

## 考虑低碳排放与需求侧管理的配电网扩展规划<sup>\*</sup>

叶加乐<sup>1</sup> 赵平<sup>1,2</sup> 孙雨辰<sup>1</sup> 李振兴<sup>1,2</sup>

(1. 三峡大学电气与新能源学院 宜昌 443002;

2. 三峡大学梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室 宜昌 443002)

**摘要:**在配电网扩展规划中考虑需求侧管理对提升分布式电源(distributed generation, DG)接纳、确保系统安全经济运行具有重要意义。针对现有配电网扩展规划方法尚未充分考虑碳排放影响的问题,提出一种考虑低碳排放与需求侧管理的配电网扩展规划。首先,基于碳排放流理论的动态碳排放强度建立配电网碳交易成本计量模型,继而提出考虑低碳的需求侧管理策略。而后,建立考虑碳交易与需求侧管理的配电网规划—运行双层优化模型:规划层以年综合成本最小为目标,决策线路、DG、储能(energy storage system, ESS)的配置方案;运行层以系统运行成本最小为目标,制定配电网在典型日场景下的最优运行策略。最后,基于改进型 IEEE 33 节点配电网的仿真测算表明,考虑低碳需求侧管理后的配电网扩展规划方案的经济成本下降 2.0%,碳排放减少 8.8%,验证了方法的有效性与优越性。

**关键词:**配电网扩展规划;低碳需求侧管理;动态碳排放强度;碳交易

**中图分类号:** TM715; TN711.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4099

## Distribution network expansion planning considering low-carbon emissions and demand side management

Ye Jiale<sup>1</sup> Zhao Ping<sup>1,2</sup> Sun Yuchen<sup>1</sup> Li Zhenxing<sup>1,2</sup>

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** In the process of distribution network planning, considering the demand side management can increase the acceptance of distributed generation (DG) and improve the system economy. Aiming at the problem that demand side management does not consider the impact of carbon emissions in the planning model, a distribution network expansion planning method considering low-carbon emissions and demand side management is proposed. Firstly, a carbon trading cost measurement model for the distribution network is established based on the dynamic carbon emission intensity derived from the carbon emission flow theory. Subsequently, a low-carbon demand-side management strategy is proposed. Thereafter, a bi-level optimization model for distribution network planning and operation, considering carbon trading and demand-side management, is developed. In the planning layer, the objective is to minimize the annual comprehensive cost by determining the optimal configuration of lines, DG, and energy storage. In the operation layer, the goal is to minimize the system's operational costs by formulating the optimal operational strategy for the distribution network under typical daily scenarios. Finally, simulation and calculation based on the modified IEEE 33-bus distribution network demonstrate that the expansion planning scheme for the distribution network, which considers low-carbon demand-side management, reduces economic costs by 2.0% and carbon emissions by 8.8%. This validates the effectiveness and superiority of the proposed method.

**Keywords:** distribution network expansion planning; low carbon demand side management; dynamic carbon emission intensity; carbon trading

收稿日期:2024-08-31

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金(52077120)项目资助

## 0 引言

电力行业作为我国碳排放的主要来源,其碳排放量占总体的40%以上,降碳减排迫在眉睫<sup>[1]</sup>。上游源侧电能生产为电力行业碳排放的主要原因,但需求导致生产<sup>[2]</sup>。因此,若能灵活的利用需求侧资源,并在配电网扩展中发掘其降碳减排潜力,将对电力行业清洁绿色发展产生重要影响。

目前,国内外学者对考虑需求侧管理的配电网扩展规划展开了深入探讨。文献[3]建立考虑可削减负荷的配电网扩展规划模型,在用电高峰对用户用电量进行削减或者中断,减少负荷的峰谷差距;文献[4]在规划时考虑负荷的时序特性,构建差异化的负荷削减管理方案,提高了系统运行经济性。然而,上述研究均以可削减负荷为主,仅通过减少负荷的方式,系统运行灵活性较差。文献[5]将可削减负荷与可转移负荷结合,得到的规划方案削峰填谷作用进一步提升。以上研究虽考虑了需求侧管理给配电网扩展规划带来的影响,却忽略了碳排放问题。

在配电网中主要通过增加配电网低碳能源的投资、设计适用于配电网的运行调度策略,降低碳排放水平<sup>[6]</sup>。因此,为实现配电网低碳转型,需要配电网在规划与运行层面的协调<sup>[7]</sup>。文献[8]提出计及低碳排放与需求侧管理的主动配电网双层规划方法,在碳排放约束中增加排放系数反映用户对分布式电源(distributed generation, DG)的消费能力,所提方法在节能和减排上有良好的效果。文献[9]将总体排放量限制在一定范围内,通过需求侧资源、DG以及储能(energy storage system, ESS)设备的协调优化配置降低配电网损和主网购电量,实现了规划方案的低碳性。然而,上述研究仅对配电网碳排放均进行一定的限制,无法体现配电网的减排效益,导致系统减排积极性差。文献[10]在光储规划—运行双层模型中同时考虑碳排放与需求侧管理,有效发挥了需求侧管理对系统低碳经济运行的积极性,获得了最优的低碳设备配置方案。文献[11-12]将碳交易与需求侧管理结合,改善系统碳减排收益,建立了综合考虑经济性和低碳性的配电网低碳扩展规划模型。上述研究对需求侧资源在降碳减排方面有良好研究意义,但采用平均碳排放使其仍然停留在电视角<sup>[13]</sup>,通过源荷互动的方式降低源侧直接碳排放。该方法无法感知不同时刻用电排放的差异性,需求侧等灵活资源的碳减排潜力未被合理利用。

为此,提出一种考虑低碳排放与需求侧管理的配电网双层扩展规划模型。首先,引入主网购电的动态碳排放强度,制定低碳需求侧管理策略;然后,建立配电网规划—运行双层模型,规划层以线路、风电(wind turbine generator, WTG)、光伏发电(photovoltaic generator, PVG)、ESS为规划对象,最小化配电网的年投资成本;运行层模拟配电网在典型日场景下的运行,优化DG、ESS以及需求侧资源的调度情况,降低系统运行成本。最后,在改进的IEEE 33节点配电网中验证了所提模型的有效性。

## 1 配电网碳排放和碳交易机制

配电网中的电能主要来自于上级电网和分布式电源。本文考虑的分布式电源为风电和光伏,均为清洁能源,可假设二者不产生碳排放。因此,配电网的碳排放主要来自于主网购电所产生的间接碳排放。

## 1.1 碳排放计算

系统碳排放可以表示为产生CO<sub>2</sub>的电能与该部分电能碳排放强度的乘积,现有研究多采用平均碳排放强度进行计算,该方法的时空差异性差<sup>[14]</sup>。配电网产生的碳排放主要来自上级电网,可采用基于碳排放流理论<sup>[15]</sup>的动态碳排放强度计量配电网购电的碳排放。

碳排放流理论可根据发电侧机组、线路潮流等信息将碳排放打上标签,从而厘清碳排放的来源和去向。因此在该理论下,配电网从主网购电的碳排放计算公式为:

$$E_{\text{Carbon}} = EF_{i,t} \cdot P_{\text{grid},t} \quad (1)$$

式中:  $E_{\text{Carbon}}$  为配电网间接碳排放;  $EF_{i,t}$  为主网购电的动态碳排放强度,由区域  $i$  内各节点碳排放强度加权平均得到,可表征该区域碳排放变化的时空特性;  $P_{\text{grid},t}$  为配电网向主网购电的电量。

$$EF_{i,t} = \frac{\sum_{q \in Z} (Q_{i,t}^q \times \epsilon_{q,t})}{\sum_{q \in Z} Q_{i,t}^q} \quad (2)$$

式中:  $Q_{i,t}^q$  为区域电网中第  $q$  个节点在时刻  $t$  的负荷量;  $\epsilon_{q,t}$  为区域电网中节点  $q$  在时刻  $t$  的节点碳势;  $Z$  为区域电网的节点集合。

## 1.2 碳交易机制

碳交易是企业进行碳排放管理的途径。通过碳交易市场将免费的碳排放份额分配给参与碳交易的发电企业。本文认为配电网的碳排放主要来自于上级电网火力发电购买的电能,采用碳排放份额与该部分电量成正比,因此免费的碳排放配额为:

$$E_q = \mu \sum_{t=1}^T P_{\text{grid},t} \quad (3)$$

式中:  $E_q$  为无偿碳配额;  $\mu$  为无偿碳配额系数;  $T$  为碳交易结算时间。

基于配电网碳排放量计算及免费的碳配额模型,本文构建的配电网碳交易为:

$$C_{\text{em}} = \rho_c (E_{\text{Carbon}} - E_q) \quad (4)$$

式中:  $C_{\text{em}}$  为碳交易成本;  $\rho_c$  为单位碳交易价格。

## 2 低碳需求侧管理策略

## 2.1 需求侧管理

本文考虑配电网中的可管理需求侧负荷包括可削减负荷与可转移负荷。可削减负荷在负荷高峰时段按照约定的容量范围进行负荷削减,给予用户一定的补偿;可转移负荷能够灵活改变各时刻的负荷功率,并保持在整个运行周期内总功率不变。

配电网中的需求侧管理模型表示为：

$$\begin{cases} P_{s,i,t}^{\text{cut}} \leq 0 \\ \sum_{t=1}^T P_{s,i,t}^{\text{tran}} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中： $P_{s,i,t}^{\text{cut}}$  为节点  $i$  时刻  $t$  负荷削减量，且为负值； $P_{s,i,t}^{\text{tran}}$  为节点  $i$  时刻  $t$  负荷转移量，在一个运行周期  $T$  内负荷转移总量保持不变。

根据用户参与的需求侧管理方式，给予用户一定的补偿，因此需求侧管理成本  $C_{\text{com}}$  为：

$$C_{\text{com}} = \sum_{i \in \Omega^{\text{cut}}} \sum_{t=1}^T \lambda_1 |P_{i,t}^{\text{cut}}| + \sum_{j \in \Omega^{\text{tran}}} \sum_{t=1}^T \lambda_2 |P_{j,t}^{\text{tran}}| \quad (6)$$

式中： $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  分别为负荷削减和负荷转移补偿因子； $\Omega^{\text{cut}}$ 、 $\Omega^{\text{tran}}$  分别为可削减负荷节点与可转移负荷节点。

## 2.2 低碳需求侧管理策略

对于这两种灵活负荷资源，影响其调度的因素主要为电价。由于需求侧管理可以改变负荷曲线，从而影响配电网从主网的购电量，在采用动态碳排放强度并考虑碳交易成本后，在进行需求侧管理时会受到碳排放影响。

因此，考虑低碳排放需求侧管理的优化控制策略原则如下：1)根据分时电价确定总体负荷调度时段，电价峰时优先削减、转出负荷，电价低谷优先转入负荷；2)在负荷调度时段内，根据动态碳排放强度确定各时段的负荷管理量，高碳排放时刻加大负荷削减及转出，低碳排放增加转入负荷量。其运行策略如图1所示。

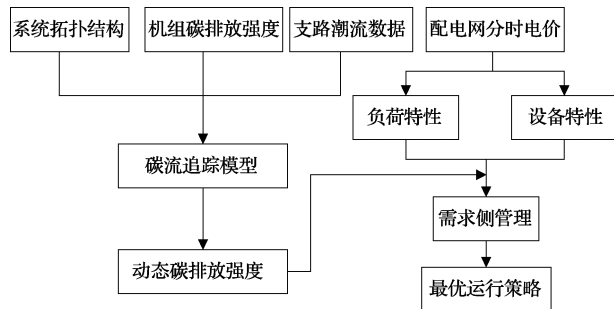


图1 低碳需求侧管理运行策略

Fig.1 Low carbon demand side management operation strategy

## 3 配电网扩展规划模型

建立考虑低碳排放和需求侧管理的配电网扩展规划模型，该模型包括规划、运行两层<sup>[16]</sup>。其中，规划层以投资成本为目标，进行线路新建、风电、光伏及储能的优化配置，运行层对规划层的规划方案模拟运行，优化系统运行经济和低碳性。该模型的结构如图2所示。

### 3.1 目标函数

1)规划层目标函数

规划层以年综合成本  $C_{\text{total}}$  最小为目标，包括年化投资成本  $C^{\text{inv}}$  和运行成本  $C^{\text{ope}}$ 。

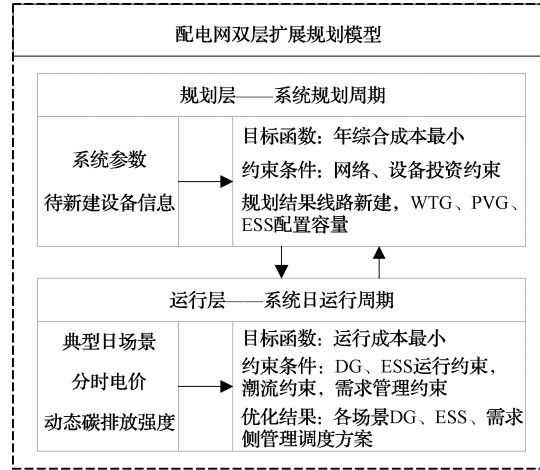


图2 配电网双层规划结构

Fig.2 Bi-level planning structure diagram of distribution network

$$\min C_{\text{total}} = C^{\text{inv}} + N \cdot C^{\text{ope}} \quad (7)$$

式中： $N$  为1年中的运行天数，取365 d。

其中，投资成本包括线路投资成本  $C_{\text{line}}$ 、WTG 投资成本  $C_{\text{WTG}}$ 、PVG 投资成本  $C_{\text{PVG}}$ 、ESS 的投资成本  $C_{\text{ESS}}$ ，即：

$$C^{\text{inv}} = C_{\text{line}} + C_{\text{WTG}} + C_{\text{PVG}} + C_{\text{ESS}} \quad (8)$$

$$\begin{cases} C_{\text{line}} = \tau \sum_{j \in \Omega^{\text{line}}} c^{\text{line}} x_j^{\text{line}} L_j \\ C_{\text{WTG}} = \tau \sum_{j \in \Omega^{\text{WTG}}} c^{\text{wt}} x_j^{\text{WTG}} S^{\text{wt}} \\ C_{\text{PVG}} = \tau \sum_{j \in \Omega^{\text{PVG}}} c^{\text{pv}} x_j^{\text{PVG}} S^{\text{pv}} \\ C_{\text{ESS}} = \tau \sum_{j \in \Omega^{\text{ESS}}} c^{\text{ess}} x_j^{\text{ESS}} S^{\text{ess}} \end{cases} \quad (9)$$

式中： $\tau$  为设备的规划等年值系数  $\tau = r(1+r)^T / ((1+r)^T - 1)$ ， $r$  为贴现率， $T$  为设备的固定投资回收期； $\Omega^{\text{line}}$ 、 $\Omega^{\text{WTG}}$ 、 $\Omega^{\text{PVG}}$ 、 $\Omega^{\text{ESS}}$  分别为待选线路集合、WTG 安装节点集合、PVG 安装节点集合、ESS 安装节点集合； $c^{\text{line}}$ 、 $c^{\text{wt}}$ 、 $c^{\text{pv}}$ 、 $c^{\text{ess}}$  分别为单位长度线路建设成本、单位容量 WTG、PVG、ESS 建设成本； $x_j^{\text{line}}$ 、 $x_j^{\text{WTG}}$ 、 $x_j^{\text{PVG}}$ 、 $x_j^{\text{ESS}}$  分别为线路、WTG、PVG、ESS 的投资决策变量，且  $x_j^{\text{line}}$  为是否投建的 0~1 变量，其余为整数变量； $L_j$ 、 $S^{\text{wt}}$ 、 $S^{\text{pv}}$ 、 $S^{\text{ess}}$  分别为各线路长度、单台 WTG、PVG、ESS 容量。

2)运行层目标函数

配电网运行成本包括主网购电成本  $C_{\text{buy}}$ 、DG 运行成本  $C_{\text{DG}}$ 、网络损耗成本  $C_{\text{loss}}$ 、弃风弃光成本  $C_q$ 、碳交易成本  $C_{\text{em}}$ 、需求侧管理成本  $C_{\text{com}}$ 。

$$C^{\text{ope}} = C_{\text{buy}} + C_{\text{DG}} + C_{\text{loss}} + C_q + C_{\text{em}} + C_{\text{com}} \quad (10)$$

$$C_{\text{buy}} = \sum_{s=1}^S \rho_s \sum_{t=1}^{24} f_t^{\text{buy}} P_{t,s}^{\text{grid}} \quad (11)$$

$$C_{\text{DG}} = \sum_{s=1}^S \rho_s \sum_{t=1}^{24} \left( \sum_{i \in \Omega^{\text{WTG}}} f_{s,i,t}^{\text{WTG}} P_{s,i,t}^{\text{WTG}} + \sum_{i \in \Omega^{\text{PVG}}} f_{s,i,t}^{\text{PVG}} P_{s,i,t}^{\text{PVG}} \right) \quad (12)$$

$$C_{\text{loss}} = \sum_{s=1}^S \rho_s \sum_{t=1}^{24} \sum_{ij \in \Omega^{\text{line}}} f^{\text{loss}} r_{ij} I_{s,ij,t}^2 \quad (13)$$

$$C_q = \sum_{s=1}^S \rho_s \sum_{t=1}^{24} \left( \sum_{i \in \Omega^{\text{WTG}}} f_q^{\text{WTG}} P_{s,i,t}^{\text{WTG,cut}} + \sum_{i \in \Omega^{\text{PVG}}} f_q^{\text{PVG}} P_{s,i,t}^{\text{PVG,cut}} \right) \quad (14)$$

式中:  $S$  为构建的典型日场景数;  $\rho_s$  为对应场景的概率;  $f_t^{\text{buy}}$  为分时电价;  $P_{t,s}^{\text{grid}}$  为场景  $s$  时刻  $t$  的购电量;  $f^{\text{WTG}}$ 、 $f^{\text{PVG}}$  分别为 WTG、PVG 的单位运行成本;  $P_{s,i,t}^{\text{WTG}}$ 、 $P_{s,i,t}^{\text{PVG}}$  分别为场景  $s$  节点  $i$  时刻  $t$  的 WTG、PVG 出力;  $f^{\text{loss}}$  为单位网络损耗成本;  $r_{ij}$  为线路阻抗;  $I_{s,ij,t}^2$  为场景  $s$  线路  $ij$  在时刻  $t$  的电流平方;  $f_q^{\text{WTG}}$ 、 $f_q^{\text{PVG}}$  分别为 WTG、PVG 的单位弃电成本;  $P_{s,i,t}^{\text{WTG,cut}}$ 、 $P_{s,i,t}^{\text{PVG,cut}}$  分别为场景  $s$  节点  $i$  时刻  $t$  WTG、PVG 弃电量。

### 3.2 约束条件

#### 1) 规划层约束条件

##### (1) 设备投资约束:

$$\begin{cases} x_j^{\text{line}} \leq 1, & \forall j \in \Omega^{\text{line}} \\ x_j^{\text{PVG}} \leq N_{\text{pv}}, & \forall j \in \Omega^{\text{PVG}} \\ x_j^{\text{WTG}} \leq N_{\text{wt}}, & \forall j \in \Omega^{\text{WTG}} \\ x_j^{\text{ESS}} \leq N_{\text{ess}}, & \forall j \in \Omega^{\text{ESS}} \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $N_{\text{wt}}$ 、 $N_{\text{pv}}$ 、 $N_{\text{ess}}$  为 WTG、PVG、ESS 在节点  $j$  的安装数量上限。

##### (2) 网络辐射状及连通性约束:

$$n = m + 1 \quad (16)$$

式中:  $n$  和  $m$  分别为规划后配电网的节点总数和线路总数。配电网设计原则<sup>[17]</sup>为闭环设计开环运行,满足辐射状约束。

#### 2) 运行层约束条件

##### (1) 分布式电源运行约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{s,j,t}^{\text{WTG}} \leq P_{s,j,\max}^{\text{WTG}} \\ 0 \leq P_{s,j,t}^{\text{PVG}} \leq P_{s,j,\max}^{\text{PVG}} \\ P_{s,j,t}^{\text{WTG}} + P_{s,j,t}^{\text{WTG,cut}} = P_{s,j,\max}^{\text{WTG}} \\ P_{s,j,t}^{\text{PVG}} + P_{s,j,t}^{\text{PVG,cut}} = P_{s,j,\max}^{\text{PVG}} \\ Q_{s,j,t}^{\text{DG}} = P_{s,j,t}^{\text{DG}} \tan\varphi \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $P_{s,j,\max}^{\text{WTG}}$ 、 $P_{s,j,\max}^{\text{PVG}}$  分别为场景  $s$  时刻  $t$  节点  $j$  的 WTG、PVG 有功功率最大值;  $Q_{s,j,t}^{\text{DG}}$  分布式电源注入的无功功率;  $\varphi$  为分布式电源的功率因数角。

##### (2) 储能运行约束:

$$\begin{cases} u_{s,j,t}^{\text{C}} + u_{s,j,t}^{\text{D}} \leq 1 \\ 0 \leq P_{s,j,t}^{\text{C}} \leq u_{s,j,t}^{\text{C}} P_j^{\text{ESS,max}} \\ 0 \leq P_{s,j,t}^{\text{D}} \leq u_{s,j,t}^{\text{D}} P_j^{\text{ESS,max}} \\ S_{s,j,t}^{\text{ESS}} = S_{s,j,t-1}^{\text{ESS}} + (P_{s,j,t}^{\text{C}} \eta^{\text{C}}) - (P_{s,j,t}^{\text{D}} / \eta^{\text{D}}) \\ 0.2 S_{\max}^{\text{ESS}} \leq S_{s,j,t}^{\text{ESS}} \leq 0.9 S_{\max}^{\text{ESS}} \\ S_{s,j,0}^{\text{ESS}} = S_{s,j,24}^{\text{ESS}} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $u_{s,j,t}^{\text{C}}$ 、 $u_{s,j,t}^{\text{D}}$  为储能充放电状态变量,ESS 设备在某个时刻状态唯一<sup>[18]</sup>;  $P_{s,j,t}^{\text{C}}$ 、 $P_{s,j,t}^{\text{D}}$  分别表示储能的充放电功

率;  $P_j^{\text{ESS,max}}$  为储能的容量上限;  $S_{s,j,t}^{\text{ESS}}$  为储能的荷电状态。

##### (3) 安全约束:

$$\begin{cases} (V^{\text{min}})^2 \leq V_{s,i,t}^2 \leq (V^{\text{max}})^2 \\ 0 \leq I_{s,ij,t}^2 \leq (I_{ij}^{\text{max}})^2 \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $V^{\text{min}}$ 、 $V^{\text{max}}$  分别为节点电压下限、上限;  $V_{s,i,t}^2$  表示节点电压的平方;  $I_{ij}^{\text{max}}$  表示线路电流的最大值。

##### (4) Distflow 潮流约束:

$$\sum_{k \in \delta_j} P_{s,jk,t} - \sum_{i \in \phi_j} (P_{s,ij,t} - I_{ij,t} r_{ij}) = P_{s,j,t} \quad (20)$$

$$\sum_{k \in \delta_j} Q_{s,ij,t} - \sum_{i \in \phi_j} (Q_{s,ij,t} - I_{s,ij,t} x_{ij}) = Q_{s,t,j} \quad (21)$$

$$V_{s,i,t}^2 - V_{s,i,t}^2 - 2P_{s,ij,t} r_{ij} - 2Q_{s,ij,t} x_{ij} + I_{s,ij,t}^2 (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \geq -M(1 - x_j^{\text{line}}) \quad (22)$$

$$V_{s,i,t}^2 - V_{s,i,t}^2 - 2P_{s,ij,t} r_{ij} - 2Q_{s,ij,t} x_{ij} + I_{s,ij,t}^2 (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \leq -M(1 - x_j^{\text{line}}) \quad (23)$$

$$P_{s,ij,t}^2 + Q_{s,ij,t}^2 = V_{s,i,t}^2 I_{s,ij,t}^2 \quad (24)$$

$$P_{s,j,t} = P_{s,j,t}^{\text{WTG}} + P_{s,j,t}^{\text{PVG}} + P_{\text{grid},s,t} - P_{s,j,t}^{\text{load}} \quad (25)$$

$$Q_{s,t,j} = Q_{s,j,t}^{\text{WTG}} + Q_{s,j,t}^{\text{PVG}} + Q_{\text{grid},s,t} - Q_{s,j,t}^{\text{load}} \quad (26)$$

式中:  $\delta_j$  表示以  $j$  为首端的线路集合;  $\phi_j$  表示以  $j$  为末端的线路集合;  $P_{s,j,t}$ 、 $Q_{s,t,j}$  分别表示各设备在节点  $j$  注入的有功功率和无功功率,若该节点无相应设备,则其值取 0;  $P_{s,j,t}^{\text{load}}$ 、 $Q_{s,j,t}^{\text{load}}$  分别为节点  $j$  处的有功功率和无功率。

### 3.3 模型转化

上述配电网双层规划模型需两层间迭代求解,且潮流约束中存在非凸模型,难以达到全局最优解。因此,本文首先将规划-运行层关联<sup>[19]</sup>转化为单层模型,然后采用二阶锥松弛将非凸项线性化。

##### DG、ESS 约束关联:

$$\begin{cases} P_{s,j,\max}^{\text{WTG}} = P_{s,t,\max}^{\text{WTG}} x_j^{\text{WTG}} \\ P_{s,j,\max}^{\text{PVG}} = P_{s,t,\max}^{\text{PVG}} x_j^{\text{PVG}} \\ P_j^{\text{ESS,max}} = P_{\max}^{\text{ESS}} x_j^{\text{ESS}} \\ S_{\max}^{\text{ESS}} = S_{\max}^{\text{ESS}} x_j^{\text{ESS}} \end{cases} \quad (27)$$

式中:  $P_{s,\max}^{\text{WTG}}$ 、 $P_{s,\max}^{\text{PVG}}$  为单台 WTG、PVG 在场景  $s$  时刻  $t$  的有功功率;  $P_{\max}^{\text{ESS}}$  为单台 ESS 的功率上限。

利用辅助变量  $U_{s,i,t}^{\text{sqr}}$  和  $I_{s,ij,t}^{\text{sqr}}$  代替潮流约束中非凸二次项  $V_{s,i,t}^2$  和  $I_{s,ij,t}^2$  进行二阶锥松弛,则式(24)转化为:

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{s,ij,t} \\ 2Q_{s,ij,t} \\ U_{s,i,t}^{\text{sqr}} - I_{s,ij,t}^{\text{sqr}} \end{array} \right\|_2 \leq U_{s,i,t}^{\text{sqr}} + I_{s,ij,t}^{\text{sqr}} \quad (28)$$

转化后的模型是一个混合整数线性规划问题,在 MATLAB 仿真平台利用 YALMIP 工具箱调用线性求解器 Gurobi 11.0.0 求解。

## 4 算例分析

### 4.1 算例设置

在改进的 IEEE 33 节点<sup>[20]</sup>配电系统中验证所提模型,其拓扑结构如图 3 所示。系统额定电压为 12.66 kV,

节点电压幅值上下限为 0.95~1.05 p. u.。可转移负荷节点为 9~18,转移电量上限为节点自身负荷 20%;可削减负荷节点为 26~33,负荷削减上限为节点负荷的 20%。规划期限以及各设备的使用年限均设定为 10 年,折现率为 5%。其余参数参考文献[21-22]。

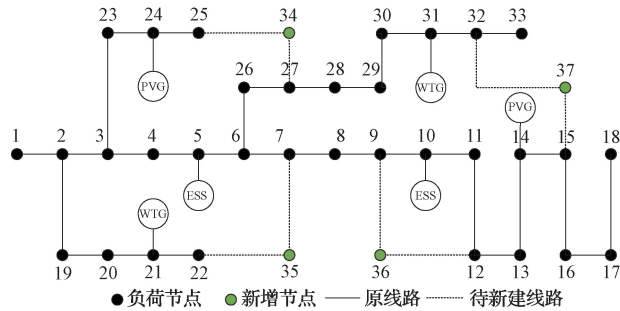


图 3 改进 IEEE 33 节点配电网拓扑图

Fig. 3 Improved IEEE 33 node distribution network topology diagram

线路参数 WTG、PVG 和 ESS 的设备参数如表 1 所示。DG 的削减上限为 0.2,功率因数为 0.95。ESS 设备的荷电状态为 0.2~0.9,每个运行周期的初始荷电为 0.5,充放电效率均为 0.98。

风光荷典型日场景参考文献[23],各场景出力情况如图 4 所示,各场景对应时段及概率如表 2 所示。

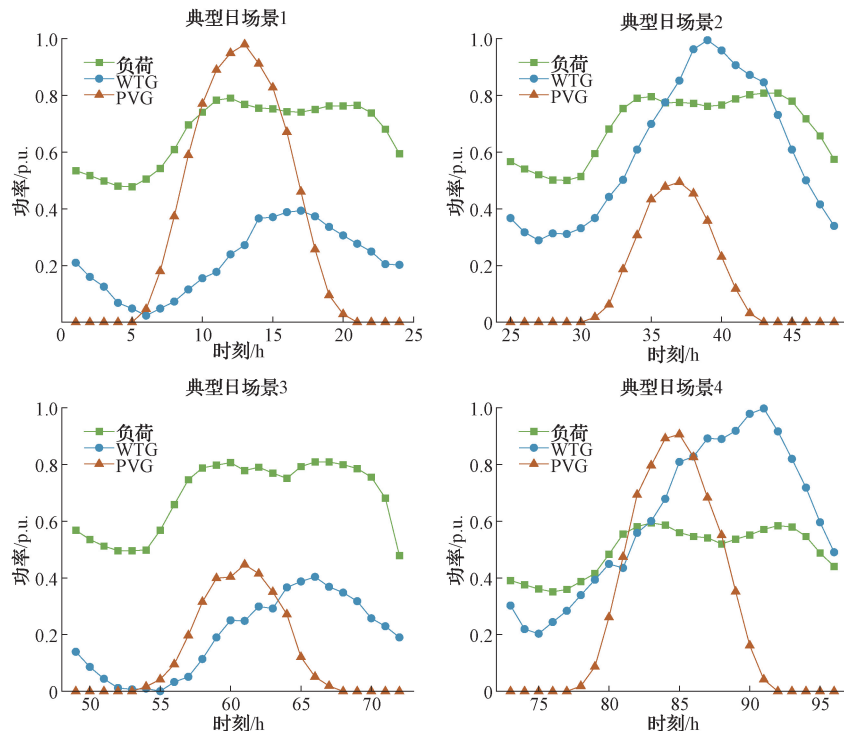


图 4 风光负荷功率曲线

Fig. 4 Wind load power curve

表 1 DG 和 ESS 设备参数

Table 1 DG and ESS equipment parameters

设备类型	安装节点	单位容量投资成本/元	单台设备容量/kW
PVG	14,24	8 000	200
WTG	21,31	7 500	200
ESS	5,10	2 000	250

表 2 典型日场景时段及其概率

Table 2 Typical day scene period and its probability

场景	时段	概率
1	1~24	0.221
2	25~48	0.255
3	49~72	0.379
4	73~96	0.145

配电网向主网购电采用北京市大工业分时电价,如图 5 所示。PVG、WTG 单位运行成本为 0.35 元/(kW·h),弃风弃光惩罚成本为 0.7 元/(kW·h);单位网络损耗成本为 0.6 元/(kW·h);单位负荷削减成本为 0.7 元/(kW·h),单位转移电量补偿成本为 0.1 元/(kW·h)。

主网购电的动态碳排放强度采用清华大学与国网江苏省电力有限公司共同构建的 ecarbon+ 平台数据,典型

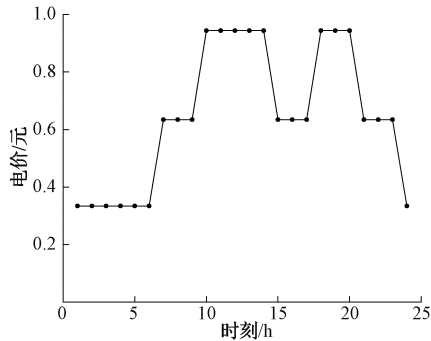


图5 分时电价  
Fig. 5 Time-of-use price

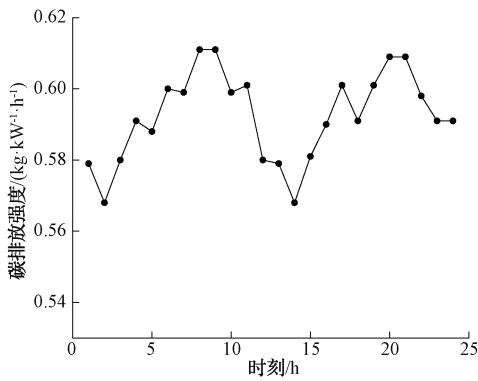


图6 动态碳排放强度  
Fig. 6 Dynamic carbon emission intensity

日实时用电碳排放量如图6所示。单位电量的无偿碳排放配额为0.3901 kg/(kW·h),碳交易价格为0.15元/kg(CO<sub>2</sub>)。

为了分析系统在扩展规划时采用动态碳排放强度进行碳交易和需求侧管理的优越性,设置如下4种情景对比碳交易和需求侧管理对配电网扩展规划的影响。各情景设置情况如表3所示,规划结果如表4所示。平均碳排放强度设置为0.62 kW·h/kg。

表3 情景设置

Table 3 Contextual settings

情景	碳排放强度	碳交易	需求侧管理
1	动态	不考虑	不考虑
	平均	不考虑	不考虑
2	动态	考虑	不考虑
	平均	考虑	不考虑
3	动态	不考虑	考虑
	平均	不考虑	考虑
4	动态	考虑	考虑
	平均	考虑	考虑

#### 4.2 结果分析

通过对比情景1中采用不同碳排放强度计量配电网碳排放可知,采用动态碳排放强度对比平均排放强度计量时低4.5%左右。由于电力负荷的高峰时段新能源丰富,动态碳排放强度较低。

表4 不同情景下的规划结果对比

Table 4 Comparison of planning results under different scenarios

情景	核算方式	投资成本	运行成本/万元				碳排放量/t	总成本/万元
			供电成本	网路损耗	需求侧管理	弃风弃光		
1	平均	275.876 0	1 383.57	74.28	—	0	—	10 764.83
	动态	275.876 0	1 383.57	74.28	—	0	—	10 296.54
2	平均	305.790 4	1 355.63	72.30	—	0	58.62	10 539.36
	动态	300.973 3	1 360.28	72.18	—	0.204 2	51.69	10 074.96
3	平均	314.702 1	1 265.58	68.07	55.786 8	0.999 7	—	9 839.84
	动态	314.702 1	1 265.58	68.07	55.786 8	0.999 7	—	9 409.42
4	平均	314.702 1	1 264.45	67.99	57.041 6	0.998 18	54.66	9 826.35
	动态	314.702 1	1 264.89	67.98	56.969 4	0.998 18	48.17	9 394.13

情景2中,当考虑碳交易后,碳排放成本要计入总成本,过高的碳排放会加大这部分成本。为降低该部分成本,在规划过程中增加了DG和ESS的投资,使得情景2下碳排放较情景1下降约2.2%。因此,当考虑碳排放成本后,系统会增加低碳清洁能源的比重。

情景3中,考虑需求侧管理后,配电网规划的成本及碳排放较情景1均有所下降,其中成本下降约1.9%。

需求侧管理包括削减负荷和转移负荷,通过补偿负荷成本与主网购电的差价降低总体的运行成本。因此,配电网在扩展规划过程中考虑需求侧管理可有效减低系统运行成本。

情景4综合考虑碳交易和需求侧管理后,规划方案得到进一步提升。情景4的规划成本相较于情景2降低约2%,且与情景1相比碳排放降低约8.8%。情景4中动态

碳排放强度时间上的差异性对可转移负荷造成影响,使得负荷在转移时不仅仅要考虑电价还要考虑各个时刻的碳排放强度,将负荷转移到碳排放强度更低时刻则可减少碳排放。这也使得动态碳排放强度下,情景4比情景3的碳排放降低15.27 t,说明动态碳排放强度有利于提高需求侧管理的低碳性。

表5为各情景中采用动态碳排放强度下的规划方案,

可以看出,当考虑碳交易或需求侧管理后,系统对设备的投资将有所增加,特别是考虑需求侧管理情况下各设备的容量达到最大。结合表4和5可知,考虑碳交易和需求侧管理后,会使得线路潮流更加均衡,线路选择也会更合理,网络损耗显著降低;弃风弃光量虽有所增加但总体风光消纳量有所增加。因此,综合考虑低碳需求侧管理可有效提高DG接纳、降低运行成本。

表5 动态排放强度下各情景的规划方案

Table 5 The planning scheme of each scenario under dynamic emission intensity

情景	线路编号	WTG节点(数量)	PVG节点(数量)	ESS节点(数量)
1	27~34,22~35	21(5),31(5)	14(5),24(1)	5(5),10(2)
	9~36,32~37			
2	27~34,22~35	21(5),31(5)	14(4),24(3)	5(5),10(3)
	9~36,15~37			
3	25~34,22~35	21(5),31(5)	14(5),24(3)	5(5),10(4)
	9~36,32~37			
4	25~34,22~35	21(5),31(5)	14(5),24(3)	5(5),10(4)
	9~36,32~37			

为进一步说明动态碳排放强度的影响,对比情景4中两种碳排放强度下ESS运行情况和需求侧管理策略。选择典型日场景2的运行情况作对比分析,ESS运行情况如图7所示。

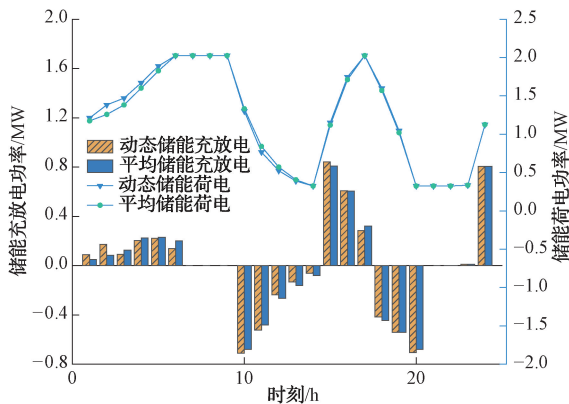


图7 两种碳排放强度下储能充放电功率对比

Fig. 7 Comparison of charge and discharge power of energy storage under two carbon emission intensities

由图7可知,当采用动态排放后,储能充放电会受到不同时刻碳排放影响,其充电量与平均相比有明显差异。比如在第1个充电时段中,时刻1:00~2:00的碳排放强度较低,充电量大大增加,而其余时刻则有所降低;第2充电时段中15:00的碳排放强度低于17:00,因此充电量前者有所增加后者则是下降。而在放电时刻则是相反总体来说就是依据主网电价决定各时段充电或放电,在碳排放强度较高时刻多释放电能,少吸收电能,低碳排放强

度少释放电能,多吸收电能,降低系统的总碳排放水平。

不同碳排放强度在场景2的需求侧管理前后负荷曲线如图8所示。通过需求侧管理可缩小负荷的峰谷差。传统需求侧管理主要通过的高峰时刻根据电价对负荷进行削减,或者将负荷转移到电价低谷时,通过差价降低配电网运行成本。当考虑碳排放后,需求侧管理策略的制定要受到碳排放的影响,而采用不同碳排放强度计量系统碳排放则是影响更加明显。不同碳排放强度下的负荷曲线主要体现在负荷的高峰时段,如12:00~17:00的购电碳排放强度较低,因此负荷削减和转移电量相较于平均较少,动态碳排放负荷曲线明显高于原负荷曲线的部分。进一步对比可削减负荷和可转移负荷,其结果如图9所示。

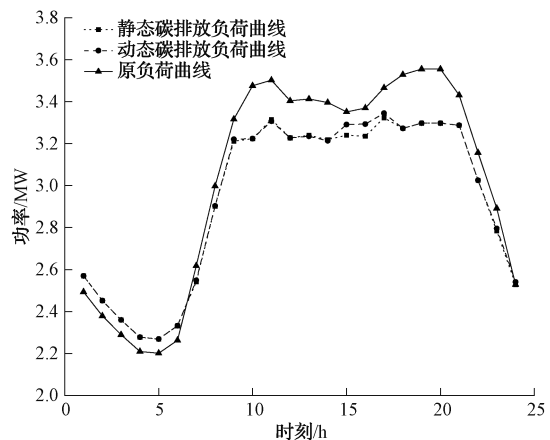


图8 需求侧管理前后负荷曲线

Fig. 8 Load curve before and after demand side management

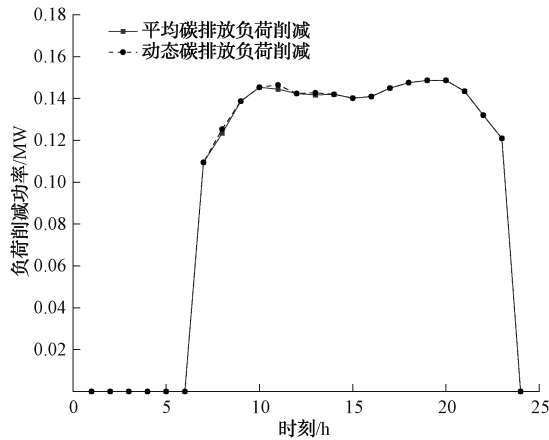


图9 负荷削减情况对比

Fig. 9 Comparison of load reduction

两种碳排放强度下的负荷削减基本一致,因为负荷削减主要受到可削减量以及各时刻电价主导,因此,可削减负荷受到碳排放强度的影响不大。

各时刻转入与转出电量如图10所示,功率大于0为该时刻转出电负荷,小于0为该时刻转入电负荷。可以看出转移负荷受到碳排放强度影响较大。如在14:00碳排放强度最低时,转出负荷减少,而相邻时刻转入的负荷也随之减少。因此转移负荷受到碳排放影响主要是考虑高碳时刻增加转出负荷,在低碳时刻减少转入负荷。

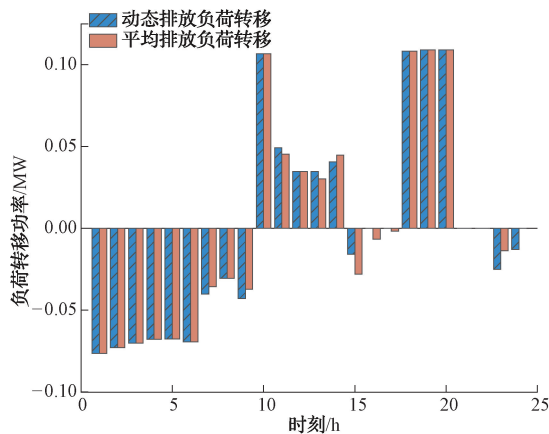


图10 负荷转移情况对比

Fig. 10 Comparison of load transfer

综上,主网购电的动态碳排放强度能够依据其碳排放的时变特性,进行运行调度和管理需求侧负荷,有效提高运行经济性,降低系统碳排放。

### 4.3 灵敏度分析

设置不同的主网购电碳排放强度,提高碳排放强度的差异性,以初始动态碳排放强度峰值与低谷差值的倍数表示。对比场景3、4,规划结果如表6所示。

由表6可知,随着主网购电碳排放强度的差异性增

表6 不同碳排放强度差异性规划结果对比

Table 6 Comparison of different carbon emission intensity difference planning results

倍数	场景3	场景4	差值
1	9 409.4	9 394.1	15.3
2	9 778.4	9 804.5	26.1
3	10 155.3	10 199.2	43.9
4	10 525.4	10 594.2	68.8

加,系统的碳排放量不断增加,但与不考虑碳排放成本的需求侧管理相比可以进一步降低配电网碳排放水平。这是因为系统在调度过程中电能的转移会考虑该差异性,差异性越大电能转移收益越高。另外,如果主网购入的电能碳排放强度过高,会导致系统整体碳排放增加,因此降低需求侧碳排放有利整体碳排放水平的降低。未来新能源电力系统环境下,碳排放差异性会扩大,碳排放强度将不断降低,采用更加准确的碳排放强度配合灵活性资源值得被考虑。

## 5 结论

为应对需求侧管理在配电网扩展规划中缺乏碳排放考虑问题,建立动态碳排放强度的模型,继而提出了一种考虑低碳排放与需求侧管理的配电网扩展规划方法。经过仿真分析验证了所提方法的有效性,得出如下结论。

1)在配电网扩展规划过程中综合考虑碳交易和需求侧管理的影响,能够在保证系统运行的情况下消纳更多DG,提高系统运行的经济性与低碳性。

2)采用动态碳排放强度提高排放计量的准确性,将其与需求侧资源结合所制定的管理策略有效降低系统碳排放。增加动态碳排放强度的差异性,需求侧资源的低碳灵活性将进一步提高。

### 参考文献

[1] 刘天蔚,边晓燕,吴珊,等. 电力系统碳排放核算综述与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 176-187.  
LIU T W, BIAN X Y, WU SH, et al. Overview and prospect of carbon emission accounting in electric power systems [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 176-187.

[2] 李楠,王伟,马雪,等. 考虑碳交易成本及区域能源优化的配电网扩展规划研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(8): 3101-3109.  
LI N, WANG W, MA X, et al. Distribution network expansion planning considering carbon trading cost and regional energy optimization [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(8): 3101-3109.



- [3] DE LIMA T D, TABARES A, BAÑOL ARIAS N, et al. Investment & generation costs vs CO<sub>2</sub> emissions in the distribution system expansion planning: A multi-objective stochastic programming approach [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 131: 106925.
- [4] 胡晶,陈红坤,陈磊,等.考虑多主体利益与需求响应的分布式电源优化配置[J].*电力系统保护与控制*, 2021,49(15):38-46.  
HU J, CHEN H K, CHEN L, et al. Distributed generation planning in an active distribution network considering multi-agent interests and demand response[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(15): 38-46.
- [5] 刘雪飞,刘洋,马国真,等.考虑负荷差异化需求响应的配电网多目标扩展规划[J].*电力系统保护与控制*, 2022,50(22):131-141.  
LIU X F, LIU Y, MA G ZH, et al. Multi-objective extended planning for a distribution network considering demarcation of demand response schemes[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(22): 131-141.
- [6] XIE S, HU Z, WANG J. Two-stage robust optimization for expansion planning of active distribution systems coupled with urban transportation networks [J]. *Applied Energy*, 2020, 261: 114412.
- [7] 梁作宾,高山,王庆,等.低碳背景下基于自适应鲁棒优化的含源配电系统规划方法[J].*电网与清洁能源*, 2021,37(12):70-80.  
LIANG Z B, GAO SH, WANG Q, et al. A planning method for the source-containing distribution system based on adaptive robust optimization under low-carbon background [J]. *Power System and Clean Energy*, 2021, 37(12):70-80.
- [8] 孙春山,魏光明,邱东,等.计及低碳排放和需求侧管理的主动配电网双层规划研究[J].*电器工业*, 2023(9):63-66,71.  
SUN CH SH, WEI G M, QIU D, et al. Reserch on bi-level planning of active distribution network considering low carbon emissions and demand side management [J]. *China Electrical Equipment Industry*, 2023(9): 63-66,71.
- [9] 杨东俊,涂智福,徐敬友,等.计及低碳排放和需求侧管理的主动配电网双层规划[J].*武汉大学学报(工学版)*, 2022,55(7):709-715.  
YANG D J, TU ZH F, XU J Y, et al. Bi-level planning of active distribution network considering low carbon emissions and demand side management[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2022, 55(7): 709-715.
- [10] 张靖,李勇,曹一家,等.计及需求侧管理与碳排放的综合能源系统光-储设备优化配置方法[J].*电力自动化设备*, 2024,44(7):189-197.  
ZHANG J, LI Y, CAO Y J, et al. Optimal configuration approach of PV-ESS for integrated energy system considering demand-side management and carbon emission[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(7): 189-197.
- [11] 韩肖清,李廷钧,张东霞,等.双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J].*高电压技术*, 2021, 47(9):3036-3046.  
HAN X Q, LI T J, ZHANG D X, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals [J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(9): 3036-3046.
- [12] 彭静,王军,亓富军,等.“双碳”目标下配电网多阶段扩展规划[J].*电力系统保护与控制*, 2022, 50(7): 153-161.  
PENG J, WANG J, QI F J, et al. Multi-stage expansion planning of a distribution network with double-carbon policy [J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(7): 153-161.
- [13] 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 J X, GAO CH, LI J P, 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.
- [14] 王冲,葛玉林,鞠平,等.基于碳排放动态分配调度优先级的配电系统低碳经济运行[J].*电网技术*, 2023, 47(11):4467-4481.  
WANG CH, GE Y L, JU P, et al. Low-carbon economic operation of distribution system based on carbon emission dynamic allocation dispatch priority[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(11): 4467-4481.
- [15] 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 Y W, ZHANG N, DU ER SH, 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.
- [16] 姜宏伟,汪庆年,尚宝,等.基于改进和声搜索算法与

- 二阶锥松弛的储能优化配置[J]. 电子测量技术, 2022, 45(6): 86-93.
- JIANG H W, WANG Q N, SHANG B, et al. Optimal configuration of energy storage based on improved harmony search algorithm and second-order cone relaxation [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(6): 86-93.
- [17] 刘云, 张洁羽, 樊浩研, 等. 分布式电源配电网多目标优化重构方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(3): 83-87.
- LIU Y, ZHANG J Y, FAN H Y, et al. Reserch on multi objective optimization reconfiguration method of distributed generation distribution network [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2021, 40(3): 83-87.
- [18] 孟国情, 邱晓燕, 张明珂, 等. 计及柔性负荷和换电站的综合能源系统优化调度[J]. 电子测量技术, 2023, 46(14): 138-145.
- MENG G Q, QIU X Y, ZHANG M K, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering flexible loads and battery swapping station[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023, 46(14): 138-145.
- [19] 张沈习, 王浩宇, 李然, 等. 考虑智能软开关接入的主动配电网扩展规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 48-61.
- ZHANG SH X, WANG H Y, LI R, et al. Active distribution network expansion planning method considering the integration of soft open point[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(1): 48-61.
- [20] 洪翠, 吴奕炜, 高伟, 等. 基于 GrapSAGE 算法的配电网故障定位方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(11): 236-245.
- HONG C, WU Y W, GAO W, et al. Fault location method in distribution network based on GrapSAGE algorithm[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(11): 236-245.
- [21] 刘自发, 于普洋, 李颀雨. 计及运行特性的配电网分布式电源与广义储能规划[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(3): 72-79.
- LIU Z F, YU P Y, LI J Y. Planning of distributed generation and generalized energy storage in distribution network considering operation characteristics [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(3): 72-79.
- [22] 杨茵, 刘毅力, 崔关奇. 计及分布电源消纳的混合储能系统优化配置[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(7): 188-196.
- YANG Y, LIU Y L, CUI G Q. Optimal configuration of hybrid energy storage in active distribution network considering distributed generation consumption [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2023, 42(7): 188-196.
- [23] 黄宗龙, 江修波, 刘丽军. 低碳化背景下配电网“源—储—荷”多目标优化配置[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(5): 36-45.
- HUANG Z L, JIANG X B, LIU L J. Multi-objective optimal allocation of "generation-storage-load" under the low-carbon background[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2020, 35(5): 36-45.

## 作者简介

叶加乐(通信作者), 硕士研究生, 主要研究方向为低碳配电网扩展规划。

E-mail: 1848283178@qq.com

赵平, 博士, 讲师, 主要研究方向为新能源并网控制。

E-mail: zp1975@126.com