽车(Electric Vehicles, EV)、分布式光伏(Distributed Photovoltaic, PV)、可控的分布式发电(Managed Distributed Generation, MT)、风能发电机(Wind Turbine, WT),最终形成的主动配电网结构如图 3 所示。

IEEE33 配电网结构轴接入的分布式光伏设备容量为 1 000 kW,电力系统正常运行状态下,新能源发电的功率因数为 0.8,储能设备的最大充放电功率为 550 kW。接入的电动汽车设备,设置入网时间为 17 点,离网时间为次日上午 9 点,以更好地模拟电网中的这部分负荷情况。

2.2 主动配电网负荷预测

在上述实验条件下,为更全面地测试协调调度优化方法的效果,设计 4 个实验场景:场景 1(晴朗天气)、场景 2(阴雨天)、场景 3(节假日)和场景 4(非节假日)。这些场景下,负荷预测曲线如图 4 所示。

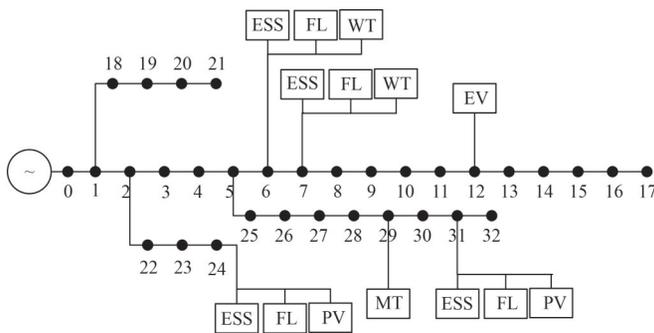


Fig.3 Structure diagram of IEEE33 distribution network
图 3 IEEE33 配电网结构图

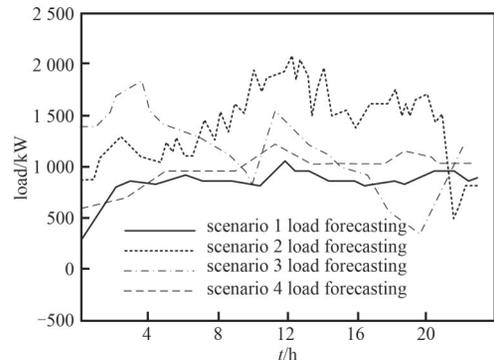


Fig.4 Load prediction curves of the distribution network in the four experimental scenarios
图 4 4 个实验场景下配电网负荷预测曲线

由图 4 可知,场景 1 下,光伏发电的出力较高,因此系统负荷需求相对较低。此时,负荷预测曲线呈现较为平缓的趋势,没有明显的峰谷变化。由于光伏发电的出力稳定,系统的调度较为简单,可充分利用新能源发电,降低化石能源的消耗。场景 2 下,光伏发电的出力大幅降低,因此系统负荷需求相对较高。此时,负荷预测曲线呈现较为陡峭的趋势,峰谷变化明显。为满足负荷需求,系统需调度其他可调节资源,如储能设备和可控的分布式发电。由于新能源发电的出力较低,系统需要更多地依赖传统能源保证供电的稳定性。场景 3 下,负荷需求通常会大幅降低。此时,负荷预测曲线呈现明显的下降趋势。由于人们的生活习惯和作息时间发生变化,负荷曲线的峰谷时间也会相应调整。系统需根据实际情况进行调度,合理安排设备的运行时间和出力,以实现能源的高效利用。场景 4 非节假日的负荷需求相对较为稳定,负荷预测曲线呈现平稳的趋势。此时,系统可以充分利用新能源发电,并保持较高效率的经济性。

2.3 协调调度优化方案

以晴朗天气和阴雨天 2 个特征明显的实验场景下的配电网负荷为依据,采用新提出的多目标调度优化方法求解源网荷储协调调度优化方案。不同实验场景下的协调调度优化结果如图 5 所示。

由图 5 可知,在不同的实验场景下,协调调度优化后储能设备、风能发电机、分布式光伏、可控分布式发电按照自身能力出力,整体满足了图 4 所示的负荷曲线,并在调度优化后明显削弱了负荷峰谷差,证明了该优化方法的可行性。

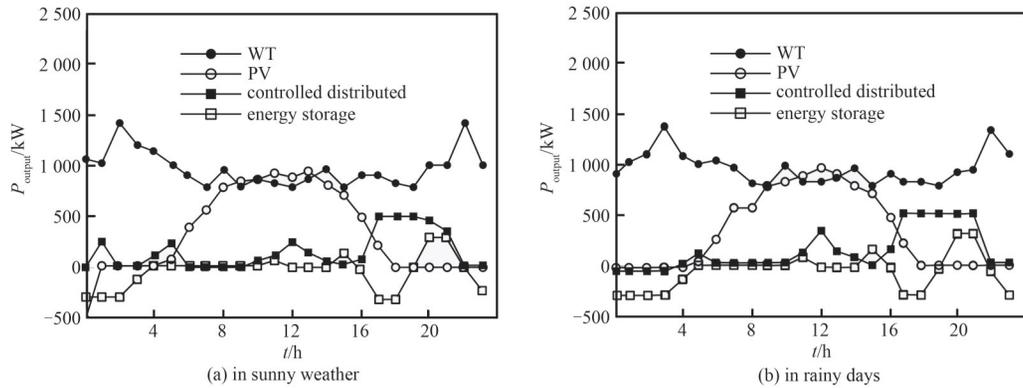


Fig.5 Optimization results of source-grid-load-storage coordination and scheduling in different scenarios
图5 不同场景下源网荷储协调调度优化结果

2.4 新能源消纳能力对比

采用本文所提方法和文献[4-5]提出的方法分别对晴朗天气和阴雨天 2 个实验场景进行协调调度优化，对比不同方法调度优化后的新能源消纳情况，结果如图 6 所示。由图 6 可知，所提方法应用后，源网荷储协调调度优化方案的新能源消纳百分比达到了 97.25%，而另外 2 种方法的新能源消纳百分比平均值分别为 63.71%、84.02%，相比优化前虽有明显提升，但新能源消纳性能提升结果明显不如本文所提方法，这也体现了基于多目标优化算法的调度问题求解优化方法的优越性能。

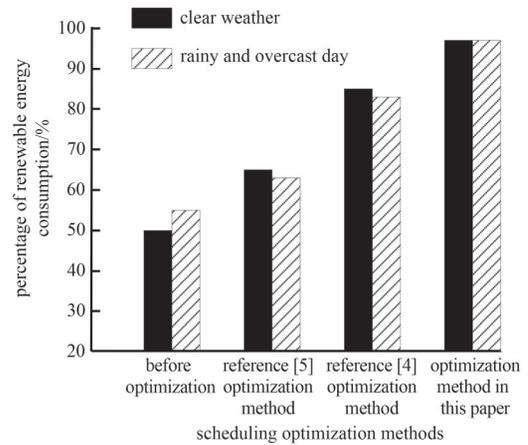


Fig.6 Comparison of new energy consumption of different scheduling optimization schemes
图6 不同调度优化方案的新能源消纳对比

3 结论

在主动配电网负荷越来越大的情况下，本文提出一种考虑源网荷储的多目标调度优化方法。经过实验测试可以看出，本文所提方法实现了最大化的新能源消纳，将其用于电力系统中，可发挥较大的应用价值。

参考文献：

[1] 王薪媛, 蔺红. 综合考虑多类型灵活性资源的主动配电网优化调度方法研究[J]. 可再生能源, 2023,41(2):227-235. (WANG Xinyuan, LIN Hong. Research on optimal scheduling method of active distribution network considering multi-type flexible resources[J]. Renewable Energy Resources, 2023,41(2):227-235.) DOI:10.3969/j.issn.1671-5292.2023.02.013.

[2] 陈锐, 刘硕, 贺先强, 等. 计及源网不确定性的风险评估与优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023,35(5):19-27,72. (CHEN Rui, LIU Shuo, HE Xianqiang, et al. Risk assessment and optimal dispatching considering source-network uncertainties[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023,35(5):19-27,72.) DOI:10.19635/j.cnki.csu-epsa.001094.

[3] 陆纯莹, 朱武, 王世萱, 等. 计及分时电价的微能源源网荷储协同优化调度[J]. 科学技术与工程, 2022,22(17):7013-7020. (LU Chunying, ZHU Wu, WANG Shixuan, et al. Source-load-storage coordinated optimal scheduling of micro energy grid considering time-of-use electricity price[J]. Science Technology and Engineering, 2022,22(17):7013-7020.) DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2022.17.028.

[4] 罗首权, 丁孝华, 韩韬, 等. 基于目标级联分析法的区域源网荷储系统日前运行优化[J]. 电工电能新技术, 2021,40(7):11-19. (LUO Shouquan, DING Xiaohua, HAN Tao, et al. Day-ahead operation optimization of regional scale source network load storage system based on analytical target cascading theory[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021,40(7):11-19.) DOI:10.12067/ATEEE2011037.

[5] 刘海南, 蔺红, 樊国旗, 等. 基于风荷耦合特性的源荷储的优化调度[J]. 智慧电力, 2021,49(1):42-47. (LIU Hainan, LIN Hong, FAN Guoqi, et al. Optimal scheduling of source-load-storage based on wind-load coupling characteristics[J]. Smart Power, 2021,49(1):42-47.) DOI:10.3969/j.issn.1673-7598.2021.01.007.

- [6] 罗金满,刘丽媛,刘飘,等. 考虑源网荷储协调的主动配电网优化调度方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022,50(1):167-173. (LUO Jinman,LIU Liyuan,LIU Piao,et al. An optimal scheduling method for active distribution network considering source network load storage coordination[J]. Power System Protection and Control, 2022,50(1):167-173.) DOI:10.19783/j.cnki.pspc.210348.
- [7] 杨冬梅,王俊,杜炜. 考虑源网荷储聚合交易的区域电热综合能源系统优化调度[J]. 电力建设, 2021,42(10):28-39. (YANG Dongmei,WANG Jun,DU Wei. Optimal dispatching for regional integrated electric and heating systems considering aggregation and transaction of generation-grid-load-storage[J]. Electric Power Construction, 2021,42(10):28-39.) DOI:10.12204/j.issn.1000-7229.2021.10.004.
- [8] 袁桂丽,贾新潮,陈少梁,等. 虚拟电厂源-荷协调多目标优化调度[J]. 太阳能学报, 2021,42(5):105-112. (YUAN Guili,JIA Xinchao,CHEN Shaoliang,et al. Multiobjective optimal dispatch considering source-load coordination for virtual power plant[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021,42(5):105-112.) DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2019-0098.
- [9] 甘露,陈芳芳,孙祥晟,等. 基于QGA-Elman模型的新能源汽车充电站负荷预测[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022,20(4):378-384. (GAN Lu,CHEN Fangfang,SUN Xiangsheng,et al. Load forecast of new energy vehicle charging stations based on QGA-Elman model[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022,20(4):378-384.) DOI:10.11805/kyda2020224.
- [10] 孙昕,刘景延,赵冬雪,等. 基于可再生能源不确定性的多能源微网调度优化模型[J]. 科学技术与工程, 2020,20(35):14523-14529. (SUN Xin,LIU Jingyan,ZHAO Dongxue,et al. Scheduling optimization model of multi-energy micro grid based on uncertainty of renewable energy[J]. Science Technology and Engineering, 2020,20(35):14523-14529.) DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2020.35.026.

作者简介:

宋明曙(1984-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力系统调度与运行优化、电力市场。email:songmingshu@xj.sgcc.com.cn.

苏常胜(1986-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力系统调度与运行优化、电力市场。

吴茂乾(1988-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力系统调度与运行优化、电力市场。

宋 炜(1994-),男,硕士,助理工程师,主要研究方向为电力市场、电力系统模拟仿真。

何 凯(1991-),男,硕士,工程师,主要研究方向为综合能源系统优化、电力市场。

(上接第409页)

- [11] RUDIN N,KOLVENBACH H,TSOUNIS V,et al. Cat-like jumping and landing of legged robots in low gravity using deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2022,38(1):317-328. DOI:10.1109/TRO.2021.3084374.
- [12] 祝熙彤,孙瑀擎,周诺,等. 电压模式 Buck-Boost 变换器变论域模糊 PI 控制[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(6):1141-1146. (ZHU Xitong,SUN Yuqing,ZHOU Nuo,et al. Variable universe fuzzy PI control of voltage mode buck-boost converter[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(6):1141-1146.) DOI:10.11805/TKYDA2019373.
- [13] MO Hong,MENG Yinghui,WANG Feiyue,et al. Interval type-2 fuzzy hierarchical adaptive cruise following-control for intelligent vehicles[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022,9(9):1658-1672. DOI:10.1109/JAS.2022.105806.
- [14] TAMADA T,IKARASHI W,YONEYAMA D,et al. High-speed bipedal robot running using high-speed visual feedback[C]// 2014 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. Madrid,Spain:IEEE, 2014:140-145.

作者简介:

皮 明(1987-),男,博士,特聘副教授,主要研究方向为智能机器人控制。email:756408918@qq.com.

杨 涛(1972-),男,博士,教授,主要研究方向为机电系统仿真。