

考虑碳排放因子与动态重构的主动配电网双层优化策略

鄢仁武^{1,2}, 林剑雄¹, 李培强³, 吴国耀⁴, 匡宇⁵

(1.福建理工大学电子电气与物理学院, 福建 福州 350118; 2.智能电网仿真分析与综合控制福建省高校工程研究中心, 福建 福州 350118; 3.湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 4.国网福建营销服务中心, 福建 福州 350013; 5.国网新源浙江磐安抽水蓄能有限公司, 浙江 金华 322304)

摘要:为提高光伏的消纳率,促进主动配电网低碳经济运行,提出一种考虑碳排放因子与动态重构的主动配电网双层优化策略。上层计及动态重构、储能设备和分布式光伏多种主动管理措施,减少系统网损成本和弃光成本,实现主动配电网最优经济运行;下层基于碳排放流理论,建立以动态碳排放因子为引导信号的低碳需求响应模型,充分挖掘用户侧减碳潜力。针对模型特征,分别采用基于二阶锥规划和改进蜣螂优化算法进行求解,通过改进 IEEE 33 节点系统验证了该策略能够有效降低电压越限风险,提升主动配电网运行的低碳经济性。

关键词:主动配电网;动态重构;低碳需求响应;动态碳排放因子;改进蜣螂优化算法

中图分类号:TM73 **文献标志码:**A

引用格式:鄢仁武,林剑雄,李培强,等.考虑碳排放因子与动态重构的主动配电网双层优化策略[J].山东大学学报(工学版),2025,55(2):16-27.

YAN Renwu, LIN Jianxiong, LI Peiqiang, et al. Bi-level optimization strategy for active distribution networks considering carbon emission factors and dynamic reconfiguration[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(2):16-27.

Bi-level optimization strategy for active distribution networks considering carbon emission factors and dynamic reconfiguration

YAN Renwu^{1,2}, LIN Jianxiong¹, LI Peiqiang³, WU Guoyao⁴, KUANG Yu⁵

(1. School of Electronic, Electrical Engineering and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, Fujian, China; 2. Fujian Provincial University Engineering Research Center for Simulation Analysis and Integrated Control of Smart Grid, Fuzhou 350118, Fujian, China; 3. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 4. State Grid Fujian Marketing Service Center, Fuzhou 350013, Fujian, China; 5. State Grid Xinyuan Company Zhejiang Pan'an Pumped Storage Co., Ltd., Jinhua 322304, Zhejiang, China)

Abstract: To improve the consumption rate of photovoltaic and promote the low-carbon and economic operation of active distribution networks, a bi-level optimization strategy for active distribution networks that considered factors of carbon emission and dynamic reconfiguration was proposed. The upper-level considered dynamic reconfiguration, energy storage devices and distributed photovoltaic multiple active management measures to reduce the system network loss cost and light abandonment cost that realized the optimal economic operation of the active distribution network. The lower-level established a low-carbon demand response model based on the theory of carbon emission flow with the dynamic carbon emission factor as the guiding signal, which can fully explore the potential of carbon reduction on the user side. According to the characteristics of this model, the second-order cone planning and improved dung beetle optimization algorithm were used to solve the converted model, respectively. The simulation of the improved IEEE 33-bus system was carried out to verify the effectiveness of the proposed strategy in reducing the risk of voltage overruns and promoting the low-carbon economy of active distribution network operation.

Keywords: active distribution networks; dynamic reconfiguration; low-carbon demand response; dynamic carbon emission factors; improved dung beetle optimization algorithm

收稿日期:2024-01-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52377097)

第一作者简介:鄢仁武(1981—),男,福建福州人,副教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为综合能源系统低碳优化调度。

E-mail: yrw2010@fjut.edu.cn

0 引言

随着中国“双碳”目标和构建新型电力系统战略目标的提出^[1],风电和光伏(photovoltaic, PV)等分布式电源的装机容量逐步提升,对配电网的安全稳定运行带来巨大挑战,传统的“源随荷动”运行方式也不再适用。主动配电网(active distribution network, ADN)概念的提出为配电网的运行控制提供了新的思路。它具备灵活的网络结构、分布式电源、需求侧响应、储能系统(energy storage systems, ESS)等多元可控资源,能够有效应对高比例新能源并网所带来的影响^[2-3]。因此,合理调控各类可控资源对实现“源网荷储”智慧联动、提升ADN运行安全、经济以及低碳性具有重大意义。

目前已有大量文献对ADN的优化运行进行了研究:文献[4]考虑电动汽车时空分布特性,对电动汽车负荷进行精准预测,在此基础上构建计及ADN动态重构和多种主动管理措施的有功、无功联合优化模型,有效降低了系统运行成本和电压波动;文献[5]利用分布式加速交替方向乘子法对含分布式电源的ADN进行分区优化调度,结果表明该策略能够有效促进分布式电源就地消纳,减少功率倒送对上级电网的影响;文献[6]构建含日前优化、日内滚动、秒级监控3个时间尺度的“源网荷储”协调优化模型,多级协调、逐级细化,保证经济运行的同时能够快速消除ADN的运行安全问题;文献[7]提出基于模型预测控制的“源网储”协调优化策略,能够提升系统经济运行同时兼顾电压质量。上述文献着重于ADN运行的经济性,缺少对系统运行低碳性的考量。

电力系统作为主要碳排放来源之一,其低碳经济性运行已得到广泛关注。文献[8-9]利用碳交易机制实现电力经济性和低碳环保性;文献[10]针对系统内多区域中的发电机组出力问题,引入碳排放总量约束,实现系统分布式低碳经济调度;文献[11]考虑碳捕集电站的运行特性,充分挖掘风、火、核、协同碳捕集电站联合优化的调度潜力和减碳可行性。上述研究主要是利用碳配额以及优化调度的手段从电源侧方面挖掘低碳潜力,没有考虑到用户侧用电行为对降低系统碳量的反作用。碳排放流理论能够精准刻画电力系统全环节的碳排放分布情况,为引导用户直接参与系统碳减排提供理论支撑^[12]。基于此,文献[13]提出以动态碳排放因

子为引导信号的电力系统低碳需求响应新机制;文献[14]进一步对不同类型的负荷进行细化,分析其特点并制定与之匹配的低碳需求响应策略,但是忽略了功率传输过程中产生的有功损耗以及节点电压安全范围约束;文献[15]为供给侧电源和需求侧资源制定了经济预调度与低碳调度两阶段ADN运行优化策略,但是没有考虑ADN动态重构这一主动管理手段。

在上述研究背景下,本研究基于碳排放流理论,分析含PV的ADN碳排放流分布特点,提出一种考虑碳排放因子与动态重构的主动配电网双层优化策略。上层为ADN最优经济调度模型,综合考虑ADN线路潮流、电压幅值等安全稳定运行的约束条件下,联合ADN动态重构、PV、ESS主动管理措施实现网损和弃光成本最低;下层根据上层优化后支路潮流结果计算碳排放流分布,结合动态碳排放因子,以调度成本和碳排放总量最低为目标优化调整负荷曲线,充分发挥用户侧响应对ADN低碳运行的促进作用;采用二阶锥规划与改进蜣螂优化(improved dung beetle optimizer, IDBO)算法协同求解上述双层模型,通过改进的IEEE 33节点算例进行仿真,验证所提策略能够有效兼顾ADN运行的经济性和低碳性,减少电压越限风险。

1 ADN碳排放流理论及需求响应模型

传统价格型需求响应一般依据负荷水平高低划分峰谷时段,随着PV在ADN中的渗透率不断提升,不同时刻PV发电量占比不同,导致配电系统的碳排放呈现出时间差异性。某些时刻,虽然负荷需求水平高,但PV发电量占比大,系统整体的碳排放水平依然较低。因此,本研究从“碳视角”出发,引入基于碳排放流理论的动态碳排放因子^[13],并以此为依据,划分出高碳、平碳、低碳用电时刻,构建实时电价的弹性需求响应模型,引导用户调整用电行为,改变ADN负荷分布,促进可再生能源的消纳,减少系统碳排放量。

1.1 ADN碳排放流的分布特点

电力系统碳排放流是依赖于系统潮流而形成的一种虚拟网络流,在网络中跟随潮流流动,赋予支路潮流碳排放的标签。以图1所示的简单含源ADN络为例,分析ADN碳排放流分布特点。

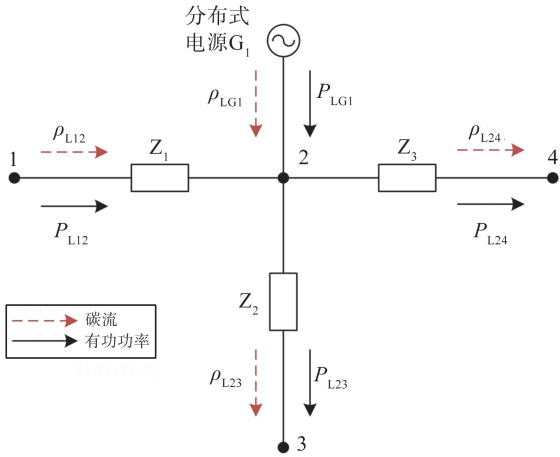


图1 有源ADN碳排放流示意图

Fig.1 Schematic diagram of ADN carbon flows

根据共享比例原则^[16],任何一条流出节点支路潮流中,都存在流入该节点支路潮流的分量,因此一条流出该节点支路的碳流率应为所有流入该节点支路对该流出支路碳流率贡献之和。支路24的碳流密度

$$\rho_{L24} = \frac{\sum_{i \in \xi^+} P_{L24} \rho_{Li}}{\sum_{s \in \xi^+} P_{Ls}} = \frac{\sum_{i \in \xi^+} P_{Li} \rho_{Li}}{\sum_{s \in \xi^+} P_{Ls}} = \frac{\sum_{s \in \xi^+} L_{Ls}^{CEF}}{\sum_{s \in \xi^+} P_{Ls}} = w_j = w_2, \quad (1)$$

式中: ξ^+ 为有功功率流入节点 j 的所有支路集合; ρ_{Li} 为支路 i 的碳流密度,其值为该支路的碳流率 L_{Ls}^{CEF} 与有功功率 P_{Ls} 之比; w_j 为节点 j 的碳势。

由式(1)可知,流出潮流支路的碳流密度与该支路的上游节点碳势相等。不同于高压输电网,配电网一般具有“闭环设计,开环运行”特征^[17],即网络不存在循环功率,故对于无源配电网,任一节点的注入功率仅由该节点的唯一上游节点提供,此时,所有节点碳势保持一致且均等于主网碳势;当ADN中接入分布式电源和储能装置时,分布式电源和储能放电功率将影响所在节点的碳势,甚至影响该节点的上游节点。因此,在已知系统潮流分布、网络结构以及主网碳势时,可计算整个ADN的碳排放流分布。

1.2 考虑动态碳排放因子的价格型需求响应模型

动态碳排放因子反映了调度周期内不同时刻用户单位用电行为所对应产生的碳排放量^[13],其数学模型为

$$D_{CO_2,t} = \left(\sum_{j=1}^{N_n} P_{j,t}^{load} w_{j,t} \right) / \left(\sum_{j=1}^{N_n} P_{j,t}^{load} \right), \quad (2)$$

式中, N_n 为节点总数, $D_{CO_2,t}$ 为 t 时刻ADN的动态碳排放因子, $P_{j,t}^{load}$ 为 t 时刻节点 j 的有功负荷。

价格型需求响应一般是通过调整电价改变原有的用电计划,负荷响应程度与价格变化量常采用弹性系数 λ 表示,其表达式为

$$\lambda = \frac{\Delta P/P}{\Delta C/C}, \quad (3)$$

式中, P 和 ΔP 分别为电量及其变化量, C 和 ΔC 分别为电价及其变化量。弹性系数进一步可写为矩阵形式

$$H = \begin{bmatrix} \lambda_{ll} & \lambda_{lf} & \lambda_{lh} \\ \lambda_{fl} & \lambda_{ff} & \lambda_{fh} \\ \lambda_{hl} & \lambda_{hf} & \lambda_{hh} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中, λ_{ll} 、 λ_{ff} 和 λ_{hh} 分别为低碳、平碳、高碳时段自弹性系数, λ_{lf} 、 λ_{lh} 、 λ_{fl} 、 λ_{fh} 、 λ_{hl} 和 λ_{hf} 分别为互弹性系数。

需求响应后负荷需求可进一步表示为

$$\begin{bmatrix} P_{1,1} \\ \vdots \\ P_{1,t} \\ \vdots \\ P_{1,T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{0,1} \\ \vdots \\ P_{0,t} \\ \vdots \\ P_{0,T} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{0,1} & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & P_{0,t} & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & P_{0,T} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta C_1/C_{0,1} \\ \vdots \\ \Delta C_t/C_{0,t} \\ \vdots \\ \Delta C_T/C_{0,T} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中, $P_{0,t}$ 、 $P_{1,t}$ 分别为 t 时刻需求响应前后负荷需求, $\Delta C_t/C_{0,t}$ 为 t 时刻电价变化率, E 矩阵由弹性矩阵 H 扩展而来, T 为调度周期。

以一天为调度周期,根据动态碳排放因子变化情况,引入偏大、偏小型模糊隶属度函数确定高、低碳时段^[18],其余则为平碳时段,即

$$\begin{cases} u_A = \frac{D_{CO_2,t} - D_{CO_2,\min}}{D_{CO_2,\max} - D_{CO_2,\min}} \\ u_B = \frac{D_{CO_2,\max} - D_{CO_2,t}}{D_{CO_2,\max} - D_{CO_2,\min}} \end{cases}, \quad (6)$$

式中, u_A 、 u_B 分别为高、低碳隶属度, $D_{CO_2,\max}$ 、 $D_{CO_2,\min}$ 分别为最大、最小动态碳排放因子。

2 双层优化模型

本研究提出的ADN优化模型是一种涉及“源荷网储”的双层优化运行模型。上层模型为日前最

优经济调度模型,对其求解得到光伏、储能最优时序出力、各个时段开关动作情况以及系统潮流分布。根据上层结果计算各个节点碳势及动态碳排放因子,将其传入下层模型并求解下层需求响应模型。根据下层负荷需求响应结果更新负荷数据,将其再次传入上层经济调度模型中。

2.1 上层优化模型

2.1.1 目标函数

上层模型以网损、弃光惩罚费用之和 F_1 最小为目标函数,即

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{ij \in \xi^{\text{Line}}} C_{\text{loss}} I_{ij,t}^2 R_{ij} \Delta t + \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \xi^{\text{PV}}} C_{\text{pvloss}} (P_{i,t}^{\text{PV,Pre}} - P_{i,t}^{\text{PV}}) \Delta t, \quad (7)$$

式中, ξ^{Line} 为包含联络线路在内的所有支路集合, ξ^{PV} 为 ADN 中接入 PV 的节点集合, C_{loss} 、 C_{pvloss} 分别为网损、弃光费用, $P_{i,t}^{\text{PV,Pre}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{PV}}$ 分别为 t 时刻接入节点 i 的 PV 预测有功功率和实际注入节点 i 的有功功率, $I_{ij,t}$ 为支路 ij 在 t 时刻的有效电流。

2.1.2 约束条件

(1) DistFlow 潮流约束

DistFlow 潮流模型是一种将支路功率作为研究对象而建立的潮流方程^[19],常用于交流配电网中,其数学模型为

$$\sum_{k \in \alpha(j)} P_{jk,t} - \sum_{i \in \beta(j)} (P_{ij,t} - I_{ij,t}^2 R_{ij}) = P_{j,t}^{\text{in}}, \quad (8)$$

$$\sum_{k \in \alpha(j)} Q_{jk,t} - \sum_{i \in \beta(j)} (Q_{ij,t} - I_{ij,t}^2 X_{ij}) = Q_{j,t}^{\text{in}}, \quad (9)$$

$$U_{j,t}^2 = U_{i,t}^2 - 2(R_{ij} P_{ij,t} + X_{ij} Q_{ij,t}) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) I_{ij,t}^2, \quad (10)$$

$$I_{ij,t}^2 U_{i,t}^2 = P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2, \quad (11)$$

$$P_{j,t}^{\text{in}} = P_{j,t}^{\text{sub}} + P_{j,t}^{\text{PV}} + P_{j,t}^{\text{ESS,dch}} - P_{j,t}^{\text{ESS,ch}} - P_{j,t}^{\text{load}}, \quad (12)$$

$$Q_{j,t}^{\text{in}} = Q_{j,t}^{\text{sub}} - Q_{j,t}^{\text{load}}, \quad (13)$$

式中, $\alpha(j)$ 为以节点 j 为支路上游节点的下游节点集合, $\beta(j)$ 为以节点 j 为支路下游节点的上游节点集合, $P_{ij,t}$ 、 $Q_{ij,t}$ 分别为 t 时刻流经支路 ij 的有功、无功功率, $P_{jk,t}$ 、 $Q_{jk,t}$ 分别为 t 时刻以节点 j 为首端端点流经下游支路的有功、无功功率, $P_{j,t}^{\text{in}}$ 、 $Q_{j,t}^{\text{in}}$ 分别为 t 时刻节点 j 的注入的净有功、无功功率, $P_{j,t}^{\text{ESS,dch}}$ 、 $P_{j,t}^{\text{ESS,ch}}$ 分别为 t 时刻节点 j 处储能装置充放电功率, $P_{j,t}^{\text{sub}}$ 、 $Q_{j,t}^{\text{sub}}$ 分别为 t 时刻变电站注入节点 j 的有功、无功功率, $Q_{j,t}^{\text{load}}$ 为 t 时刻节点 j 的无功负荷, $U_{j,t}$ 为 t 时刻节点 j 处有效电压, R_{ij} 、 X_{ij} 分别为支路 ij 的等效电阻、电抗。

由于上述潮流方程中存在非线性项,一般难以直接求解,故引入中间变量以及二阶锥松弛对其线

性转换^[20]。令 $I_{ij,t}^{\text{sqr}} = I_{ij,t}^2$, $U_{j,t}^{\text{sqr}} = U_{j,t}^2$ 替代式(8)~(11)中的平方项,即

$$\sum_{k \in \alpha(j)} P_{jk,t} - \sum_{i \in \beta(j)} (P_{ij,t} - I_{ij,t}^{\text{sqr}} R_{ij}) = P_{j,t}^{\text{in}}, \quad (14)$$

$$\sum_{k \in \alpha(j)} Q_{jk,t} - \sum_{i \in \beta(j)} (Q_{ij,t} - I_{ij,t}^{\text{sqr}} X_{ij}) = Q_{j,t}^{\text{in}}, \quad (15)$$

$$U_{j,t}^{\text{sqr}} = U_{i,t}^{\text{sqr}} - 2(R_{ij} P_{ij,t} + X_{ij} Q_{ij,t}) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) I_{ij,t}^{\text{sqr}}, \quad (16)$$

$$I_{ij,t}^{\text{sqr}} U_{i,t}^{\text{sqr}} = P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2. \quad (17)$$

式(17)中存在非线性项,采用二阶锥松弛法将其转换为二阶锥约束,即

$$I_{ij,t}^{\text{sqr}} U_{i,t}^{\text{sqr}} \geq P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2 \Leftrightarrow \left\| \begin{array}{c} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ I_{ij,t}^{\text{sqr}} - U_{i,t}^{\text{sqr}} \end{array} \right\|_2 \leq I_{ij,t}^{\text{sqr}} + U_{i,t}^{\text{sqr}}. \quad (18)$$

进行 ADN 动态重构后,由于部分支路处于断开状态,并非所有支路均可满足式(16),故引入文献[20]中的大 M 法,进一步将式(16)转换为

$$U_{j,t}^{\text{sqr}} - U_{i,t}^{\text{sqr}} \leq M a_{ij,t} - 2(R_{ij} P_{ij,t} + X_{ij} Q_{ij,t}) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) I_{ij,t}^{\text{sqr}}, \quad (19)$$

$$U_{j,t}^{\text{sqr}} - U_{i,t}^{\text{sqr}} \geq -M a_{ij,t} - 2(R_{ij} P_{ij,t} + X_{ij} Q_{ij,t}) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) I_{ij,t}^{\text{sqr}}, \quad (20)$$

式中: M 为足够大的正数; $a_{ij,t}$ 为布尔变量,表示 t 时刻支路 ij 开闭状态,当 $a_{ij,t} = 0$ 时,支路 ij 闭合,当 $a_{ij,t} = 1$ 时,支路 ij 断开。

(2) 节点电压和支路电流约束

为满足 ADN 运行安全,必须限制节点电压和支路电流在规定的范围内,即

$$U_{j,t}^{\text{min}} \leq U_{j,t}^{\text{sqr}} \leq U_{j,t}^{\text{max}}, \quad (21)$$

$$0 \leq I_{ij,t}^{\text{sqr}} \leq I_{ij,t}^{\text{max}}, \quad (22)$$

式中, $U_{j,t}^{\text{max}}$ 、 $U_{j,t}^{\text{min}}$ 为节点 j 允许的最大、最小电压, $I_{ij,t}^{\text{max}}$ 为允许流经支路 ij 的最大电流。

(3) PV 出力约束

考虑 PV 出力的特点不同,设置不同上限约束 PV 出力,同时为了不影响上级电网,本研究规定不允许向上级电网倒送功率,且不考虑 PV 出力的不确定性以及其无功出力,模型为

$$0 \leq P_{j,t}^{\text{PV}} \leq P_{j,t}^{\text{PV,max}}, \quad (23)$$

式中 $P_{j,t}^{\text{PV,max}}$ 为 t 时刻节点 j 处最大 PV 可调功率。

(4) ESS 运行约束

为平缓 PV 出力的波动性及提升 PV 消纳率,ADN 系统中往往配置一定容量的 ESS,在其充放电过程中需对充放电状态以及功率进行相关限制,约束为

$$0 \leq \varepsilon_{j,t}^{\text{ESS,ch}} + \varepsilon_{j,t}^{\text{ESS,dch}} \leq 1, \quad (24)$$

$$\varepsilon_{j,t}^{\text{ESS,ch}} P_{j,t}^{\text{ESS,ch}} \leq P_{j,t}^{\text{ESS,ch}} \leq \varepsilon_{j,t}^{\text{ESS,dch}} P_{j,t}^{\text{ESS,dch}}, \quad (25)$$

$$\varepsilon_{j,t}^{\text{ESS,dch}} P_{t,\min}^{\text{ESS,dch}} \leq P_{j,t}^{\text{ESS,dch}} \leq \varepsilon_{j,t}^{\text{ESS,dch}} P_{t,\max}^{\text{ESS,dch}}, \quad (26)$$

$$E_{j,t+1}^{\text{ESS}} = E_{j,t}^{\text{ESS}} + \eta_{\text{ch}}^{\text{ESS}} P_{j,t}^{\text{ESS,ch}} - \eta_{\text{dch}}^{\text{ESS}} P_{j,t}^{\text{ESS,dch}}, \quad (27)$$

$$E_{\min}^{\text{ESS}} \leq E_{j,t+1}^{\text{ESS}} \leq E_{\max}^{\text{ESS}}, \quad (28)$$

式中: $\varepsilon_{j,t}^{\text{ESS,ch}}$ 、 $\varepsilon_{j,t}^{\text{ESS,dch}}$ 分别为 t 时刻节点 j 处 ESS 充电状态, 其值为布尔变量, 用于限制 ESS 只能处于充电或者放电状态; $P_{t,\max}^{\text{ESS,ch}}$ 、 $P_{t,\min}^{\text{ESS,ch}}$ 分别为 t 时刻 ESS 最大、最小充电功率; $P_{t,\max}^{\text{ESS,dch}}$ 、 $P_{t,\min}^{\text{ESS,dch}}$ 分别为 t 时刻 ESS 最大、最小放电功率; $E_{j,t}^{\text{ESS}}$ 为 t 时刻节点 j 处 ESS 储电容量; E_{\max}^{ESS} 、 E_{\min}^{ESS} 分别为 ESS 最大、最小储电容量; $\eta_{\text{ch}}^{\text{ESS}}$ 、 $\eta_{\text{dch}}^{\text{ESS}}$ 分别为 ESS 充放电效率系数。

(5) 拓扑结构约束

在上层优化问题中, 需保证重构后的 ADN 满足辐射状结构, 即不存在孤岛和环网。多数学者广泛采用高效率的生成树约束法, 但有学者证明该方法并非生成辐射状拓扑的充分必要条件^[21]。为此, 本研究采用基于解环思想的辐射状拓扑约束方法^[22]。相较于生成树约束法, 该方法约束形式简单, 不仅能够确保生成理想的辐射状拓扑, 而且引入的中间变量和约束方程数更少, 具备更高求解效率, 模型为

$$\sum_{ij \in \psi_k} a_{ij} + \sum_{r \in \psi_k} b_r = 1, \quad (29)$$

$$\sum_{r \in \partial_n} b_r \leq 1, \quad (30)$$

$$\sum_{r \in \partial_n} b_r = \sum_{ij \in \partial_n} a_{ij}, \quad (31)$$

$$\sum_{r \in \varphi_m} b_r < N_{\varphi_m}, \quad (32)$$

式中: ψ_k 为第 k 个基本回路中所有支路集合; ∂_n 为相邻基本回路中公共支路集合, 即 $\partial_n = \psi_{k1} \cap \psi_{k2}$; b_r 为引入的中间变量, 取代相邻基本回路中公共支路变量 a_{ij} 状态, 使每个基本回路断开的开关相互独立, 最终由式(32)将 b_r 变换回 a_{ij} 状态; r 为转换后中间变量 b_r 对应的支路; φ_m 、 N_{φ_m} 分别为网络中节点度大于等于 3 所对应割集的集合和对应割集中支路数量。

2.2 下层优化模型

2.2.1 目标函数

下层模型以负荷侧碳排放最低以及需求响应调度成本最小为目标函数, 建立低碳需求响应优化模型。

(1) 碳排放最低

总碳排放量

$$E_{\text{CO}_2} = \min \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_n} P_{j,t}^{\text{load,DR}} w_{j,t}, \quad (33)$$

式中 $P_{j,t}^{\text{load,DR}}$ 为 t 时刻需求响应后节点 j 的负荷水平。

(2) 调度成本最低

需求响应调度成本

$$C_{\text{DR}} = \min \sum_{t=1}^T (P_{0,t} C_{0,t} - P_{1,t} C_{1,t}). \quad (34)$$

(3) 多目标函数处理

对于上述多目标函数, 采用加权组合将其转化为单目标问题, 因两者量纲大小不同, 加权前需进行归一化处理, 最终得到下层目标函数

$$\min F_2 = (1 - \alpha) E'_{\text{CO}_2} + \alpha C'_{\text{DR}}, \quad (35)$$

式中 α 为权重系数。

2.2.2 约束条件

(1) 日前负荷总量约束

为满足用户用电需求, 在实施需求响应过程中, 要求调度周期内负荷总量保持不变, 即

$$\sum_{t=1}^T P_{0,t} = \sum_{t=1}^T P_{1,t}. \quad (36)$$

(2) 负荷响应量约束

在调度周期内负荷调节量需满足一定的限制:

$$\Delta P_{t,\min} \leq P_{1,t} - P_{0,t} \leq \Delta P_{t,\max}, \quad (37)$$

式中 $\Delta P_{t,\max}$ 、 $\Delta P_{t,\min}$ 分别为 t 时刻可调节负荷上、下限。

(3) 电价约束

由于政策原因, 单位电价的制定应在合理范围内:

$$C_{t,\min} \leq C_{1,t} \leq C_{t,\max}, \quad (38)$$

式中 $C_{t,\max}$ 、 $C_{t,\min}$ 分别为 t 时刻电价上、下限, 分别取 0.3、0.9 元/kW。

(4) 用户用电费用约束

为保证用户参与需求响应的积极性以及利益, 要求需求响应后的用电费用要小于需求响应前:

$$\sum_{t=1}^T P_{0,t} C_{0,t} \geq \sum_{t=1}^T P_{1,t} C_{1,t}. \quad (39)$$

3 基于改进 DBO 算法的求解方法

3.1 多策略融合的改进 DBO 算法

蜣螂优化(dung beetle optimizer, DBO)算法是文献[23]根据蜣螂滚球、跳舞、觅食、繁殖和偷窃 5 种社会行为提出的一种新型启发式智能优化算法, 具有结构简单、寻优能力强等特点, 但同时也存在局部和全局开发能力不平衡问题。因此, 为提高 DBO 搜索性能, 本研究采用多种策略对 DBO 算法进行改进。

(1) Chebyshev 映射初始种群

DBO 算法中采用随机初始化种群方法, 导致蜣螂在解空间中分布不均匀影响其收敛速度与准确

性,Chebyshev 混沌映射数学表达式简单,具有较好的随机性、规律性以及遍历性等特点。因此,在 DBO 算法种群初始化时加入 Chebyshev 混沌映射增强初始种群的多样性,使其在整个解空间中分布更加均匀,具体表达式为

$$x_{n+1} = \cos(k \arccos x_n), \quad (40)$$

式中: k 为阶次; x_n 为第 n 次迭代时种群个体位置, $x_n \in [-1, 1]$ 。

(2) 自适应权重与可变螺旋搜索

传统 DBO 算法在偷窃阶段缺乏自适应能力,位置更新受到全局最优解的影响,在逼近最优个体的过程过于单一,失去对邻近搜索范围的探索,容易停留在局部最优。为进一步提高 DBO 的寻优性能,受鲸鱼优化算法在发起气泡网攻击时以螺旋形接近最佳鲸类个体的启发,引入自适应螺旋搜索策略改进偷窃蜣螂的位置,同时加入自适应惯性权重,两者相结合能够较好地平衡偷窃蜣螂的全局探索和局部开发能力,提高算法的收敛精度和速度,故改进后偷窃阶段的位置更新为

$$\eta^* = e^{\gamma \cos(\pi t / S_{\max}^{\text{iter}})}, \quad (41)$$

$$\omega = \omega_{\min} + (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \arctan(\pi t / 2S_{\max}^{\text{iter}}), \quad (42)$$

$$x_i^{t+1} = \omega x_{\text{gbest}}^t + e^{i\eta^*} \cos(2\pi l) (|x_i^t - x_{\text{gbest}}^t| + |x_i^t - x_{\text{lbest}}^t|), \quad (43)$$

式中: η^* 为变螺旋参数; γ 为调整系数; S_{\max}^{iter} 为最大迭代次数; l 为随机数, $l \in [-1, 1]$; ω 为权重系数; x_{gbest}^t 、 x_{lbest}^t 分别为第 t 次迭代全局和局部最佳位置。

(3) 最优位置扰动策略

DBO 在后期迭代中,逐渐逼近最优个体,导致种群多样性下降。为了降低其陷入局部最优的可能性,本研究通过等概率交替选择柯西突变与折射反向学习 2 种扰动策略对最优蜣螂个体进行扰动,具体表达式为

$$x_{\text{new,gbest}}^t = \begin{cases} \frac{l_b + u_b}{2} + \frac{l_b + u_b}{2\delta} - \frac{x_{\text{gbest}}^t}{\delta}, & \text{rand}() < 0.5 \\ x_{\text{gbest}}^t + \text{Cauchy}(0, 1) x_{\text{gbest}}^t, & \text{rand}() \geq 0.5 \end{cases}, \quad (44)$$

式中: $x_{\text{new,gbest}}^t$ 为扰动后的新个体; l_b 、 u_b 分别为变量上下界; δ 为光线的折射率,随迭代次数变化而变化;Cauchy(0, 1) 为标准柯西分布。

由于无法确认变异后的最优适应度优于原适应度,故本研究通过贪婪策略选择是否要更新位置。

3.2 模型求解

本研究求解流程如图 2 所示。

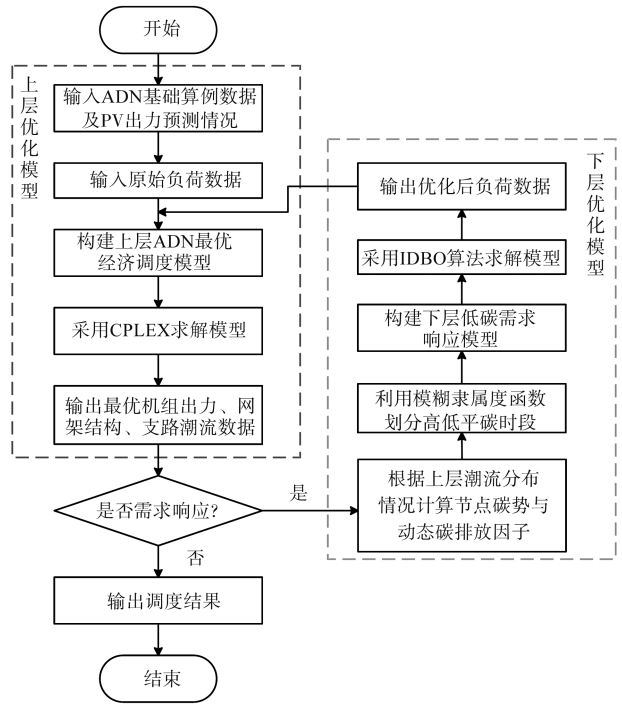


图2 双层模型求解流程图

Fig.2 Flowchart for solving the bi-level model

上层 ADN 运行优化模型经线性变换及二阶锥松弛转换为混合整数二阶锥规划模型,可采用 CPLEX 商业求解器进行求解。其决策变量中既存在 PV、ESS 出力的连续变量,又存在开关状态的离散变量,理论上应将调度周期内每个时刻的开关状态定义为变量,但随着时段的增加,离散变量的数量及解的搜索空间也随之大幅增加,极大影响求解效率,且实际中为保证开关使用寿命在正常范围内,动态重构的次数也应受到限制。因此,本研究采用基于改进递归有序聚类的时段划分方法对离散设备调控周期进行划分^[24],动态重构只发生在每个时段的最初时刻。

下层低碳需求响应优化模型采用 IDBO 求解。由于下层模型需求响应后负荷水平发生变化,因此需对上层模型中负荷数据进行修正,重新求解各 PV 出力、ESS 充放电情况和网架结构。

4 算例分析

4.1 仿真算例与基础数据

为了验证本研究所提出的调度策略以及模型的有效性,基于改进的 IEEE 33 节点配电系统进行仿真。网络拓扑结构及基本环路情况如图 3 所示。在此基础上,分别在 14、17 以及 29 节点处接入额定容量为 1 500 kW 的光伏阵列 PV₁、PV₂、PV₃;在 31 节点接入额定容量为 1 000 kW 的 ESS,其额定充放

电功率为 150 kW,最大充放电效率均为 0.9,储能初始容量与最终容量相等,均为额定容量的一半;各节点在各个时段的日前预测负荷功率可根据文献[22]中各节点的负荷比例和负荷时间分布得到,PV出力预测值参考文献[6],重构时段划分结果及负荷、PV功率曲线如图4所示;网损、弃光惩罚费用参考文献[22],电量电价弹性矩阵数据参考文献[25],考虑弹性需求响应前电价为 0.6 元/kW;权重取值详见 4.2.4 节;本研究设定理想运行电压为 [0.95, 1.05];调度周期为 24 h,步长为 1 h,并设置 3 个不同场景:场景一为传统配电网优化;场景二为计及低碳需求响应 ADN 优化;场景三为计及动态重构与低碳需求响应 ADN 优化。

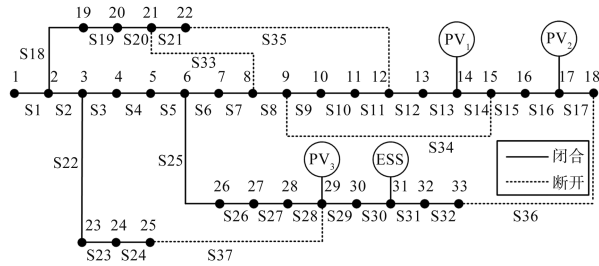


图3 改进的 IEEE-33 节点拓扑图
Fig.3 Improved IEEE-33 node topology map

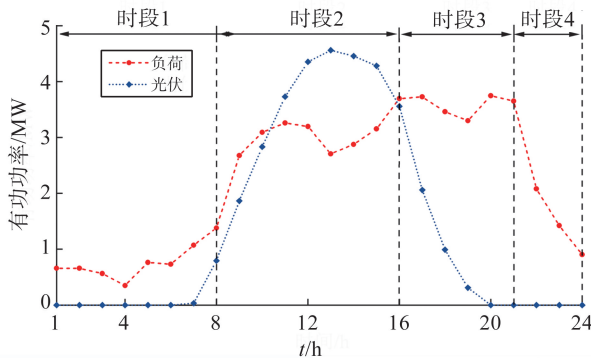
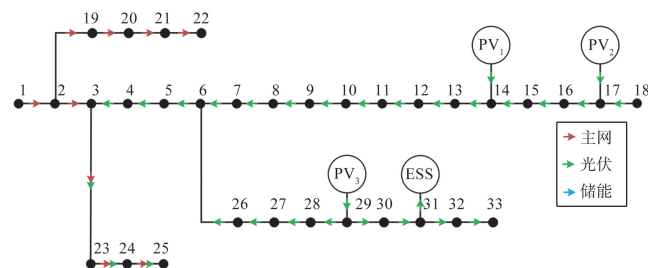


图4 光伏出力及原始负荷曲线图
Fig.4 PV output and raw load curves

4.2 调度结果分析

4.2.1 不同场景下的经济性

相较于场景一,场景二、三考虑了低碳需求侧响



(a) 10:00时刻系统碳流方向

应,故负荷曲线相较于原始曲线会有所变动。由上层优化结果可计算出动态碳排放因子,其中主网碳势参考文献[14]。在此基础上,采用模糊隶属度函数进行小段调整,将一个周期内 24 h 划分为高碳、平碳、低碳 3 个用电时段,每个时段 8 h,具体时段划分结果如表 1 所示,动态碳排放因子及低碳需求响应后的负荷曲线与原始负荷曲线如图 5 所示。

表 1 高碳、平碳、低碳时段划分结果
Table 1 Results of the high, flat and low carbon time periods

时段类型	具体时间
高碳	5:00—8:00、18:00—23:00
平碳	0:00—5:00、8:00—9:00、17:00—18:00、23:00—24:00
低碳	9:00—17:00

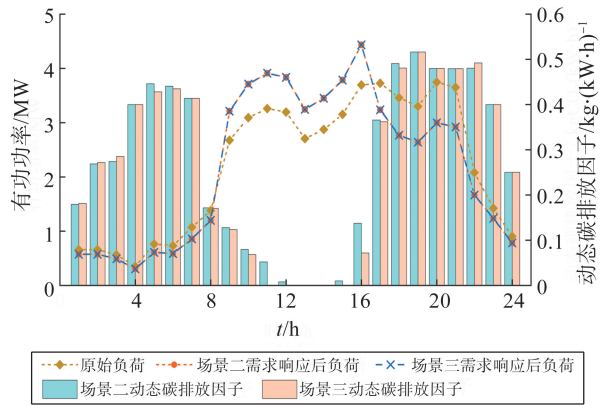
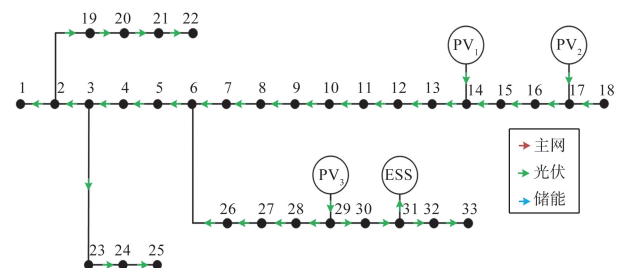
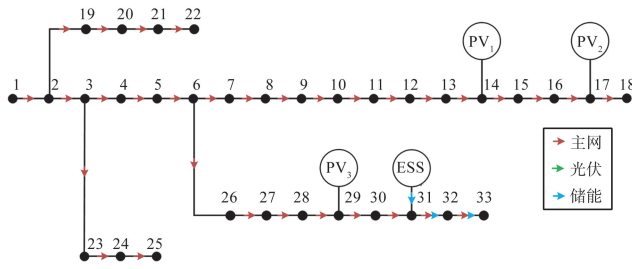


图5 动态碳排放因子及需求响应前后负荷曲线图
Fig.5 Dynamic carbon emission factors and load profiles before and after demand response

由图 5 可观察到,考虑低碳需求响应后,柔性负荷由高碳时刻平移至低碳时刻,平碳时刻负荷略有降低。这样不仅能够降低净负荷的峰谷差,提高 ADN 的发电、用电平衡能力,而且因为将可变负荷用电时间移动,使之尽可能地使用发自光伏新能源机组的“绿电”,增加对可再生能源的消纳。场景二中典型时刻的 ADN 碳流方向如图 6 所示,场景三动态重构后的系统拓扑如图 7 所示,不同场景下的经济性能对比如表 2 所示。



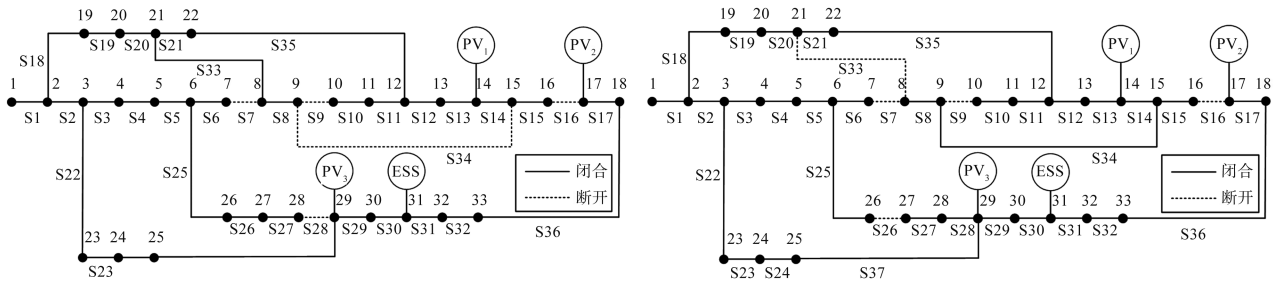
(b) 13:00时刻系统碳流方向



(c) 20:00时刻系统碳流方向

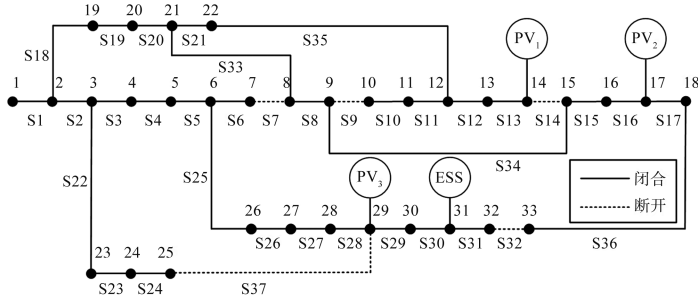
图 6 场景二中 3 种典型时刻的 ADN 碳流方向

Fig.6 Direction of ADN carbon flow at three typical moments in scenario 2



(a) 时段 1、3 动态重构后的系统拓扑

(b) 时段 2 动态重构后的系统拓扑



(c) 时段 4 动态重构后的系统拓扑

图 7 场景三不同时段动态重构后的系统拓扑

Fig.7 Scenario 3 system topology after dynamic reconfiguration at different time periods

表 2 三个不同场景下调度结果

Table 2 Scheduling results for three different scenarios

场景	时段	断开支路	运行总成本/ 元	网损成本/ 元	弃光成本/ 元	调度成本/ 元	碳排放量/ kg
一	全时段	S33、S34、S35、S36、S37	1 696.82	595.04	1 101.78	0	13 408.56
二	全时段	S33、S34、S35、S36、S37	1 562.46	587.76	718.26	256.44	12 704.71
三	0:00—8:00	S7、S9、S16、S28、S34	1 054.89	304.53	493.92	256.44	11 500.96
	8:00—16:00	S7、S9、S16、S26、S33					
	16:00—21:00	S7、S9、S16、S28、S34					
	21:00—24:00	S7、S9、S14、S32、S37					

由表 2 可知,场景一采用的传统配电网调度策略且不考虑调度过程中产生碳排放的影响,导致网损、弃光成本以及系统碳排放偏高。相较于场景一,场景二中考虑低碳需求响应,虽然产生 256.44 元的柔性负荷调度费用,但是弃光成本从 1 101.78 元降为 718.26 元,减少 34.81%,网损费用略有降低,系统运行总成本从 1 696.82 元降为 1 562.46 元,减少 7.92%,碳排放由 13 408.56 kg 降为 12 704.71 kg,

减少 5.24%。对比场景二和场景三可以看出,考虑动态重构,通过部分联络开关与分段开关的相互动作配合,可以进一步降低网损、弃光成本,分别减少了 48.19% 和 31.23%,同时减少系统碳排放量,降低了 9.47%。以上结果表明动态重构与低碳需求响应联合优化有效改善了含高比例 PV 的 ADN 运行状况,对提高 ADN 经济运行、PV 消纳有着良好的效果。

4.2.2 不同场景下的节点碳排放

3个不同场景下的节点碳排放如图8所示。

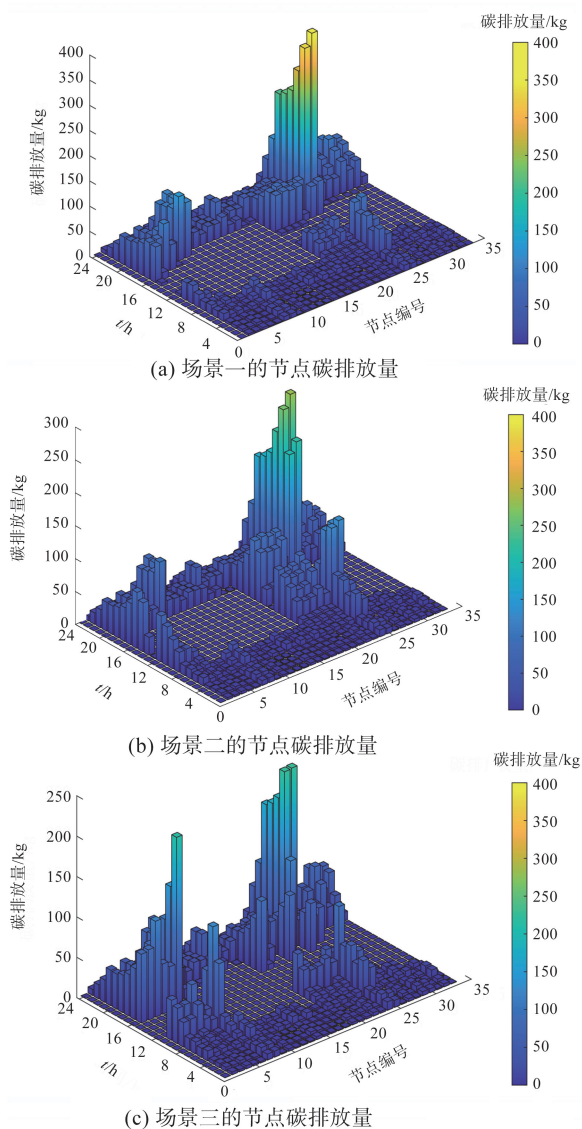


图8 不同场景下的节点碳排放量

Fig.8 Nodal carbon emissions in different scenarios

由图8可知,场景二、三与场景一主要区别在于5:00—8:00、18:00—23:00节点碳排放降低,因为实施由动态碳排放因子引导价格型需求响应在时间尺度上改变用户用电习惯,动态碳排放因子较大的高碳时段的部分负荷转移至动态碳排放因子较小的低碳时段,但是由于部分时刻转移后总负荷大于光伏出力以及为了防止电压越限,9:00—17:00部分节点碳排放升高。尽管如此,从整体看总体碳排放量仍然是减少的。对比场景二与场景三,主要区别在于场景三中在9:00—17:00时段内,3~7号节点碳排放有所升高,但20~25号节点碳排放大幅度降低,因为场景三考虑动态重构改变网络拓扑结构,消纳因电压越上限而削减部分的PV出力,降低节点碳排放,同时也改变了PV供能范围,导致部分节点碳排放有所增加。

因此,综合考虑动态重构与低碳需求响应可以提高“绿电”能源的就地消纳率,将原本弃之不用的多余清洁低碳能源代替高碳排放的主网发电机组出力,降低系统总碳排放量。值得注意的是,当节点负荷完全由零碳排放的PV机组供给时,其供能范围的节点碳排放可以降低至0。

4.2.3 不同场景下的节点电压

不同调度策略对系统电压的影响结果如表3所示,结果采用标么值,基准值本研究取12.66 kV。

表3 不同场景下的系统电压偏移

Table 3 System voltage offsets in different scenarios

场景	总电压偏移
一	0.400 6
二	0.351 8
三	0.228 1

为了进一步分析本研究所提方法对系统电压水平的提升,选取3种典型时刻,分别为PV出力预测值与负荷水平相近时刻(10:00)、PV出力预测值较大而负荷水平较低时刻(13:00)、PV无出力而负荷水平较大时刻(20:00),不同时刻电压分布情况如图9所示。

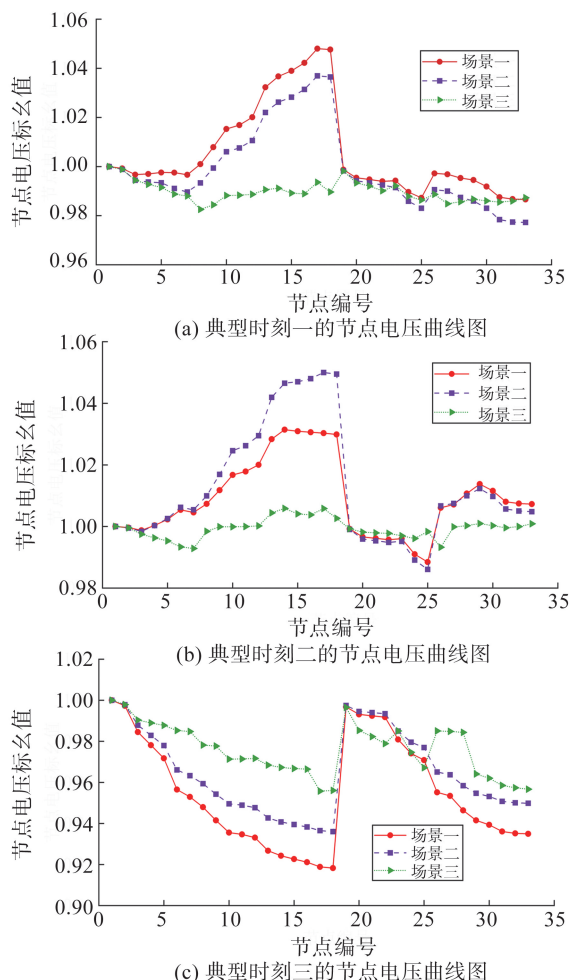


图9 三个典型时刻的节点电压曲线图

Fig.9 Nodal voltage profiles for three typical moments

由图9可见:(1)当PV出力与负荷水平相近时,场景一中最高电压出现在PV接入点17节点达到1.048,即将达到最高理想运行电压,存在越上限风险;而场景二考虑低碳需求响应后整体电压相对有所降低至1.036,因为考虑低碳需求响应后总负荷水平增大,PV出力在需求响应前已经达到最大,因此整体电压降低。(2)当PV出力较大而负荷水平相对较低时刻,场景一中节点最高电压为1.030;但是在场景二考虑低碳需求响应后,负荷水平增大的同时PV出力随之相应增加,导致系统最高电压上升至1.050,达到最高理想运行电压,存在越上限风险,进而削减PV出力。(3)当PV无出力而负荷水平较大时,场景一中最低电压为0.918,严重偏离最低理想运行电压;在场景二考虑低碳需求响应后,节点最低电压提升至0.937,因为考虑需求响应后,系统总负荷水平降低,因此整体电压提高,但依旧低于理想运行电压。(4)无论何种时刻,在场景三中进一步考虑配电网动态重构后,节点电压质量得到较大幅度改善,有效降低因节点电压越限而引起电力事故的风险,满足配电网电压理想运行要求。由此可见,同时考虑动态重构与低碳需求响应主动管理措施有助于提升系统运行安全性。

4.2.4 不同权重下优化结果

下层需求响应中不同权重下对优化结果的影响如图10所示,可见随着权重系数 α 升高,实施需求响应所需的调度成本总体呈下降趋势,当 $\alpha \in [0.5, 1]$ 时,调度成本下降趋势较为平缓。相反,系统总碳排放量逐渐上升。由于两者存在冲突,为兼顾调度成本与系统总碳排放量,利用模糊决策方法选择最佳折中解^[26],最终 α 取值为0.5。

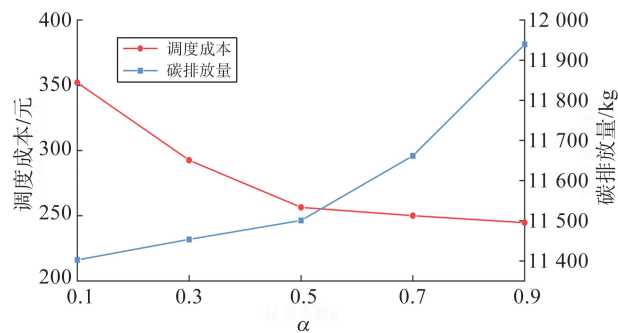


图10 不同权重时的调度成本与系统总碳排放量
Fig.10 Dispatch costs and total system carbon emissions at different weights

4.3 有效性分析

4.3.1 上层模型松弛准确性分析

为验证本研究采用的二阶锥松弛 ADN 最优潮流模型的精确性,定义二阶锥松弛误差指标

流模型的精确性,定义二阶锥松弛误差指标

$$\Delta O_{j,t} = \left| I_{ij,t}^{\text{sqr}} - \frac{\sqrt{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}}{U_{j,t}^{\text{sqr}}} \right|. \quad (45)$$

二阶锥松弛误差结果如图11所示,明显发现所有偏差在 10^{-5} 级别,证明本研究使用的二阶锥松弛精确度可以满足上层优化调度的要求。

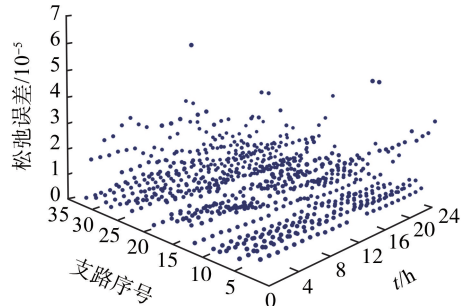


图11 二阶松弛误差图
Fig.11 Second-order relaxation error plots

4.3.2 IDBO 算法性能分析

为了验证所述 IDBO 的性能,利用粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO)、DBO、IDBO 共同求解以场景三为例的 ADN 双层低碳优化调度问题,设置种群规模均为30,迭代次数为100次,其中,PSO学习因子 c_1, c_2 均取1.5,DBO参数设置参考文献[23],IDBO中的滚球、繁殖、觅食、偷窃蛻螂占比分别为20%、20%、25%、35%, k 取0.1, b 取0.3, ω_{\max} 取0.89, ω_{\min} 取0.1,迭代曲线如图12所示,其中适应度值经归一化加权处理。

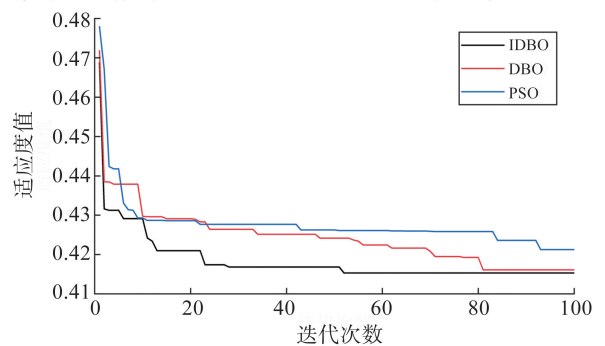


图12 不同算法收敛曲线
Fig.12 Convergence curves of different algorithms

由图12可知,在相同种群数量和迭代次数情况下,PSO算法的收敛性以及全局搜索能力较弱。相比之下,IDBO通过融合多种策略对DBO进行改进,增强了其收敛性能。IDBO迭代49次后便收敛到最小目标函数,而DBO则在迭代81次后才收敛到最小目标函数。在全局搜索能力方面,DBO与IDBO表现相近。综上所述,在求解本研究模型上,IDBO展现较好的收敛性以及全局搜索能力。

5 结论

本研究针对“双碳”目标下含高比例分布式 PV 的主动配电网系统运行经济、安全、低碳问题,兼顾“源网荷储”,提出一种考虑碳排放因子与动态重构的 ADN 双层优化策略。通过算例分析,得到以下结论。

(1)通过合理调控 ESS、PV 出力以及动态重构技术改变网络拓扑,能够均衡潮流分布,有效降低网络损耗、弃光费用,降低系统运行成本,同时解决 ADN 电压越限问题。

(2)基于碳排放流理论,将碳减排责任从“源”侧传递至“荷”侧,在不改变负荷需求总量的前提下,以动态碳排放因子为引导信号,对系统负荷在时间尺度上进行合理调节,能够促进供给侧和需求侧的双向协调互动,促进新能源消纳,节省电力系统的运行成本,使系统碳排放总量显著减少。

(3)通过变量乘积线性化和二阶锥松弛将 ADN 最优经济优化模型进行凸化处理,降低求解的复杂度,能够满足工程求解精度要求。IDBO 优化算法拥有较好的收敛性及全局搜索能力,能够有效求解本研究低碳需求响应模型。

参考文献:

- [1] 辛保安,单葆国,李琼慧,等.“双碳”目标下“能源三要素”再思考[J].中国电机工程学报,2022,42(9):3117-3126.
XIN Baoan, SHAN Baoguo, LI Qionghui, et al. Rethinking of the “three elements of energy” toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3117-3126.
- [2] 陈美福,夏明超,陈奇芳,等.主动配电网源-网-荷-储协调调度研究综述[J].电力建设,2018,39(11):109-118.
CHEN Meifu, XIA Mingchao, CHEN Qifang, et al. Review on coordination control of generation-grid-load-storage[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(11): 109-118.
- [3] 倪识远,张林垚.考虑动态重构的主动配电网多目标双层优化调度方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(20):38-47.
NI Shiyuan, ZHANG Linyao. Multi-objective bi-level optimal dispatch method of an active distribution network considering dynamic reconfigurations[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 38-47.
- [4] 程杉,钟仕凌,尚冬冬,等.考虑电动汽车时空负荷分

布特性的主动配电网动态重构[J].电力系统保护与控制,2022,50(17):1-13.

CHENG Shan, ZHONG Shiling, SHANG Dongdong, et al. Dynamic reconfiguration of an active distribution network considering temporal and spatial load distribution characteristics of electric vehicles [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 1-13.

- [5] 寇凌峰,吴鸣,李洋,等.主动配电网分布式有功无功优化调控方法[J].中国电机工程学报,2020,40(6):1856-1865.
KOU Lingfeng, WU Ming, LI Yang, et al. Optimization and control method of distributed active and reactive power in active distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1856-1865.
- [6] 柴园园,赵晓波,吕超贤,等.基于 Fisher 时段划分的配电网源网荷储多时间尺度协调优化调控策略[J/OL].电网技术.(2023-05-06)[2024-01-05].<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0293>
- [7] GUO Y, WU Q, GAO H, et al. MPC-based coordinated voltage regulation for distribution networks with distributed generation and energy storage system [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(4): 1731-1739.
- [8] JIN J, ZHOU P, LI C, et al. Low-carbon power dispatch with wind power based on carbon trading mechanism [J]. Energy, 2019, 170: 250-260.
- [9] 陈登勇,刘方,刘帅.基于阶梯碳交易的含 P2G-CCS 耦合和燃气掺氢的虚拟电厂优化调度[J].电网技术,2022,46(6):2042-2054.
CHEN Dengyong, LIU Fang, LIU Shuai. Optimization of virtual power plant scheduling coupling with P2G-CCS and doped with gas hydrogen based on stepped carbon trading [J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2042-2054.
- [10] 李军徽,邵岩,朱星旭,等.计及碳排放量约束的多区域互联电力系统分布式低碳经济调度[J].电工技术学报,2023,38(17):4715-4728.
LI Junhui, SHAO Yan, ZHU Xingxu, et al. Carbon emissions constraint distributed low-carbon economic dispatch of power system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(17): 4715-4728.
- [11] 赵冬梅,王浩翔,陶然.计及风电-负荷不确定性的风-火-核-碳捕集多源协调优化调度[J].电工技术学报,2022,37(3):707-718.
ZHAO Dongmei, WANG Haoxiang, TAO Ran. A multi-source coordinated optimal scheduling model considering wind-load uncertainty [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(3): 707-718.
- [12] 周天睿,康重庆,徐乾耀,等.电力系统碳排放流分析理论初探[J].电力系统自动化,2012,36(7):38-43.

- ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qian Yao, et al. Preliminary theoretical investigation on power system carbon emission flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 38-43.
- [13] 李姚旺, 张宁, 杜尔顺, 等. 基于碳排放流的电力系统低碳需求响应机制研究及效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2830-2842.
- LI Yaowang, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Mechanism study and benefit analysis on power system low carbon demand response based on carbon emission flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2830-2842.
- [14] 葛津铭, 刘志文, 王朝斌, 等. 考虑需求响应的高比例光伏配电网低碳调度[J/OL]. 电网技术. (2023-07-11) [2024-01-05]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0602>
- [15] 宋泽溟, 冯华, 陈晓刚, 等. 基于节点碳势的配电网分布式资源低碳调度策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2320-2332.
- SONG Zehao, FENG Hua, CHEN Xiaogang, et al. Low-carbon scheduling strategy of distributed energy resources based on node carbon intensity for distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2320-2332.
- [16] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 电力系统碳排放流的计算方法初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 44-49.
- ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qian Yao, et al. Preliminary investigation on a method for carbon emission flow calculation of power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 44-49.
- [17] 李澍森, 杨迎建, 吴夕科, 等. 配电技术概况及发展趋势[J]. 高电压技术, 2008, 34(1): 113-122.
- LI Shusen, YANG Yingjian, WU Xike, et al. Overview and development trend of distribution technology [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(1): 113-122.
- [18] 邵志芳, 赵强, 张玉琼. 独立型微电网源荷协调配置优化[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3935-3946.
- SHAO Zhifang, ZHAO Qiang, ZHANG Yuqiong. Source side and load side coordinated configuration optimization for stand-alone micro-grid [J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3935-3946.
- [19] 卢姬, 常俊晓, 张云阁, 等. 考虑 DG 不确定性的主动配电网两阶段无功机会约束优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 28-35.
- LU Ji, CHANG Junxiao, ZHANG Yunge, et al. Two-stage reactive power chance-constrained optimization method for an active distribution network considering DG uncertainties[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 28-35.
- [20] 高红均, 刘俊勇, 沈晓东, 等. 主动配电网最优潮流研究及其应用实例[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1634-1645.
- GAO Hongjun, LIU Junyong, SHEN Xiaodong, et al. Optimal power flow research in active distribution network and its application examples[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1634-1645.
- [21] 王颖, 许寅, 和敬涵, 等. 基于断线解环思想的配电网辐射状拓扑约束建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2395-2404.
- WANG Ying, XU Yin, HE Jinghan, et al. Radiality constraint modelling method in distribution network based on cutting-line and opening-loop idea [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2395-2404.
- [22] 傅长熠, 杨镜非, 顾家辉. 基于双层动态时段划分的配电网重构[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(6): 30-36.
- FU Changyi, YANG Jingfei, GU Jiahui. Reconfiguration of distribution network based on bi-level dynamic time division [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(6): 30-36.
- [23] XUE J K, SHEN B. Dung beetle optimizer: a new meta-heuristic algorithm for global optimization [J]. The Journal of Supercomputing, 2022, 79(7): 7305-7336.
- [24] 高纯, 于艾清, 丁雨. 基于改进递归有序聚类的有源配电网多时段动态重构[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(2): 84-90.
- GAO Chun, YU Aiqing, DING Yu. Multi-period dynamic reconfiguration of active distribution network based on improved recursive ordered clustering [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 84-90.
- [25] 李春燕, 许中, 马智远. 计及用户需求响应的分时电价优化模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(3): 11-16.
- LI Chunyan, XU Zhong, MA Zhiyuan. Optimal time-of-use electricity price model considering customer demand response[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(3): 11-16.
- [26] 马燕峰, 范振亚, 刘伟东, 等. 考虑碳权交易和风荷预测误差随机性的环境经济调度[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 412-418.
- MA Yanfeng, FAN Zhenya, LIU Weidong, et al. Environmental and economic dispatch considering carbon trading credit and randomness of wind power and load forecast error[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 412-418.