

考虑风电和储能接入电网的多目标协同博弈区间经济调度

黄 頔¹, 杨 鑫², 高 林³, 张 聪^{3†}, 陈皓勇⁴

(1. 国网湖南省电力有限公司技术技能培训中心(长沙电力职业技术学院), 湖南 长沙 410131;

2. 国网湖南省电力有限公司长沙供电分公司, 湖南 长沙 410004;

3. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 4. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510641)

摘要: 针对风电的不确定性对电网调度的经济和安全运行造成影响的问题, 充分考虑储能灵活充放电的运行优势, 提出了一种基于改进均衡协调算法的多目标区间储能经济调度优化方法. 本文综合考虑有功调度与无功优化之间的内在耦合关系, 以典型日运行的电压偏差和系统综合运行总成本最小化为优化目标, 建立多目标区间储能经济调度优化模型. 在优化过程中, 首先考虑在直流潮流的区间调度模型中, 通过优化储能和发电机的有功出力来实现对风电不确定性的处理, 然后采用改进均衡协调算法对考虑交流潮流的有功-无功储能调度模型进行综合优化, 从而获得兼顾电网安全性与经济性的均衡最优解. 本文还从风电的不同区间波动以及风电场并网规模的角度出发, 分析了系统储能调度运行的影响. 最后本文将改进算法获得的最优解与采用带权重系数的理想点法分析获得的 Pareto 最优解进行对比分析, 可避免确定权重因子时的人为主观因素. 本文通过对 IEEE RTS-24 节点系统进行算例仿真, 验证了所提模型的合理性和可行性.

关键词: 经济性; 安全性; 区间优化; 经济调度; 协同博弈; 均衡协调; 多目标优化

引用格式: 黄頔, 杨鑫, 高林, 等. 考虑风电和储能接入电网的多目标协同博弈区间经济调度. 控制理论与应用, 2021, 38(7): 1061 – 1070

DOI: 10.7641/CTA.2021.00541

Interval economic dispatch of multi-objective cooperative game considering wind power and energy storage connected to power grid

HUANG Di¹, YANG Xin², GAO Lin³, ZHANG Cong^{3†}, CHEN Hao-yong⁴

(1. Technical Skills Training Center of State Grid Hunan Electric Power Company
(Changsha Electric Power Technical College), Changsha Hunan 410131, China;

2. Changsha Power Supply Branch of State Grid Hunan Electric Power Company, Changsha Hunan 410004, China;

3. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China;

4. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510641, China)

Abstract: In view of the impact of wind power uncertainty on the economic and safe operation of power grid dispatching, fully considering operational advantages of flexible charging and discharging of energy storage, a multi-objective interval energy storage economic dispatch optimization method based on improved equilibrium coordination algorithm is proposed. Considering inherent coupling relationship between active power dispatch and reactive power optimization, a multi-objective interval energy storage economic dispatch optimization model is established to minimize voltage deviation and overall operation cost of typical daily operation. During the optimization, firstly in the interval dispatching model considering DC power flow, the uncertainty of wind power is handled by optimizing outputs of energy storage and generators. Then, the improved algorithm is used to optimize active-reactive dispatching model to obtain equilibrium optimal solution by considering AC power flow as well as the security and economy of the grid. The paper also analyzes the impact on system dispatch operation from the perspective of different interval fluctuations of wind power and the scale of wind farms connected to the grid. Finally, this paper compares optimal solution of the improved algorithm with Pareto optimal solution obtained by ideal point method with weight coefficients, which can avoid subjective factors when determining the weight factors. The rationality and feasibility of the proposed model are verified through the simulation of IEEE RTS-24 system.

Key words: economy; security; interval optimization; economic dispatch; cooperative game; equilibrium coordination; multi-objective optimization

Citation: HUANG Di, YANG Xin, GAO Lin, et al. Interval economic dispatch of multi-objective cooperative game considering wind power and energy storage connected to power grid. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(7): 1061 – 1070

收稿日期: 2020-08-14; 录用日期: 2021-05-26.

[†]通信作者. E-mail: zcong@hnu.edu.cn; Tel.: +86 15018716275.

本文责任编辑: 董希旺.

国家自然科学基金项目(52007056), 国网湖南省电力有限公司科技项目(5216AP20000D)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (52007056) and the State Grid Hunan Electric Power Company (5216AP20000D).

1 引言

近年来,可再生能源得到迅猛发展,其中以风电技术的发展最为迅速.配电网对可再生能源具有良好的兼容性,是未来智能配电网的发展方向^[1-2].分布式电源(distributed generation, DG)合理地接入将对配电网的电能质量、供电可靠性、继电保护和调度运行等方面带来一系列的影响.由于风力发电易受自然环境和时间等因素的影响,其功率输出具有较大的波动性、间歇性和随机性,大规模DG接入会严重影响电网的安全稳定运行;而储能系统(energy storage system, ESS)能量响应速度快,可以快速吸收或者释放电能,能够有效地平抑DG的波动性^[3-4],从而提高电网对分布式能源的消纳能力.

国内外学者在ESS参与风电并网的经济调度方面已开展了大量的研究,并积淀了一定的学术成果.关于考虑风电场和储能系统的电网有功-无功调度协同优化问题的研究工作,主要可以归纳为风电出力的不确定性分析、调度模型建立和求解算法的选取共3个方面.

传统的确定性经济调度模型中通常仅考虑优化发电机组的出力,并且一般很少出现误差.当风电场接入电力系统后,因其输出功率的强不确定性很难对其进行精准预测,对电力系统的调度运行、优化与控制提出了新的挑战,故为有效地促进系统消纳风电,保证系统的安全稳定可靠运行,需要对风电的出力进行不确定性建模与分析.文献[5-6]分别借助长短期记忆网络和支持向量机的方法对风电的输出功率进行了预测,但风电的点预测功率误差较大,不能充分地体现风电功率的不确定信息.

就经济调度模型而言,文献[7]针对风电并网存在大量弃风的问题,综合考虑风电及储能系统的经济效益和投资费用,构建了电网的经济性评估模型,并通过概率区间预测的方法提高风电场的调度入网规模,但该方法是以电网经济性换取安全性进行的调度决策;文献[8]为解决分布式电源接入引起的配电网电压越限问题,提出了一种考虑储能系统调节效应的有功-无功协调优化方法,以系统的节点电压偏差最小化为优化目标,建立了配网的有功-无功协调优化模型,并采用基于分布熵的粒子群算法进行求解,有效地降低了系统的电压偏差;文献[9-10]建立了计及风电、储能与需求响应联合调度优化模型;上述文献只是从调度运行的经济性或安全性的角度出发,并未考虑储能系统对电网的经济运行和安全运行的影响.

就模型的求解算法而言,文献[11-13]分别运用基于层次分析法和熵权法的改进粒子群算法、差分进化算法和分支定界算法求解了计及风电场和储能系统的经济调度多目标优化问题.以上文献对于多目标问

题的处理,其优化目标相应的权重系数的选取在一定程度上都存在着受人为主观因素的影响,其求解结果缺乏客观性.

综上所述,含风电并网和储能接入的电网经济调度问题的关键在于如何均衡系统的综合运行成本和电压波动,以达到同时满足电网的经济性和安全性.因此,本文针对以上问题,考虑风电出力的不确定性,利用区间理论对风电的出力进行区间建模,并以系统调度运行的综合成本和电压偏差最小化为目标函数,建立兼顾电网储能调度运行经济指标和安全指标的多目标区间优化模型.首先,通过考虑直流潮流的有功区间调度对风电场的不确定性出力进行处理,其次,通过考虑交流潮流的有功-无功储能调度进行综合优化,并采用改进均衡协调算法使系统的经济方和安全方进行资源的相互竞争与相互协调,从而获得兼顾系统经济性和安全性的均衡最优解,可避免确定权重因子时的人为主观因素.最后,本文通过对修改后的IEEE RTS-24节点系统进行仿真分析,从而验证本文所提算法与模型的可行性和有效性.

2 考虑风电并网储能接入的多目标区间经济调度优化模型

在大规模风电接入电网的背景下,因风电输出功率具有强波动性和不可精准预测的特征,导致电网调度人员在调度过程中误差增大,引起系统有功功率失衡,使得风电机组产生较大的弃风,严重情况下甚至会导致电网系统发生解列等事故.

为保障电网的安全稳定经济运行,本文采取区间预测^[14]的方法来调度风电的并网容量,即在风电预测出力的基础上预测误差得到风电功率的区间出力.风电机组的区间出力曲线如图1所示.

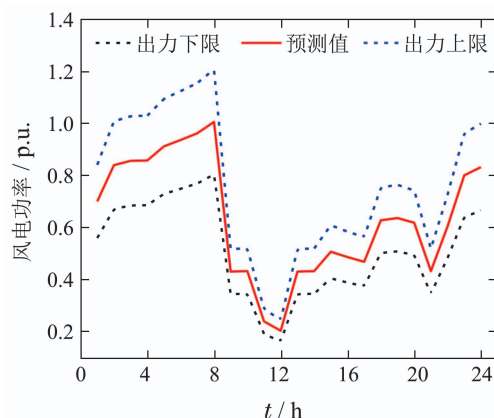


图1 风电预测功率以及出力上下限

Fig. 1 Wind power forecast and upper and lower limits of output

风电场出力的强不确定性和波动性是影响电力系统经济运行和安全稳定运行的重要因素.因此,本文从经济运行和安全运行的角度为切入点,以系统的综

合运行成本和电压偏差最小化为优化目标, 建立ESS参与电网有功-无功调度运行的综合优化模型, 从而为电网的调度运行与决策提供经济、技术上的双重评判标准。

2.1 风电极限场景下的有功区间调度模型

为考虑减小风电场出力的不确定性, 选取风电场区间出力的上边界和下边界为极限场景^[15], 以系统的综合运行成本为优化目标建立电网的有功区间调度模型, 其中优化目标 f_1 包含系统发电机组的发电运行成本和环境污染费用, 可描述为

$$\min f_1 = C_{\text{ope}} + C_{\text{env}}, \quad (1)$$

$$C_{\text{ope}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega_G} a_i P_{Gi}^2(t) + b_i P_{Gi}(t) + c_i, \quad (2)$$

$$C_{\text{env}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega_G} (k_{\text{CO}_2} \cdot k_{\text{NO}_x} \cdot k_{\text{SO}_2} \cdot P_{Gi}(t)), \quad (3)$$

式中: T 为当前调度的时段数; Ω_G 为发电机组集合; C_{ope} 为电网调度的日运行成本; C_{env} 为环境污染费用^[16]; 发电机组的发电运行成本和机组出力为二次函数关系, 其中 a_i , b_i 和 c_i 分别为第 i 台机组的燃料成本系数, $P_{Gi}(t)$ 为第 i 台发电机在 t 时段的有功出力; k_{CO_2} , k_{NO_x} 和 k_{SO_2} 分别表示二氧化碳排放系数、氮氧化物排放系数以及二氧化硫排放系数, 单位为万元/MW。

1) 等式约束条件。

$$[\underline{P}_i^w(t), \bar{P}_i^w(t)] + \sum_{i \in \Omega_G} P_{Gi}(t) - P_i^{\text{ch}}(t) + P_i^{\text{dis}}(t) =$$

$$P_i^l(t) + \sum_{i,j \in \Omega_{\text{Line}}} P_{ij}(t), \quad (4)$$

$$P_{ij}(t) = B_{ij}(\theta_i(t) - \theta_j(t)), \quad (5)$$

式中: $\underline{P}_i^w(t)$ 和 $\bar{P}_i^w(t)$ 分别为节点 i 处的风电场在 t 时段的下限出力和上限出力; $P_i^{\text{ch}}(t)$ 和 $P_i^{\text{dis}}(t)$ 分别为第 i 个储能装置在 t 时刻的充电和放电功率; $P_i^l(t)$ 为节点 i 在 t 时刻的负荷有功功率; Ω_{Line} 为系统中所有输电线路的集合; $P_{ij}(t)$ 为 t 时段母线 i, j 之间的线路传输功率; B_{ij} 表示系统的电纳参数, 其值为节点导纳矩阵中第 i 行、第 j 列元素的虚部; $\theta_i(t)$ 和 $\theta_j(t)$ 分别为节点 i 和节点 j 在 t 时段内的电压相角。

2) 不等式约束条件。

不等式约束包含发电机组的出力极限约束、爬坡速率约束、线路潮流约束以及节点电压的相角约束。

a) 发电机组出力的上、下限约束。

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi}(t) \leq P_{Gi}^{\max}, \quad (6)$$

式中: $P_{Gi}^{\min}$ 和 $P_{Gi}^{\max}$ 分别为第 i 台机组的最小和最大出力。

b) 发电机组爬坡速率约束。

$$P_{Gi}(t) - P_{Gi}(t-1) \leq P_{Gi}^{\text{RU}}, \quad (7)$$

$$P_{Gi}(t-1) - P_{Gi}(t) \leq P_{Gi}^{\text{RD}}, \quad (8)$$

式中 P_{Gi}^{RU} 和 P_{Gi}^{RD} 分别为第 i 台机组的最大爬坡速率和最大滑坡速率。

c) 输电线路潮流约束。

$$-P_{ij}^{\max} \leq P_{ij}(t) \leq P_{ij}^{\max}, \quad (9)$$

式中 $P_{ij}^{\max}$ 为输电线路 ij 之间的最大传输功率。

d) 电压相角约束。

$$-\pi \leq \theta_i(t) \leq \pi. \quad (10)$$

任意 t 时段内平衡节点的相角始终为0, 即 $\theta_{(\text{slack})t} = 0$ 。其中 $\theta_{(\text{slack})t}$ 表示的是系统平衡节点的电压相角。

2.2 风电预测场景下的无功优化模型

无功优化是指在电网中发电机组的有功出力和负荷在已知的前提下, 考虑单一调度时段或某一时间断面电网的无功资源分配和电压控制, 通过调节相关控制变量如发电机的机端电压, 从而保证电网稳态运行的电压质量最高。储能装置接入电网中会改变系统潮流, 对系统电压质量直接产生影响, 以电压质量为安全技术指标的目标函数 f_2 可表示为

$$\min f_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \left(\frac{U_i(t) - U_N}{U_N} \right)^2, \quad (11)$$

式中: n 为系统节点总数; $U_i(t)$ 为第 i 个节点在 t 时刻的电压值; U_N 为母线处的额定电压。

1) 等式约束条件。

a) 系统实时功率平衡方程。

功率平衡是维持电网安全稳定运行的前提, 电网的发电和用电功率必须时刻保持平衡。一旦电网的功率失去平衡, 便直接影响系统的电能质量, 因此需设立系统的实时功率平衡方程, 即有

$$P_i^{\text{pre-w}}(t) + \sum_{i \in \Omega_G} P_{Gi}(t) - P_i^{\text{ch}}(t) + P_i^{\text{dis}}(t) =$$

$$P_i^l(t) + \sum_{i,j \in \Omega_{\text{Line}}} P_{ij}(t), \quad (12)$$

$$Q_i^w(t) + \sum_{i \in \Omega_G} Q_{Gi}(t) = Q_i^l(t) + \sum_{i,j \in \Omega_{\text{Line}}} Q_{ij}(t), \quad (13)$$

式中: $P_i^{\text{pre-w}}(t)$ 为节点 i 处的风电场在 t 时刻的预测出力; $Q_{Gi}(t)$ 为第 i 台发电机组的无功出力; $Q_i^w(t)$ 为节点 i 处的风电场在 t 时段的无功出力; $Q_i^l(t)$ 为节点 i 在 t 时刻的负荷无功功率; $Q_{ij}(t)$ 为 t 时段线路 ij 之间的无功损耗。

b) 潮流方程等式约束。

$$P_{Gi}(t) + P_i^{\text{pre-w}}(t) - P_i^l(t) = U_i(t) \sum_{j=1}^n U_j(t) (G_{ij} \cos \theta_{ij}(t) + B_{ij} \sin \theta_{ij}(t)), \quad (14)$$

$$Q_{Gi}(t) + Q_i^w(t) - Q_i^l(t) =$$

$$U_i(t) \sum_{j=1}^n U_j(t) (G_{ij} \sin \theta_{ij}(t) - B_{ij} \cos \theta_{ij}(t)), \quad (15)$$

式中: G_{ij} 为系统的电导参数, 其值为节点导纳矩阵中第 i 行、第 j 列元素的实部; $\theta_{ij}(t)$ 表示传输线路 ij 之间的节点电压相角差, 即 $\theta_{ij}(t) = \theta_i(t) - \theta_j(t)$.

2) 不等式约束.

无功优化模型中不等式的约束条件包含发电机组的无功出力约束和电压幅值上下限约束.

a) 发电机组的无功出力约束.

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi}(t) \leq Q_{Gi}^{\max}, \quad (16)$$

式中 $Q_{Gi}^{\min}$ 和 $Q_{Gi}^{\max}$ 分别为第 i 台机组无功出力的下限和上限.

b) 节点电压幅值的约束.

$$U_{\min} \leq U_i(t) \leq U_{\max}, \quad (17)$$

式中 $U_{\min}$ 和 $U_{\max}$ 分别为节点电压幅值的下限和上限.

2.3 储能系统模型

储能系统在 t 时刻的容量取决于前一时刻的剩余能量以及每个时刻的充电或者放电功率^[17]. 本文在研究 ESS 参与电网运行调度时忽略能量衰减, 利用荷电状态(state of charge, SOC)表征储能装置的剩余电量情况, 其模型可表示为

$$\begin{aligned} \text{SOC}_i^{\text{ess}}(t+1) = & \text{SOC}_i^{\text{ess}}(t) + \\ & \frac{(P_i^{\text{ch}}(t) \cdot \eta_{\text{ch}} \cdot I_i^{\text{ch}}(t) - P_i^{\text{dis}}(t) \cdot \eta_{\text{dis}} \cdot I_i^{\text{dis}}(t))}{E_n^{\text{ess}}} \Delta t, \end{aligned} \quad (18)$$

式中: $\text{SOC}_i^{\text{ess}}(t)$ 为第 i 个储能装置在 t 时刻的荷电状态; E_n^{ess} 表示接入系统的储能装置的额定容量; η_{ch} , η_{dis} 分别为储能系统的充、放电效率; Δt 为时间间隔; $I_i^{\text{ch}}(t)$ 和 $I_i^{\text{dis}}(t)$ 分别表示在 t 时刻第 i 个储能系统的充电和放电标志, 当 $I_i^{\text{ch}}(t)$ 为 1 时, 代表该储能系统在 t 时刻进行充电, 当 $I_i^{\text{ch}}(t)$ 为 0 时, 代表该储能系统在 t 时刻不进行充电; 当 $I_i^{\text{dis}}(t)$ 为 1 时, 代表储能系统在 t 时刻进行放电, 当 $I_i^{\text{dis}}(t)$ 为 0 时, 代表储能系统在 t 时刻不进行放电.

由于储能装置不会在同一时刻均处于充电和放电状态, 因此储能系统的充、放电状态需要满足如下要求:

$$\begin{cases} I_i^{\text{ch}}(t) + I_i^{\text{dis}}(t) \leq 1, \\ I_i^{\text{ch}}(t), I_i^{\text{dis}}(t) \in (0, 1). \end{cases} \quad (19)$$

ESS 在运行过程中的功率和容量需要满足如下约束:

a) 储能系统充、放电功率的限制.

$$P_{i,\min}^{\text{ch}} \leq P_i^{\text{ch}}(t) \leq P_{i,\max}^{\text{ch}}, \quad (20)$$

$$P_{i,\min}^{\text{dis}} \leq P_i^{\text{dis}}(t) \leq P_{i,\max}^{\text{dis}}, \quad (21)$$

式中: $P_{i,\min}^{\text{ch}}$, $P_{i,\max}^{\text{ch}}$ 分别表示为第 i 个 ESS 的充电功率的最小值和最大值; $P_{i,\min}^{\text{dis}}$, $P_{i,\max}^{\text{dis}}$ 分别表示为第 i 个 ESS 的放电功率的最小值和最大值.

b) 储能系统的荷电状态约束.

$$\text{SOC}_{i,\min}^{\text{ess}} \leq \text{SOC}_i^{\text{ess}}(t) \leq \text{SOC}_{i,\max}^{\text{ess}}, \quad (22)$$

式中 $\text{SOC}_{i,\min}^{\text{ess}}$ 和 $\text{SOC}_{i,\max}^{\text{ess}}$ 分别为第 i 个 ESS 的荷电状态的下限和上限.

此外, 为保证储能装置在新的调度周期内具有持续工作能力, 需使 ESS 在调度始与调度末的 SOC 保持一致, 故优化过程中还应满足约束:

$$\text{SOC}_i^{\text{ess}}(t_{\text{initial}}) = \text{SOC}_i^{\text{ess}}(t_{\text{end}}), \quad (23)$$

式中 $\text{SOC}_i^{\text{ess}}(t_{\text{initial}})$ 和 $\text{SOC}_i^{\text{ess}}(t_{\text{end}})$ 分别表示储能系统在调度始和调度末的荷电状态.

3 基于改进均衡协调的协同博弈多目标优化算法

在博弈时各博弈方是完全理性的, 以最优化各自利益为目标, 通过集体完全理性的竞争与协商来确定策略集合^[18-19], 得到的结果对于各博弈方来说不一定最优, 但一定是可以满足自身利益需求的均衡最优解.

3.1 完全信息静态多目标博弈模型及定义

多目标博弈问题是指博弈系统中对多个局中人关于多个支付函数进行优化的博弈问题.

设 $G = (N, S, U)$ 为多目标博弈系统, 其中 N 为局中人集合, 有 $N = \{1, 2, \dots, n\}$; S_i 为局中人 i 的策略集, 并且 $S = \prod_{i=1}^n S_i$; $U^i = \{u_1^i, u_2^i, \dots, u_k^i\}$ 为局中人 i 的向量支付目标函数, n 个局中人的支付组合为 $U = (U^1, U^2, \dots, U^n)$.

若将 K 个支付目标函数分为 K 个优先级别, 则局中人 i 的第 k 个支付函数 $u_k^i(s)$ 的优先级便为 k , 并且对于每个支付函数 $u_k^i(s)$ 分别具有不同的属性^[20].

下面建立完全信息下静态多目标博弈问题的系统全局决策模型和第 i 个局中人的决策模型.

1) 博弈系统的多目标全局决策模型(P^0).

对于(P^0), 求 $s \in S$, 使得

$$\min z^0 = \left\{ \sum_{i=1}^n \eta_1^i, \sum_{i=1}^n \eta_2^i, \dots, \sum_{i=1}^n \eta_K^i \right\},$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} u_k^i(s) + \eta_k^i - \sigma_k^i = b_k^i, \\ \eta_k^i, \sigma_k^i \geq 0; \eta_k^i \cdot \sigma_k^i = 0; \\ s \geq 0; i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, K. \end{cases}$$

(24)

记模型(P^0)的最优解集(即达成向量)为 $Z(P^0)$ ^[20], 其中 $\eta_k^i, \sigma_k^i (k = 1, 2, \dots, K)$ 分别为博弈系统中第 i 个局中人第 k 个向量支付函数的正、负偏移

量; b_k^i 为支付函数 $u_k^i(s)$ 的期望值. 利用模型 (P^0) 求解 s 以便于各博弈方的均衡协调.

2) 第 i ($i = 1, 2, \dots, n$) 个局中人的多目标决策模型 (P^i) .

对于 (P^i) , 求 $s \in S_i$, 使得

$$\begin{aligned} \min \quad & z^i = \{\eta_1^i, \eta_2^i, \dots, \eta_K^i\}, \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} u_k^i(s) + \eta_k^i - \sigma_k^i = b_k^i; \\ \eta_k^i, \sigma_k^i \geq 0; \eta_k^i \cdot \sigma_k^i = 0, \\ s \geq 0; k = 1, 2, \dots, K. \end{cases} \end{aligned} \quad (25)$$

本文利用模型 (P^i) 求解 s 时, 将多目标模型转化为单目标优化, 并且对各自优化结果不起作用的约束条件进行固定得到各博弈方, 进而寻求各方的决策结果.

3) 博弈系统模型均衡协调意义下各局中人目标函数最优值的存在性.

定理 1 若 $S = \prod_{i=1}^n S_i$ 为有界闭集, $u_1^i(s)$ 是 S 上的连续函数, $H_1^i = \max_{s \in S_i} u_1^i(s)$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 则模型

$$\begin{aligned} b_1^i(1) = \max b, \\ \text{s.t.} \quad \begin{cases} u_1^i(s) \geq b, \\ u_1^j(s) \geq b \cdot \frac{H_1^j}{H_1^i}, \\ s \in S, \\ j \in \{1, 2, \dots, n\} \setminus \{i\} \end{cases} \end{aligned} \quad (26)$$

存在最优解.

证 求解 b 的最大值, 令 $b_1^i(1) = \max b$, 为使得既满足 $b \leq \frac{H_1^i}{H_1^j} \cdot u_1^j(s)$, 又满足 $b \leq u_1^i(s)$, 只需要证明 $b_1^i(1)$ 小于或等于 $\{\frac{H_1^i}{H_1^j} \cdot u_1^j(s), u_1^i(s)\}$ 的最小值即可, 则模型(26)解的存在性问题可转化为以下求极值问题:

$$\max b = \max_{s \in S} \min_j \{u_1^i(s), \frac{H_1^i}{H_1^j} \cdot u_1^j(s)\}. \quad (27)$$

设 $U_1^j(s) = \min_j \{u_1^i(s), \frac{H_1^i}{H_1^j} \cdot u_1^j(s)\}$, 则根据文献[19]中的引理, 可以得知 $u_1^i(s)$ 若为 S 上的连续函数, $U_1^j(s)$ 在有界闭集 S 上为连续函数, 故 $U_1^j(s)$ 在闭集 S 上存在最大值, 即模型(26)存在最优解. 证毕.

以上是局中人 i 在第 1 优先级下取得最优解的证明过程, 根据文献[20]可知, 上述结论适用于任意局中人 i 在任意优先级 k 下取得最优解的情况. 另外, 由于篇幅所限, 本文模型最优解的唯一性证明方法见文献[21].

基本均衡协调算法在求解多目标问题时, 通过各博弈方按照优先级来调整 b_k^i , 进而判断博弈系统模型 (P^0) 和个体决策模型 (P^i) 是否达到均衡, 但基本均衡协调算法在求解过程中存在以下问题: 1) 目标函数在数量级上的巨大差异使得博弈系统易陷入局部解; 2) 按优先级博弈优化导致迭代时间长, 计算量过大. 针对以上问题, 本文对按优先级博弈优化的均衡协调多目标算法进行改进.

3.2 改进的均衡协调算法

为避免陷入局部解, 本文对各优化目标进行归一化处理. 此外, 借鉴协同优化算法的思想, 在博弈策略上提出所有博弈方并行寻优, 相对于按优先级进行均衡协调, 可以大大提高博弈效率, 并且节省计算时间.

1) 改进的均衡协调算法思想.

在进行博弈优化前, 首先对每个局中人进行归一化处理; 然后结合本文所提的多目标区间储能经济调度优化模型, 将有功经济调度和无功优化模型分为两个博弈方, 分别使二者根据各自拥有的资源进行均衡协调优化, 利用有功区间经济调度对风电出力的不确定性进行处理, 然后将所得的发电机组和储能的出力作为无功优化模型的状态变量, 通过控制发电机组的机端电压进而优化系统的电压偏差 f_2 , 并把无功优化所得的机组机端电压作为考虑交流潮流的有功经济调度的状态变量以优化系统的综合运行成本 f_1 , 此时获得第一次的迭代解; 再次按照考虑交流潮流的有功-无功储能调度协同迭代的方法进行优化可以得到第二次的优化结果 f_1' 和 f_2' ; 最后, 计算前后两次迭代结果的差值之和 $\Delta = |f_1 - f_1'| + |f_2 - f_2'|$, 若差值之和小于预设精度值 ε , 则迭代结束.

综合考虑系统储能调度运行的经济性和安全性, 本文基于以上的改进均衡协调算法的多目标优化模型可描述为

$$\begin{aligned} \min \quad & z^0 = \eta_1 + \eta_2, \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \frac{f_1(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{y}) - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} + \eta_1 - \sigma_1 = 0, \\ \frac{f_2(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{y}) - f_2^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} + \eta_2 - \sigma_2 = 0, \\ h(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{y}) = 0, \\ g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{y}) \geq 0, \\ \eta_k, \sigma_k \geq 0; \eta_k \cdot \sigma_k = 0, \\ k = 1, 2, \end{cases} \end{aligned} \quad (28)$$

式中: η_1, σ_1 分别表示目标函数 f_1 的正、负偏移量; η_2, σ_2 分别表示目标函数 f_2 的正、负偏移量; $f_1^{\min}, f_1^{\max}$ 分别为目标函数 f_1 的最小值和最大值; $f_2^{\min}$ 和 $f_2^{\max}$ 分别为目标函数 f_2 的最小值和最大值; $h(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{y})$ 为系统的等式约束方程; $g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{y})$ 为其他

不等式约束条件; $\mathbf{x}$ 为有功优化变量; $\mathbf{u}$ 为无功优化变量; $\mathbf{y}$ 为其余变量.

2) 改进的均衡协调算法步骤.

本文采用基于协同博弈优化的改进均衡协调算法求解多目标区间储能经济调度优化模型的具体流程如图2所示.

本文改进算法的步骤可描述为如下:

步骤1 输入区间优化模型的数据, 设置算法迭代精度 ε 和最大迭代次数 $k_{\max}$;

步骤2 分别计算博弈系统中每个局中人的支付目标函数 f_1 与 f_2 的最小值和最大值, 对其进行数据归一化处理, 并置 $k = 0$;

步骤3 采用考虑直流潮流的有功区间调度模型对风电出力进行不确定性处理, 获得发电机组和储能装置的有功出力;

步骤4 将所得的各发电机和储能装置的有功功率作为无功优化调度的输入参数, 计算电压偏差 f_2 ;

步骤5 将无功调度获得发电机的机端电压作为考虑交流潮流的有功调度的输入参数, 计算系统的综合运行成本 f_1 ;

步骤6 将步骤5获得的机组和储能装置的有功出力再次作为无功优化的输入参数, 优化系统的电压偏差 f_2 ;

步骤7 将步骤6获得的发电机的机端电压再次作为有功调度的输入参数, 计算系统的综合运行成本 f_1 ;

步骤8 分别计算步骤4和步骤6的电压偏差之差, 即 $|f_2 - f_2'|$, 计算步骤5和步骤7的系统综合运行成本之差, 即 $|f_1 - f_1'|$;

步骤9 计算 $\Delta = |f_1 - f_1'| + |f_2 - f_2'|$, 当差值 Δ 之和满足所设精度值 ε 或循环达到最大迭代次数 $k_{\max}$, 便结束循环, 否则需要跳转至步骤4继续执行迭代过程.

4 算例分析

为了验证本文所提方法的可行性, 本文以修改后的IEEE RTS-24节点测试系统^[22]进行算例分析, 系统结构如图3所示. 在系统中加入风电机组(wind turbine generator, WTG)和储能设备, 此系统的拓扑结构中包含24个节点, 12台发电机, 3个风电场以及2个储能装置, 在节点8, 19和21接入风电机组, 其控制模式为恒功率因数控制^[23], 设功率因数为 $\cos \varphi = 0.95$; 电池储能系统位于节点19和节点21.

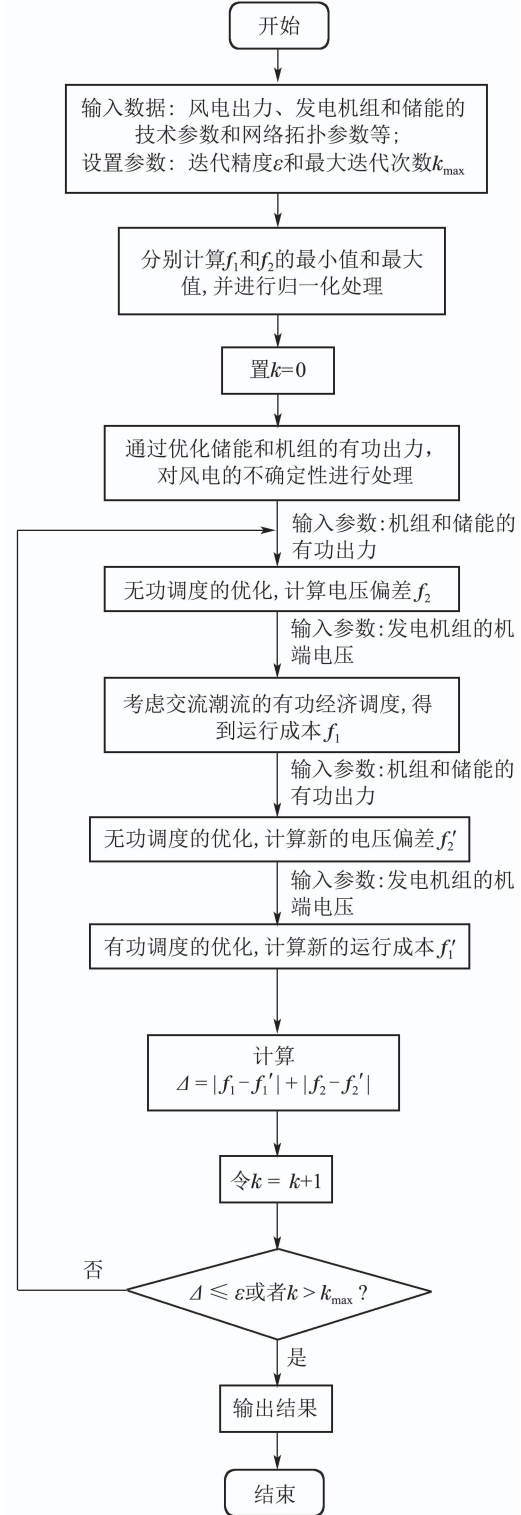


图2 基于协同博弈优化的改进均衡协调算法流程
Fig. 2 Flow chart of improved equilibrium coordination algorithm based on collaborative game optimization

本文储能系统的具体技术参数如表1所示^[24]. 在本文中将调度运行周期设置为24 h, 每个时段为1 h, 并通过MATLAB 调用GAMS软件对此算例进行求解. 设系统各负荷节点的电压幅值标幺值波动范围为0.95~1.05 p.u., 发电机节点电压幅值标幺值范围为0.9~1.1 p.u..

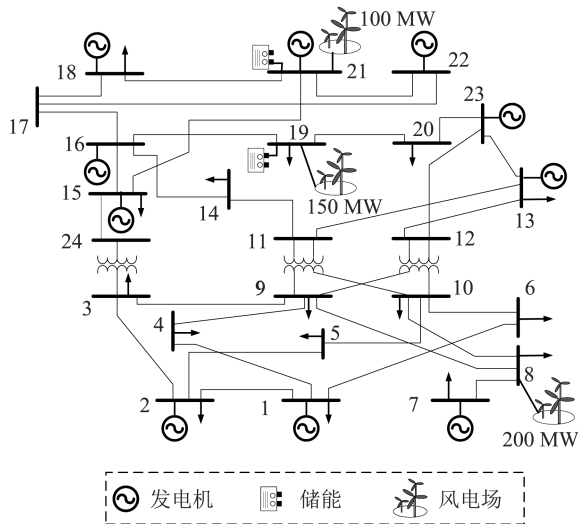


图 3 IEEE RTS-24 系统
Fig. 3 IEEE RTS-24 System

表 1 电池储能的技术参数

Table 1 Technical parameters of battery energy storage

参数	值/范围	参数	值/范围
额定容量/MW	200	充电效率	0.95
额定功率/MW	40	荷电状态	[0, 1]
放电效率	0.95	调度始末的SOC	0.2

发电机的具体参数如表2所示. 该可靠性测试系统峰值负荷为2850 MW, 风电和负荷的预测曲线见附录的图A.

表 2 发电机技术参数

Table 2 Technical parameters of generators

机组 编号	节点 编号	最大出 力/MW	最小出 力/MW	爬坡率/ MW·h ⁻¹
1	1	152	30.4	14
2	2	152	30.4	14
3	7	350	75	49
4	13	591	206.85	21
5	15	60	12	7
6	15	155	54.25	21
7	16	155	54.25	21
8	18	400	100	47
9	21	400	100	47
10	22	300	100	35
11	23	310	108.5	21
12	23	350	140	28

本文在进行多目标均衡协调时, 为消除各目标函数在数量级上的差异对优化结果的影响, 需要对目标函数进行归一化处理. 归一化的表达式为

$$f_i = \frac{f_i - f_i^{\min}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}},$$

其中 $f_i^{\max}$, $f_i^{\min}$ 分别为目标函数 f_i 的最大值和最小值.

首先确定系统综合运行成本以及电压偏差理论上的最大和最小值, 因此分别以系统综合运行成本和电压偏差为目标进行优化求解, 求解结果如表3所示.

表 3 各目标函数的最小值和最大值

Table 3 Minimum and maximum values of each objective function

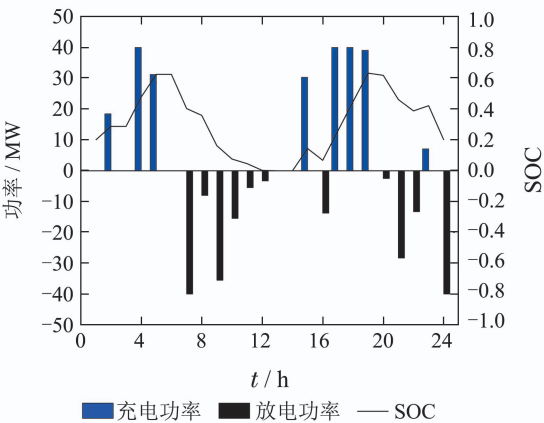
目标	综合运行成本/万元	电压偏差/p.u.
最小值	34.9602	0.0776
最大值	113.2426	0.5574

本文在GAMS中建立以系统综合运行成本和电压偏差均为最小的多目标优化模型, 首先利用考虑直流潮流的有功区间经济调度对风电的区间出力进行处理, 得到发电机组和储能装置的有功出力, 然后再根据考虑交流潮流的有功-无功储能调度综合优化对系统的综合运行成本和电压偏差进行博弈, 直至两个博弈方获得各自的均衡最优解.

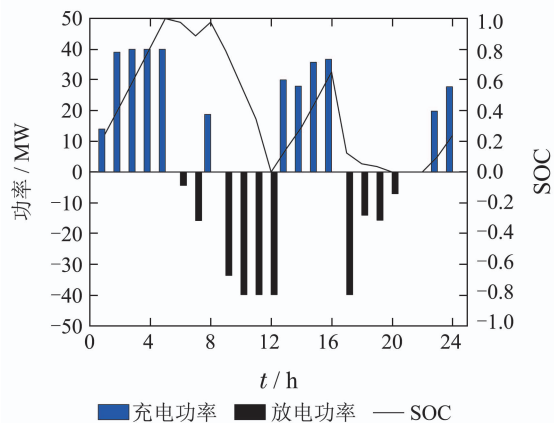
图4给出了当风电的区间出力波动为±20%时, 经过改进均衡协调后两个储能装置的充放电功率以及荷电状态曲线变化情况. 从图4(a)和4(b)可以看出, 两个储能装置主要集中在凌晨时段和下午时段(0:00~6:00 和 13:00~16:00) 进行充电, 在上午和晚上时段(9:00~12:00和18:00~22:00)进行放电, 通过优化后两个储能的荷电状态均在调度末又恢复至调度开始时刻的SOC水平, 从而保证了储能装置的可持续运行.

图5给出了当风电出力波动为±20%时, 改进均衡前与改进均衡后系统的负荷节点电压波动情况. 从图中可以比较看出, 改进均衡前的电压波动幅度比较大, 使得电网的供电安全性较差, 而改进均衡后的电压波动较小, 明显提高了电网的电压质量水平.

表4给出了在不同的风电出力区间下系统经过改进均衡协调后两个博弈方(安全方和经济方)的均衡最优解情况.



(a) 19号节点上储能充放电以及SOC变化曲线



(b) 21号节点上储能充放电以及SOC变化曲线

图 4 储能的充放电情况与SOC变化曲线

Fig. 4 Charge and discharge of energy storage and SOC curve

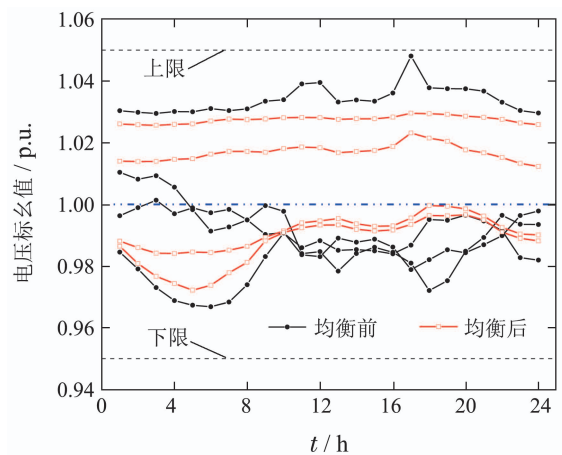


图 5 改进均衡协调前与改进后的节点电压波动情况

Fig. 5 Node voltage fluctuation before and after improved equalization coordination

表 4 不同风电出力区间下的均衡最优解结果对比

Table 4 Comparison of the results of equilibrium optimal solutions in different wind power output intervals

风电波动范围	有功调度(经济方)	无功优化(安全方)
	综合运行成本/万元	电压偏差/p.u.
± 10%	86.2324	0.1037
± 20%	86.0813	0.1040
± 30%	85.7244	0.1045
± 40%	85.5129	0.1050
± 50%	85.5001	0.1051
± 60%	85.1730	0.1054

根据表4中数据分析可以看出,在不同的风电区间出力下,系统经过均衡协调迭代的结果有所不同,并且随着风电出力区间的变大,系统的经济指标有所减小,这是由于在考虑直流潮流的区间调度模型中通过储能的充放电特性对风电出力的波动性进行了平抑,促进了系统对风电的消纳能力,使得风电的输出功率

变得具有可控性,从而降低了系统的综合运行成本;对于系统的安全指标而言,随着风电出力波动范围的变大,电压偏差也随之变大,这是由风电出力的波动性引起.另外,从表中数据还可以比较出,系统的综合运行成本的变化幅度较大,而电压偏差的变化幅度较小,这是因为两个博弈方所拥有的资源各不相同,即影响二者结果的控制变量不同.由于影响系统的电压偏差的控制变量只有发电机的机端电压,而影响系统综合运行成本的控制变量包括发电机组的有功出力 and 储能系统的充放电功率,故经济方和安全方在进行博弈协调时,二者在空间解的寻优范围均不相同,并且经济方的寻优范围大于安全方的寻优解范围,因此,经济方的解集变化程度大于安全方的变化程度.

为了分析不同的风电场容量下对系统的经济性和安全性的影响,本文把系统中的所有风电场均设置为相同的接入容量,并且接入系统19和21号节点的储能容量始终保持不变.表5给出了在不同的风电场容量下系统经过改进均衡协调后两个博弈方的均衡最优解情况.

表 5 不同风电场容量下的均衡最优解结果对比

Table 5 Comparison of results of optimal equilibrium solutions under different wind farm capacities

风电场容量/MW	有功调度(经济方)	无功优化(安全方)
	综合运行成本/万元	电压偏差/p.u.
50	90.4299	0.1134
100	89.6350	0.1095
200	86.0813	0.1040
300	82.7040	0.1018
400	78.7151	0.0998

将表5中的数据结果进行对比,可以看出考虑接入不同容量的风电场会对系统的综合运行成本和电压偏差均有所影响.随着风电场并网容量的增加,系统的综合运行成本和节点电压偏差均有所减小,这说明风电场入网容量的增加会提升系统的经济运行,并可以改善系统的供电质量.

对于所建的区间经济调度模型,本文将改进后的均衡协调优化算法与利用文献[25]中所提的理想点法获得的结果进行对比分析.理想点法是一种处理多目标优化的有效方法,其基本思想是:首先分别求出各个子目标的最优函数值(即为理想点),然后让各个子目标尽可能地接近各自的理想点,以获取多目标优化问题的最优解^[25].利用带权重系数的评价函数来组合本文的调度子目标: $\min f = [f_1, f_2] = \sum_{i=1}^2 \omega_i \cdot f_i$, 其中 ω_i 为加权系数,体现了调度模型对各个优化目标的重视程度,且 $\sum_{i=1}^2 \omega_i = 1$.

图6给出了风电出力波动为±20%时,改进后均衡

协调算法的最优解和采用带权重因子的理想点法获得的Pareto最优前沿解集的分布情况. 从图6中可以看出, 采用理想点法计算时, 通过灵活设置权重系数的方法获得的区间储能经济调度模型的Pareto前沿最优解集面分布相对均匀. 显然, 点 $(f_1^{\min}, f_2^{\min})$ 是绝对意义上的最优解, 但理论上是无法获得, 称这一点为理想点, 即对应图中的点 $(0, 0)$, 因此需要寻求Pareto前沿面中最优的折衷方案, 可寻求欧氏距离: $\sqrt{f_1^2 + f_2^2}$ 最小的点, 该点为理想点法的最优Pareto解, 即图中的黑色实心圆圈所在的位置, 此时系统的综合运行成本为97.8238万元, 电压偏差为0.1779 p.u. 利用改进后的均衡协调算法得到的最优解为图6中红色三角形所标注的位置. 因此, 在经济方和安全方进行资源的竞争和协同博弈优化过程中, 考虑二者的竞争实力不相同, 经济方占有的资源较多, 处于“强势”地位, 安全方必须进行自身调整来使双方利益达到均衡, 从而才能获得满足自身资源需求的均衡解, 即Nash均衡解, 故优化后的系统综合运行成本为86.0813万元, 电压偏差为0.1040 p.u.

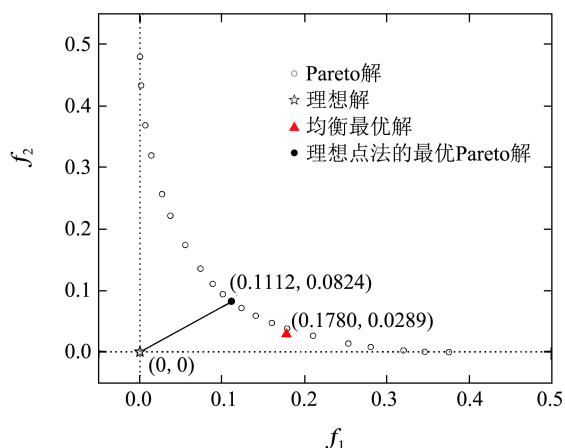


图6 带权重系数的理想点法与改进均衡协调获得的最优解对比

Fig. 6 Comparison of optimal solution obtained by ideal point method with weight coefficient and improved equilibrium coordination

通过对比发现, 改进后的均衡协调方法获得的最优均衡解比采用带权重系数的理想点法获得的最优解能更好地兼顾系统的经济性和安全性, 能使各博弈方均满足各自的利益需求, 避免了理想点法确定权重因子的主观性.

5 结论

本文考虑风电出力的不确定性, 以风电的预测值为基础按固定比例缩放进而产生风电的区间出力. 本文将博弈优化理论应用于电网的区间经济调度中, 充分考虑储能灵活充放电的运行优势, 以系统的综合运行成本和电压偏差最小化为优化目标, 建立了计及风

电和储能接入电网的多目标区间经济调度模型. 在优化过程中, 首先, 通过考虑直流潮流的有功区间经济调度对风电的区间出力进行处理, 然后利用考虑交流潮流的有功-无功储能调度综合优化, 采用改进的均衡协调算法对系统经济方和安全方二者的资源进行均衡协调, 从而寻求兼顾电网调度运行经济性和安全性的均衡最优解. 在算例中, 本文还探讨了不同的风电区间出力以及不同风电场并网容量下对系统的储能调度经济运行和安全运行的综合影响; 最后, 将本文算法获得的均衡最优解与采用带权重系数的理想点法获取的Pareto最优前沿解集进行了对比分析, 验证了本文所提算法和模型的有效性和优越性.

参考文献:

- [1] MA Zhao, ZHOU Xiaoxin, SHANG Yuwei, et al. Form and development trend of future distribution system. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(6): 1289 – 1298.
(马钊, 周孝信, 尚宇炜, 等. 未来配电系统形态及发展趋势. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1289 – 1298.)
- [2] ZHONG Qing, YU Nanhua, SUN Wen, et al. Distribution generation programming and economical analysis of active distribution network. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2014, 26(11): 82 – 86.
(钟清, 余南华, 孙闻, 等. 主动配电网分布式电源规划及经济性分析. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(11): 82 – 86.)
- [3] LI Q, CHOI S S, YUAN Y, et al. On the determination of battery energy storage capacity and short-term power dispatch of a wind farm. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2010, 2(2): 148 – 158.
- [4] GUO Li, XUE Guiyuan, WU Chen, et al. Research on economic evaluation of energy storage applied to load shift. *Power Demand Side Management*, 2019, 21(5): 31 – 34.
(郭莉, 薛贵元, 吴晨, 等. 储能系统应用于削峰填谷的经济效益分析研究. 电力需求侧管理, 2019, 21(5): 31 – 34.)
- [5] LI Junqing, LI Qiujia. Wind power prediction method based on Kriging and LSTM network. *Acta Energetica Sinica*, 2020, 41(11): 241 – 247.
(李俊卿, 李秋佳. 基于Kriging和长短期记忆网络的风电功率预测方法. 太阳能学报, 2020, 41(11): 241 – 247.)
- [6] JIANG Guimin, CHEN Zhijun, LI Xiaozhu, et al. Short-term prediction of wind power based on EEMD-ACS-LSSVM. *Acta Energetica Sinica*, 2020, 41(5): 77 – 84.
(姜贵敏, 陈志军, 李笑竹, 等. 基于EEMD-ACS-LSSVM的短期风电功率预测. 太阳能学报, 2020, 41(5): 77 – 84.)
- [7] YAN Gangui, LIU Jia, CUI Yang, et al. Economic evaluation on improving wind power scheduling scale by using energy storage systems. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(22): 45 – 52.
(严干贵, 刘嘉, 崔杨, 等. 利用储能提高风电调度入网规模的经济性评价. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 45 – 52.)
- [8] LIU Hong, XU Zhengyang, GE Shaoyun, et al. Coordinated operation of active-reactive power and voltage control for active distribution network considering regulation of energy storage. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(11): 51 – 58.
(刘洪, 徐正阳, 葛少云, 等. 考虑储能调节的主动配电网有功-无功协调运行与电压控制. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 51 – 58.)
- [9] JU Liwei, YU Chao, TAN Zhongfu. A two-stage scheduling optimization model and corresponding solving algorithm for power grid containing wind farm and energy storage system considering demand response. *Power System Technology*, 2015, 39(5): 1287 – 1293.
(鞠立伟, 于超, 谭忠富. 计及需求响应的风电储能两阶段调度优化模型及求解算法. 电网技术, 2015, 39(5): 1287 – 1293.)

- [10] WU Xiong, WANG Xiuli, LI Jun, et al. A joint operation model and solution for hybrid wind energy storage systems. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(13): 10 – 17.
(吴雄, 王秀丽, 李俊, 等. 风电储能混合系统的联合调度模型及求解. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 10 – 17.)
- [11] FU Yang, LIAO Jianbo, LI Zhenkun, et al. Day-ahead optimal scheduling and operating of active distribution network considering violation risk. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(21): 6328 – 6338.
(符杨, 廖剑波, 李振坤, 等. 考虑越限风险的主动配电网日前优化调度及运行. 中国电机工程学报, 2017, 37(21): 6328 – 6338.)
- [12] YANG Yuanyuan, YANG Jingyan, XIA Tian, et al. Multi-objective dynamic economic dispatch in wind power integrated system based on an improved differential evolution algorithm. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(23): 24 – 29, 35.
(杨媛媛, 杨京燕, 夏天, 等. 基于改进差分进化算法的风电并网系统多目标动态经济调度. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 24 – 29, 35.)
- [13] CHEN Houhe, LIU Lina, JIANG Tao, et al. Optimal economic configuration of distributed energy storage systems for improving voltage quality in distribution network. *Power System Technology*, 2018, 42(7): 2127 – 2135.
(陈厚合, 刘丽娜, 姜涛, 等. 提升配电网电压质量的分布式储能经济优化配置方法. 电网技术, 2018, 42(7): 2127 – 2135.)
- [14] WANG Caixia, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. Short-term wind power forecast based on non-parametric regression model. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(16): 78 – 82, 91.
(王彩霞, 鲁宗相, 乔颖, 等. 基于非参数回归模型的短期风电功率预测. 电力系统自动化, 2010, 34(16): 78 – 82, 91.)
- [15] YE Rong, CHEN Haoyong, WANG Gang, et al. A mixed integer programming method for security-constrained unit commitment with multiple wind farms. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(5): 29 – 33, 65.
(叶荣, 陈皓勇, 王钢, 等. 多风电场并网时安全约束机组组合的混合整数规划解法. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 29 – 33, 65.)
- [16] ZOU Yujie, TANG Zhong, YAN Wu, et al. Joint economic dispatch of multi-type energy storage system based on wind power consumption. *Water Resources and Power*, 2019, 37(4): 202 – 206, 175.
(邹钰洁, 唐忠, 晏武, 等. 基于风电消纳的多类型储能系统联合经济调度. 水电能源科学, 2019, 37(4): 202 – 206, 175.)
- [17] TANT J, GETH F, SIX D, et al. Multiobjective battery storage to improve PV integration in residential distribution grids. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2013, 4(1): 182 – 191.
- [18] WU Lilan. *The leader-follower game theory strategy and multi-objective operation optimization of the integrated energy systems*. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
(吴利兰. 综合能源系统的主从复合博弈策略及多目标运行优化方法的研究. 广州: 华南理工大学, 2018.)
- [19] ZHANG Mingye, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. A cooperative game theory based multi-objective reactive voltage optimization model and its solution. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(18): 116 – 121, 133.
(张明晔, 郭庆来, 孙宏斌, 等. 基于合作博弈的多目标无功电压优化模型及其解法. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 116 – 121, 133.)
- [20] YU Yang. *The study on algorithm of multi-objective game equilibrium solution*. Jilin: Northeast Electric Power University, 2016.
(于洋. 多目标博弈均衡解的算法研究. 吉林: 东北电力大学, 2016.)
- [21] ZHANG Jie, LI Han, HU Ding. Existence of equilibrium solutions of complete information multi-objective game. *Journal of Jilin University (Science Edition)*, 2014, 52(1): 1 – 6.

(张杰, 李晗, 胡鼎. 完全信息多目标博弈均衡解的存在性. 吉林大学学报(理学版), 2014, 52(1): 1 – 6.)

- [22] SUBCOMMITTEE P M. IEEE reliability test system. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1979, (6): 2047 – 2054.
- [23] ZENG Xueqiang. *Studies on reactive power optimization and algorithm of distribution network containing wind power generators*. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
(曾学强. 含风电机组的配电网无功优化及算法研究. 成都: 西南交通大学, 2011.)
- [24] CHENG Tingli, CHEN Minyou, LUO Huan. Multi-objective allocation of energy storage in distribution network penetrated with renewable energy generation. *Power System Technology*, 2017, 41(9): 2808 – 2815.
(程庭莉, 陈民铀, 罗欢. 含可再生能源发电的配网储能多目标优化配置方法. 电网技术, 2017, 41(9): 2808 – 2815.)
- [25] ZHANG Cong. *Models and algorithms of reactive power optimization considering uncertainties based on interval theory*. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
(张聪. 基于区间理论的不确定性无功优化模型及算法. 广州: 华南理工大学, 2018.)

附录

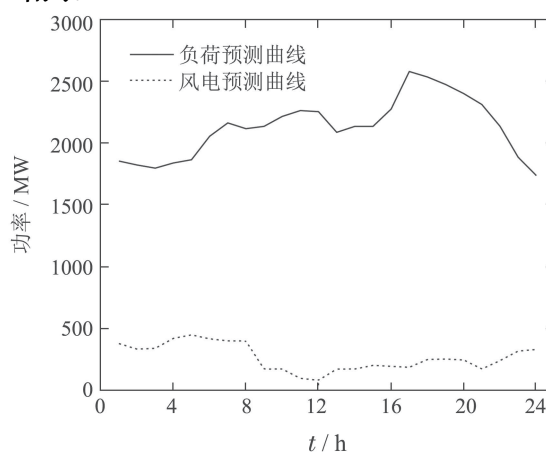


图 A 负荷及风电预测曲线

Fig. A Load and wind power prediction curve

作者简介:

黄 颀 硕士, 讲师, 目前研究方向为电力系统运行与控制、新能源及微电网技术, E-mail: 2307021454@qq.com;

杨 鑫 硕士, 中级工程师, 目前研究方向为电力系统电压控制及新能源, E-mail: 380843825@qq.com;

高 林 硕士研究生, 目前研究方向为电力系统调度运行与新能源并网, E-mail: 1253306467@qq.com;

张 聪 博士, 讲师, 目前研究方向为电力系统最优潮流、经济调度和无功电压控制等, E-mail: zcong@hnu.edu.cn;

陈皓勇 博士, 教授, 目前研究方向为电力系统规划、运行与控制、新能源并网和智能电网技术、电力经济与电力市场等, E-mail: eehychen@scut.edu.cn.