

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240985

“源-网-荷-储”协调控制低碳经济优化及降碳效果分析

耿光飞¹, 宋方烁¹, 汪泽州², 解芳³

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 国网浙江省电力有限公司嘉兴供电公司, 浙江 嘉兴 314300; 3. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 在“双碳”目标背景下, 针对实现配电网低碳经济运行问题, 提出了一种“源-网-荷-储”协调控制的配电网低碳经济优化方法。首先, 以考虑弃风弃光成本、柔性负荷与储能装置调度成本、碳排放成本等的配电网综合成本最小为目标函数进行建模。其次, 通过二阶锥松弛技术, 将其转变为混合整数凸规划模型, 进一步提高计算速率。然后通过修改的 IEEE 33 节点配电系统证明了该方法在降低配电网经济成本和碳排放方面的优越性。最后, 对“源-网-荷-储”协调优化中不同降碳措施的效果进行了灵敏度分析, 并以此为基础研究了协调低碳经济运行与传统经济运行之间矛盾与统一的博弈关系, 得出了在不同环境条件下两种运行方式之间的相同点与差异点。

关键词: 配电网低碳经济运行; “源-网-荷-储”协同优化; 混合整数二阶锥规划; 降碳效果分析

Low-carbon economic optimization and carbon reduction effect analysis of “source-grid-load-storage” coordinated control

GENG Guangfei¹, SONG Fangshuo¹, WANG Zezhou², XIE Fang³

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
2. Jiaxing Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Jiaxing 314300, China;
3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Under the “dual-carbon” goal, a low-carbon economic optimization method for distribution networks based on “source-grid-load-storage” coordinated control is proposed. First, a model is developed with the objective of minimizing the comprehensive costs of the distribution network, considering factors such as wind and solar curtailment costs, flexible load and energy storage dispatch costs, and carbon emission costs. Second, second-order cone relaxation technology is employed to transform the problem into a mixed integer convex programming model for improving computational efficiency. Then, a modified IEEE 33-bus system is used to demonstrate the superiority of the proposed method in reducing both economic costs and carbon emissions. Finally, a sensitivity analysis is conducted on the different carbon reduction measures in the coordinated optimization of “source-grid-load-storage”. Based on this, the trade-off between coordinated low-carbon economic operation and traditional economic operation is explored, identifying similarities and differences between the two approaches under various environmental conditions.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 1400-202155508A-0-5-ZN).

Key words: low-carbon economic operation of distribution networks; “source-grid-load-storage” coordinated optimization; mixed integer second-order cone programming; carbon reduction effect analysis

0 引言

减少温室气体排放已成为全球各国的共识。随着国家“双碳”发展目标的提出以及海量分布式电

源(distributed generator, DG)和储能系统(energy storage system, ESS)的接入, 配电网迎来了一系列新的挑战, 迫切需要开展适应一系列变化的新型配电网低碳经济优化技术的研究与开发。配电网重构是指在满足配电网正常运行基本约束的前提下, 通过改变配电网中不同联络开关的状态来实现对配电网中一个或多个指标的优化, 可以在不增加设备投资的情况下, 充分发挥配电系统的潜力, 提高系统的性能

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助 (1400-202155508A-0-5-ZN); 国家自然科学基金项目资助 (52111530048)

指标, 具有较好的经济效益^[1-3]。柔性负荷和储能装置可以在满足配电网用能需求的前提下, 通过对配电网的负荷曲线进行调节, 达到“削峰填谷”的作用, 在保证配电网供电安全的同时进一步降低线路损耗, 提高配电网经济性^[4]。

目前已有关于配电网低碳经济调度的相关研究, 文献[5]在模型中引入碳交易机制, 以综合运行成本最小为目标进行优化, 有效减少配电网侧碳排放量; 文献[6]通过需求侧管理, 能够有效提高配电网对于 DG 的接纳能力, 降低碳排放。但上述两篇文献优化控制措施考虑过于单一, 忽略了不同控制之间的协同性, 无法充分挖掘降碳潜力。文献[7]提出计及协调调度 DG、储能以及负荷侧各类需求响应的“源-荷-储”协调优化; 文献[8]在支路潮流模型的基础上提出了“网-储”协调优化。上述两篇文献有效提高了配电网的经济效益, 但均未引入碳交易机制, 模型中没有考虑碳排放成本。文献[9]对共享储能与需求侧响应两方面进行协调优化, 有效降低了配电网碳排放; 文献[10-11]分别在移动储能与需求侧响应的基础上, 通过配电网动态重构, 进一步提高清洁能源消纳降低碳排放; 文献[12]建立电-碳-绿证多元交易市场, 使“源-荷”两侧通过“动态电价”与“动态碳排放因子”形成有效互动, 达到“源-荷”协同低碳优化的效果; 文献[13-14]分别考虑了多种储能设备参与下的系统低碳经济优化, 通过需求侧响应对负荷曲线进行调节, 达到优化电源配置, 降低碳排放的目的; 文献[15]构建了“碳-能”协同响应的综合能源系统, 将碳交易价格修正系数与低碳需求信号引入碳能交互价格中, 提高系统的低碳性与经济性。但上述几篇文献在多种措施协调控制优化方面考虑的并不全面, 不能充分挖掘配电网经济运行时的降碳潜力, 因此进行“源-网-荷-储”全方位的协调控制优化以及降碳效果分析是十分必要的。

而对于配电网低碳经济研究的算法主要分为智能算法和数学优化算法两类。在智能算法方面, 文献[16]提出的改进粒子群算法, 解决了传统粒子群容易陷入局部最优解的问题, 但其性能受参数影响较大, 如何选择合适的参数使性能达到最优是一个挑战; 文献[17]提出了一种基于改进非支配排序的遗传算法, 计算效率和寻优能力得到大大加强, 但遗传算法的结果依赖于初始化种群和评价函数, 需要设计合适的策略; 文献[18]采用的深度学习算法能够较好地“源-荷”的随机波动做出响应, 但深度学习需要消耗大量的数据与资源, 对算力要求较高; 文献[19]采用了自适应单目标连续优化, 该算

法在全局搜索能力与适应性方面表现优越, 但在某些情况下会出现不能充分寻优的问题。由上述文献可知, 在部分情况下智能算法依然存在收敛速度慢、计算量大、容易陷入局部最优等问题。在数学优化算法方面, 文献[20-21]建立了混合整数二阶锥模型, 分别对配电网的拓扑结构和柔性负荷调用情况进行了优化调节, 所得结果具有良好的稳定性与最优性; 文献[22]建立了混合整数二阶锥规划模型, 并通过多面体近似将二阶锥约束线性化, 使其在保留计算精度的前提下进一步提高了计算速率。结合上述文献, 本文在已有数学优化算法研究的基础上对配电网优化模型进行简化, 进一步提高了计算效率。

从上述文献可以看出, 目前对于配电网多措施协调控制低碳经济优化方面的研究相对较少, 缺乏对不同降碳措施的效果分析以及对配电网经济运行和低碳运行之间的协调与矛盾关系的研究, 因此本文在已有研究的基础上提出配电网“源-网-荷-储”协调控制低碳经济优化方法及降碳效果分析, 研究配电网经济性与低碳性之间的博弈关系, 在保证配电网经济性的同时进一步降低碳排放, 在求解算法方面, 通过引入二阶锥松弛约束将原模型转换为混合整数凸规划模型, 并通过 MOSEK 求解器进行求解。

1 配电网低碳经济优化模型

1.1 目标函数

本文以降低配电网碳排放和运行成本为目标, 提出了配电网“源-网-荷-储”协调低碳经济优化模型, 该模型的目标函数计算方法如式(1)所示。

$$\min f = C_{BP} - C_{SP} + C_{wd} + C_{pv} + C_M + C_{ESS} + C_{load} + C_{CO_2} \quad (1)$$

式中: f 为配电网的综合成本; C_{BP} 、 C_{SP} 分别为配电网的购电成本与售电收入; C_{wd} 、 C_{pv} 分别为风机、光伏的运行维护成本以及弃风弃光成本; C_M 为燃气轮机发电成本; C_{ESS} 为储能运行成本; C_{load} 为柔性负荷调度成本; C_{CO_2} 为配电网碳排放产生的成本。

式(1)中不同成本计算公式如下所示。

1) 配电网购电成本与售电收入

$$C_{BP} = \sum_{t=1}^T C_{t,BP} P_{t,grid} \Delta t \quad (2)$$

$$C_{SP} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n C_{t,SP} P_{i,t} \Delta t \quad (3)$$

式中: T 为优化模型持续时间; Δt 为时间间隔; $C_{t,BP}$ 、 $C_{t,SP}$ 分别为 t 时段向上级电网购电单价及向用户售电单价; $P_{t,grid}$ 为 t 时段从上级电网购电的功

率； n 为电网节点个数； $P_{i,t}$ 为 t 时段接在节点 i 上用户的用电功率。

2) 风力发电机运行维护成本及其弃风成本

$$C_{wd} = \sum_{t=1}^T k_{wd} P_{t,wd}^f \Delta t + \sum_{t=1}^T k_{wd,ab} (P_{t,wd}^f - P_{t,wd}) \Delta t \quad (4)$$

式中： k_{wd} 、 $k_{wd,ab}$ 分别为风机的运行维护成本系数与弃风惩罚系数； $P_{t,wd}^f$ 为 t 时段风机期望输出功率； $P_{t,wd}$ 为风机实际输出功率。

3) 光伏运行维护成本及其弃光成本

$$C_{pv} = \sum_{t=1}^T k_{pv} P_{t,pv}^f \Delta t + \sum_{t=1}^T k_{pv,ab} (P_{t,pv}^f - P_{t,pv}) \Delta t \quad (5)$$

式中： k_{pv} 、 $k_{pv,ab}$ 分别为光伏的运行维护成本系数与弃光惩罚系数； $P_{t,pv}^f$ 为 t 时段光伏期望输出功率； $P_{t,pv}$ 为光伏实际输出功率。

4) 燃气轮机发电成本

$$C_M = \sum_{t=1}^T (a_M P_{t,M}^2 + b_M P_{t,M} + c_M) \Delta t \quad (6)$$

式中： a_M 、 b_M 、 c_M 为燃气轮机成本多项式模型的系数； $P_{t,M}$ 为 t 时段燃气轮机的发电功率。

5) 储能运行成本

$$C_{ESS} = \sum_{t=1}^T k_{ESS} P_{t,ESS} \Delta t \quad (7)$$

式中： k_{ESS} 为储能运行成本系数； $P_{t,ESS}$ 为 t 时段储能的充放电功率。

6) 柔性负荷调度成本

$$C_{load} = \sum_{t=1}^T k_{load} P_{t,load} \Delta t \quad (8)$$

式中： k_{load} 为柔性负荷调用成本系数； $P_{t,load}$ 为 t 时段柔性负荷调用功率。

7) 配电网碳排放成本

$$C_{CO_2} = \rho_C \sum_{t=1}^T (k_e P_{t,grid} + k_g P_{t,M} - \lambda_{load} P_{t,load}^f) \Delta t \quad (9)$$

式中： ρ_C 为碳交易价格； k_e 为与上级电网连接点处的碳排放因子； k_g 为燃气轮机发电的碳排放因子； λ_{load} 为配电网中单位负荷对应的碳排放额度^[23]； $P_{t,load}^f$ 为配电网中合计的总负荷量。

1.2 约束条件

约束条件包括：改进的 DistFlow 支路潮流约束、节点电压约束、支路电流约束、燃气轮机出力约束、储能约束、网络结构约束、无功补偿约束、需求侧响应约束等，如式(10)一式(19)所示。

1) 电压约束

在配电网优化过程中，节点电压应该满足上、下限约束。

$$U_{i,\min} \leq U_{i,t} \leq U_{i,\max} \quad (10)$$

式中： $U_{i,\max}$ 、 $U_{i,\min}$ 分别为节点 i 的电压上、下限； $U_{i,t}$ 为 t 时段节点 i 的电压。

2) 支路电流约束

由于配电网线路传输容量有限，因此需要对支路电流加以限制。

$$I_{ij,t} \leq I^{\max} \quad (11)$$

式中： $I_{ij,t}$ 为 t 时段支路 ij 电流的有效值； I^{\max} 为配电网允许长期流过电流最大值。

3) 改进的 DistFlow 支路潮流约束

考虑本文模型中涉及配电网重构问题，因此基本潮流约束不再能够满足要求，为了防止孤立节点的出现，需要引入 big-M 法对约束进行改进。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{k:(jk) \in \phi_j} P_{jk} = P_j - r_{ij} \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} - P_j^L \\ \sum_{k:(jk) \in \phi_j} Q_{jk} = Q_j - x_{ij} \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} - Q_j^L \\ |P_j^L| > 0 \\ |Q_j^L| > 0 \\ m_{ij} = (1 - z_{ij}) \cdot M \\ U_i^2 - U_j^2 \leq m_{ij} + 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) - (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} \\ U_i^2 - U_j^2 \geq -m_{ij} + 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) - (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} \end{array} \right. \quad (12)$$

式中： i 、 j 、 k 为配电网中节点； ϕ_j 为配电网中所有支路集合； $k:(jk)$ 表示与节点 j 通过配电网支路直接相连的节点 k ； P_j^L 、 Q_j^L 分别为节点 j 计及分布式电源出力的净流出有功、无功负荷； P_{ij} 、 Q_{ij} 分别为支路 ij 首端的有功、无功功率，方向为从节点 i 流向节点 j ； P_{jk} 、 Q_{jk} 分别为支路 jk 首端的有功、无功功率，方向为从节点 j 流向节点 k ； r_{ij} 、 x_{ij} 分别为支路 ij 的电阻与电抗； U_i 、 U_j 分别为节点 i 、 j 电压幅值； z_{ij} 为配电网支路导通状况的布尔变量，当节点 i 、 j 之间的支路导通时， $z_{ij} = 1$ ，当节点 i 、 j 之间的支路断开时， $z_{ij} = 0$ ； m_{ij} 为 big-M 法中引入的人工变量； M 为一个很大的正数。

4) 燃气轮机功率约束

在配电网优化过程中, 燃气轮机输出功率 P_M 应该满足上、下限约束

$$P_{M\min} \leq P_M \leq P_{M\max} \quad (13)$$

式中, $P_{M\max}$ 、 $P_{M\min}$ 分别为微型燃气轮机有功出力上、下限。

5) 光伏与风机出力约束

由于配电网中可能存在弃风弃光的情况, 因此需要对风机和光伏加以约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{t,wd} \leq P_{t,wd}^f \\ 0 \leq P_{t,pv} \leq P_{t,pv}^f \end{cases} \quad (14)$$

6) 储能运行约束

储能装置在配电网优化过程中应该满足充放电功率约束和电量约束。

$$\begin{cases} E_t = E_{t-1} + P_{cE,t-1}\Delta t - P_{dcE,t-1}\Delta t \\ 0 \leq P_{cE,t-1} \leq u_{cE,t} P_{E\max} \\ 0 \leq P_{dcE,t-1} \leq u_{dcE,t} P_{E\max} \\ u_{cE,t} + u_{dcE,t} \leq 1 \\ 0.1 \times E_{\max} \leq E_t \leq 0.9 \times E_{\max} \end{cases} \quad (15)$$

式中: E_t 为蓄电池在 t 时段的电池电量; $P_{cE,t-1}$ 为 $t-1$ 时段蓄电池的充电功率; $P_{dcE,t-1}$ 为 $t-1$ 时段蓄电池的放电功率; $P_{E\max}$ 为蓄电池的最大充放电功率; $u_{cE,t}$ 、 $u_{dcE,t}$ 分别为 t 时段蓄电池充电和放电的布尔变量, 充电时 $u_{cE,t} = 1$ 、 $u_{dcE,t} = 0$, 放电时 $u_{cE,t} = 0$ 、 $u_{dcE,t} = 1$; E_{\max} 为蓄电池的最大容量。

7) 无功补偿约束

为提高系统的功率因数, 降低线路损耗, 需对配电网进行无功补偿并做以下约束。

$$0 \leq Q_{i,t,rpc} \leq Q_{i,rpc_max} \quad (16)$$

式中: $Q_{i,t,rpc}$ 为节点 i 在 t 时段的无功补偿量;

Q_{i,rpc_max} 为节点 i 的最大无功补偿容量。

8) 柔性负荷约束

柔性负荷包含了可削减负荷与可转移负荷, 其中可削减负荷应该满足上下限约束。

$$0 \leq P_{i,t}^{RE} \leq \gamma_{i,t}^{RE} P_{i,t,max}^{RE} \quad (17)$$

式中: $P_{i,t}^{RE}$ 为节点 i 在 t 时段削减的负荷功率; $\gamma_{i,t}^{RE}$ 为削减状态的布尔变量, 当节点 i 在 t 时段存在可削减负荷时, $\gamma_{i,t}^{RE} = 1$, 反之为 0; $P_{i,t,max}^{RE}$ 为节点 i 在 t 时段最大可削减负荷功率。

对于可转移负荷而言, 需要添加约束以保证转入负荷总量等于转出负荷总量以及一个节点在相同时段内不能同时转入、转出负荷。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,t}^{TRin} \leq \gamma_{i,t}^{in} P_{i,t,max}^{TRin} \\ 0 \leq P_{i,t}^{TRout} \leq \gamma_{i,t}^{out} P_{i,t,max}^{TRout} \\ \gamma_{i,t}^{in} + \gamma_{i,t}^{out} \leq 1 \\ \sum_t (P_{i,t}^{TRin} + P_{i,t}^{TRout}) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中: $P_{i,t}^{TRin}$ 、 $P_{i,t,max}^{TRin}$ 分别为节点 i 在 t 时段内转入的负荷功率及其上限值; $P_{i,t}^{TRout}$ 、 $P_{i,t,max}^{TRout}$ 分别为节点 i 在 t 时段内转出的负荷功率及其上限值; $\gamma_{i,t}^{in}$ 、 $\gamma_{i,t}^{out}$ 分别为节点 i 在 t 时段内转入和转出负荷功率的布尔变量, 当存在转入负荷时, $\gamma_{i,t}^{in} = 1$, 反之为 0, 当存在转出负荷时, $\gamma_{i,t}^{out} = 1$, 反之为 0。

9) 网络拓扑约束

为了保证配电网安全运行, 一般要求配电网呈辐射状运行, 即网络中不存在环状拓扑结构。

$$\sum_{(ij) \in \phi} z_{ij} = n - n_s \quad (19)$$

式中, n_s 为配电网的根节点个数。

1.3 优化模型凸性转化

上述配电网优化模型中由于存在平方项, 属于非凸规划, 本文通过二阶锥松弛技术, 将其转变为混合整数凸规划模型。

$$\begin{cases} V_i = U_i^2 \\ L_{ij} = I_{ij}^2 = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} \end{cases} \quad (20)$$

式中: V_i 为节点 i 的电压平方值; L_{ij} 为支路 ij 的电流平方值; I_{ij} 为支路 ij 的电流。

将式(20)中的两个约束添加到模型中, 用新变量替代原约束条件中的对应项, 对式(10)一式(12)进行转化。

$$(U_{i,\min})^2 \leq V_i \leq (U_{i,\max})^2 \quad (21)$$

$$L_{ij,t} \leq z_{ij} (I^{\max})^2 \quad (22)$$

$$\begin{cases} \sum_{k:(jk) \in \phi} P_{jk} = P_j - r_{ij} L_{ij} - P_j^L \\ \sum_{k:(jk) \in \phi} Q_{jk} = Q_j - x_{ij} L_{ij} - Q_j^L \\ V_i - V_j \leq m_{ij} + 2(r_{ij} P_j + x_{ij} Q_j) - (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) L_{ij} \\ V_i - V_j \geq -m_{ij} + 2(r_{ij} P_j + x_{ij} Q_j) - (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) L_{ij} \end{cases} \quad (23)$$

对于式(20)的非凸形式, 在目标函数是变量 L_{ij} 的严格单调递增函数且节点负荷没有上界的情况下, 可对其进行变形, 如式(24)所示。

$$L_{ij} \geq \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{V_i} \quad (24)$$

再将式(24)等价转换为标准的二阶锥形式:

$$\begin{cases} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ L_{ij} - U_i \end{cases} \leq L_{ij} + U_i \quad (25)$$

原非凸模型通过二阶锥松弛技术转换为混合整数凸规划模型,其最优解搜索空间变为凸可行域,可以通过在 Matlab 中使用 YALMIP 工具箱来调用 MOSEK 求解器求解模型的最优解。

2 协调控制优化分析

2.1 算例参数

选取 IEEE 33 节点配电网系统并配置 DG 和储能系统,如图 1 所示,具体参数见文献[24-25],节

点编号标于图 1,其中实线代表配电网支路,虚线代表配电网重构后可闭合的联络线支路。在节点 11 接入一个容量为 0.4 MW 的燃气轮机,发电成本为 0.692 元/kWh;在节点 7、16 分别接入容量均为 1.5 MW 的光伏电源和风力发电机,其日功率曲线如图 2 所示,风机与光伏的运行维护成本均为 0.2 元/kWh,弃光弃风成本为 0.1 元/kWh;节点 7、8、24、25、32 含有可削减负荷,节点 23、24、31 含有可转移负荷,设置负荷削减补贴为 0.1 元/kWh;并在节点 18 加装一个容量为 1.5 MWh 的储能装置,其运行维护费用为 0.2 元/kWh;结合目前碳交易市场^[26],定碳交易价格为 160 元/吨,单位负荷碳排放额 λ_{load} 为 0.5 吨/MWh;购电与售电的电价采用分时电价,如表 1 所示。

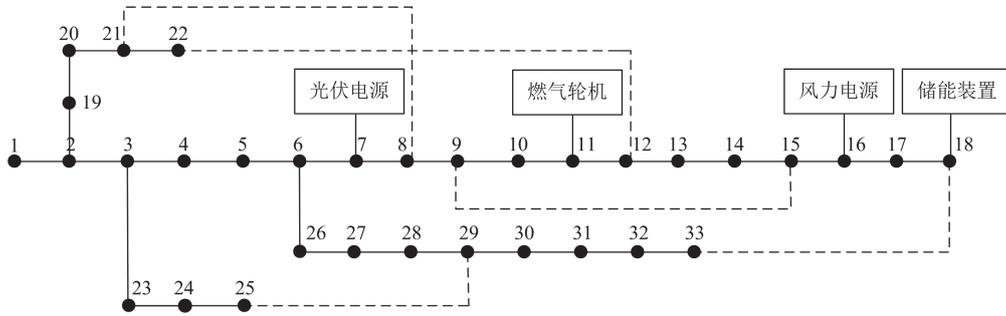


图 1 IEEE 33 节点系统图

Fig. 1 IEEE 33-node system diagram

表 1 各时段电价

Table 1 Time-of-use price

时间段	购电价/ (元/kWh)	售电价/ (元/kWh)
01:00—05:00; 23:00—24:00	0.3249	0.5692
06:00—08:00; 15:00—19:00; 22:00	0.6226	0.8278
09:00—14:00; 20:00—21:00	1.0394	1.118

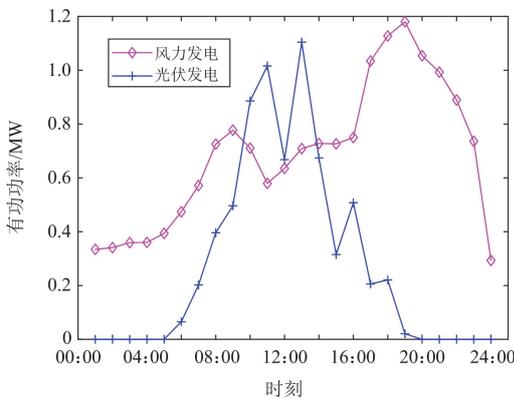


图 2 分布式风电与光伏日功率曲线

Fig. 2 Distributed wind power and photovoltaic daily power curves

2.2 配电网“源-网-荷-储”协调优化结果

在上述已知条件下,应用所提配电网低碳经济优化模型,通过调用 MOSEK 求解器进行混合整数凸规划优化求解。由图 3 可以看出,部分负荷从用电高峰时段(09:00—12:00, 20:00—21:00)转移到了低谷时段(01:00—03:00, 17:00, 23:00—24:00),优化前后负荷的峰谷差由 2.179 MW 下降到了 1.648 MW,达到了削峰填谷的作用,使配电网所有

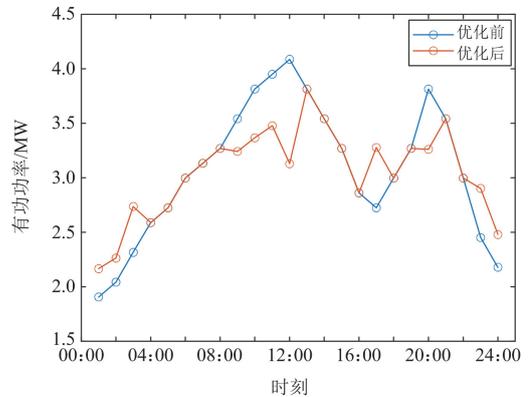


图 3 优化前后的负荷曲线

Fig. 3 Load curves before and after optimization

支路负载率保持在 80% 以下, 提高了配电网运行的安全性。

通过调用储能装置, 可以将部分低谷时段的低价电能储存起来, 并在高峰时段释放出去, 从而缓解配电网压力, 减小线路损耗, 提高经济效益。由于模型目标函数中引入了碳排放成本, 且平衡节点(与上级电网连接点处)的碳排放因子也是随时间变化的, 因此储能装置还可以将部分低碳排放时段的电能储存起来在高碳排放时段释放, 从而降低配电网碳排放, 储能 SOC 变化曲线如图 4 所示, 可以看出分时电价与动态碳排放因子均具有明显的峰谷差, 在购电电价与碳排放因子都相对较低的 00:00—04:00、16:00—18:00 以及 22:00—23:00 低碳低价时间段, 储能装置充电, 在 08:00—13:00 和 19:00—20:00 的高碳高价时段, 储能装置放电, 从而减少了高碳排放因子时段碳基电源的出力, 配电网碳排放降低了 0.672 吨, 获取低储高放效益 496.9 元。

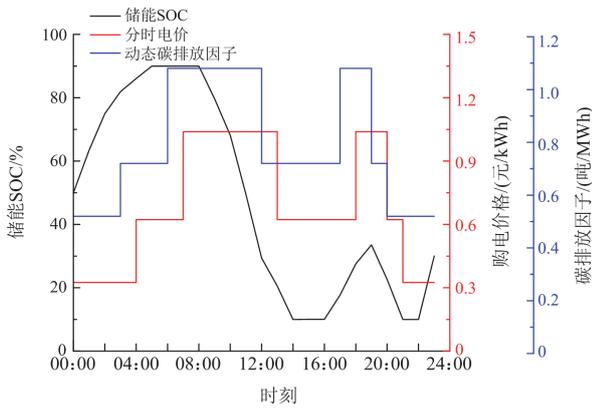


图 4 储能 SOC 变化曲线

Fig. 4 Energy storage SOC change curve

多措施协调控制优化后各时段柔性负荷的调用情况如图 5 所示。

该模型中柔性负荷包含了可削减负荷和可转移负荷两大类, 在引入碳排放成本之后, 调用柔性负荷不仅可以达到削峰填谷、降低线路损耗和提高

配电网经济效益的目的, 还可以将部分高碳排放时段的负荷削减或转移至低碳排放时段, 从而降低配电网碳排放。由图 5 可以看出, 在 10:00—12:00 时段以及 20:00 通过调用柔性负荷对负荷高峰进行削减或转移, 减少了高碳时段碳基电源出力, 降低配电网碳排放 0.822 吨。

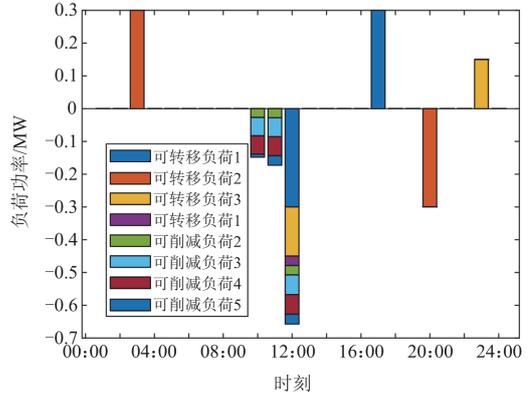


图 5 柔性负荷调用情况

Fig. 5 Flexible load call situation

多措施协调控制优化后的网络拓扑如图 6 所示, 优化后在 03:00 随着负荷分布不均衡的加剧, 为减小线路损耗, 改善电能质量, 配电网优化重构断开了原有的 7-8、8-9、13-14 支路, 连接了 21-8、22-12、33-18 支路, 使得配电网负载不均匀度由 3.872 降低至 2.498, 电网线损由 1.481 MWh 降低至 0.937 MWh, 等效降低碳排放 0.454 吨, 提高经济效益 509.7 元。

优化前后的结果对比如表 2 所示, 在“源-网-荷-储”协调优化下配电网成本相比于经济运行降低了 1780 元, 配电网利润提高了 550 元, 碳排放降低了 2.744 吨, 再加上储能装置和柔性负荷的削峰填谷作用, 配电网线损费用相比于经济运行也降低了 371.59 元, 在降低配电网碳排放的同时又提高了经济效益。

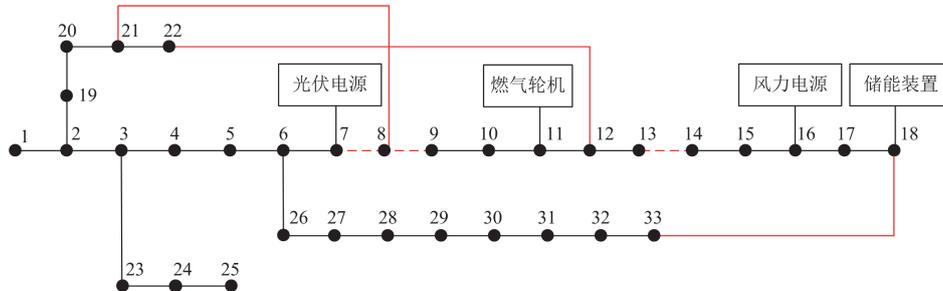


图 6 IEEE 33 节点网络重构拓扑图

Fig. 6 IEEE 33-node network reconstruction topology

表 2 优化前后结果对比

Table 2 Comparison of results before and after optimization

场景	配电网成本/万元	线损费用/元	配电网利润/万元	配电网碳排放/吨
优化前	3.995	967.463	2.573	39.5817
优化后	3.817	595.876	2.628	36.8377

3 配电网降碳效果分析

为了研究不同降碳措施的效果,本文分别对碳交易价格、电源上网电价、分时电价曲线与动态碳排放因子曲线的相关性等因素进行了分析。

3.1 碳交易价格与碳排放的关系

碳交易价格与配电网碳排放的关系如图 7 所示,随着碳交易价格的不断增长,碳排放总体上呈现出降低趋势,当碳交易价格在[50,80]元/吨区间时,碳排放成本小于降碳措施所需成本,配电网碳排放较高;当碳交易价格在[80,350]元/吨区间时,碳排放成本逐渐大于降碳所需成本,出于经济性考虑,碳排放随碳交易价格的不断增长降低明显;当价格在 350 元/吨以上时,所有降碳措施均已采用,碳排放不会再随着碳交易价格的不断增长而降低。

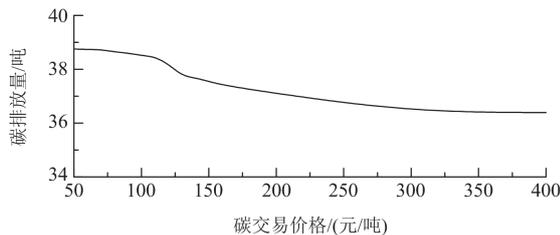


图 7 碳交易价格与碳排放的关系

Fig. 7 Relationship between carbon trading price and carbon emission

碳交易价格与电源出力结构的关系如图 8 所示,在风光发电不可控的情况下,由于燃气轮机的碳排放因子小于平衡节点处,当碳交易价格过低时,出

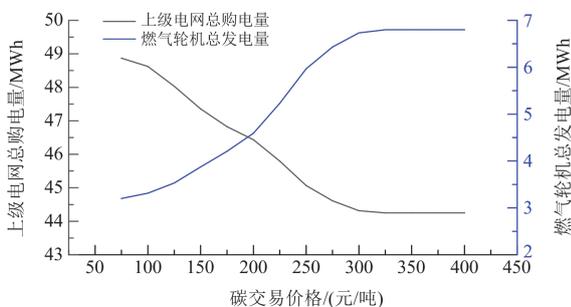


图 8 碳交易价格与电源出力结构的关系

Fig. 8 Relationship between carbon trading price and power supply output structure

于经济性考虑,上网价格相对较高的燃气轮机出力较少;随着碳交易价格的不断提升,为降低配电网碳排放成本,相对更加绿色低碳的燃气轮机出力占比不断增加,当达到 350 元/吨以上时,燃气轮机出力达到最大值,其出力不会再随碳交易价格的提高而增加,模型达到饱和。

同时,碳交易价格对于柔性负荷和储能装置的调度也有着重要的影响,在分时电价曲线与动态碳排放因子曲线相关系数为 0.5 的情况下进行分析,得出碳交易价格对两者的影响分别如图 9、图 10 所示。

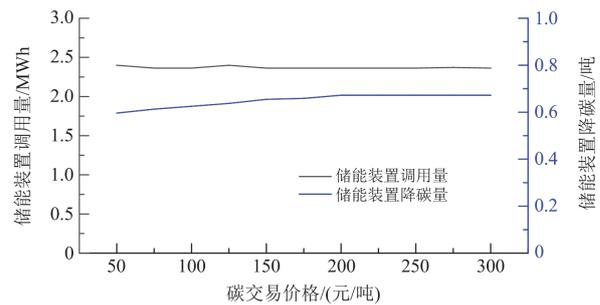


图 9 碳交易价格对储能降碳效果的影响

Fig. 9 Influence of carbon trading price on the carbon reduction effect of energy storage

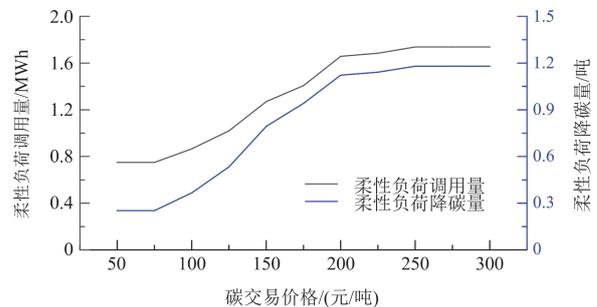


图 10 碳交易价格对柔性负荷降碳效果的影响

Fig. 10 Influence of carbon trading price on the carbon reduction effect of flexible load

由图 9、图 10 可以看出,当碳交易价格较低时,碳排放成本较低,此时为保证配电网的经济效益,储能装置更多用于低储高放获利,柔性负荷只在负荷高峰期间调用以保证线路不重载;随着碳交易价格的提高,柔性负荷的调用总量逐渐提高,将高碳排放时段的电能削减或转移,储能装置的调用总量虽然没有发生明显的变化,但更加偏向于将电能从高碳排放时段转移至低碳排放时段,两者的降碳量均有所提高。

3.2 源侧电价与碳排放的关系

燃气轮机上网电价与配电网碳排放的关系如图 11 所示,碳排放总体上呈现出随燃气轮机上网电

价增长而上升的趋势。由于燃气轮机的碳排放因子小于平衡节点处, 故当上网电价较低时, 燃气轮机出力占比较高, 配电网碳排放较低。又因采用分时电价的缘故, 随着电价的增长, 在部分时段内购电所产生的总成本逐渐小于燃气轮机发电所产生的总成本, 使其发电量减少, 碳排放增加。当电价在[1300, 1500]元/MWh 区间时燃气轮机因发电成本过高而不再工作, 模型达到饱和, 此时配电网碳排放达到最大值。

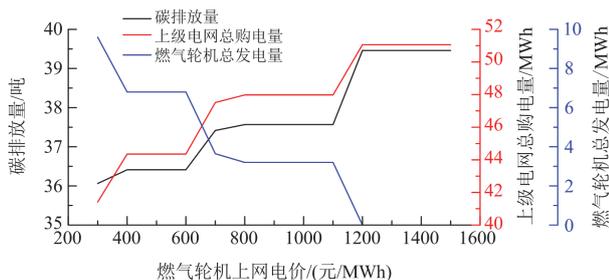


图 11 燃气轮机上网电价与碳排放的关系

Fig. 11 Relationship between on-grid electricity price and carbon emission of gas turbine

购电电价与配电网碳排放的关系如图 12 所示, 碳排放总体上呈现出随上级电网购电电价增长而下降的趋势。由于燃气轮机的碳排放因子小于平衡节点处, 故当平时段购电电价在[498.08,572.792]元/MWh 区间时, 存在部分时段购电所产生的总成本小于燃气轮机发电所产生总成本, 使其发电占比较低, 配电网碳排放较高; 当电价在[572.792,622.6]元/MWh 区间时, 随着购电成本增加, 燃气轮机发电占比提高, 碳排放下降; 由于燃气轮机容量有限, 当电价大于 622.6 元/MWh 时, 其发电量达到最大值, 模型达到饱和, 配电网碳排放不会再随着平时段购电电价的增加而降低。

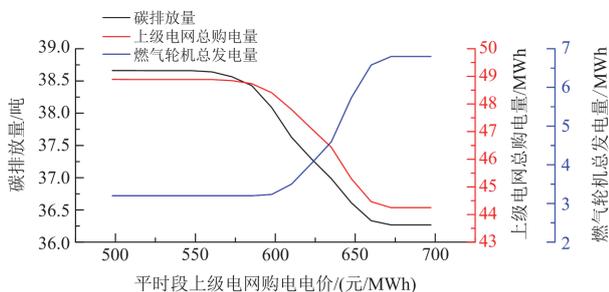


图 12 购电电价与碳排放的关系

Fig. 12 Relationship between purchase electricity price and carbon emission

3.3 柔性负荷和储能装置降碳效果分析

柔性负荷与储能装置的降碳性和经济性与平衡

节点处的分时电价曲线和动态碳排放因子曲线的相关性有着密切的联系, 因此本文通过引入斯皮尔曼相关系数对两条曲线的相关性进行量化, 并设定了多组不同相关系数的场景, 如表 3 所示, 以此分析在不同场景下储能装置与柔性负荷对于配电网的影响。

表 3 不同相关系数下柔性负荷与储能装置的降碳效果

Table 3 Carbon reduction effect of flexible load and energy storage device under different correlation coefficients

斯皮尔曼 相关系数	储能装置 降碳量/吨	电网低储高 放收益/元	柔性负荷 降碳量/吨	柔性负荷调 用成本/元
1	0.788	504	1.31	163.06
0.8	0.737	489.92	1.31	163.06
0.5	0.655	472.63	0.854	132.63
0.3	0.556	472.56	0.389	112.14
0.125	0.394	472.56	0.253	100.53
-0.1	0.228	472.56	0.068	89.31
-0.2	0.168	472.56	0.02	89.31

由表 3 可以看出, 当分时电价曲线与动态碳排放因子曲线相关系数较高时, 储能装置与柔性负荷在实现经济运行的同时可以削减或转移部分高碳时段的负荷, 从而降低配电网碳排放; 随着分时电价曲线与动态碳排放因子曲线相关系数的降低, 在考虑配电网综合成本最优的情况下, 储能装置通过牺牲部分低储高放收益降低碳排放, 但受限于两曲线相关系数降低的影响, 储能装置的降碳量仍有所下降, 同时柔性负荷的降碳能力也随相关系数的降低而减弱, 导致柔性负荷调用量逐步缩减。当分时电价曲线与动态碳排放因子曲线相关系数降低到一定值时, 为保证配电网经济性, 储能装置调度完全受分时电价影响, 收益维持恒定, 柔性负荷只为保证配电网不重载而调用, 两者降碳量随相关系数的减小而降低, 但在正相关系数下两者均能保证具有不错的降碳能力。

3.4 配电网优化重构降碳效果分析

配电网优化重构在降低线路损耗方面的能力与支路载荷均衡度有很大的关系, 因此本文通过引入支路载荷均匀度指标对均衡度进行量化^[27], 指标越大则说明支路载荷分布越不均匀, 反之则说明支路载荷分布越均匀。为分析其对配电网重构优化效果的影响, 本文设定了多组不同支路载荷均衡度的负荷分布场景, 如表 4 所示。

由表 4 中的优化前后配电网载荷均匀度指标可以看出, 经过配电网优化重构后, 所有场景指标均有所降低, 载荷分布均匀度有了较大程度的改善, 且改善效果整体上呈现出随支路载荷分布均匀度指

标的增大而提高的趋势, 较大程度地降低了线路损耗, 提高了电源侧电能的利用率, 达到了降低配电网碳排放的目的。

表 4 不同场景下配电网优化重构的效果

Table 4 Effect of optimal reconfiguration of distribution network in different scenarios

场景	优化前荷	优化后荷	优化前	优化后	降碳量/ 吨
	载均匀度 指标	载均匀度 指标	线路损 耗/MWh	线路损 耗/MWh	
1	3.714	2.669	2.027	1.396	0.461
2	3.69	2.345	2.001	1.201	0.576
3	3.515	2.334	1.843	1.2	0.463
4	3.484	2.479	1.805	1.177	0.458
5	3.281	2.342	1.717	1.11	0.443
6	2.872	2.159	1.423	0.975	0.327
7	4.021	2.382	2.223	1.215	0.736

4 结论

本文提出了一种“源-网-荷-储”协调低碳经济优化模型, 并通过 IEEE 33 节点算例进行仿真, 对不同降碳措施进行效果分析, 研究了配电网经济运行和低碳运行之间的协调与矛盾关系, 在上级电网与配电网电源发电容量充足, 储能装置、柔性负荷等方面的降碳措施调用量均未达到其限值的条件下, 得出以下结论。

1) 通过“源-网-荷-储”协调低碳经济优化, 可以显著减小线路损耗, 降低运行成本, 提高电力系统安全性, 同时还可以显著降低供电区域碳排放。

2) 传统配电网经济运行需考虑网损及电价等影响运行成本的因素, 而低碳经济运行在此基础上考虑了碳交易价格、碳排放因子等因素, 这两种优化控制方式的差别总结如下。

(1) 在碳交易价格相对于电价很低时, 两者之间的运行差异较小, 因为降碳的收益较小。随着碳交易价格的提高以及动态碳排放因子峰谷差的增大, 储能装置与柔性负荷的调度策略呈现出明显的转变趋势, 由传统的电价套利逐步转向以动态碳排放因子为导向的降碳套利。

(2) 在绿电电价保持不变的情况下, 经济运行方式优先调用低价电源, 低碳经济运行因考虑了减碳收益, 会比经济运行方式调用更多的绿色电源发电, 减少碳基电源出力。

(3) 动态碳排放因子变化的峰谷特征与电价峰谷特征相关性越大, 储能装置与柔性负荷在削峰填谷时的降碳能力也越强, 即节约成本和降碳效果互相加强; 反之, 则互相削弱。

3) 当荷载不均匀度较高时, 通过配电网优化重构能够有效改善荷载分布均匀度, 可以在负荷功率不变的条件下减小线路损耗, 提高电源侧电能利用率, 等效降低碳基电源出力, 达到减小碳排放的目的, 且优化效果与重构前支路荷载均匀度指标呈近似正相关。

参考文献

- [1] 吴文传, 张伯明, 巨云涛. 主动配电网网络分析与运行调控[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [2] 吴任博, 黄奕俊. 高比例可再生能源接入下自愈性能的分布式配电网重构策略研究[J]. 发电技术, 2024, 45(5): 975-982.
WU Renbo, HUANG Yijun. Research on reconfiguration strategy of distributed distribution network with self-healing performance under high-proportion renewable energy access[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(5): 975-982.
- [3] 杜浩程, 李世龙, 巨云涛, 等. 基于压缩开关候选集合的分布鲁棒配电网重构方法[J]. 中国电力, 2024, 57(10): 12-24, 35.
DU Haocheng, LI Shilong, JU Yuntao, et al. A distributional robust distribution network reconfiguration method based on compressed switch candidate set[J]. Electric Power, 2024, 57(10): 12-24, 35.
- [4] 周步祥, 黄伟, 臧天磊. 计及共享储能与柔性负荷的微电网鲁棒优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(2): 48-57.
ZHOU Buxiang, HUANG Wei, ZANG Tianlei. Robust optimal scheduling of microgrid considering shared energy storage and flexible load[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(2): 48-57.
- [5] 席俊辉, 童晓阳, 李智, 等. 考虑风电不确定性的交直流配电网低碳分布鲁棒优化调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(11): 59-66.
XI Junye, TONG Xiaoyang, LI Zhi, et al. Low-carbon distribution robust optimal scheduling of AC/DC distribution network considering wind power uncertainty[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(11): 59-66.
- [6] 王利猛, 刘雪梦, 李扬, 等. 阶梯式碳交易机制下考虑需求响应的综合能源系统低碳优化调度[J]. 电力建设, 2024, 45(2): 102-114.
WANG Limeng, LIU Xuemeng, LI Yang, et al. Low-carbon optimal dispatch of integrated energy system considering demand response under the tiered carbon trading mechanism[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(2): 102-114.
- [7] 和萍, 刘鑫, 宫智杰, 等. 高比例可再生能源电力系统

- 源荷储联合调峰分层优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(18): 112-122.
- HE Ping, LIU Xin, GONG Zhijie, et al. Hierarchical optimization operation model for joint peak-load regulation of source-load-storage in a high proportion of renewable energy power system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(18): 112-122.
- [8] 谢亮, 李远卓, 崔慧军, 等. 考虑蓄电池储能的配电网动态网络重构[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(3): 70-74.
- XIE Liang, LI Yuanzhuo, CUI Huijun, et al. Dynamic network reconfiguration of distribution network considering battery energy storage[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(3): 70-74.
- [9] 王蓬蓬, 宋运忠. 计及最恶劣场景概率和供需灵活性的综合能源系统分布鲁棒低碳优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(13): 78-89.
- WANG Pengpeng, SONG Yunzhong. Distributed robust low-carbon optimal scheduling of an integrated energy system considering worst-case scenario probability and flexibility of supply and demand[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(13): 78-89.
- [10] 李政麒, 蔡晔, 唐夏菲, 等. 面向降损场景的移动储能与网络重构协同优化策略[J]. 电力建设, 2023, 44(9): 137-148.
- LI Zhengqi, CAI Ye, TANG Xiafei, et al. Collaborative optimization strategy of mobile energy storage devices and distribution network reconfiguration for power loss reduction scenarios[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(9): 137-148.
- [11] 罗龙波, 陈明辉, 王雯沁, 等. 考虑分级重构的配电网安全低碳两阶段运行优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(14): 36-45.
- LUO Longbo, CHEN Minghui, WANG Wenqin, et al. A two-stage secure and low-carbon operation optimization for a distribution network considering multi-level reconfiguration[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 36-45.
- [12] 李伊竹林, 韩肖清, 李廷钧, 等. 基于动态电-碳需求响应的综合能源系统日前多元低碳交易方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(12): 24-35.
- LI Yizhulin, HAN Xiaoqing, LI Tingjun, et al. Multifaceted day-ahead low-carbon trading method for integrated energy systems based on dynamic electricity-carbon demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(12): 24-35.
- [13] 刘妍, 胡志坚, 陈锦鹏, 等. 含碳捕集电厂与氢能多元利用的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(1): 31-40.
- LIU Yan, HU Zhijian, CHEN Jinpeng, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system considering carbon capture power plant and multi-utilization of hydrogen energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(1): 31-40.
- [14] 孙毅, 谷家训, 郑顺林, 等. 考虑广义储能和 LCA 碳排放的综合能源系统低碳优化运行策略[J]. 上海交通大学学报, 2024, 58(5): 647-658.
- SUN Yi, GU Jiayun, ZHENG Shunlin, et al. Low-carbon optimal operation strategy of integrated energy system considering generalized energy storage and LCA carbon emission[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2024, 58(5): 647-658.
- [15] 马广超, 颜宁, 王明强, 等. 基于“碳-能”协同响应的综合能源系统季节性低碳经济优化调度方法[J]. 电网技术: 1-13[2024-09-25]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0474>.
- MA Guangchao, YAN Ning, WANG Mingqiang, et al. Seasonal low-carbon economy optimization and dispatching method of integrated energy system based on “carbon-energy” synergistic response[J]. Power System Technology: 1-13[2024-09-25]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0474>.
- [16] 武晓滕, 李晨晨, 党博. 基于改进二进制 PSO 配电网动态重构[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2024, 39(4): 124-131.
- WU Xiaomeng, LI Chenchen, DANG Bo. Dynamic reconfiguration of distribution network based on improved binary particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2024, 39(4): 124-131.
- [17] 张照堃, 何莉, 吴霜. 基于改进非支配排序遗传算法的配电网动态重构[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(21): 8916-8922.
- ZHANG Zhaolong, HE Li, WU Shuang. Dynamic reconfiguration of distribution network based on improved NSGA-II algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(21): 8916-8922.
- [18] 杨挺, 刘豪, 王静, 等. 基于深度强化学习的园区综合能源系统低碳经济调度[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3604-3613.
- YANG Ting, LIU Hao, WANG Jing, et al. Deep reinforcement learning-based low-carbon economic dispatch of park integrated energy system[J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3604-3613.
- [19] WANG Tao, HUANG Zhu, YING Ruixuan, et al. A low-carbon operation optimization method of ETG-RIES based on adaptive optimization spiking neural P systems[J].

- Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(5): 162-177.
- [20] 王晋君, 李童宇, 陈衡, 等. 基于二阶锥规划最优潮流计算的主动配电网动态重构研究[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(5): 58-66.
WANG Jinjun, LI Tongyu, CHEN Heng, et al. Dynamic reconstruction of active distribution networks based on second-order cone programming for optimal power flow calculation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 58-66.
- [21] 张俊潇, 高崇, 李京平, 等. 考虑低碳和柔性负荷的有源配电网混合整数二阶锥规划[J]. 电力建设, 2022, 43(12): 66-73.
ZHANG Junxiao, GAO Chong, LI Jingping, et al. Mixed-integer second-order cone programming for active distribution networks considering low-carbon and flexible loads[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(12): 66-73.
- [22] 张琳娜, 乐健, 李昊旻. 基于混合整数线性规划的含ZIP负荷有源配电网重构方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 25-32.
ZHANG Linna, LE Jian, LI Haojiong. Reconfiguration method of an active distribution network with a ZIP load model based on mixed integer linear programming[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 25-33.
- [23] 江训谱, 吕施霖, 王健, 等. 考虑阶梯碳交易和最优建设时序的园区综合能源系统规划[J]. 电测与仪表, 2023, 60(12): 11-19.
JIANG Xunpu, LÜ Shilin, WANG Jian, et al. Park-level integrated energy system planning considering tiered carbon trading and optimal construction timing under dual carbon goals[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(12): 11-19.
- [24] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [25] BAUER T, LIPS H P, THIELE G, et al. Operational tests on HVDC thyristor modules in a synthetic test circuit for the Sylmar East Restoration Project[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1151-1158.
- [26] 张妍, 冷媛, 尚楠, 等. 考虑碳排放需求响应及碳交易的电力系统双层优化调度[J]. 电力建设, 2024, 45(5): 94-104.
ZHANG Yan, LENG Yuan, SHANG Nan, et al. Bi-level optimal scheduling of power system considering carbon demand response and carbon trading[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(5): 94-104.
- [27] 汲国强, 吴文传, 张伯明, 等. 以降损和载荷均衡为目标的地区电网网络重构快速算法[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 172-178.
JI Guoqiang, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Regional network reconfiguration algorithm for loss reduction and loading equilibrium[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 172-178.

收稿日期: 2024-07-29; 修回日期: 2025-01-10

作者简介:

耿光飞(1970—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为碳排放、电网规划、无功优化; E-mail: gf_geng@139.com

宋方烁(2000—), 男, 硕士, 研究方向为配电网优化运行; E-mail: 1559965703@qq.com

汪泽州(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化。E-mail: 253557954@qq.com

(编辑 张颖)