

考虑需求响应和碳交易的多微电网 能量协同优化方法

李 壮 万俊杰

(安科瑞电气股份有限公司, 上海 201801)

摘要 微电网是新型电力系统的重要组成部分, 多微电网之间的能量协同交互有助于新能源消纳和提高群体经济性。针对多微电网系统, 本文提出一种考虑需求响应和碳交易的能量协同优化方法。首先, 构建多微电网协同优化框架; 然后, 对微电网内部的资源进行建模, 在原有基础上加入需求响应和碳交易机制; 接着, 构建单微电网和多微电网能量协同的目标函数, 并采用改进白鲸优化算法进行求解; 最后, 基于仿真, 验证了所提方法可以有效提高多微电网系统能量协同优化的经济性, 为实际多微电网的协调优化运行提供了参考。

关键词: 多微电网; 需求响应; 碳交易; 改进白鲸优化算法

Multi-microgrid energy collaborative optimization method considering demand response and carbon trading

LI Zhuang WAN Junjie

(Acrel Co., Ltd, Shanghai 201801)

Abstract The microgrid is an important part of the new power system. The energy coordination and interaction between microgrids is conducive to the consumption of new energy and improving the economy of the group. An energy collaborative optimization method considering demand response and carbon trading is proposed for multi-microgrid systems. Firstly, the framework of multi-microgrid energy collaborative optimization is constructed. Then, the internal resources of the microgrid are modeled, and demand response and carbon trading mechanisms are added on the original basis. Then, the objective function of energy coordination between single microgrid and multi-microgrid is constructed, and the improved beluga whale optimization is used to solve it. Finally, based on the simulation, it is verified that the algorithm can effectively improve the economy of multi-microgrid system energy cooperative optimization, and provide certain reference for the actual coordinated optimization operation of multi-microgrid.

Keywords: multi-microgrid; demand response; carbon trading; improved beluga whale optimization

0 引言

近年来, 以“双碳”目标为主导, 构建以新能源为主体的新型电力系统^[1]势在必行, 大量的新能源并网和消纳问题成为重要的研究课题。微电网^[2]作为新型电力系统的一部分, 包含分布式电源、储能系统等, 有助于促进新能源的消纳和资源的高效利用。

微电网的运行模式^[3]可以分为并网和孤岛两

种。在孤岛模式下, 微电网无大电网支持, 只需要实现能源需求和负荷需求之间的平衡; 但是, 由于新能源前期容量规划和风光资源不稳定的问题, 很难实现源荷平衡, 因此可以考虑通过多个微电网之间的信息和资源交互, 促进多种分布式能源的就地消纳, 提高电力系统的稳定性^[4-5]。本文就多微电网的能量协调优化方法进行研究。文献[6]构建基于分层约束强化学习的多微电网协调经济调度模型, 弥补了传统方法的缺陷, 并通过算例验证了该模型的

有效性。文献[7-8]提出计及源荷不确定影响的多微电网鲁棒经济调度模型,采用数学规划方法,提升了整体的经济性。文献[9]提出一种阶梯式碳交易机制下的综合能源系统优化运行模型,并通过 4 种场景验证了模型的有效性。文献[10]提出一种光伏、光热和储能装置分时段、协同收集转换能量,以跟踪调度负荷指令的控制方案。但是,以上研究均未同时考虑需求响应和碳交易方面的需求,分析不够全面,且求解方法存在陷入局部极值的情况。

鉴于此,本文考虑需求响应、碳交易机制及源荷不确定性影响,提出一种考虑需求响应和碳交易的多微电网能量协同优化方法。首先构建多微电网协同优化的框架;然后对微电网内部资源进行建模,考虑需求响应和碳交易机制,并构建单微电网和多微电网协同优化目标函数;最后采用改进的白鲸优化算法(improved beluga whale optimization, IBWO)进行求解,并基于仿真数据验证该方法的可行性和有效性。

1 多微电网能量协同优化框架

图 1 为多微电网能量协同优化框架,其中多微电网包含 3 个微电网用户,微电网 1 包含风力发电设备和储能设备,微电网 2 和 3 包含光伏(photo-voltaic, PV)设备和储能设备。在配电系统中,每个微电网都可以视为向其他微电网售电或购电的用户。图 1 中,虚线为双向通信线,可通信协调控制网关对分布式电源和负荷进行调控,黑色实线为电力网络线。

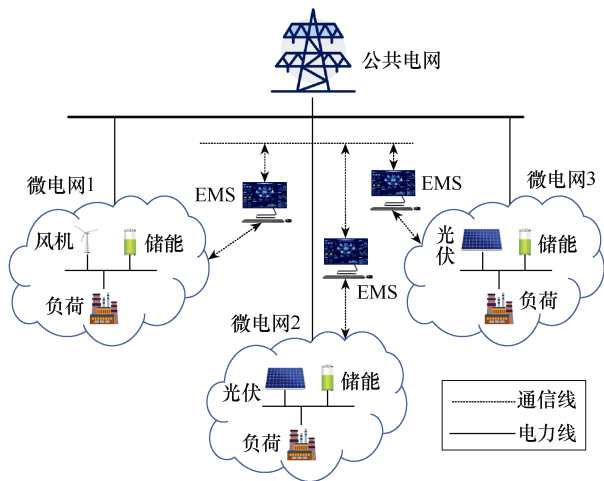


图 1 多微电网能量协同优化框架

为提升对新能源的消纳能力,各微电网均配有一套能量管理系统(energy management system,

EMS)。假设微电网之间的购电费用低于电网电价,各微电网可通过 EMS 进行信息和功率交互。

2 模型建立

2.1 微电网内部单元建模

1) 光伏电池模型

光伏电池^[10]利用半导体直接把光能转换成电能,这一过程不需要热力发电设备。光伏电池能够直接向用电设备提供直流电,在需要交流电的情况下,必须使用交直流转换器。光伏发电系统基本原理如图 2 所示。

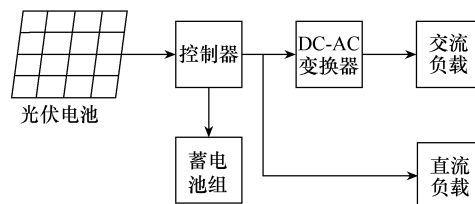


图 2 光伏发电系统基本原理

光伏发电功率与光照强度正相关。当光照强度增大时,发电功率增加;当光照强度减小时,发电功率降低。光伏电池输出功率为

$$P_{pv} = R_{pv} q_{pv} \frac{I_T}{I_{STC}} [1 + \alpha_p (T_c - T_{stc})] \quad (1)$$

式中: P_{pv} 为 PV 电池输出的有功功率; R_{pv} 为标准测试环境下的 PV 输出功率; q_{pv} 为 PV 发电的效率系数; I_T 为当前地区小型气象站实际采取的辐照强度参数值; I_{STC} 为标准测试环境下的辐照强度参数值; α_p 为 PV 电池的温度系数; T_c 为当前条件下的 PV 电池温度; T_{stc} 为标准测试环境下的 PV 电池温度。

2) 风力发电机模型

风力发电机(wind turbine, WT)应用在风能资源较为丰富的地区,将风能转化为机械能。风力发电系统组成如图 3 所示。

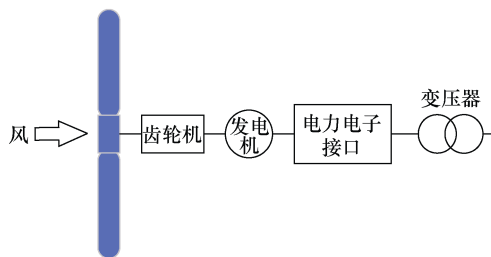


图 3 风力发电系统组成

WT 输出功率由风速大小决定。由于风机自身有保护机制,其发电功率不会超过容量上限值,风

力发电机的输出特性如图4所示。

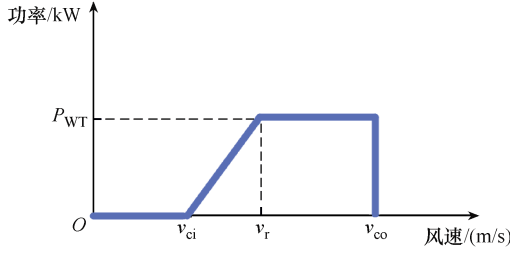


图4 风力发电机输出特性

风力发电机的输出功率可以表示为

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & v < v_{ci} \\ av^3 + bv^2 + cv + d & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_r & v_r < v < v_{co} \\ 0 & v \geq v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

式中： P_{WT} 为风力发电机的输出功率； v 为风速； P_r 为风力发电机的额定功率； v_{ci} 、 v_r 和 v_{co} 分别为切入风速、额定风速和切出风速，其中切入风速为风机起动的最小风速，切出风速为防止风速过大而损坏设备的风速限值； a 、 b 、 c 和 d 为风速参数。

3) 储能单元模型

储能设备用于储存电能和调节电能供应，能够在能量供应过剩时或购电价格较低时储存电能，并在有需求时或购电价格较高时释放电能，常见模式是削峰填谷模式和峰谷套利模式。储能设备常用的电池类型为锂离子电池、铅酸电池和钠硫电池，储能电池剩余电量的计算表达式为

$$S_{OC}(t) = \begin{cases} S_{OC}(t-1) + \frac{1}{\eta^-} P_{bess}(t) & P_{bess}(t) \leq 0 \\ S_{OC}(t-1) + \eta^+ P_{bess}(t) & P_{bess}(t) > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $S_{OC}(t)$ 为储能电池在 t 时刻的剩余电量比例，即荷电状态 (state of charge, SOC)； $P_{bess}(t)$ 为储能电池的充放电功率， $P_{bess}(t)$ 值为正表示放电，值为负表示充电； η^- 为充电效率； η^+ 为放电效率。

4) 电价模型

在一个多微电网系统中，当某一个微电网的负荷需求高于发电量时，可以从其他微电网购电，以满足自身负荷的需求；当多微电网系统的发电量高于负荷需求时，可以将多余电能出售给电网，以获得收益。因此， t 时刻的电网购电成本 $C_G(t)$ 可以描述为

$$C_G(t) = \begin{cases} AP_G(t)^2 + BP_G(t) + C & P_G(t) > 0 \\ \sigma P_G(t) & P_G(t) \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中： $P_G(t)$ 为 t 时刻微电网系统的购电功率； A 、 B 、 C 为发电成本系数； σ 为售电单价。

5) 需求响应模型

需求响应本质上是保证电网稳定运行的一种激励措施，在特定时间段改变用电行为，可获得一定奖励。除基础负荷外，本文将负荷分为可削减负荷和可转移负荷。

$$P_{Le}(t) = P_{Le0}(t) + P_{cut}(t) + P_{tran}(t) \quad (5)$$

式中： $P_{Le}(t)$ 为 t 时刻需求响应之后的负荷； $P_{Le0}(t)$ 为 t 时刻原始负荷； $P_{cut}(t)$ 为 t 时刻削减的负荷； $P_{tran}(t)$ 为 t 时刻转移的负荷。转移负荷满足一天各时段转移负荷总和为0的约束。

6) 碳交易模型

碳交易是指温室气体排放权的交易，涉及 CO_2 排放权。每个微电网园区均有一定的碳排放配额，可以向其他园区购、售碳排放配额。

$$\begin{cases} C_{CO_2} = E_{money} (HS_{buy} - E_{all}) \\ \text{s.t. } E_{all} = \alpha S_{buy} + \beta S_{rew} \end{cases} \quad (6)$$

式中： C_{CO_2} 为碳交易额； E_{money} 为碳交易单价(元/kg)； H 为碳排放系数； S_{buy} 为运行周期内向大电网购电总度数； E_{all} 为微电网的碳排放配额； S_{rew} 为新能源发电度数； α 、 β 分别为计算碳排放配额所需的系数。如果微电网系统从大电网购电，则根据碳排放系数 H 可计算当前时刻的碳排放量，对运行周期内购电情形下的碳排放量进行叠加即可得到总碳排放量；如果微电网系统向大电网售电，则代表绿电大于负载需求，当前购电为零，可视为无碳排放。

2.2 单微电网能量优化

由于风力发电和光伏发电的不稳定性，为使单微电网内部的发电成本最小，第 k 个微电网的优化目标函数为

$$\min C_k = C_{k,storage} + C_{k,demand} + C_{k,CO_2} + C_{k,grid} + C_{k,exc} \quad (7)$$

式中： C_k 第 k 个微电网总运行成本； $C_{k,storage}$ 为储能电池的充放电成本； $C_{k,demand}$ 为需求响应的补偿成本，即对负荷用户的补贴(包含从电网公司获得的收益)，包括可削减负荷补偿成本和可转移负荷补偿成本； C_{k,CO_2} 为碳交易成本； $C_{k,grid}$ 为与大电网之间的交易成本，当 $C_{k,grid}$ 为正时，表示微电网从大电网购电，反之，表示微电网向大电网售电； $C_{k,exc}$ 为第 k 个微电网与其他微电网之间的交互成本之和。

$$P_k^d + P_k^{\text{demand}} + P_k^{\text{exc}} = P_k^{\text{rew}} + P_k^{\text{ESS}} + P_k^G \quad (8)$$

$$P_{k,\min}^{\text{ESS}} \leq P_k^{\text{ESS}} \leq P_{k,\max}^{\text{ESS}} \quad (9)$$

$$S_{\text{OC}k}^{\min} \leq S_{\text{OC}k} \leq S_{\text{OC}k}^{\max} \quad (10)$$

式中： P_k^d 为原负荷功率； P_k^{demand} 为参与需求响应的可削减功率和可转移功率之和； P_k^{exc} 为第 k 个微电网与其他微电网之间的交互功率； P_k^{rew} 为新能源的发电功率； P_k^{ESS} 为储能电池的充放电功率； P_k^G 为第 k 个微电网与大电网之间的交互功率； $P_{k,\min}^{\text{ESS}}$ 和 $P_{k,\max}^{\text{ESS}}$ 为储能电池充放电功率的下限和上限； $S_{\text{OC}k}^{\min}$ 和 $S_{\text{OC}k}^{\max}$ 为储能电池荷电状态的下限和上限。

2.3 多微电网能量协同优化

本文研究的是多微电网系统，微电网与微电网之间可以进行信息和功率的交互。多微电网的能量协同优化目标函数为

$$\begin{aligned} \min C_{\text{all}} = \\ \sum_{k=1}^K C_k = \sum_{k=1}^K (C_{k,\text{storage}} + C_{k,\text{demand}} + C_{k,\text{CO}_2} + C_{k,\text{grid}} + C_{k,\text{exc}}) \end{aligned} \quad (11)$$

式中： C_{all} 为多微电网系统运行的总成本，即多个微电网运行成本之和； K 为微电网的数量。

3 基于改进白鲸优化算法的多微电网能量协同优化

白鲸优化算法 (beluga whale optimization, BWO) 相比其他群体智能算法具有更高的收敛精度和更快的收敛速度^[11]，因此本文考虑将其应用于多微电网协同优化问题，以式 (11) 所示目标函数作为白鲸个体的适应度值，求得最优解，对应多个微电网的储能出力情况、电网交互情况、各个微电网之间的交互情况等。

3.1 白鲸优化算法

BWO 是一种模拟白鲸捕食、生存等行为的优化算法^[12]，其本质是将白鲸作为搜索代理，每条白鲸对应一个候选解。在 BWO 中，所有白鲸的位置信息构成一个位置矩阵，其中每行为一条白鲸的位置，每列为白鲸位置的某一维度或特征。位置矩阵表示为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,D} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,D} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n,1} & x_{n,1} & \cdots & x_{n,D} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中： n 为白鲸种群的数量； D 为搜索空间维数。白鲸种群适应度值向量 \mathbf{F} 为

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f(x_{1,1}, x_{1,2}, \cdots, x_{1,D}) \\ f(x_{2,1}, x_{2,2}, \cdots, x_{2,D}) \\ \vdots \\ f(x_{n,1}, x_{n,2}, \cdots, x_{n,D}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

平衡因子 B_f 的计算式如式 (14) 所示，其作用是决定白鲸是否进入探索或开发阶段。

$$B_f = B_0 \left(1 - \frac{T}{2T_{\max}} \right) \quad (14)$$

式中： T 为当前迭代次数； T_{\max} 为最大迭代次数； B_0 为 (0, 1) 之间变化的随机数。 B_f 取值在 0~1，当 $B_f > 0.5$ 时，进入探索阶段；否则进入开发阶段。随着迭代次数的增加， B_f 的波动范围从 (0, 1) 减少到 (0, 0.5)，进入开发阶段的概率不断提升。

1) 探索阶段

算法进入探索阶段，白鲸种群的位置更新公式为

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{i,j}^{T+1} = \mathbf{X}_{i,p_j}^T + (\mathbf{X}_{r,p_j}^T - \mathbf{X}_{i,p_j}^T)(1+r_1)\sin(2\pi r_2) & j = 2n \\ \mathbf{X}_{i,j}^{T+1} = \mathbf{X}_{i,p_j}^T + (\mathbf{X}_{r,p_j}^T - \mathbf{X}_{i,p_j}^T)(1+r_1)\cos(2\pi r_2) & j = 2n+1 \end{cases} \quad (15)$$

式中： $\mathbf{X}_{i,j}^{T+1}$ 为第 i 条白鲸在第 j 维的新位置； p_j 为维度 j 范围内的随机整数； \mathbf{X}_{i,p_j}^T 为第 i 条白鲸在第 p_j 维的位置； \mathbf{X}_{r,p_j}^T 和 \mathbf{X}_{i,p_j}^T 分别为第 r 条白鲸 (随机选择) 和第 i 条白鲸的当前位置； $r_1 \in (0, 1)$ ； $r_2 \in (0, 1)$ 。

2) 开发阶段

在开发阶段 BWO 引入 Levy 飞行策略，有利于提高算法的收敛性，其计算方式为

$$\mathbf{X}_i^{T+1} = r_3 \mathbf{X}_{\text{best}} - r_4 \mathbf{X}_i^T + C_1 L_F (\mathbf{X}_r^T - \mathbf{X}_i^T) \quad (16)$$

式中： \mathbf{X}_r^T 为随机选取的白鲸所在的位置； \mathbf{X}_i^T 第 i 条白鲸所处的位置； \mathbf{X}_i^{T+1} 为第 i 条白鲸在第 $T+1$ 次

迭代时所处的位置； r_3 和 r_4 为 $0\sim 1$ 的随机数； C_1 为 Levy 飞行的随机跳跃强度，如式 (17) 所示； L_F 为符合 Levy 飞行的随机数，如式 (18) 所示； \mathbf{X}_{best} 为种群中的最佳位置。

$$C_1 = 2r_4 \left(1 - \frac{T}{T_{\max}} \right) \quad (17)$$

$$L_F = 0.05 \times \frac{u\delta}{|v|^{\frac{1}{\gamma}}} \quad (18)$$

$$\delta = \left(\frac{\Gamma(1+\gamma) \sin \frac{\pi\gamma}{2}}{\Gamma\left(\frac{1+\gamma}{2}\right) \gamma \times 2^{\frac{\gamma-1}{2}}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (19)$$

式中： u 和 v 为满足正态分布的随机数； $\gamma=0.5$ ； $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数。

3) 鲸落阶段

BWO 通过引入鲸鱼坠落的行为来模拟随机性及白鲸群体中的变化，计算公式为

$$\mathbf{X}_i^{T+1} = r_5 \mathbf{X}_i^T - r_6 \mathbf{X}_i^T + r_7 \mathbf{X}_{\text{step}} \quad (20)$$

式中： r_5 、 r_6 和 r_7 均为 $0\sim 1$ 的随机数； \mathbf{X}_{step} 为鲸鱼坠落的步长。 \mathbf{X}_{step} 表达式为

$$\mathbf{X}_{\text{step}} = (\mathbf{u}_b - \mathbf{l}_b) \exp\left(-C_2 \frac{T}{T_{\max}}\right) \quad (21)$$

式中： \mathbf{u}_b 和 \mathbf{l}_b 分别为变量的上限和下限； C_2 为种群的规模和鲸鱼下降概率相关的阶跃因子。 C_2 表达式为

$$C_2 = 2W_f n \quad (22)$$

式中， W_f 为鲸鱼坠落的概率。 W_f 是一个线性函数，从 0.1 逐渐下降到 0.05，其计算表达式为

$$W_f = 0.1 - 0.05 \frac{T}{T_{\max}} \quad (23)$$

3.2 改进白鲸优化算法

传统的 BWO 存在易陷入局部极值的问题，本文采用 IBWO，通过反向学习策略来增强 BWO 的整体搜索能力。反向学习可以提供与白鲸位置相反的位置，探索另外一种可能性，通过对比两个解，将其中的最优解作为白鲸个体的位置。目前，反向学习策略已经在多种优化算法中得到应用，其

数学表达式为

$$\mathbf{X}'_i = (\mathbf{u}_{\text{bo}} + \mathbf{l}_{\text{bo}}) r_8 - \mathbf{X}_i \quad (24)$$

式中： \mathbf{X}'_i 为白鲸个体的反向位置； \mathbf{X}_i 为白鲸个体的当前位置； \mathbf{u}_{bo} 和 \mathbf{l}_{bo} 分别为搜索空间的上限和下限； r_8 为 $0\sim 1$ 的随机数。

3.3 基于 IBWO 的多微电网能量协同优化

采用 IBWO 进行多微电网能量协同优化的步骤如下：

1) 初始化 IBWO 参数，包括种群规模、迭代次数、变量维度及变量范围。

2) 根据变量的上限和下限，对白鲸种群进行随机初始化操作。

3) 计算白鲸个体的适应度值，通过比较得出最优适应度个体，白鲸个体的适应度值为多微电网系统的总运行成本。

4) 利用式 (14) 计算平衡因子 B_f 的值。

5) 若 $B_f < 0.5$ ，则进入开发阶段，按照式 (16) 更新个体位置；若 $B_f > 0.5$ ，则进入探索阶段，按照式 (15) 更新个体位置。

6) 对比平衡因子 B_f 和鲸落概率 W_f ，如果 $B_f < W_f$ ，就进行步骤 7)，进入鲸落阶段；否则进行步骤 8)，进入反向学习阶段。

7) 进入鲸落阶段。利用鲸落阶段的位置更新公式 (20) 逐个更新白鲸个体，若经过更新之后的个体比原个体更优，则替换原个体。

8) 对当前个体进行反向学习，比较经过反向学习策略之后个体与原个体的适应度值，择优替换。

9) 判断是否达到最大迭代次数，若是，则输出多微电网调度的结果，否则返回步骤 3)。

4 实验验证

为了验证 IBWO 应用于多微电网能量协同优化的有效性，与传统 BWO 和粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 进行比较。本文的时间精度为 1h，对未来一天 (00:00—24:00) 进行能量调度，案例包括 3 个微电网，微电网 1 配备风机和储能，微电网 2 和微电网 3 配备光伏和储能，各微电网的新能源预测结果如图 5 所示，各微电网与大电网之间的购电价格如图 6 所示，售电价格设为 0.3 元/(kW·h)。

4.1 参数设置

参数设置主要包括需求响应负荷比例、储能充

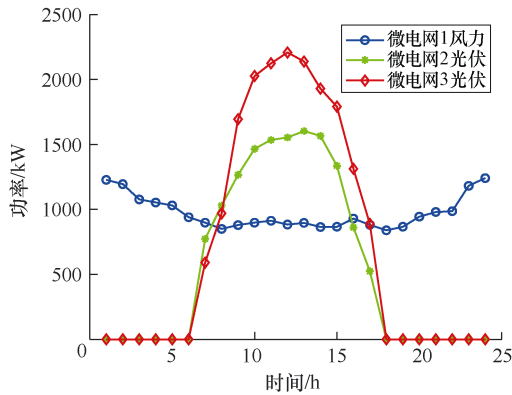


图 5 各微电网新能源预测结果

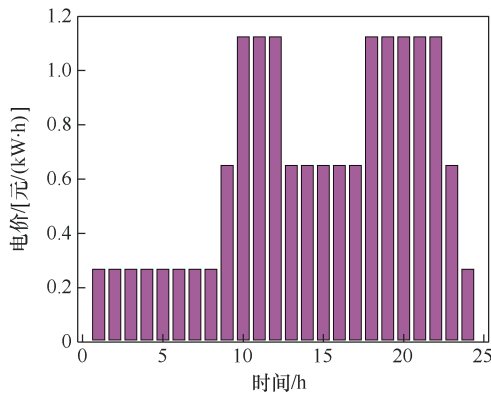


图 6 各微电网与大电网之间的购电价格

放电功率范围、储能容量上下限、储能充放电成本、大电网交互功率限制、微电网群交互功率限制、碳排放配额、碳交易单价等。参数设置见表 1。

表 1 参数设置

参数	微电网 1	微电网 2	微电网 3
可削减负荷/%	[-0.15, 0]	[-0.15, 0]	[-0.15, 0]
可转移负荷/%	[-0.15, 0.15]	[-0.15, 0.15]	[-0.15, 0.15]
需求响应补偿成本/[元/(kW·h)]	3	3	3
储能容量约束/(kW·h)	[500, 1800]	[500, 1800]	[500, 1800]
储能功率约束/kW	[-500, 500]	[-500, 500]	[-500, 500]
购电约束/kW	[0, 1 800]	[0, 1 800]	[0, 1 800]
微电网交互功率约束/kW	[0, 2 000]	[0, 2 000]	[0, 2 000]
碳交易成本/(元/kg)	0.25	0.25	0.25
碳排放系数 H	1.08	1.08	1.08
碳配额系数 α	0.798	0.798	0.798
碳配额系数 β	0.102	0.102	0.102

4.2 结果分析

传统 BWO、PSO 和 IBWO 优化的微电网群总运行成本见表 2。由表 2 可以看出, IBWO 求解得到

表 2 不同算法优化的微电网群总运行成本

单位: 元

算法	微电网 1	微电网 2	微电网 3
PSO	1 251	11 521	865
BWO	1 203	10 021	847
IBWO	901	9 495	822

的总成本比 PSO、BWO 求解得到的总成本更低。

IBWO 优化下的微电网 1~3 的调度结果分别如图 7~图 9 所示。由图 7 可知, 00:00—06:00 前期负荷较低时, 风力发电较多, 多余电能部分出售给电网, 部分与其他微电网交互或对储能设备充电; 当 07:00—20:00 负荷变大时, 风电无法满足负荷需求, 此时可以从其他微电网购电, 同时储能进行放电; 当 21:00—24:00 负荷减少时, 风力发电偏高, 多余电能给储能设备充电并且出售给其他微电网。图 8 和图 9 的分析同理。

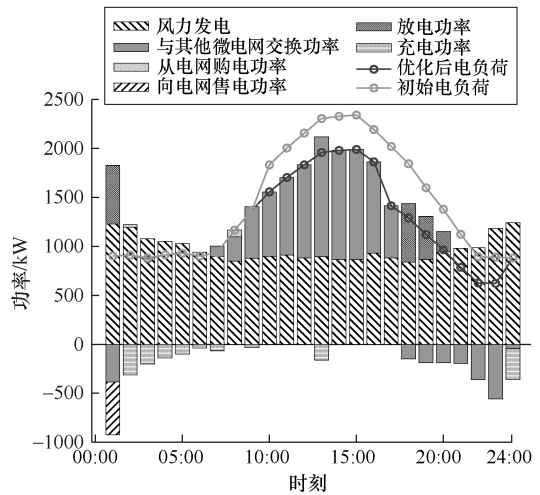


图 7 微电网 1 调度结果

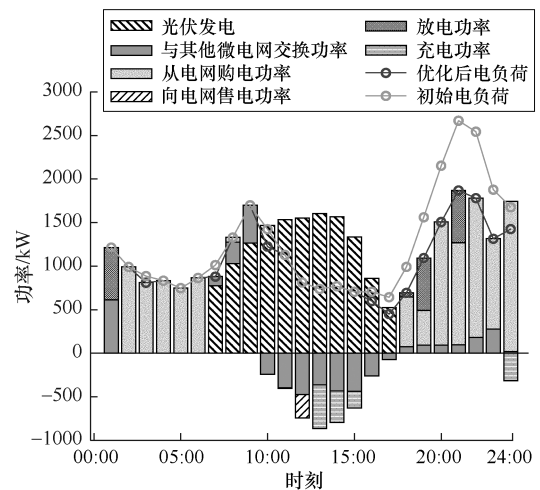


图 8 微电网 2 调度结果

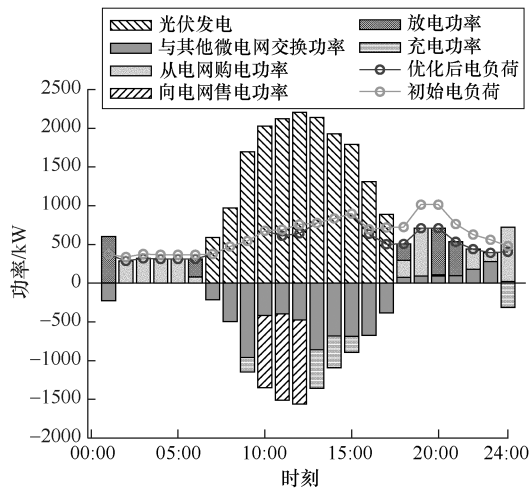


图9 微电网3调度结果

图10为微电网群之间的交互功率,其中电能流入为正,流出为负;图11为微电网群的成本收敛曲线。由图11可以看出,3条曲线均逐渐收敛,成本均由负变正,表明微电网群逐渐获得收益,验证了IBWO在多微电网能量协同优化中的有效性。

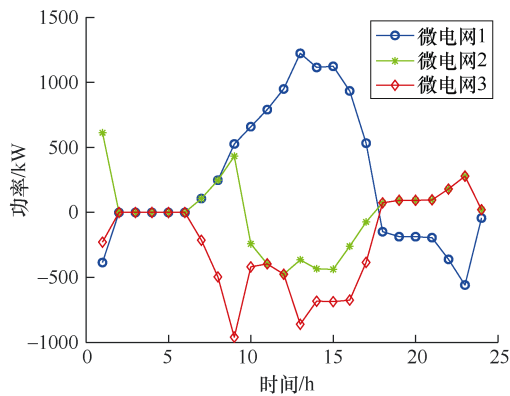


图10 微电网群交互功率

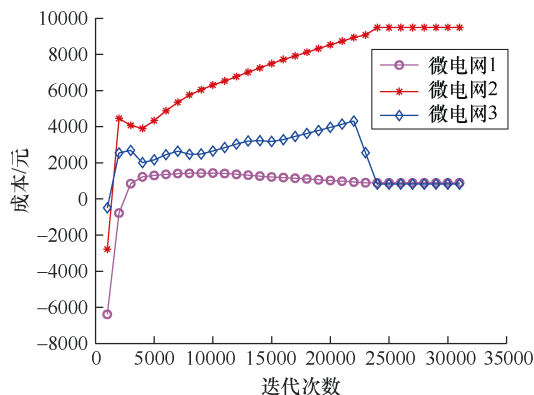


图11 微电网群成本收敛曲线

5 结论

针对多微电网能量协同优化问题,本文提出了

一种考虑需求响应和碳交易的多微电网能量协同优化方法,构建了单微电网和多微电网能量协同优化的目标函数,并选取IBWO进行求解,使调度策略更加灵活,以适应不同情况,降低了多微电网系统的运行成本,实现互赢互利。

参考文献

- [1] 孟明,陈世超,赵树军,等. 新能源微电网研究综述[J]. 现代电力, 2017, 34(1): 1-7.
- [2] 卢恒光,范欣辰. 考虑环境效益的微电网经济功率优化[J]. 电气技术, 2022, 23(11): 56-61.
- [3] 魏译帆,邢建春. 基于虚拟同步发电机双模式切换的柴储微电网无差调频控制策略[J]. 电气技术, 2022, 23(11): 13-20.
- [4] 范培潇,杨军,温裕鑫,等. 基于可进化模型预测控制的含电动汽车多微电网智能发电控制策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(3): 699-713.
- [5] 孟潇潇,尤泽豪,张茂凡,等. 基于背靠背变流器柔性互联微电网群的分层分布式协同控制及其稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2024, 39(24): 7917-7932.
- [6] 董雷,杨子民,乔骥,等. 基于分层约束强化学习的综合能源多微网系统优化调度[J]. 电工技术学报, 2024, 39(5): 1436-1453.
- [7] 宋晓通,陈佳琪,师芊芊. 多主体博弈背景下的综合能源微网优化调度[J]. 高电压技术, 2023, 49(8): 3163-3178.
- [8] 马越,蔺红. 多代理技术下基于主从博弈的多微网系统经济优化调度[J]. 太阳能学报, 2024, 45(1): 574-582.
- [9] 袁坤龙,张少康,常冉,等. 阶梯式碳交易机制下计及电-气-热综合能源系统需求响应优化运行[J]. 电气技术, 2024, 25(1): 8-16.
- [10] 孙海翠. 一种基于光伏-光热-储能联合发电的能源基地功率协调控制方案[J]. 电气技术, 2024, 25(11): 22-29.
- [11] 高松,何俊,杨松坤,等. 基于交替方向乘子法的多微电网能量共享方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(6): 113-120.
- [12] 亓祥波,赵品威,宋岩,等. 求解工程优化问题的混合白鲸优化算法[J]. 制造技术与机床, 2024(11): 149-159.

收稿日期: 2025-01-02

修回日期: 2025-02-28

作者简介

李 壮(1992—),男,安徽省宿州市人,本科,工程师,主要从事智慧能源方面的研究工作。