

文章编号: 1006-2467(2023)04-0442-10

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.482

# 考虑碳排放指标的配电网经济调度方法

陈雨婷<sup>1</sup>, 赵毅<sup>1</sup>, 吴俊达<sup>1</sup>, 孙文瑶<sup>1</sup>, 夏世威<sup>2</sup>

(1. 沈阳工程学院 电力学院, 沈阳 110136; 2. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 碳中和愿景下二氧化碳排放配额指标逐步递减, 清洁能源必将超高比例渗透, 传统配电网调度模式需解决碳排放达标与清洁能源强间歇性平抑等问题. 在分析碳排放指标与电功率经济成本耦合关系的基础上, 提出未来态配电网碳电耦合新型调度模型, 针对系统运行碳排放成本递增若干场景, 基于二阶锥规划模型提出配电网优化调度策略, 设置不同的碳排放成本区间及并网容量区间, 在改进的 IEEE 33 节点系统验证了方法的有效性, 算例结果表明: 在特定的成本区间内, 配电网的发电行为随之变化, 所提方法能够有效应用于双碳目标下的配电网经济调度中, 提高配电网稳定性, 促进清洁能源消纳.

**关键词:** 碳排放配额; 配电网; 碳电耦合; 优化调度; 清洁能源

中图分类号: TM 732

文献标志码: A

## Economic Dispatch Method of Distribution Network Considering Carbon Emission Index

CHEN Yuting<sup>1</sup>, ZHAO Yi<sup>1</sup>, WU Junda<sup>1</sup>, SUN Wenyao<sup>1</sup>, XIA Shiwei<sup>2</sup>

(1. School of Electric Power, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China; 2. School of Electrical and Electronics Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Under the vision of carbon neutrality, carbon dioxide emission allowance targets are gradually decreasing, and clean power sources will penetrate in an ultra-high proportion. The traditional distribution grid dispatching model needs to solve the problems of carbon emission compliance and strong intermittent leveling of clean power sources. Based on the analysis of the coupling relationship between carbon emission index and the economic cost of electric power, this paper proposes a novel dispatching model for the future state distribution grid with carbon and electric power coupling, proposes an optimal dispatching strategy for distribution grid based on the second-order cone planning model for several scenarios of increasing carbon emission cost of system operation, and verifies the effectiveness of the proposed method in the improved IEEE 33-node system. The example results show that the output and power generation cost of each distribution network change after considering the carbon emission index.

**Key words:** carbon emission allowance; distribution grid; carbon-electrical coupling; optimize dispatch; clean power

收稿日期: 2021-12-02 修回日期: 2022-04-14 录用日期: 2022-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(52077075)资助项目

作者简介: 陈雨婷(1998-), 硕士生, 从事配电系统运行与控制方面的研究.

通信作者: 赵毅, 副教授; E-mail: reef614@163.com.

“双碳”路径下,风、光等清洁能源将逐步代替火、水可调电厂成为电量主体,其固有的强间歇性和弱受控性将为电力系统运行与调控带来诸多问题,突出表现为:碳中和指标达成压力,导致电力供给侧间歇性逐步加剧问题<sup>[1-2]</sup>. 上述问题的核心在于:间歇性清洁能源持续增长,而可用于平衡电力供需剧烈波动的灵活性资源严重短缺<sup>[3]</sup>. 未来配电系统将具有多种微电网,微网中含有分布式电源、分散储能聚合、电动汽车、可控负荷等灵活性可调资源,可作为配电系统调度对象,用以消纳清洁能源,是对当前清洁能源消纳方法的有效补充. 配电系统的低碳化是电力行业碳中和的重要组成部分,配电系统中的电能供给将主要由 2 个部分组成:一是来自上级大电网输送,包括火力发电(简称火电)厂发出的碳基电能,以及风电场、光伏电站、水电站、核电站发出的清洁电能;二是来自配电侧的分布式发电,包括微型燃气轮机等小型电源发出的碳基电能,以及分布式风力机、光伏发出的清洁电能.

广义上的“碳中和区”允许清洁能源发生内外流动,共同参与更大范围内的碳交换过程<sup>[4]</sup>. 因此,对于广义的碳中和区而言,清洁能源不仅可以来自上级电网,考虑碳排放的约束作用即考虑碳排放成本和自身碳配额值时,还可以考虑将碳权交易与电力市场交易相结合. 从优化的角度来看,在智能配电网规划模型中考虑碳排放约束,可以达到“供需平衡”“经济可靠”“低碳高效”的多重效果.

在配电网优化调度方面,目前国内外学者对基于优化理论的经济调度方面的研究,大多集中在以经济性为目标进行调度. 文献[5]建立主动配电网分布式优化模型,采用复制节点的区域分解方法实现配电网和微电网的解耦. 文献[6]考虑可再生能源输出的不确定性,建立了主动配电网分布式鲁棒优化调度模型. 文献[7]对主动配电网进行合理分区,并以配电网不同分区内分布式电源消纳最大化、电网电压偏差最小及网损最小为目标,提出一种主动配电网的分布式有功无功优化调控方法. 文献[8]将鲁棒机会约束模型引入到调度计划中,提出了考虑区域自治能力的主动配电网优化调度模型.

在配电网电力市场交易方面,文献[9]在批发市场和配电市场中引入了负荷聚合商,分析了微电网、发电公司和负荷聚合商三者之间基于完全信息下的动态博弈行为,通过收益函数对报价策略的灵敏度矩阵更新自身的报价策略,直至市场达到均衡. 除此之外,文献[10]提出了一种多领导者单追随者的非线性双层规划模型,并采用粒子群算法求解系统的

广义纳什均衡点. 文献[11]提出了一种非线性互补算法对此类双层规划问题进行求解. 上述文献的主要研究对象集中在输电侧,而对配电侧市场,尤其是微电网参与下的配电侧市场交易和竞价机制研究较少.

在碳排放权市场方面,文献[12-14]分别采用了熵权法、两级分配、选举机制讨论并设计了与交易市场相匹配的绿证、碳排放配额分配方法;文献[15]讨论了碳排放配额制下的交易决策及利益分配策略;文献[16]基于总量管制和交易(Cap-and-Trade)模式,对中国的碳减排项目进行分析,给出碳排放评级方法并对碳市场价格进行预测.

综上,现有配电系统调度体系中,考虑碳排放成本系数的优化调度研究较少,由此,分析碳排放指标对配电系统运行成本的影响,提出未来态配电系统碳电耦合新型经济调度模型. 与现有固定碳排放成本系数的碳排放指标相关研究不同,本文在此基础上,设置碳排放成本动态区间,针对配电系统碳排放成本递增若干场景,在改进 IEEE 33 节点进行算例仿真,验证方法的有效性.

## 1 考虑碳排放指标的配电系统调度模式

为了说明调度模式,虚拟了 2 个不同城市的城市规模、二氧化碳排放量以及清洁能源发电占比等信息,如表 1、图 1 所示. 可见,城市 A 清洁能源(低碳电源)少、火电(高碳电源)占绝大比例,碳排放量较高;城市 B 低碳电源占比大,碳排放量较低. 鉴于低碳电源发电量与气候条件的强耦合性,考虑碳排放强度指标因素和碳排放权交易途径,存在以下两种典型场景.

场景 1 为低碳电源电力充足场景(风光资源充足). 在此场景下,城市 B 电力可以自给自足,并存在剩余电力和一定量的碳排放权可以交易. 城市 A 存在从城市 B 购电的同时积累碳排放配额可能,也存在靠自身高碳电源保持电力供给的可能.

场景 2 为低碳电源电力不足场景(风光资源不足). 在此场景下,城市 B 电力不足,需从 A 购电以满足电力供给,城市 A 存在向 B 售电情况下碳排放超标可能,也存在从 B 购买碳排放权的可能.

影响以上两种典型场景的城市 A 发电决策的影响因素主要是:发电成本、城市碳排放强度指标、售购电价格与碳排放权交易价格等. 具体如表 1 所示.

间歇式清洁能源在电源侧和负荷侧并网达到超

表 1 配电网碳-电虚拟场景  
Tab. 1 Distribution grid carbon-electric virtual scene

电网	清洁能源比例	碳排放量	场景 1:低碳电源电力充足	场景 2:低碳电源电力不足
电网 A	低	高	电力自足/购电 碳排放自足/购碳排放权	电力自足下可售电 购买碳排放权
电网 B	高	低	电力自足/售电 碳排放权不交易/碳排放权交易	电力不足需购电 碳排放权可交易

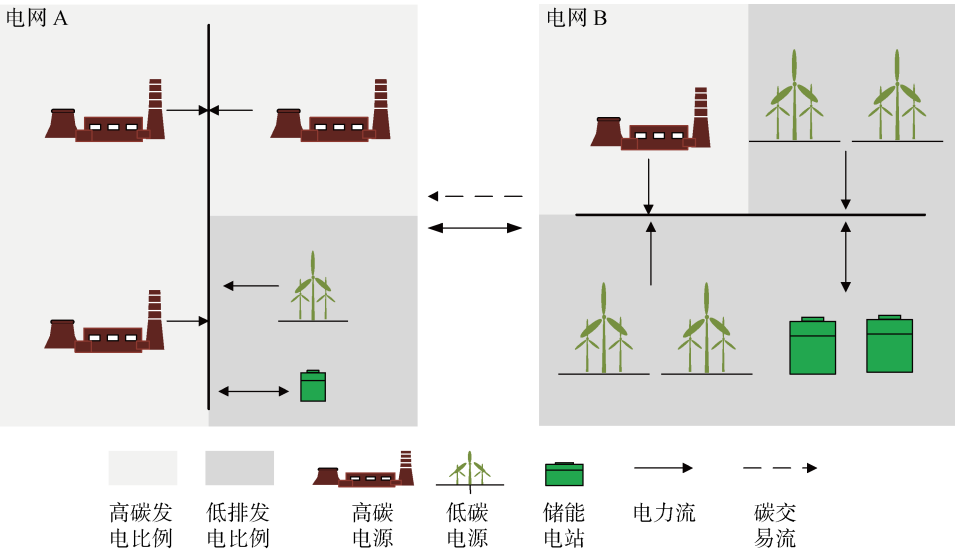


图 1 考虑清洁能源分布特性的配电网电力流与碳交易流耦合调度示意图

Fig. 1 Schematic diagram of distribution network power flow and carbon trading flow coupling scheduling considering distribution characteristics of clean power supply

高比例后,由于清洁能源受天气影响严重,传统日负荷曲线和日发电曲线均将呈现更大的间歇性,在极端天气条件下清洁能源发电困难,此时电源侧对负荷侧供给不足,存在用-发电角色互易的可能,甚至存在负荷需/供功率与电源供/需功率反向叠峰叠谷的可能,此时引入碳市场交易保证在碳中和实现目标中仍可以保持电力供给充足。

碳市场交易会对电力市场造成一定影响<sup>[17-20]</sup>。在发电侧,碳交易对火电企业带来巨大影响,当火电参与市场交易时要考虑综合供电成本,企业根据所接收的上网电量计算免费碳排放配额。在未来电力现货市场中,火电企业售电报价方案需要考虑综合收益。在用电低谷时段,用低价电换电量,提高负荷率,降低供电排放强度,从而增加配额销售量或减少配额购买量。售电的损失通过碳交易弥补,实现综合收益最大化。

在售电侧,碳市场不会对售电公司产生直接影响,但是新的增值服务机遇可以由其提供给售电公司。售电公司并不承担控制碳排放的任务,但是全国碳排放市场中未来也许会出现由其代理的用电企

业,亦或者目前已有由其代理的用电企业被纳入地区碳排放市场,电力用户侧可以享受由售电公司提供的碳市场价格趋势预测、碳减排咨询、碳交易策略建议、绿电采购等增值业务。

在用户侧,碳市场和电力市场需被均衡考虑,应按照实际情况调整购电策略。应通过技术创新以及提高管理水平,或通过市场交易,如向清洁能源电厂购电的方式减少碳排放量,使用户侧企业达到降低碳排放履约成本的目的。

新形势下的电网调度既要遵循电网运行的客观规律,保证电网的安全、稳定、经济、优质运行,又要按市场规则进行电力调度,为电力市场的平稳运营保驾护航。

2 配电网优化调度模型

针对清洁能源集中式并网时,区域电网碳中和指标阶段性达成诉求,研究不同场景下的碳-电耦合模型,将碳指标与电计划进行阶段性分解,在碳中和强度阶段性指标达成前提下,综合考虑负荷电力需求与配电网经济运行需求,针对信息共享型微网,建

立以配电网整体运行成本最小化为目标,以负荷削减、配电网安全和储能出力等为约束,重点考虑配电网碳排放成本的集中式优化经济调度模型。

## 2.1 基于混合整数二阶锥的模型转换

二阶锥规划(Second-Order Cone Programming, SOCP)的标准形式如下:

$$\min\{\mathbf{c}^T \mathbf{x} \mid \mathbf{Ax} = \mathbf{b}, \mathbf{x}_i \in K, i = 1, 2, \dots, N\} \quad (1)$$

式中:任意一点  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}_N$ ; 系数常量  $\mathbf{b} \in \mathbf{R}_M$ ,  $\mathbf{c} \in \mathbf{R}_N$ ,  $\mathbf{A}_{M \times N} \in \mathbf{R}_{M \times N}$ ; 对于锥中任意一点,  $K$  为如下形式的二阶锥或旋转二阶锥。

对于任意一点  $x, y$  满足:

$$K = \{\mathbf{x}_i \in \mathbf{R}_N \mid y^2 \geq \sum_{i=1}^N x_i^2, y \geq 0\} \quad (2)$$

为二阶锥。

对于任意一点  $x, y, z$  满足:

$$K = \{\mathbf{x}_i \in \mathbf{R}_N \mid yz \geq \sum_{i=1}^N x_i^2, y, z \geq 0\} \quad (3)$$

为旋转二阶锥。

SOCP 是一种特殊的非线性优化,其本质是一种凸规划,具有非常高效的求解算法,利用现有的 SOCP 算法包可以轻易求取最优结果,因此很多问题都可以转化为二阶锥规划来求解。

通过 Distflow 的二阶锥松弛将高阶非线性的传统交流潮流模型转换为可以进行精确求解的混合整数二阶锥模型,该模型在实际运行情况下,能够维持其求解性能不受其他因素干扰,只受配电网的拓扑结构影响。在此结构下,可以使用已知的 Distflow 算法来描述相邻母线之间的电气关系。具体如图 2 所示进行说明。图中:  $k$  为母线;  $n_1$  和  $n_2$  为母线的 2 个分支;  $P_{l,m}$  为向配电网注入的有功功率;  $Q_{l,m}$  为向配电网注入的无功功率;  $p_{mn_1}$  为分支有功功率流;  $q_{mn_1}$  为分支无功功率流;  $r_{km}$  为支路电阻;  $x_{km}$  为支路电抗;  $l_{km}$  为支路电流幅值平方;  $p_{km}$  为母线有功功率流;  $q_{km}$  为母线无功功率流。

图 2 中与母线  $m$  相关的支路潮流可以由以下的 DistFlow 方程表示:

$$P_{l,m} = p_{mn_1} + p_{mn_2} - (p_{km} - r_{km} l_{km}) \quad (4)$$

$$Q_{l,m} = q_{mn_1} + q_{mn_2} - (q_{km} - x_{km} l_{km}) \quad (5)$$

$$v_k - v_m = 2(r_{km} p_{km} + x_{km} q_{km}) - (r_{km}^2 + x_{km}^2) l_{km} \quad (6)$$

$$p_{km}^2 + q_{km}^2 = v_k l_{km} \quad (7)$$

式中:  $v_k$  为电压的幅值平方;  $v_m$  为电压的幅值平方。式(4)和式(5)分别表示该母线处有功功率和无功功率的平衡;式(6)量化了该母线和上行母线电压幅值的平方差;式(7)定义了终止于该母线线路上的视在功率、电流和电压的关系。为了充分利用 SOC(二阶

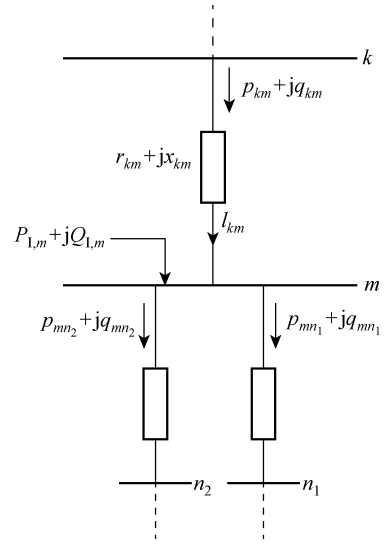


图 2 配电馈线单线图

Fig. 2 One-line diagram of power distribution feeder

锥)在编程计算方面的优势,由式(7)可以得到以下凸约束:

$$p_{km}^2 + q_{km}^2 \leq v_k l_{km} \quad (8)$$

在运行时配电网能够与静止无功补偿器密切配合,通过调整有载调压变压器的分接头设置,进而保证智能配电网两端的电压安全。引入一条假想母线  $k\hat{C}$  后,变压器可以看作是包含串联阻抗的理想变压器。图 3 为母线  $k$  与母线  $m$  之间的有载调压变压器等效图。图中:  $\eta_{km}$  为变压器变比。

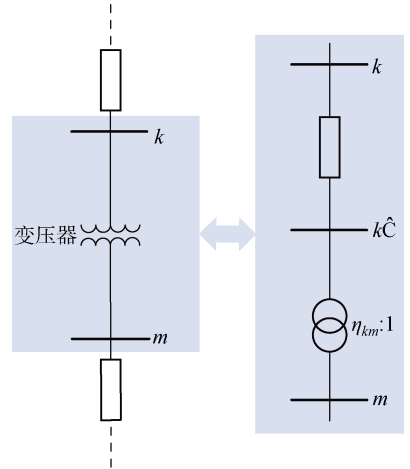


图 3 有载调压变压器等效图

Fig. 3 Equivalent diagram of on-load tap changing transformer

## 2.2 优化调度模型

在考虑配电网发电成本、储能电站成本、负荷削减成本、外购电力成本以及碳排放惩罚成本等因素下,制定优化调度模型如下:

$$\min(C_{\text{imp}} + C_{\text{shed}} + C_{\text{gen}} + C_{\text{deg}} + C_{\text{mp}}) \quad (9)$$

式中:  $C_{\text{imp}}$  为从上级电网购电成本;  $C_{\text{shed}}$  为切负荷成本;  $C_{\text{gen}}$  为发电厂生产成本;  $C_{\text{deg}}$  为储能电站折旧成本;  $C_{\text{mp}}$  为碳排放成本。

配电网中从上级电网购电成本如下:

$$C_{\text{imp}} = \sum_{m \in \Omega_B} \rho_{E,m} P_{B,m} \quad (10)$$

式中:  $\rho_{E,m}$  和  $P_{B,m}$  分别为在母线  $m$  处, 从上级电网购电单价和交换的有功功率;  $\Omega_B$  为边界母线集合。

配电网中切负荷成本如下:

$$C_{\text{shed},m} = \rho_{LS} P_{LS,m} \quad (11)$$

式中:  $C_{\text{shed},m}$  为配电网负荷停电时的惩罚成本;  $\rho_{LS}$  为配电网中负荷停电的单价;  $P_{LS,m}$  为有功负荷减小量。

配电网中发电机生产成本如下:

$$C_{\text{gen},m} = \sum_{g \in \Pi_{C,m}} (a_g P_{G,g}^2 + b_g P_{G,g} + c_g) \quad (12)$$

式中:  $C_{\text{gen},m}$  为  $m$  母线处的发电机组生产总成本;  $a_g$ 、 $b_g$  和  $c_g$  为分别为  $g$  发电机组生产成本常系数;  $P_{G,g}$  为  $g$  发电机的有功出力;  $\Pi_{C,m}$  为可控发电单元集合。

配电网中储能折旧成本如下:

$$C_{\text{deg},m} = \sum_{e \in \Lambda_m} a_e (P_{\text{Ch},e}^2 + P_{\text{Dch},e}^2) \quad (13)$$

式中:  $C_{\text{deg},m}$  为储能电池折旧成本;  $a_e$  为储能电池退化成本常系数;  $P_{\text{Ch},e}$  为储能电池充电功率;  $P_{\text{Dch},e}$  为储能电池放电功率;  $\Lambda_m$  为储能装置集合。

配电网中碳排放成本如下:

$$C_{\text{mp}} = \rho \sum_{m \in \Lambda} E P_{G,g} \quad (14)$$

式中:  $\rho$  为碳排放成本系数;  $E$  为边际排放因子;  $\Lambda$  为微网集合。

### 2.3 约束条件

(1) 负载削减约束。

$$0 \leq P_{LS,m} \leq P_{D,m}, \quad \forall m \in \Omega/\Omega_M \quad (15)$$

$$P_{LS,m} Q_{D,m} = Q_{LS,m} P_{D,m}, \quad \forall m \in \Omega/\Omega_M \quad (16)$$

式中:  $Q_{LS,m}$  为无功负荷切除量;  $P_{D,m}$  为有功负荷需求量;  $Q_{D,m}$  为无功负荷需求量;  $\Omega$  为所有母线集合;  $\Omega_M$  为微网母线集合。

其中, 式(15)为节点有功约束条件; 式(16)为功率因数相等条件下无功平衡约束。

(2) 功率注入约束。

配电网并网的功率传输需满足以下限制:

$$P_{1,m} = P_{X,m}, \quad Q_{1,m} = Q_{X,m} \quad (17)$$

$$\underline{P}_{X,m} \leq P_{X,m} \leq \bar{P}_{X,m}, \quad \underline{Q}_{X,m} \leq Q_{X,m} \leq \bar{Q}_{X,m} \quad (18)$$

$$\forall m \in \Omega_M$$

式中:  $P_{X,m}$  为经由母线  $m$  从微网传输到配电网的有

功功率;  $Q_{X,m}$  为经由母线  $m$  从微网传输到配电网的无功功率;  $\underline{P}_{X,m}$  为经由母线  $m$  从微网传输到配电网的有功功率下界;  $\bar{P}_{X,m}$  为经由母线  $m$  从微网传输到配电网的有功功率上界;  $\underline{Q}_{X,m}$  为经由母线  $m$  从微网传输到配电网的无功功率下界;  $\bar{Q}_{X,m}$  为经由母线  $m$  从微网传输到配电网的无功功率上界。

由于配电网中的功率需求通常由于弹性负载(例如电动车和空调负荷)的存在而可调节, 所以当有功功率或无功功率不足时, 也需要考虑削减负载, 约束如下:

$$0 \leq P_{LS,m} \leq P_{D,m} \quad (19)$$

(3) 发电机输出功率约束。

$$\underline{P}_{G,g} \leq P_{G,g} \leq \bar{P}_{G,g}, \quad \forall g \in \Pi_{C,m} \quad (20)$$

式中:  $\underline{P}_{G,g}$  为发电机有功出力下边界;  $\bar{P}_{G,g}$  为发电机有功出力上边界。式(20)将每个发电机有功出力限制在技术上允许范围内。

(4) 配电网储能装置约束。

$$-\bar{P}_{E,e} \leq P_{\text{Ch},e} - P_{\text{Dch},e} \leq \bar{P}_{E,e}, \quad \forall e \in \Lambda_m \quad (21)$$

$$P_{\text{Ch},e} \geq 0, \quad P_{\text{Dch},e} \geq 0, \quad \forall e \in \Lambda_m \quad (22)$$

式中:  $\bar{P}_{E,e}$  为电池充放电功率的上限。

其中, 式(21)规定了充放电功率区间的上下限, 即不超过额定功率极限; 式(22)表示在储能装置参与电网调度后, 应该保持的电量约束; 需要注意, 储能电池的充放电次数会对寿命产生影响。

(5) 配电网安全性约束。

$$p_{km}^2 + q_{km}^2 \leq S_{km}^2, \quad \forall k, m \in \Psi \quad (23)$$

$$\underline{v}_m \leq v_m \leq \bar{v}_m, \quad \forall m \in \Omega/\Omega_B \quad (24)$$

式中:  $S_{km}$  为线路容量;  $\underline{v}_m$  为电压幅值平方值下限;  $\bar{v}_m$  为电压幅值平方值上限;  $\Psi$  为可切换线路集合。

## 3 算例分析

智能配电网系统基于具有 33 条母线并且三相平衡的配电网配置, 其中母线 1 与上级电网连接, 如图 4 所示。节点 13 至 14、5 至 6、8 至 21、31 至 32、9 至 15、18 至 33、12 至 22 和 25 至 29 具有联络线开关, 可作为备选线路(转供线)。支路 9 至 10、1 至 2 和 29 至 30 具有有载调压变压器, 分接头档位  $\pm 2.5\%$ , 变比为 0.95~1.05。母线 12、19 和 28 具有静止无功补偿器包括支持向量机和可缩放矢量图形, 无功功率取值范围为  $-300 \sim 900$  kvar。母线 13、18 和 30 分别是微电网 1、2、3。

碳排放系数参考国家公布的“区域电网基准线排放因子(OM)”中东北电网的数据。IEEE 33 节点

系统参数、3 个微网的本地负荷及其他参数、耗量特性和储能装置的参数如表 2~6 所示. 各个微网中的

可控发电机组参数如表 7 所示. 表中:  $\sum P_d$  为总并网容量.

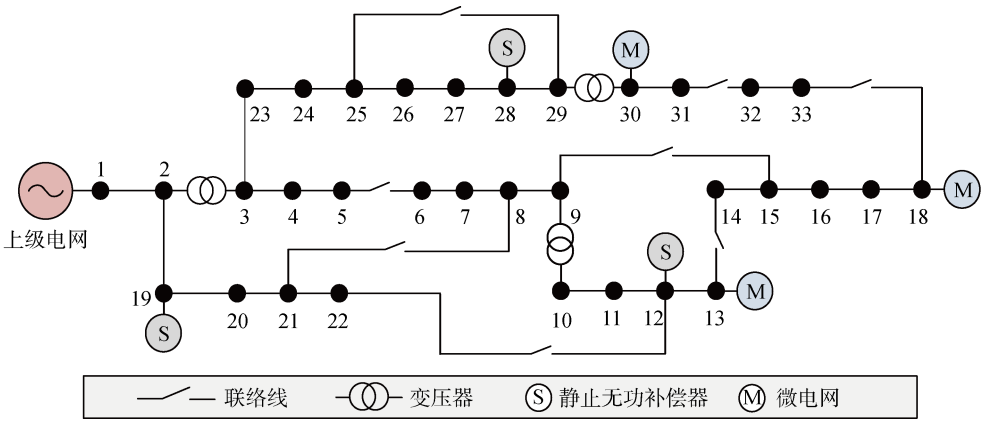


图 4 IEEE 33 节点配电网

Fig. 4 IEEE 33-node distribution network

表 2 3 个微网中的储能装置参数

母线	最大功率/kW	能级/(kW·h)			放/充电效率	折旧成本/ [美元·(MW <sup>2</sup> ·h) <sup>-1</sup> ]
		最小	最大	初始值		
13(微网 1)	50	50	200	100	0.9/0.9	20
18(微网 2)	100	100	300	100	0.9/0.9	25
30(微网 3)	100	100	300	200	0.85/0.85	15

表 3 3 个微网的本地负荷和其他能源参数

母线	功率需求		无功出力	
	有功/kW	无功/kvar	最小/kvar	最大/kvar
13	350	200	−100	500
18	10	40	−250	750
30	50	800	−200	600

表 4 33 节点系统负荷功率

节点 编号	有功 功率/kW	无功 功率/kvar	节点 编号	有功 功率/kW	无功 功率/kvar	节点 编号	有功 功率/kW	无功 功率/kvar
2	90	40	13	120	80	24	420	200
3	120	80	14	60	10	25	420	200
4	60	30	15	60	20	26	60	25
5	60	20	16	60	20	27	60	25
6	200	100	17	100	60	28	60	20
7	200	100	19	90	40	29	120	70
8	60	20	20	90	40	30	500	800
9	60	20	21	90	40	31	150	70
10	45	30	22	90	40	32	210	100
11	60	35	23	90	50	33	60	40
12	350	200						

表 5 33 节点系统线路阻抗  
Tab. 5 Line impedance of 33-node system

起始节点	终止节点	线路电阻(p. u.)	线路电抗(p. u.)	起始节点	终止节点	线路电阻(p. u.)	线路电抗(p. u.)
1	2	0.057 526	0.029 324	3	23	0.281 515	0.192 356
3	4	0.228 357	0.116 300	23	24	0.560 285	0.442 425
4	5	0.237 778	0.121 104	24	25	0.559 037	0.437 434
5	6	0.510 995	0.441 115	6	26	0.126 657	0.064 514
6	7	0.116 799	0.386 085	26	27	0.177 320	0.090 282
7	8	0.443 860	0.146 685	27	28	0.660 737	0.582 559
8	9	0.642 643	0.461 705	28	29	0.501 761	0.437 122
10	11	0.122 664	0.040 555	30	31	0.607 953	0.600 840
11	12	0.233 598	0.077 242	31	32	0.193 729	0.225 799
12	13	0.915 922	0.720 634	32	33	0.212 759	0.330 805
13	14	0.337 918	0.444 796	21	8	1.247 851	1.247 851
14	15	0.368 740	0.328 185	9	15	1.247 851	1.247 851
15	16	0.465 635	0.340 039	12	22	1.247 851	1.247 851
16	17	0.804 240	1.073 775	18	33	0.311 963	0.311 963
17	18	0.456 713	0.358 133	25	29	0.311 963	0.311 963
2	19	0.102 324	0.097 644	2	34	0.307 595	0.156 668
19	20	0.938 508	0.845 668	9	35	0.651 378	0.461 705
20	21	0.255 497	0.298 486	29	36	0.316 642	0.161 285
21	22	0.442 301	0.584 805				

表 6 并网容量  
Tab. 6 Grid-connected capacity kW

$\Sigma P_d$	微网 1 有功 功率	微网 2 有功 功率	微网 3 有功 功率	$\Sigma P_d$	微网 1 有功 功率	微网 2 有功 功率	微网 3 有功 功率
3 715	80	130	140	4 515	320	370	460
3 815	110	160	180	4 615	350	400	500
3 915	140	190	220	4 715	380	430	540
4 015	170	220	260	4 815	410	460	580
4 115	200	250	300	4 915	440	490	620
4 215	230	280	340	5 015	470	520	660
4 315	260	310	380	5 115	500	550	700
4 415	290	340	420	5 225	530	580	740

表 7 3 个微网的可控发电机组参数  
Tab. 7 Controllable power generating units of three microgrids

母线	技术参数		成本系数		
	最小输出功率/kW	最大输出功率/kW	$a_g/[\text{美元} \cdot (\text{MW}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$	$b_g/[\text{美元} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}]$	$c_g/(\text{美元} \cdot \text{h})^{-1}$
13	100	500	0.5	10	5
18	100	500	1.0	20	10
30	100	250	0.5	10	5



对改进的 IEEE 33 节点配电系统进行案例研究. 在 MATLAB 2016a 环境下进行了数值实验, 优化问题均由求解器 MOSEK 8.1 求解. 混合整数规划的相对最优性间隙设置为 0.01%, 二阶锥松弛精度的阈值设置为  $10^{-6}$ . 母线 1 的电压幅值保持在 1.0(p.u.), 并且所有其他母线的电压幅值被设置在 1.0(p.u.), 而实际值允许在 0.9(p.u.) 到 1.1(p.u.) 之间变化. 通过母线 1 从上行输电网输入能量的成本为 88 美元/(MW·h), 切负荷成本统一为 500 美元/(MW·h), 并且惩罚所有母线上的电压幅值的因子为 100 美元/h. 功率和电压的基值设置为 100 MV·A 和 12.66 kV. 设计了两种情景进行仿真, 具体如下.

**场景 1** 边际排放因子取 1.1, 即 CO<sub>2</sub> 排放量为 1.1 t/(MW·h), 碳排放成本系数为 70 美元/t, 并网容量从 [3 715, 5 225] kW 以 100 kW 为公差进行仿真, 仿真结果绘制如图 5 和图 6 所示. 图中:  $P_m$  为微网出力;  $C_{mg}$  为总成本.

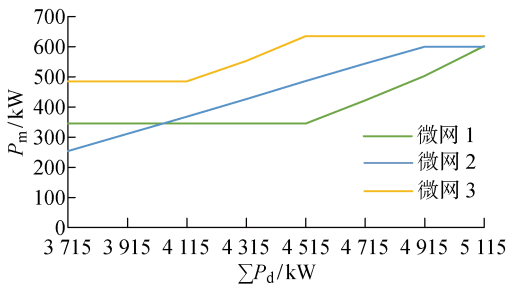


图 5 3 个微网出力对并网容量变化的响应区间  
Fig. 5 Response interval of three microgrids to variation in grid-connected capacity

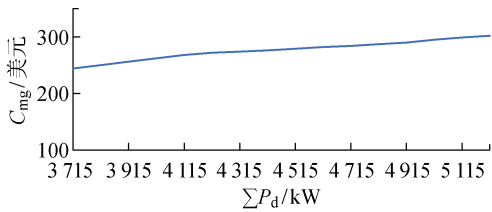


图 6 总成本随并网容量变化曲线  
Fig. 6 Total cost versus grid-connected capacity

图 5 和图 6 说明, 随着并网容量的增加, 微网出力整体总趋势呈增长状态, 达到固定值后不再受并网容量变化而改变; 总成本随之缓慢增加, 总体趋势呈线性增长.

**场景 2** 边际排放因子取 1.1, 碳排放成本系数从 [60, 75] 美元/t 以 0.1 美元/t 为公差进行仿真, 仿真结果绘制成图 7 和图 8 所示.

图 7 和图 8 表明, 引入碳排放成本后, 系统总成

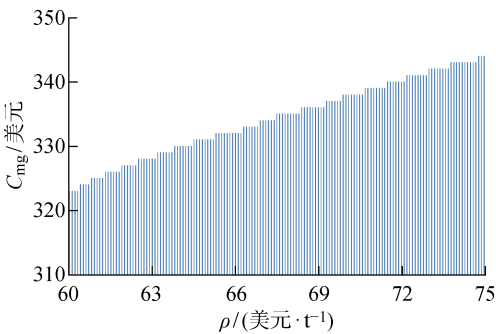


图 7 总成本随碳排放成本系数变化曲线  
Fig. 7 Total cost versus carbon cost factor

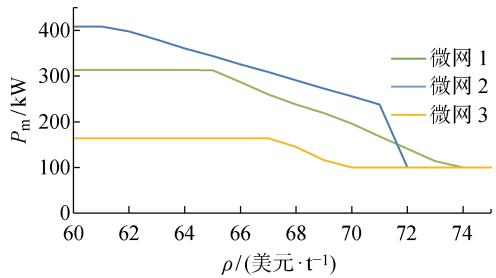


图 8 3 个微网出力对碳排放成本系数响应区间  
Fig. 8 Response interval of three microgrids to carbon cost factor

本显著增加, 同时各微网的出力有所降低. 3 个微网由于耗量特性不同和容量不同, 对碳排放成本所作出的响应敏感度和变化幅度也不相同. 图 8 可以看到 3 个微网对碳排放成本系数的响应区间, 当  $\rho$  在 [73, 73.8] 美元/t 区间变化时, 微网 1 对碳排放成本系数的变化作出响应; 当  $\rho$  在 [62.3, 64.3] 美元/t 区间变化时, 微网 2 对碳排放成本系数的变化作出响应; 当  $\rho$  在 [73.4, 74] 美元/t 区间变化时, 微网 3 出力对碳排放成本系数的变化作出响应. 从图 7 可以看出, 当引入碳排放价格后, 系统的成本增大, 各个微网的成本随之受到影响, 进而微网的发电行为也受到影响, 当碳排放成本系数较低时, 微网的发电行为受到的影响程度较小, 仍可保持自身原来的发电行为, 但随着碳排放成本逐渐升高, 微网的发电行为开始出现越来越明显的变化, 具体体现在自身发电开始减少, 从上级电网购电开始增多. 当碳排放成本系数增高到一定程度时, 微网的发电行为将不再受其影响, 均以最小出力工作.

对比 3 个微网的结果, 结合微网的耗量特性和其各自对碳排放价格的响应区间进行分析, 可以发现, 微网 1 和微网 2 在容量相同的情况下, 由于微网 2 的耗量成本较大, 总成本受到影响波动较大, 所以微网 2 对碳排放成本系数的变化最为敏感, 其发电



行为优先开始变化. 而对比微网 1 和微网 3, 两者耗量特性相同的情况下, 由于微网 3 容量较小, 所以微网 3 受到碳排放系数影响的价格区间较短.

## 4 结论

提出一种考虑碳排放指标的配电网优化调度模型, 将碳排放成本考虑到配网经济调度模型中, 并观察微网的发电行为受碳排放成本的影响, 算例结果表明:

(1) 当不考虑碳排放成本变化, 固定碳排放成本系数, 通过改变并网微网容量, 改变清洁能源的占比, 微网的发电行为受到影响. 随着清洁能源的占比升高, 微网的出力随之增加, 当占比达到一定数值时, 出力将不受影响. 当清洁能源的占比增加时, 总成本会随之呈线性增长趋势升高.

(2) 当考虑碳排放成本后, 其他因素固定, 微网的发电行为也会受到影响, 碳排放成本越高, 微网出力越少, 当碳排放成本系数增高到一定程度后, 微网将不再受其影响, 以最小出力工作.

(3) 引入碳排放成本系数后的微网发电行为除了受碳排放成本系数的影响外, 还会受自身耗量特性和容量的约束, 耗量特性较大的微网对碳排放系数的变化更为敏感, 会优先改变自身的发电行为. 容量较小的微网只在很小的成本变化区间内, 对碳排放成本系数的波动进行响应.

(4) 本文仅考虑了碳排放成本对配电网经济调度的影响, 后续研究需进一步考虑不同场景下碳配额、碳惩罚单价与微网有功出力的耦合关系, 以及不同微网间碳排放权交易等因素, 制定更加精确的配电网优化调度模型.

## 参考文献:

[1] 赵毅, 于继来. 多微网智能配电系统协同自律运控模式初探[J]. *电网技术*, 2018, 42(4): 1200-1209.  
ZHAO Yi, YU Jilai. Preliminary research on operation and control model of coordination and self-discipline for smart distribution system with multi micro-grids [J]. *Power System Technology*, 2018, 42(4): 1200-1209.

[2] YANG W, CHENG L, QI N, *et al.* Review on distribution network planning methods considering large-scale access of flexible load[C]//2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing, China: IEEE, 2018: 1-6.

[3] MIRBAGHERI S, FALABRETTI D, MERLO M. Voltage control in active distribution grids: A review

and a new set-up procedure for local control laws[C]//2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Amalfi, Italy: The Institution of Engineering and Technology, 2018: 1203-1208.

[4] 任洪波, 吴琼, 刘家明. 耦合区域售电服务的分布式能源产销者经济优化与能效评估[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(13): 3756-3766.  
REN Hongbo, WU Qiong, LIU Jiaming. Economic optimization and energy assessment of distributed energy prosumer coupling local electricity retailing services[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(13): 3756-3766.

[5] 陈国平, 梁志峰, 董昱. 基于能源转型的中国特色电力市场建设的分析与思考[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(2): 369-379.  
CHEN Guoping, LIANG Zhifeng, DONG Yu. Analysis and reflection on the marketization construction of electric power with Chinese characteristics based on energy transformation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(2): 369-379.

[6] 孙玲玲, 贾清泉, 张弓, 等. 考虑运营交易的微电网优化配置方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(7): 2221-2233.  
SUN Lingling, JIA Qingquan, ZHANG Gong, *et al.* Optimal configuration method of micro-grid considering operating and exchanging[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(7): 2221-2233.

[7] 单兰晴, 孔王维, 顾承红, 等. 配电系统运营商在配电网电力市场发展进程中的角色与功能演化初探[J]. *全球能源互联网*, 2020, 3(1): 70-78.  
SHAN Lanqing, KONG Wangwei, GU Chenghong, *et al.* A preliminary study on the role and function evolution of distribution system operators in the development process of distribution network electricity market[J]. *Global Energy Internet*, 2020, 3(1): 70-78.

[8] WU W, TIAN Z, ZHANG B. An exact linearization method for OLTC of transformer in branch flow model[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(3): 2475-2476.

[9] LIU Y, LI Y, GOOI H, *et al.* Distributed robust energy management of a multi-microgrid system in the real-time energy market[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019, 10(1): 396-406.

[10] 彭谦, 周晓洁, 杨睿. 国家绿证交易市场与省级日前电力市场协调均衡机制设计[J]. *电网技术*, 2020, 44(7): 2565-2571.  
PENG Qian, ZHOU Xiaojie, YANG Rui. Design of

coordination and equilibrium mechanism between national green certificate trading market and provincial-level electricity market[J]. **Power Grid Technology**, 2020, 44(7): 2565-2571.

[11] 董福贵, 时磊. 可再生能源配额制及绿色证书交易机制设计及仿真[J]. **电力系统自动化**, 2019, 43(12): 113-122.

DONG Fugui, SHI Lei. Design and simulation of renewable energy quota system and green certificate trading mechanism[J]. **Power System Automation**, 2019, 43(12): 113-122.

[12] 梅天华, 边巧燕, 谢俊, 等. 考虑碳排放权的低碳电力调度及收益分摊[J]. **电力系统自动化**, 2016, 40(22): 49-55.

MEI Tianhua, BIAN Qiaoyan, XIE Jun, *et al.* Low-carbon power dispatch and revenue sharing considering carbon emission rights[J]. **Power System Automation**, 2016, 40(22): 49-55.

[13] 赵双, 潘险险, 林俐. 碳排放配额托管业务中联合系统交易决策及利润分配策略[J]. **电力系统自动化**, 2020, 44(16): 30-36.

ZHAO Shuang, PAN Xianxian, LIN Li. Trading decision and profit distribution strategy of joint system in carbon emission allowance custody business[J]. **Power System Automation**, 2020, 44(16): 30-36.

[14] SHANG T, YANG L, LIU P, *et al.* Financing mode of energy performance contracting projects with carbon emissions reduction potential and carbon emissions ratings[J]. **Energy Policy**, 2020, 144: 111632.

[15] 郑重, 苗世洪, 李超, 等. 面向微型能源互联网接入的交直流配电网协同优化调度策略[J]. **电工技术学报**, 2022, 37(1): 192-207.

ZHENG Zhong, MIAO Shihong, LI Chao, *et al.* Cooperative optimal dispatch strategy of AC-DC distribution network for micro-energy internet access [J]. **Transactions of China Electrotechnical Society**, 2022, 37(1): 192-207.

[16] 范添圆, 王海云, 王维庆, 等. 计及主/被动需求响应下基于合作博弈的微网-配电网协调优化调度[J]. **电网技术**, 2022, 46(2): 453-463.

FAN Tianyuan, WANG Haiyun, WANG Weiqing, *et al.* Microgrid-distribution network coordinated optimization dispatch based on cooperative game under consideration of active/passive demand response[J]. **Power Grid Technology**, 2022, 46(2): 453-463.

[17] 朱坤, 彭建松, 张文莉, 等. 曲靖市森林生态系统固碳释氧的生态效益[J]. **森林工程**, 2022, 38(2): 34-43.

ZHU Kun, PENG Jiansong, ZHANG Wenli, *et al.* Ecological benefits of carbon sequestration and oxygen release in forest ecosystem in Qujing City[J]. **Forest Engineering**, 2022, 38(2): 34-43.

[18] SHAN L, KONG W, GU C, *et al.* Roles and functions of distribution system operators in local electricity market development[J]. **Journal of Global Energy Interconnection**, 2020, 3(1): 70-78.

[19] 崔崧, 肖锐, 王文帆, 等. 小兴安岭针阔混交林碳汇结构特征的研究[J]. **森林工程**, 2020, 36(6): 30-35.

CUI Song, XIAO Rui, WANG Wenfan, *et al.* Study on carbon sink structure characteristics of coniferous and broad mixed forest in Xiaoxing'anling[J]. **Forest Engineering**, 2020, 36(6): 30-35.

[20] 冯昌森, 谢方锐, 文福拴, 等. 基于智能合约的绿证和碳联合交易市场的设计与实现[J]. **电力系统自动化**, 2021, 45(23): 1-11.

FENG Changsen, XIE Fangrui, WEN Fushuan, *et al.* Design and implementation of green certificate and carbon joint trading market based on smart contract [J]. **Power System Automation**, 2021, 45(23): 1-11.

(本文编辑:王一凡)