

输配协同下考虑全局和区域碳排放约束的多目标经济调度

焦昊¹, 陈锦铭¹, 赵新冬¹, 郭雅娟¹, 杨毅¹, 黄铭浩²

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏省南京市 211103; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027)

Multi-objective Economic Dispatch of Transmission-distribution-coupled Networks Considering Global and Regional Carbon Emission Obligations

JIAO Hao¹, CHEN Jinming¹, ZHAO Xindong¹, GUO Yajuan¹, YANG Yi¹, HUANG Minghao²

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, Jiangsu Province, China;
2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

摘要: 双碳背景下, 碳排放将成为一个有限的公共资源, 在经济调度中考虑碳排放具有重要的价值。因此, 建立输配协同下考虑全局和区域碳排放约束的分布式多目标经济调度模型。然后, 在模型中应用加权的方法来处理多个目标。通过引入边界参数, 基于异构分解算法, 将集中式多目标经济调度模型解耦为输电系统子问题和多个配电系统子问题。通过边界参数交换在输电网之间交替迭代计算, 以获得经济调度方案。算例测试表明, 与集中式经济调度相比, 所提方法具有较好的准确性、收敛性以及较高的效率。此外, 该方法能够实现经济效益和环境效益之间的权衡。

关键词: 经济调度; 碳排放; 输配协同; 异构分解算法; 多目标

Abstract: In the context of carbon peaking and carbon neutrality goals carbon emission will become an important evaluation index, which make it worthy of consideration in economic dispatch. In this paper we propose a distributed multi-objective economic dispatch model for transmission-distribution-coupled networks considering global and regional carbon emission constraints under the cooperation of transmission and distribution. Then, the weighted-sum method is applied in the model to handle multiple objectives. By introducing boundary parameters, a centralized multi-objective economic dispatch model of transmission-distribution-coupled networks is decoupled into a transmission system operator sub-problem and

several distribution system operator sub-problems utilizing the heterogeneous decomposition algorithm. Alternating iterations are processed between transmission system and distribution system operators through boundary parameter exchange to achieve solutions. Numerical experiments indicate that the proposed method shows superiority in accuracy, convergence, and the efficiency over centralized economic dispatch methods. Furthermore, it enables the simultaneous consideration of both economic and environmental benefits.

Keywords: economic dispatch; carbon emissions; transmission-distribution-coupled networks; heterogeneous decomposition algorithm; multi-objective

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0020

0 引言

随着分布式新能源和新型负荷的接入, 配电网的主动性不断增强, 输配电系统的耦合性也随之增强。由于输电网和配电网之间的耦合日益增强, 许多研究人员开展了输配协同 (transmission-distribution-coupled, TDC) 网络在协调运行和优化调度方面的研究, 如 TDC 潮流计算^[1-3]、TDC 最优潮流^[4-5]、TDC 经济调度 (TDC economic dispatch, TDCED)^[6-10]等。

其中, 经济调度是电力系统运行的基本工具, TDCED 是 TDC 网络协调运行和优化研究的热点之一。在传统的经济调度中, 输电系统调度中心 (transmission system operator, TSO) 只能对接入输电网的发电机的输出进行优化, 而将配电网完全等效于恒定负载, 因此接入配电网的分布式电源

基金项目: 国家电网江苏电力有限公司科技资助项目 (基于电力大数据的区域碳排放与减碳潜力评估 (J2021197))。

Project Supported by State Grid Corporation of Jiangsu Electric Power Co., Ltd. (Regional Carbon Emission and Carbon Reduction Potential Assessment Based on Electricity Big Data (J2021197)).

(distributed generation, DG)、无功补偿器等有源设备都不会参与经济调度。为了充分利用配电网的有源性,减少边界功率失配,并获得更经济的结果,一些研究人员提出了 TDCED 的概念。文献[6]提出了求解 TDCED 的异构分解算法(heterogeneous decomposition, HGD),该算法通过 TSO 和 DSO 的交替迭代求解各自的子问题,TSO 向配电系统调度中心(distribution system operator, DSO)发送边界节点的节点边际价格(locational marginal price, LMP),而 DSO 在每次迭代中向 TSO 发送边界节点功率。此外,文献[7]提出一种基于 LMP 的 HGD 来求解 TDCED,它有效地增强了 HGD 算法的收敛性。文献[8]提出了考虑热电耦合的区域综合能源系统基于分散机会约束的经济调度。文献[9]提出 TDCED 的凸公式,并使用 Benders 分解算法对模型进行求解。文献[10]提出一个分散的 TDCED 模型,并通过多参数编程对模型进行求解。然而,这些文献主要集中于研究提高分布式迭代算法的效率和收敛性,并且建立的优化模型中只有一个优化目标,例如最小化总发电成本。TDC 协调运行和优化中尚未充分考虑多目标(multi-objective, MO)优化。

根据世界资源研究所统计,我国电力行业二氧化碳排放占全国能源消耗产生二氧化碳排放总量的 40% 左右,其中煤电是最主要的碳排放源。在“双碳”的背景下,电力工业的节能减碳已成为一项关键任务^[11],碳排放的电力系统调度问题成为研究热点。

文献[12]考虑碳交易机制下发电机组碳排放对经济调度结果的影响,建立碳交易成本模型,实

现调度策略经济性与低碳性的协调优化。文献[13]将模拟退火和交互最佳折衷方法相结合,提出一种考虑碳排放的经济调度优化方法。但是,上述方法都没有考虑到输配协同的背景,而且这些工作大多数只考虑了大范围的全局总碳排放义务。然而,一些行政上的减排责任是按地区划分的,这表明仅考虑全局碳排放约束责任是不够的,因为一些减排压力较大的区域会违反碳排放约束^[14]。

为了应对上述挑战,本文提出 TDC 网络中全局和区域碳排放约束的概念,并建立考虑全局和区域碳排放约束的多目标输配协同经济调度(multi-objective transmission-distribution-coupled economic dispatch, MO-TDCED)模型;通过边界参数传递,实现输电网和配电网的解耦,建立分布式 MO-TDCED 模型,采用 HGD 算法对分布式模型进行迭代求解。最后,通过算例测试证明该方法的准确性、收敛性和效率。

本文内容安排如下:第 1 节建立 MO-TDCED 的模型;第 2 节介绍用于解决 MO-TDCED 的 HGD 算法;第 3 节进行算例测试;第 4 节给出结论。

1 MO-TDCED 模型

1.1 TDC 系统划分

一个 TDC 系统通常由一个输电网和多个配电网组成。它可以分为输电网部分、配电网部分和边界部分^[4],如图 1 所示。边界部分包括边界节点,即配电网的根节点。输电网部分由一个 TSO 管理,不同的配电网部分则由不同的 DSO 管理。边界部分由 TSO 和 DSO 共同管理。

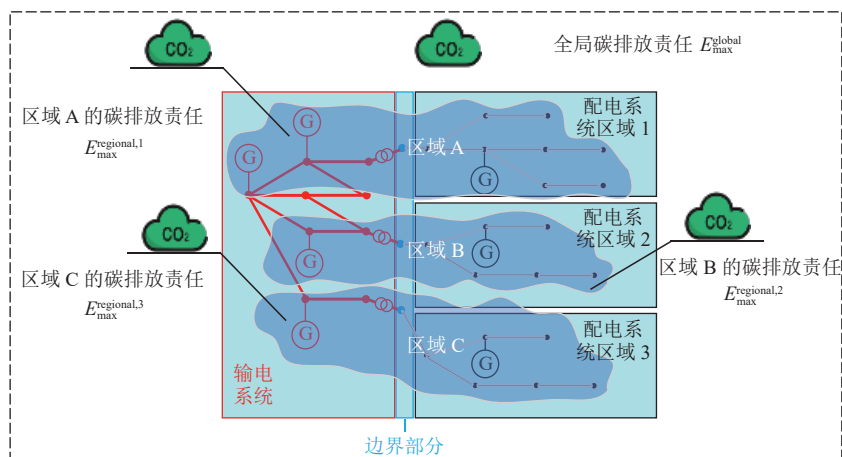


图 1 输配电网分区

Fig. 1 TDC division

此外,由 TSO 管理的输电网的覆盖区域比较大,例如一个省。由 DSO 管理的配电网的覆盖区域相对较小,例如一个城市或一个镇。而一个省有多个城市和城镇,接入输电网的发电机可能被安装在不同的区域。以图 1 为例,输电网覆盖了 3 个地区,TSO 管理着 4 台发电机,它们分别安装在 3 个不同的地区,DSO1 只能管理区域 A 内的 DG,尽管有 2 台接入输电网的发电机安装在区域 A 内,但 DSO1 不能对其进行管理。

1.2 全局和区域碳排放

为了计算发电机的碳排放量,参考文献 [15],将每个发电机和 DG 的碳排放设置为其有功功率输出的二次函数:

$$E_i^T(P_{Gi}^T) = \alpha_i^T (P_{Gi}^T)^2 + \beta_i^T P_{Gi}^T + \gamma_i^T \quad (1)$$

$$E_i^{T,j}(P_{Gi}^{T,j}) = \alpha_i^{T,j} (P_{Gi}^{T,j})^2 + \beta_i^{T,j} P_{Gi}^{T,j} + \gamma_i^{T,j} \quad (2)$$

式中: i 表示第 i 台发电机; j 表示第 j 个配电网; P_{Gi} 表示发电机 i 的有功出力; E_i 表示发电机 i 在有功出力为 P_{Gi} 时的碳排放量; α 、 β 、 γ 分别表示发电机有功输出的二次碳排放系数、一次碳排放系数和碳排放常数项;上标 T、D 分别表示输电网和配电网。

碳排放义务可以分为两类:第一类是全局碳排放义务,它通常涵盖一个大范围,如一个省;第二类是区域碳排放,通常覆盖一个小范围,如一个城市 [14]。

因此,本文建立了 2 种不同的碳排放约束。全局碳排放约束如式 (3) 所示,它表示 TDC 系统中所有发电机和 DG 的总碳排放量应该受到限制。

$$\sum_{i \in G^T} E_i^T(P_{Gi}^T) + \sum_{j \in D} \sum_{i \in G^{T,j}} E_i^{T,j}(P_{Gi}^{T,j}) \leq E_{\max}^{\text{global}} \quad (3)$$

式中: D 表示所有配电网组成的集合; G 表示所有发电机组成的集合; $E_{\max}^{\text{global}}$ 表示全局碳排放限制。

如图 1 所示,每个区域也有其区域碳排放配额。在此,在不失一般性的情况下,假定第 j 个配电网在第 j 个区域,因此,区域碳排放约束可以写为

$$\sum_{i \in G^{T,j}} E_i^T(P_{Gi}^T) + \sum_{i \in G^{T,j}} E_i^{T,j}(P_{Gi}^{T,j}) \leq E_{\max}^{\text{regional},j} \quad (4)$$

式中 $E_{\max}^{\text{regional},j}$ 表示第 j 个区域的区域碳排放限制,并且有

$$\bigcup_{j \in D} G^{T,j} = G^T \quad (5)$$

1.3 集中式 MO-TDCED 模型

依据 1.2 节提出的全局和区域碳排放约束,本节建立集中式 MO-TDCED 模型。

目标函数考虑了最小化总发电成本和最小化总碳排放 2 个不同的目标:

$$\min_{P_G} \{E_{\text{total}}, F_{\text{total}}\} \quad (6)$$

式中:

$$E_{\text{total}} = \sum_{i \in G^T} E_i^T(P_{Gi}^T) + \sum_{j \in D} \sum_{i \in G^{T,j}} E_i^{T,j}(P_{Gi}^{T,j}) \quad (7)$$

$$F_{\text{total}} = \sum_{i \in G^T} F_i^T(P_{Gi}^T) + \sum_{j \in D} \sum_{i \in G^{T,j}} F_i^{T,j}(P_{Gi}^{T,j}) \quad (8)$$

式中 E_{total} 、 F_{total} 分别表示总碳排放量和总发电成本。其中,发电成本 F 被定义为

$$F_i^T(P_{Gi}^T) = a_i^T (P_{Gi}^T)^2 + b_i^T P_{Gi}^T + c_i^T \quad (9)$$

$$F_i^{T,j}(P_{Gi}^{T,j}) = a_i^{T,j} (P_{Gi}^{T,j})^2 + b_i^{T,j} P_{Gi}^{T,j} + c_i^{T,j} \quad (10)$$

式中 a 、 b 、 c 分别表示发电机有功输出的二次发电成本系数、一次发电成本系数和发电成本常数项。

功率平衡约束可以表示为

$$\begin{aligned} \sum_{i \in G^T} P_{Gi}^T + \sum_{j \in D} \sum_{i \in G^{T,j}} P_{Gi}^{T,j} = \\ \sum_{i \in B^T} P_{Di}^T + \sum_{j \in D} \sum_{i \in B^{T,j}} P_{Di}^{T,j} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: P_D 表示有功负荷; B 表示所有节点所组成的集合。

发电容量限制可以表示为

$$P_{Gi,\min}^T \leq P_{Gi}^T \leq P_{Gi,\max}^T, \quad i \in G^T \quad (12)$$

$$P_{Gi,\min}^{T,j} \leq P_{Gi}^{T,j} \leq P_{Gi,\max}^{T,j}, \quad j \in D, i \in G^{D,j} \quad (13)$$

式中 $P_{G,\max}$ 、 $P_{G,\min}$ 分别表示发电机有功出力的上限和下限。

线路容量约束限制可以表示为

$$P_{L,\min} \leq P_L \leq P_{L,\max}, \quad l \in L \quad (14)$$

式中: l 表示第 l 条线路; P_L 表示第 l 条线路的有功功率; $P_{L,\max}$ 、 $P_{L,\min}$ 分别表示线路容量的上限和下限; L 表示线路的集合。

因此,集中式 MO-TDCED 可以表示为

$$\begin{aligned} \min_{P_G} \{E_{\text{total}}, F_{\text{total}}\} \\ \text{s.t. (2), (3); } \forall t, (6), (10) \end{aligned} \quad (15)$$

2 HGD 算法

2.1 基于加权的集中式 MO-TDCED 模型

文献 [5] 系统地介绍了加权方法，它可以将不同的目标组合在一个标量目标函数中。通过将加权方法应用于式 (10)，实现了基于加权方法的集中式 MO-TDCED，具体表达式为

$$\begin{aligned} \min_{P_G} & (1-\omega)E_{\text{total}} + \pi_c \omega F_{\text{total}} \\ \text{s.t.} & (3), (4); \forall t, (7), (14) \end{aligned} \quad (16)$$

式中： ω 表示发电成本目标的权重系数； $1-\omega$ 表示碳排放目标的权重系数； π_c 是碳市场的碳排放价格。

2.2 基于 HGD 算法的分布式 MO-TDCED

由于输电网和配电网的隐私问题、数值稳定性问题和计算收敛性问题，本文所提的集中式模型在实际计算中是难以现实的。因此，本节将提出一个基于 HGD 的 MO-TDCED 的分布式模型。

首先，将式 (16) 解耦为 TSO 和 DSO 子问题，第 j 个配电网的 DSO 子问题为

$$\begin{aligned} \min_{P_G, P_B} & \sum_{i \in G^{T,j}} \omega F_i^{T,j} + (1-\omega) \lambda^{\text{global}} \sum_{i \in G^{T,j}} E_i^{T,j} + \\ & L_{\text{MP}}^j P_B^j + (1-\omega) \lambda^{\text{regional},j} \sum_{i \in G^{T,j}} E_i^{T,j} \end{aligned} \quad (17)$$

$$P_B^j + \sum_{i \in G^{T,j}} P_{Gi}^{T,j} = \sum_{i \in B^{T,j}} P_{Di}^{T,j} \quad (18)$$

$$P_{Gi,\min}^{T,j} \leq P_{Gi}^{T,j} \leq P_{Gi,\max}^{T,j}, \quad i \in G^{D,j} \quad (19)$$

式中： P_B 表示边界节点的有功注入； L_{MP} 表示边界节点的节点边际价格； λ 表示相应的等式约束对应的拉格朗日乘数； μ 表示不等式约束对应的非负乘子向量。

其中，边界节点的耦合关系为

$$L_{\text{MP}}^j = -\lambda + \sum_{l \in L^T} \mu_l^T - \mu_l^{T,j} \quad (20)$$

$$E^{D,j} = \sum_{i \in G^{T,j}} E_i^{T,j} \quad (21)$$

TSO 子问题：

$$\min_{P_G} \sum_{i \in G^T} \omega F_i^T + (1-\omega) E_i^T \quad (22)$$

$$\sum_{i \in G^T} P_{Gi}^T = \sum_{i \in B^T} P_{Di}^T + \sum_{j \in D} P_B^j \quad (23)$$

$$P_{Gi,\min}^T \leq P_{Gi}^T \leq P_{Gi,\max}^T, \quad i \in G^T \quad (24)$$

$$P_{Li,\min} \leq P_{Li} \leq P_{Li,\max}, \quad l \in L \quad (25)$$

$$\sum_{i \in G^T} E_i^T(P_{Gi}^T) \leq E_{\max}^{\text{global}} - \sum_{j \in D} E^{D,j} \quad (26)$$

$$\sum_{i \in G^{T,j}} E_i^T(P_{Gi}^T) \leq E_{\max}^{\text{regional},j} - E^{D,j} \quad (27)$$

2.3 HGD 算法步骤

HGD 算法通过对输电网子问题优化模型求解，并将相应的边界区域数据传递给所有的配电网子问题模型，然后对所有配电网子问题模型求解，并将所有边界区域数据传递给输电网，重复上述过程直到所有边界区域相关的物理量收敛到预设的收敛残差之内。输配电网交替迭代过程中的数据交换具体如图 2 所示。利用 HGD 算法求解分布式 MO-TDCED 的具体步骤如图 3 所示。

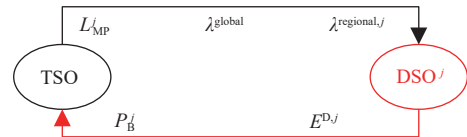


图 2 HGD 中 TSO 和 DSO 之间的数据流

Fig. 2 Data flow between TSO and DSO in the HGD

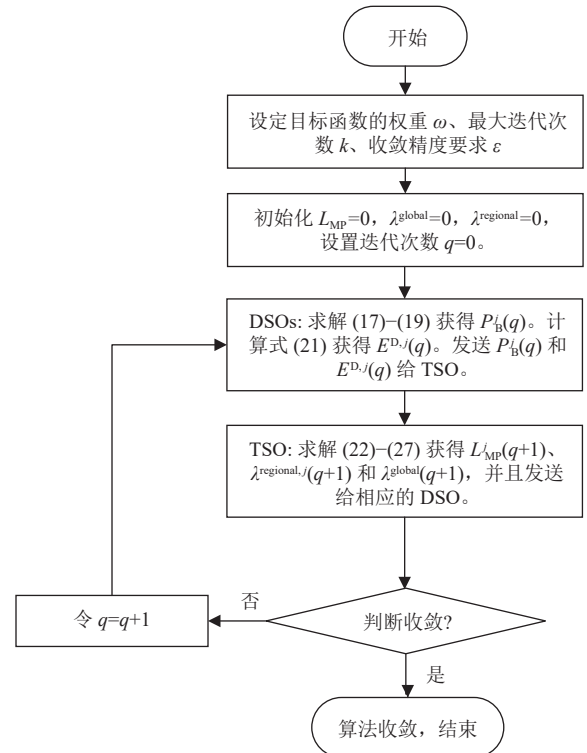


图 3 HDG 算法流程图

Fig. 3 Flowchart of HGD algorithm

3 算例测试

3.1 算例构造

为了测试本文提出的模型和算法，需要构造输配一体化的全网算例。本文将 MATPOWER 的输电网 30 节点标准算例与配电网 69 节点标准算例进行拼接，得到全网算例。

对于单区域配电网算例，具体的拼接方法是将 CASE30 的 30 号节点经变压器 ($r=0.002$ pu, $x=0.01$ pu, 比率为 1.0) 连接至 CASE69 系统的根节点。设置全局碳排放限额为 200 t。对于多区域配电网算例，具体的拼接方法是将 CASE30 的 8、10、30 号节点经 3 个变压器连接至 3 个 CASE69 系统的根节点，设置全局碳排放限额为 210 t，设置每个配电网区域的碳排放限额为 70 t。配电网各节点的电压幅值上下限分别为 1.1 pu 和 0.9 pu。设置 $\pi_c=22$ USD/kg。

将 CASE69 的部分节点接入 DG，输电网的发电机和 DG 的具体信息见表 1。

3.2 单区域配电网测试

3.2.1 算法精度测试

为了测试本文提出的模型和算法的精确度，将本文的计算结果与集中式多目标经济调度计算结果进行对比。

集中式模型指的是输配网模型进行拼接后得到的模型，虽然这种模型存在数据私密性、数值稳定性等问题，并不符合工程实际，但可以用来计算考虑碳约束的经济调度的精确结果，为其他算法的计算结果提供参考和对比。

图 4(a) 展示了输配电网边界区域节点电压随迭代次数的变化，可以发现经过 6 次迭代，边界节点的电压收敛到与集中式一致的结果。图 4(b) 展示了输电网区域和配电网区域内各机组在 2 种模型下的优化结果，可见各个发电机的出力完全一致。此外，由表 2 可见 2 种模式下的发电成本、系统总碳排也是完全一致，这表明所提出的分布式模型具有很高的精度，经过迭代计算可以得到与集中式一样的效果，同时保护了输配电网的数据隐私。HGD 算法因为需要反复迭代计算，所以花费的时间要高于集中式模型，但也具有较高的计算效率。

3.2.2 单目标和多目标对比

为了比较单目标和多目标，是否考虑碳排放约束的区别，设置了以下 4 个场景：

场景 1：单一目标 (最小化发电成本)，无碳排放限制；

场景 2：具有碳排放限制的单一目标 (最小化发电成本)；

场景 3：单一目标 (最小化碳排放)；

场景 4：具有碳排放限制的多目标 (最小化发电成本和碳排放)。

表 3 展示了 4 种场景下的发电成本、系统总碳排和计算时间。图 5 展示了输电网区域和配电网区域内各机组在 4 种场景下的计算结果。

由图 5 可知，在场景 1 中配电网中的分布式光伏的有功功率输出比其他 3 个场景小得多。在这个场景中，DG 比输电网中的发电机碳排放更低，但发电成本更高，由于第一个模型只考虑发

表 1 发电机和 DGs 的具体信息
Table 1 Specific information of generators and DGs

	节点	区域	有功参数 /MW			发电成本/(USD/h)			碳排放成本/(lb/h)		
			$P_{\max}$	$P_{\min}$	P_0	a	b	c	α	β	γ
配电网	15	—	4	0	0.5	0.025	3.7	0	0.0019	0.1497	6.287
	30	—	4	0	0.5	0.01	3.8	0	0.0031	−0.2474	1.8265
	45	—	4	0	0.5	0.02	3.7	0	0.0021	−0.2319	1.9459
	61	—	4	0	0.5	0.02	3.8	0	0.0021	−0.2319	1.9459
输电网	1	1	与MATPOWER中的参数相同			与MATPOWER中的参数相同			0.0019	n	6.287
	2	1							0.0019	0.1497	6.287
	22	2							0.0031	−0.2474	1.8265
	27	3							0.0031	−0.2474	1.8265
	23	3							0.0021	−0.2319	19.459
	13	2							0.0021	−0.2319	19.459

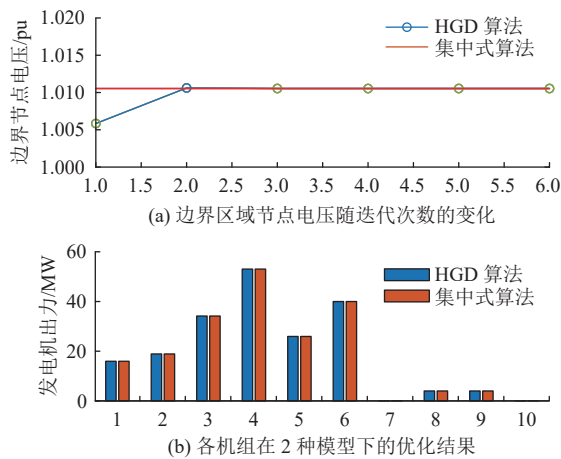


图 4 集中式与 HGD 算法对比图

Fig. 4 Comparison between centralized and HGD algorithms

表 2 2 种模式的计算结果

Table 2 Calculation results of two modes

模式	发电成本/(USD/h)	系统总碳排/(kg/h)	计算时间/s	迭代次数/次
HGD	664	79.38	0.87	6
集中式	664	79.38	0.13	1

表 3 4 种场景的计算结果

Table 3 Calculation results of four scenarios

编号	发电成本/(USD/h)	系统总碳排/(kg/h)	计算时间/s
场景1	591	102.06	0.13
场景2	604	90.72	0.13
场景3	668	79.23	0.13
场景4	664	79.38	0.87

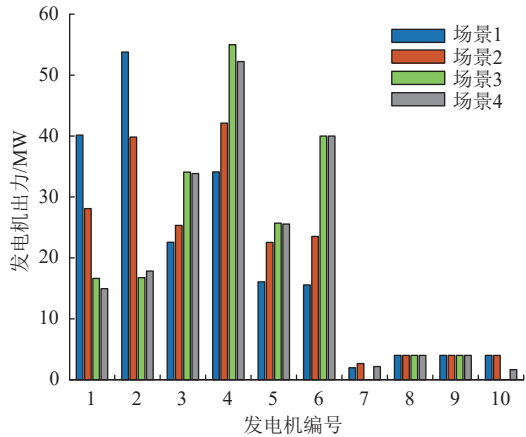


图 5 优化结果 (机组出力)

Fig. 5 Optimization results (unit output)

电成本, 因此 DG 的出力较少, 并导致碳排放总量达到 225 t, 大于碳排放的最大允许值 200 t。这表明在不考虑碳排放限制的情况下, 传统的经济调度结果可能会危害环境。此外, 比较场景 2、3、

4 的计算结果可以发现, 场景 4 的结果与场景 3 较为接近, 这是因为在当前的碳排放价格下, 减小系统碳排放带来的收益要远大于发电成本。MO 模型可以通过碳排放价格 π_c 和权重系数 ω 实现 2 个目标之间的权衡, 在实际操作中, MO-TDCED 更加灵活。

3.3 多区域配电网测试

3.3.1 不同碳排放约束条件对比

由于 3.2 节的分析对象只有一个配电网, 因此全局和区域碳排放量是一致的。在本节中, 将对比全局和区域碳排放约束条件对优化结果的影响。表 4 和图 6 比较了目标是最小化发电成本的 3 种情况: 场景 1, 未考虑碳排放限制; 场景 2, 仅考虑全局碳排放限制; 场景 3, 同时考虑全局和区域碳排放。

表 4 不同碳排放约束条件下的区域碳排放

Table 4 Regional carbon emissions under different carbon emission constraints

场景	发电成本/(USD/h)	区域1碳排/(kg/h)	区域2碳排/(kg/h)	区域3碳排/(kg/h)	总碳排/(kg/h)
场景1	619	43.09	36.29	35.83	115.21
场景2	646	28.58	33.57	33.11	95.25
场景3	661	29.48	31.75	70	92.99

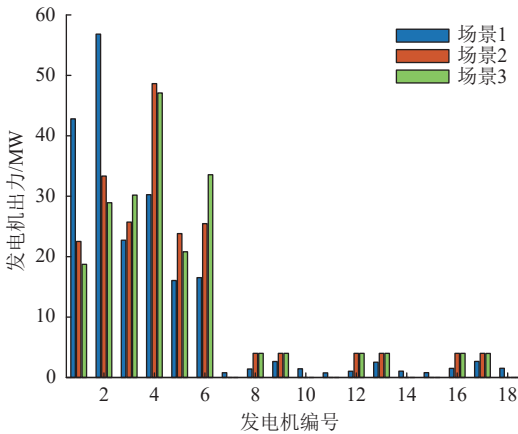


图 6 不同碳排放约束条件下的机组出力

Fig. 6 Unit output under different carbon emission constraints

这 3 种情况下的调度结果不同。全局限制将全局碳排放限制在 210 t 以内, 但仍可能违反区域碳排放限额, 如场景 2 中的区域 2、3。区域碳排放限制进一步将区域 2、3 的区域碳排放限制在 70 t 以内, 从而满足该区域区域碳排放责任。

3.3.2 收敛性分析

表 5 展示了多区域 MO-TDCED 在 HGD 和集中式 2 种算法求解下的优化结果、迭代次数和时间消耗。此处，假设不同的 DSO 以分散的方式工作，并且忽略通信时间对计算效率的影响。

表 5 多区域集中式与 HGD 算法计算结果
Table 5 Calculation results of centralized and HGD algorithms for multi-regions

算法	发电成本 (USD/h)	区域1 碳排放 (lb/h)	区域2 碳排放 (lb/h)	区域3 碳排放 (lb/h)	总碳排放 (lb/h)	计算 时间/s	迭代 次数/次
HGD	676	20.87	31.30	31.75	83.91	1.24	10
集中式	676	20.87	31.30	31.75	83.91	0.14	1

图 7(a) 展示了输电网的边界区域节点电压随迭代次数的变化，可以发现经过 10 次迭代，边界节点的电压收敛到与集中式一致的结果。图 7(b) 展示了输电网区域和配电网区域各机组在 2 种模型下的优化结果，各个发电机的出力完全一致。

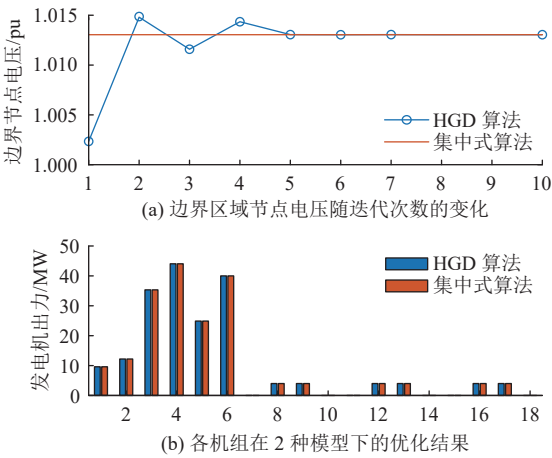


图 7 多区域下集中式与 HGD 对比图

Fig. 7 Comparison of centralized and HGD algorithms in multi-regions

尽管多区域下 HGD 算法比 2.2 节所述单区域经济调度需要更多的迭代次数，并花费更多时间，但本文提出的分布式模型仍然具有很高精度，HGD 算法的计算效率在日前经济调度中仍旧可以接受。

4 结论

本文提出了考虑碳排放的分布式 MO-TDCED。通过算例分析，可以得到以下结论：

1) 所提 MO-TDCED 模型可以实现经济效益和环境效益之间的权衡。此外，通过考虑全局和区域碳排放限制，不仅输配电系统满足了全局碳排放要求，而且每个区域的碳排放限制也得到了满足。

2) 采用的 HGD 算法可以用分布式迭代的方式得到与集中式一样精确的解。同时，保护了 TSO 和 DSO 的隐私，它们只需要交换边界参数。此外，算法具有较好的收敛性和较高的效率。尽管性能可能会随着 DSO 数量的增加而降低，但在日前经济调度中，计算时间仍然是可以接受的。

本文所提 MO-TDCED 对于双碳目标下的有源配电网经济调度具有参考价值，下一步将研究将 MO 模型和分布式算法扩展到与 TDC 协调运行与分析相关的其他问题，例如 TDC 最优潮流等，同时将精细刻画源荷的不确定性，进一步研究负荷不确定性与分解算法结合的问题。

参考文献

[1] TANG K, DONG S, SONG Y. Successive-intersection-approximation-based power flow method for integrated transmission and distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Power System*, 2020, 35(6): 4836–4846.

[2] LI Z, SUN H, GUO Q, *et al.* Generalized master-slave-splitting method and application to transmission-distribution coordinated energy management[J]. *IEEE Transactions on Power System*, 2019, 34(6): 5169–5183.

[3] SUN H, GUO Q, ZHANG B, *et al.* Master-slave-splitting based distributed global power flow method for integrated transmission and distribution analysis[J]. *IEEE Trans on Smart Grid*, 2015, 6(3): 1484–1492.

[4] LI Z, GUO Q, SUN H, *et al.* Coordinated transmission and distribution AC optimal power flow[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(2): 1228–1240.

[5] TANG K, DONG S, CUI Y, *et al.* Synthesised-objective collaborative model and its solution algorithm for transmission-distribution coordinated optimisation[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2020, 14(5): 752–761.

[6] LI Z, GUO Q, SUN H, *et al.* Coordinated economic dispatch of coupled transmission and distribution systems using heterogeneous decomposition[J]. *IEEE Transactions on Power System*, 2016, 31(6): 4817–4830.

[7] LI Z, GUO Q, SUN H, *et al.* A new LMP-sensitivity-based heterogeneous decomposition for transmission and distribution coordinated economic dispatch[J]. *IEEE Transactions*

- on Smart Grid, 2018, 9(2): 931–941.
- [8] YU J, LI Z, GUO Q, *et al.* Decentralized chance-constrained economic dispatch for integrated transmission-district energy systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(6): 6724–6734.
- [9] YUAN Z, HESAMZADEH M. Hierarchical coordination of TSO-DSO economic dispatch considering large-scale integration of distributed energy resources[J]. *Apply Energy*, 2017, 195(C): 600–615.
- [10] LIN C, WU W, CHEN X, *et al.* Decentralized dynamic economic dispatch for integrated transmission and active distribution networks using multi-parametric programming[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(5): 4983–4993.
- [11] 肖立业, 张京业, 聂子攀, 等. 地下储能工程 [J]. *电工电能新技术*, 2022, 41(2): 1–9.
XIAO Liye, ZHANG Jingye, NIE Zipan, *et al.* Underground energy storage engineering[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2022, 41(2): 1–9(in Chinese).
- [12] 彭元, 娄素华, 范越, 等. 考虑火电机组储热改造的电力系统低碳经济调度 [J]. *电网技术*, 2020, 44(9): 3339–3345.
PENG Yuan, LOU Suhua, FAN Yue, *et al.* Low-carbon economical dispatch of power system considering thermal energy storage in thermal power units[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(9): 3339–3345(in Chinese).
- [13] KUO M, LU S, TSOU M. Considering carbon emissions in economic dispatch planning for isolated power systems: a case study of the Taiwan power system[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, 54(2): 987–997.
- [14] FANG K, ZHANG Q, LONG Y, *et al.* How can China achieve its intended nationally determined contributions by 2030? A multi-criteria allocation of China's carbon emission allowance[J]. *Apply Energy*, 2019, 241(C): 380–389.
- [15] YANG L, LUO J, XU Y, *et al.* A distributed dual consensus ADMM based on partition for DCOPF with carbon emission trading[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(3): 1858–1872.

收稿日期：2023-01-28

作者简介：

焦昊 (1991), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统低碳调度、智能配用电等, E-mail: jiaohaopeter@163.com;
陈锦铭 (1985), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网大数据及低碳电力等, E-mail: cjm_nju@163.com;
赵新冬 (1980), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为 IT 新技术在电力低碳领域的应用, E-mail: 15105168216@139.com;
郭雅娟 (1975), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统低碳调度、电力通信, E-mail: mandy_guo@163.com;
杨毅 (1983), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为继电自动化、电力系统调度, E-mail: yang_yi_ec@163.com;
黄铭浩 (1998), 男, 硕士研究生, 通信作者, 研究方向为低碳电力、最优潮流, E-mail: 3170102286@zju.edu.cn。