第47卷第7期	电网技术	Vol. 47 No. 7
2023年7月	Power System Technology	Jul. 2023

文章编号: 1000-3673 (2023) 07-2703-10 中图分类号: TM 721 文献标志码: A 学科代码: 470·40

# 基于碳流理论考虑用户侧碳排放配额的最优潮流

黄铭浩1,唐坤杰1,董树锋1,南斌1,宋永华2

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027;

2. 智慧城市物联网国家重点实验室(澳门大学), 中国澳门特别行政区 氹仔 999078)

# Optimal Power Flow Considering User-side Carbon Emission Allowances Based on Carbon Flow Theory

HUANG Minghao<sup>1</sup>, TANG Kunjie<sup>1</sup>, DONG Shufeng<sup>1</sup>, NAN Bin<sup>1</sup>, SONG Yonghua<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China;

2. State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City (University of Macau), Taipa 999078, Macau SAR, China)

ABSTRACT: Since carbon emission allowances will be a limited public resource under the carbon peak and carbon neutrality targets, this paper focuses on the user-side to carry out the research of carbon reduction. Considering the differences in the development and resource statuses between regions, this paper applies the carbon flow theory based on the proportional sharing to measure the user-side carbon emissions. A non-convex mixed-integer nonlinear optimal power flow model based on the carbon flow theory and the user-side carbon emission allowances is established, where the power flow direction problem of the user-side carbon emission constraints is solved. Then, a particle swarm algorithm based on a power flow calculation update is used to solve the model. A case study illustrates that, introducing carbon allowances on the user-side can not only meet the user's carbon emission demand for electricity, bult also take into account the fairness principle of the emission reduction responsibility of the power sector in the dispatching. The proposed algorithm has a significant advantage in computational speed compared to the exact solution in the small-scale cases. In the large-scale cases, the proposed algorithm has a significant advantage in convergence compared with the common nonlinear programming solver. The problems of convergence and parameter tuning in the traditional particle swarm algorithm are solved.

**KEY WORDS:** carbon flow theory; carbon emission allowance constraints; optimal power flow; particle swarm algorithm; non-convex mixed-integer nonlinear model

**摘要**:由于双碳目标下碳排放配额将成为一个有限的公共资源,聚焦用户侧展开减碳调度研究。考虑到区域间发展及资源状况存在差异,采用基于比例共享原则的碳流理论来计量用户侧的碳排放。通过解决用户侧碳排放配额约束的潮流方向问题,建立了基于碳流理论、考虑用户侧碳排放配额约束的混合整数非线性最优潮流模型,并采用一种基于潮流计算更新的粒子群算法进行求解。经算例测试,在用户侧考虑碳排放配额约束不仅能够满足各类用户的用电碳排放需求,还能在调度中兼顾电力部门减排责任的公平原则。所提算法在小规模算例中相较于精确求解在计算速度上具有显著优势,在大规模算例中相较于非线性规划求解器在收敛性能上具有显著优势。与传统粒子群算法相比,解决了收敛难度大、参数整定困难的问题。

关键词:碳流理论;碳排放配额约束;最优潮流;粒子群算法;非凸混合整数非线性模型

#### DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0028

## 0 引言

电力工业作为主要的碳排放能源,占我国能源 活动碳排放的 40% 左右<sup>[1]</sup>,在双碳背景下,电力工 业的减碳已成为一项关键任务<sup>[2-4]</sup>。

国内外许多学者已经在电力系统调度中开展 减排工作。文献[5]在最优潮流的目标函数中考虑碳 交易成本,实现调度的经济性与低碳性的协调优 化。文献[6]通过对系统的总碳排施加约束,从而实 现低碳调度。

然而,考虑到发电侧碳排放的原动力来自于消费端的需求,以及我国地区经济发展和资源分布的不平衡,一些学者指出,"消费者"应该对生产过程中排放的二氧化碳负责<sup>[7]</sup>。

即使同一用户消耗同样的电量,实际碳排放会 根据电网拓扑结构和机组状态的变化而变化<sup>[8]</sup>,因

**基金项目:**国家自然科学基金项目(多区域互联综合能源系统自治协调运行研究(52077193))。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (52077193).

此,一些学者对用户侧的碳计量方式展开研究。文 献[8]提出了基于比例共享原则的碳流理论和模型, 详细地量化电力输送过程中的碳排放分布和消耗, 明确各个用户的碳排放量。在此基础上,文献[9] 对碳流理论进行了改进与完善,提出了一种基于网 络功率分解的实时碳流计算方法,克服了功率损耗 的碳排放分摊问题。

这些工作明确了用户侧的碳计量方法,国内外 许多学者在此基础上在用户侧开展减排工作。文 献[10]对用户收取消耗单位能源产生的排放碳的 税;文献[11]提出了一种针对碳足迹控制的需求侧 管理方法;文献[12]基于免费的碳配额,建立计及 碳排放成本的混合储能综合微能源网系统优化运 行模型。

综上,可以发现当前的研究聚焦于在源侧施加 总碳排约束或者在目标函数中考虑碳成本,在用 户侧考虑需求响应、施加碳税等。然而考虑用户的 减排责任,将用户侧碳排放配额作为约束,进行电 力系统优化调度的研究还比较罕见。

双碳目标的提出,意味着我国的碳排放配额将 成为一个有限的公共资源,必须在全国不同地区共 享<sup>[13]</sup>。同时一些行政上的减排责任是按地区划分 的<sup>[6]</sup>。因此已经有许多专家对碳排放配额展开研究。 在省级层面,文献[14]基于 2005 年至 2017 年的各 省电力部门的碳排放历史数据,基于公平、效率和 可持续原则,使用发电量、历史累积碳排放量等 6 个指标构建综合指数,计算 30 个省份电力部门 2030 年 的 最 优 碳 排 放 配 额 。 在 城 市 层 面 , 文 献[15-16]通过不同的指标分别计算了京津冀地区 和珠三角地区城市的碳排放配额。在企业层面:文 献[17]采用零和收益数据包络分析方法,将碳排放 配额分配给中国五家主要电力生产公司;生态环境 部要求发电行业重点排放单位报送年度温室气体 排放报告并进行审查<sup>[18]</sup>。

在工程应用中,本文研究的用户指输电网和配 电网的节点,代表一个省份、城市、地区或者街道 等,公平原则对用户分担气候负担和碳排放权的重 要性己在广泛的文献中得到证明<sup>[19]</sup>。因此,从人口、 经济、能源消耗等角度,为不同的用户分配不同的 用电碳配额是具有现实意义的。

通过解决用户侧碳排放配额约束的潮流方向 问题,本文建立了基于碳流理论、考虑用户侧碳配 额约束的最优潮流模型,并采用基于潮流计算更新 的粒子群算法对模型进行求解,规避了非凸混合整 数非线性规划模型难以求解的问题。算例测试表 明,在调度中考虑用户侧碳排放配额能够在保证用 户碳排放不超过碳配额的情况下,实现发电成本最 小,同时在调度中兼顾了电力部门减排责任的公平 原则,有助于实现双碳目标下减碳责任的落实。所 用算法在收敛性能和求解速度上,相较于精确求解 都具有显著优势,与传统粒子群算法相比解决了收 敛难度大、参数整定困难的问题。

# 1 基于碳流理论、考虑用户侧碳配额约束的 最优潮流模型

#### 1.1 用户侧碳排放配额约束模型

目前在工程中用户侧碳排放总量 F 的计算公式<sup>[18]</sup>如下:

$$F = eG \tag{1}$$

式中: G 是用户用电量; e 是电网平均排放因子, 一般取发电机单位发电量的二氧化碳排放量的加 权平均值, 生态环境部发布通知规定 2022 年企 业核算温室气体排放时采用的电网排放因子为 0.5810 tCO<sub>2</sub>/(MW·h)<sup>[18]</sup>。

然而,采用电网平均排放因子不利于用户了解 高耗能行为的实际碳足迹,对用户减碳的激励和惩 罚作用都较弱<sup>[10]</sup>,而且对于安装分布式光伏的用 户、采用新能源发电的电力输出地区是不公平的。 因此本文采用文献[8]提出的碳流理论,通过用户侧 碳排放强度 *e<sub>x</sub>*(即每个用户单位用电量产生的碳排 放量)来计量用户侧碳排放,*e<sub>x</sub>*计算公式如下:

$$e_{x} = \frac{\sum_{i \in x^{*}} (P_{i} \ \rho_{i}) + P_{G,x} e_{G,x}}{\sum_{i \in x^{*}} (P_{i} \ ) + P_{G,x}}$$
(2)

式中:  $x^+$ 是流入节点 x 的支路集合;  $P_i$ 为支路 i 的 有功功率;  $\rho_i$ 是支路 i 的碳排放强度;  $P_{G_x}$ 是节点 x的发电机的有功功率;  $e_{G_x}$ 是节点 x 的发电机的碳 排放强度。

在式(1)中可以注意到, x<sup>+</sup>不包括流出节点 x 的 支路,在潮流分布已知时,可以根据功率方向判断 流入节点的支路。但是将其作为约束,在得到最优 潮流结果前,无法判断支路功率的流向,这为建模 带来了很大的困难。为了解决潮流方向问题,本文 引入 0-1 变量 a<sub>ii</sub>:

$$a_{ij} = \begin{cases} 0, & P_{ij} < 0\\ 1, & P_{ij} > 0 \end{cases}$$
(3)

式中 P<sub>ij</sub>表示由节点 i 流向节点 j 的功率。

添加约束(4)一(6):

$$a_{ij} + a_{ji} = 1 \tag{4}$$

$$a_{ii}P_{ii} \ge 0 \tag{5}$$

$$a_{ji}P_{ji} \ge 0$$
(6)  
从而可以将式(2)可以改写为式(7):  

$$e_{x} = \frac{\sum_{i \in X^{+}} (P_{ix}\rho_{i}a_{ix}) + \sum_{j \in X^{-}} [P_{xj}\rho_{j}(a_{xj}-1)] + P_{G,x}e_{G,x}}{\sum_{i \in X^{+}} (P_{ix}a_{ix}) + \sum_{j \in X^{-}} [P_{xj}(a_{xj}-1)] + P_{G,x}}$$
(7)

式中: X<sup>+</sup>和 X<sup>-</sup>分别是规定流入节点 x 作为正方向和 规定流出节点 x 作为正方向的支路集合。

若 P<sub>ix</sub>>0,则说明功率由节点 *i* 流入节点 *x*,因此 *a<sub>ix</sub>=1*,纳入碳排放强度计算;反之则说明功率由节点 *x* 流入节点 *i*,因此 *a<sub>ix</sub>=0*,不纳入碳排放强度计算。

若  $P_{xj} < 0$ ,则说明功率由节点 j 流入节点 x,因此  $a_{xj}=0$ , $P_{xj}(a_{xj}-1)$ 是一个正数,纳入碳排放强度计算;反之则说明功率由节点 x 流入节点 j,  $a_{xj}=1$ ,  $P_{xi}(a_{xj}-1)$ 则是 0,不纳入碳排放强度计算。

综上,通过引入 0-1 变量解决了碳流理论中碳 排放强度计算的潮流方向问题,使基于碳流理论的 用户侧碳排放配额可以作为最优潮流中的约束。

## 1.2 最优潮流模型

在满足用户侧碳排放约束的条件下,本文所考 虑的最优潮流数学模型的成本函数为

$$\min f = \sum_{j \in G_{\mathrm{T}}} (\beta_j g_{\mathrm{GT},j}) + \sum_{z \in G_{\mathrm{W}}} (\varepsilon_z P_{\mathrm{GW},z}) + \sum_{z \in G_{\mathrm{W}}} [\alpha_n (a_n P_{\mathrm{GF},n}^2 + b_n P_{\mathrm{GF},n} + c_n)]$$
(8)

式中:  $G_{\rm T}$ 、 $G_{\rm W}$ 、 $G_{\rm F}$ 分别为燃气机组集合、风电 机组集合和燃煤机组集合;  $\beta_{j}$ 和 $g_{{\rm GT},j}$ 分别为燃气 机组 j的发电成本系数和发电消耗的天然气量;  $P_{{\rm GW},z}$ 和 $P_{{\rm GF},n}$ 分别为风电机组z和燃煤机组n的有功 出力;  $\varepsilon_{z}$ 为风电机组z的发电成本系数;  $a_{n}$ 、 $b_{n}$ 和 $c_{n}$ 是燃煤机组n的煤耗特性曲线的参数;  $\alpha_{n}$ 为 燃煤机组n的发电成本系数<sup>[20]</sup>。

本文对发电机的差异化建模侧重考虑不同发 电机组的碳排放强度不同,因此在本文中不考虑燃 气机组的供热需求,燃气机组的耗气量为

 $g(P_{GT,j}) = \gamma_{j,2} P_{GT,j}^2 + \gamma_{j,1} P_{GT,j} + \gamma_{j,0}$  (9) 式中:  $g(P_{GT,j})$ 为燃气机组j发电消耗的天然气量;  $P_{GT,j}$ 为燃气机组j的有功出力;  $\gamma_0 \cdot \gamma_1 \pi \gamma_2$ 是燃气 机组发电消耗天然气的耗量系数<sup>[20]</sup>。

等式约束:

$$\begin{cases} P_{\mathrm{G},i} - P_{\mathrm{L},i} - U_i \sum_{j \in X} \left[ U_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \right] = 0 \\ Q_{\mathrm{G},i} - Q_{\mathrm{L},i} - U_i \sum_{j \in X} \left[ U_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \right] = 0 \ (10) \\ \forall i \in S_{\mathrm{C}} \end{cases}$$

式中: X 是所有与节点 i 连接的支路的集合; Sc 表

示节点集合;  $P_{G,i}$ 和  $Q_{G,i}$ 分别为节点 *i* 处的发电机的 有功出力和无功出力;  $P_{L,i}$ 和  $Q_{L,i}$ 分别为节点 *i* 的有 功负荷和无功负荷;  $g_{ij}$ 、 $b_{ij}$ 和  $\theta_{ij}$ 分别表示节点 *i* 与 节点 *j*之间的电导、电纳和电压相位差;  $U_i$ 表示节 点电压幅值。

不等式约束:

$$\underline{P}_{G,i} \le \underline{P}_{G,i} \le \overline{P}_{G,i}, \qquad i \in S_G \tag{11}$$

$$Q_{\mathrm{G},i} \le Q_{\mathrm{G},i} \le \overline{Q_{\mathrm{G},i}}, \qquad i \in S_{\mathrm{G}}$$
(12)

$$\underline{U_i} \le U_i \le \overline{U_i}, \qquad i \in S_C \tag{13}$$

$$S_l \le S_l \le \overline{S_l}, \qquad l \in S_L$$
 (14)

$$g_i \le g_i \le \overline{g_i}, \qquad i \in G_{\mathrm{T}} \tag{15}$$

$$e_i P_{\mathrm{L},i} \le \overline{F_i}, \qquad i \in S_{\mathrm{C}}$$
 (16)

式中:  $S_{G}$ 表示发电机组集合;  $S_{L}$ 表示线路支路集合;  $\overline{P_{G,i}} \approx P_{G,i}$ 分别表示发电机组有功出力的上下限;  $\overline{Q_{G,i}} \approx Q_{G,i}$ 分别表示发电机组无功出力的上下限;  $\overline{U_{i}} \approx U_{i}$ 分别表示节点电压的上下限;  $S_{l}$ 为流过支路l的视在功率;  $\overline{S_{l}} \approx S_{l}$ 分别表示支路视在功率的 上下限;  $\overline{g_{i}} \approx g_{i}$ 分别表示天然气供应量上下限;  $\overline{F_{i}}$ 表示节点 i的碳排放配额。

根据上述目标函数及相关约束,计及用户侧碳 排放约束的最优潮流问题的数学表达为

#### 1.3 模型求解

为了解决碳排放强度计算的潮流方向问题,引入了支路数量两倍的 0-1 变量,优化模型变成了非 凸混合整数非线性规划问题,这是规划领域中最难 求解的问题,属于多项式复杂程度的非确定性 (non-deterministic polynominal hard, NP-hard)问题<sup>[21]</sup>, 如何获得最优解,在理论和算法上仍然有很多瓶颈<sup>[22]</sup>。

此外,在己知潮流分布的前提下,由式(2)可知 节点碳排放强度的求解是一个线性方程组问题。而 将用户侧的碳排放作为一个约束去求解最优潮流, 因为潮流分布和发电机出力是优化变量,支路功率 是与发电机出力相关的未知量,且在碳排放强度相 关的计算中, *P<sub>i</sub>、e<sub>x</sub>*和 *P<sub>Gx</sub>*是高度相关的变量,因 此式(7)是一个非线性表达式,式(16)是一个非线性 约束。

表1对比了传统最优潮流与考虑碳排放配额最 优潮流的差异。其中 ng、nb和 nl分别是发电机个数、 节点个数和支路个数。

表1 最优潮流模型对比						
Table 1 Con	nparison	of optim	al power	flow models		
推刑	连续变	整数变量	非线性	数学规划		
侠至	量数量	数量	约束数量	类型		
传统最优潮流模型	$2n_{\rm g}$	0	$3n_{\rm b}$	非凸非线性规划		
考虑碳排放配额	2	<i>ni</i> *2	2	非凸混合整数		
最优潮流模型	$2n_{\rm g}$		$3n_b+n_l$	非线性规划		

由于混合整数非线性规划(mixed integer nonlinear programming, MINLP)问题含有整数变 量,使得求解非线性规划的很多优秀算法都不能直 接求解 MINLP 问题<sup>[22]</sup>。当前的 MINLP 问题求解思 路包括:

1)将 0-1 变量连续化,并在目标函数中添加惩 罚项,使得 *a<sub>ij</sub>*接近 0 或者 1,从而能够使用现有的 成熟的非线性问题求解器进行精确求解。然而文 献[22]指出对于非凸 MINLP 问题,将整数变量进行 松弛后求解相应的非线性规划问题通常只能得到 局部最优解。

2)将模型凸处理。潮流模型的凸优化已经有 了较多较为成熟的研究,但是目前碳排放配额约束 研究相对较少,缺少针对性的凸优化处理方法。若 只将潮流模型凸优化并不能使得整个模型变成凸优 化模型进行求解,凸优化的效果较差。

3)采用启发式算法。最优潮流作为一个典型的非凸优化问题,不论使用内点法还是牛顿法等非线性优化方法进行求解,都不能从理论上得到最优解,而启发式算法虽然无法保证结果最优,但如果能保证得到一个接近全局最优解的近似最优解,那么对于实际工程应用来说是可以满足要求的。

为了提高计算的收敛性和速度,本文采用了一 种基于潮流计算更新的粒子群算法。

### 2 基于潮流计算更新的改进粒子群算法

粒子群算法通过随机搜索可以获得满足约束 的解,并得到潮流分布,从而可以直接求解碳排放 强度,规避了 0-1 变量造成的混合整数非线性规划 问题难以求解的难题,还大幅度减少了最优潮流模 型变量的数量。

#### 2.1 带约束优化问题的粒子群模型

粒子群算法的每一个解都称为粒子,并具有随 机速度,每个粒子根据自身最优值和全局最优值来 调整自己的空间搜索方向和步长,最终迭代搜寻整 个解空间的最优解。

粒子群算法的更新公式如下:  $\begin{cases}
V_i^{k+1} = wV_i^k + c_1 r_{i1}^k (P_i^k - X_i^k) + c_2 r_{i2}^k (P_g^k - X_i^k) \\
X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1}
\end{cases}$ (18) 式中:  $V_i^{k+1}$ 表示第 i 个粒子在第 k+1 次迭代时的速度: w 是惯性权重:  $c_1$ 和  $c_2$  是学习因子;  $r_{i1}^k$ 和  $r_{i2}^k$  是位于(0, 1)之间的随机数<sup>[23]</sup>;  $P_i^k$  是截止到第 k 次迭代,第 i 个粒子获得最优目标对应的解;  $P_g^k$  是截止到第 k 次迭代,所有粒子中获得最优目标值对应的解;  $X_i^k$  是截止到第 k 次迭代,第 i 个粒子当前的解。

带约束优化问题常采用罚函数法来进行处理。 罚函数的基本思路是将约束条件引入原来的目标 函数形成一个新的函数,将原来的有约束最优问题 求解转化成为一系列无约束最优问题求解。

加入惩罚项之后,目标函数变成了:

$$F(x) = f(x) + h(k)H(x)$$
(19)

式中: *f*(*x*)是原先的目标函数; *h*(*k*)是动态更新的惩罚系数; *H*(*x*)是约束惩罚项。

$$e_i(x) = \max[0, g_i(x)]$$
 (20)

对于等式约束, $h_j(x)=0$ ,则惩罚项:

$$e_j(x) = \max(0, |h_j(x)|)$$
 (21)

整体惩罚项 H(x)是各个约束惩罚项的和,即

$$H(x) = \sum_{i=1}^{m_1} e_i(x) + \sum_{j=1}^{m_2} e_j(x)$$
(22)

式中: *m*<sub>1</sub> 是所有不等式约束的集合; *m*<sub>2</sub> 是所有等 式约束的集合。

因此最优潮流的适应性函数可以改写为

$$\min f + w(\sum_{i=1}^{c} (\max(0, e_{i} - \overline{e_{i}})) + \sum_{i=1}^{s_{c}} (\max(0, U_{i} - U_{i})) + \sum_{i=1}^{s_{c}} (\max(0, U_{i} - U_{i})) + \sum_{i=1}^{s_{c}} (\max(0, P_{G,i} - P_{G,i})) + \sum_{i=1}^{s_{c}} (\max(0, P_{G,i} - \overline{P_{G,i}})) + \sum_{i=1}^{s_{c}} (\max(0, Q_{G,i} - Q_{G,i})) + \sum_{i=1}^{s_{c}} (\max(0, Q_{G,i} - Q_{G,i})) + \sum_{i=1}^{s_{c}} (\max(0, Q_{G,i} - Q_{G,i})) + \sum_{i=1}^{s_{c}} (\max(0, S_{i} - S_{i})) + \sum_{i=1}^{s_{c}} (\max(0, S_{i} - S_{i})) + \sum_{i=1}^{s_{c}} (\max(0, g_{i} - g_{i})) + \sum_{i=1}^{s_{c}} (\max(0, g_{i} - g_{i})) + \sum_{i=1}^{s_{c}} (\max(0, g_{i} - P_{L,i} - V_{i} \sum_{j \in X} V_{j}(g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij})|)) + \sum_{i=1}^{s_{c}} (\max(0, |Q_{G,i} - Q_{L,i} - U_{i} \sum_{j \in X} U_{j}(g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij})|)))$$

$$(23)$$

## 2.2 改进粒子群算法

标准粒子群算法非常依赖于惯性权重、学习因 子、惩罚系数等参数的选择,容易出现收敛精度低、 陷入局部最优解的问题<sup>[24]</sup>。最优潮流作为典型的非 线性优化问题,对惩罚系数的整定提出了较高的要 求,惩罚系数过大容易陷入局部最优解,过小则容 易出现违反约束的情况,求解难度大。

因此本文采用一种基于潮流计算更新的粒子 群算法。该算法的变量仅为发电机的有功功率和电 压幅值,从而减小了粒子的维度,通过潮流计算获 得当前发电机有功功率和电压幅值条件下的潮流 分布,确保随机移动的粒子满足潮流方程,提高收 敛性。因此,适应性函数可以不再考虑潮流方程等 式约束,只需添加不等式约束的罚函数,从而式(23) 可以改写为

$$\min f + w(\sum_{i=1}^{S_{c}}(\max(0, e_{i} - \overline{e_{i}})) + \sum_{i=1}^{S_{c}}(\max(0, U_{i} - U_{i})) + \sum_{i=1}^{S_{c}}(\max(0, U_{i} - \overline{U_{i}})) + \sum_{i=1}^{S_{c}}(\max(0, P_{G,i} - P_{G,i})) + \sum_{i=1}^{S_{c}}(\max(0, P_{G,i} - \overline{P_{G,i}})) + \sum_{i=1}^{S_{c}}(\max(0, Q_{G,i} - Q_{G,i})) + \sum_{i=1}^{S_{c}}(\max(0, Q_{G,i} - Q_{G,i})) + \sum_{i=1}^{S_{c}}(\max(0, Q_{G,i} - \overline{Q_{G,i}})) + \sum_{i=1}^{S_{c}}(\max(0, S_{i} - S_{i})) + \sum_{i=1}^{S_{c}}(\max(0, S_{i} - \overline{S_{i}})) + \sum_{i=1}^{S_{c}}(\max(0, S_{i} - \overline{S_{i}})))$$
(24)

综上所述,基于潮流计算更新的粒子群算法的 具体步骤如图1所示。





本文设置粒子群算法的最大迭代次数 q=2000, 收敛判据为连续 15 次迭代适应性函数的数值相差 小于 10<sup>-6</sup>,避免将局部最优解误认为全局最优解。

在实际的日前调度中为了确保安全性,可以对 粒子群计算结果进行后续检验,确认没有违反不等 式约束后再应用到调度中。

## 3 算例测试

#### 3.1 测试环境和测试条件

本文测试中的程序基于 MATLAB R2018a 及 MATPOWER 7.0 编写,运行在 64bit 的 Windows10 操作系统上。测试使用的中央处理器型号为 Intel Core i5-7300HQ,运行主频 2.50 GHz。优化问题的 相关参数的设定,采用 MATPOWER 7.0 的默认设 定。粒子群算法的惯性权重设置为 0.729 8,2 个学 习因子设置为 1.4296<sup>[25]</sup>;惩罚系数与迭代次数有 关,设置为 $\sqrt{k}$ 。

IEEE 标准算例没有相关的信息,算例测试的 主要目的是验证模型的可行性和方法的正确性,因 此本文的碳排放配额设置为比原先的碳排放降低 一定的比例 *k*<sub>carbon</sub>,具体为:利用碳流理论计算传 统最优潮流下相应节点的碳排放数值 *F*<sub>1</sub>,在此基础 上,设置碳配额上限:

$$F_i = F_1 (1 - k_{\text{carbon}}) \tag{25}$$

国务院在《关于印发 2030 年前碳达峰行动方 案的通知》中指出:到 2025 年,单位国内生产总 值二氧化碳排放比 2020 年下降 18%<sup>[26]</sup>。为了实现 该目标,每年单位负荷的碳排放量同比需要降低 3.9%,因此本文取 k<sub>carbon</sub>=3.9%。

在实际工程应用,也可以根据各个用户的实际 减排需求,依照各级电力部门的历史排放数据,基 于公平原则等指标,利用文献[14-16]中的方法计算 得到各级用户的碳排放配额数值。

#### 3.2 算例构造

为了测试本文所提出的算法,使用 IEEE 14、 30 和 118 节点测试系统进行案例研究。由于 14 节 点系统的节点 8 和 30 节点系统的节点 11 与节点 13 可能存在功率通量为 0(没有发电机和支路注入功 率)的情况,在计算节点碳排放强度时会造成矩阵奇 异,本文选择对算例进行改造,在可能的零功率通 量节点增加负荷:在 14 节点系统的节点 8 添加 5 MW 的有功负荷,30 节点系统的节点 11 与 13 分 别添加 2 MW 的有功负荷。另一个解决方案是在碳 流追踪计算时消除与零功率通量节点连接的分支, 因为零功率通量节点的消除不会改变潮流的分布, 也不会改变其余节点的碳排放流,只改变矩阵和向 量的维数<sup>[8]</sup>。

测试系统中的每个发电机都被定义为3种类型 之一:容量大于330 MW的发电机设置为燃煤机组, 容量小于等于100 MW的发电机设置为风电机组, 其余发电机设置为燃气机组<sup>[8]</sup>。发电机的碳排放强 度如表 2 所示<sup>[8]</sup>。

表 2 发电机容量与碳排放强度						
Table 2	Table 2         Capacity and carbon emission intensity of					
generations						
发电机类	型	发电机容量/MW	$e_{Gx}/(kgCO_2/(kW\cdot h))$			
燃煤机线	组	>330	0.875			
燃气机线	组	>100& ≤330	0.500			
清洁能源	机组	≤100	0.000			

# 3.3 用户侧碳约束的影响

3.3.1 单时段仿真分析

14 节点系统拓扑如图 2 所示。根据电网拓扑可 知,所有发电机都可以通过不同的分支流入节点 4, 将其称为枢纽节点。





设置5个场景如下:

1)场景1。不添加碳约束。

2)场景2。节点4施加小于等于37.36 tCO<sub>2</sub>/h 的碳排放配额约束。

3)场景3。节点3施加小于等于39.58 tCO<sub>2</sub>/h 的碳排放配额约束。

4)场景4。在发电侧施加场景2条件下的系统 总碳排放配额约束(166.16 tCO<sub>2</sub>/h)。

5)场景 5。对所有负荷节点按照式(25)施加碳 排放配额约束。

场景1和2是对照组,场景1与场景2对比可 以分析碳配额约束对用户碳排放的影响;场景3与 场景2对比可以分析对不同用户施加碳约束对潮流 分布的影响;场景4与场景2对比可以分析在发电 侧施加总碳排约束与在用户侧施加碳约束的区别; 场景5与场景1对比可以分析在所有用户施加碳配 额约束对潮流分布的影响。

5个场景下系统的总碳排和费用如表 3 所示, 发电机出力和节点碳排放强度如图 3 所示。

			SCE	nario	)S				
Table 3	C	arbon e	emissions	and	costs of	f 14 b	ous sy	stem i	n 5
-	表 3	5种共	<b>6</b> 景下 14	节点	系统的	〕碳排	和费	用	

场景	系统费用/(\$/h)	系统总碳排/(tCO <sub>2</sub> /h)	约束点碳排放/(tCO <sub>2</sub> /h)
场景1	8 270	178.30	39.04
场景 2	8 298	166.16	37.36
场景3	8 279	176.37	39.58
场景4	8 286	166.05	38.87
七星 6	0 600	140.72	



#### 图 3 14 节点系统发电机出力和节点碳排放强度 Fig. 3 14 bus system generator results and bus carbon emission intensity

1) 用户侧碳配额约束会影响流入该节点发电 机的出力和流出节点的碳排放量。直接影响:比较 场景 1 和场景 2, G1 和 G2 的边际成本(分别为 0.043P<sub>G</sub>+20 和 0.25 P<sub>G</sub>+20, 其中 P<sub>G</sub>为相应发电机 的有功功率)远小于其余发电机,因此在不施加约束 时, 流入节点4的功率全部来自于G1(碳排放强度 为 0.875)和 G2(碳排放强度为 0.5)。而当对节点 4 施加碳排放配额约束时,因为增加 G2 的出力对碳 排放的影响较小,最佳措施是提高风电机组的出 力, 使得风电流入节点 4, 现在的结果便是增加 G5(碳排放强度为 0)的出力, 使得线路 4-7 和 7-8 功率倒送,降低了节点4的碳排放量。间接影响: 原先流入节点7的功率来自于节点4和节点8,因 为G5的出力增加,线路4-7和7-8功率倒送,所以 节点7和节点8的功率全部来自于G5,因此节点7 和 8 的碳排放量也降为 0。此外, 由于 G3 的发电 量降低为0,因此节点3的功率基本来自于节点2, 因此节点3的碳排放量大幅度提升。

2)对枢纽节点施加碳排放配额约束对整个系统的潮流分布会造成较大的影响。比较场景1与场

景 3,给节点 3 施加小于等于 39.58 tCO<sub>2</sub>/h 的碳排 放配额约束时,只需要略微提高 G3(碳排放强度为 0)的出力即可满足约束,可以发现其余节点的碳排 放量与场景 1 相比差异很小。而给节点 4 施加约束, 由场景 2 的计算结果可知,与场景 1 各个节点的碳 排放量结果有显著的差异,这是因为节点 3 只与节 点 2 和 4 相连,与节点 4 相比属于一个边界节点, 所以对节点 3 施加碳配额约束只对小范围内的潮流 分布造成影响。

3) 在发电侧施加碳排放约束不能确保特定用 户的碳排放量不超标,在调度时没有考虑到分担气 候负担的公平原则。根据场景2求得的系统总碳排, 在 matpower 的 runopf 函数中添加总碳排约束再进 行求解。比较场景2与场景4可以发现,由于在发 电侧施加总碳排放约束相较于在用户侧考虑碳配 额约束是一个更加宽松的约束,在总碳排一样时发 电成本可能会更低。但是节点 4 的碳排放量为 38.87 tCO<sub>2</sub>/h,碳排放量将超出约束,没能完成减排 指标。同样的,如果某些用户减排压力较轻,他们 不希望通过提高发电成本而降低他们的用电碳排。 以上调度方法没有考虑到公平原则, 文献[14]计算 指出不同的省份减排压力不同,在发电侧施加总碳 排放约束无法满足实际情况中不同用户对用电碳 排的差异性需求。然而,考虑用户侧碳配额约束的 最优潮流能够满足各类用户的用电碳排放需求,在 保证碳排放不超过配额的情况下,实现总体发电成 本最低,实现了双碳目标下减排责任的公平原则。

4) 在用户施加碳配额约束是一个更加严格的 约束。14节点系统的总负荷为264MW,根据式(25), 理论上只需降低10.296 tCO<sub>2</sub>/h即可,然而根据计算 结果可发现场景5相较于场景1减少了近30 tCO<sub>2</sub>/h。 观察图3的节点碳排放量,可以发现节点5的碳排 放量与碳排放配额十分接近,而其余节点的碳排放 量都低于碳排放量。因此节点5的碳排放配额约束 是关键约束,流入节点5的功率全部来自于G1(碳 排放强度为)和G2(碳排放强度为0.5)。为了实现目 标函数的成本最小,只能降低G1的发电量,虽然 节点5的负荷只有7.6MW,但是由于比例共享原 则,G1减少了53MW的出力,因此系统总碳排大 幅度降低。

#### 3.3.2 多时段仿真分析

长期量的碳排放配额与短期过程的最优潮流 可以通过按照负荷比例分配的方式进行衔接。

以 IEEE14 节点系统作为例,进行 24h 多时段 仿真,节点4 的总负荷为 1164MW·h,节点4 的总 碳配额设置为 913t CO<sub>2</sub>/h。按照负荷比例分配到 24 个时间段,有无碳约束下多时段 14 节点系统的碳 排和费用如表 4 所示,有功功率负载和节点碳排放 量如图 4 所示。

	and without carbon constraints
Table 4	14 bus system carbon emissions and costs with
表 4	有无碳约束下多时段 14 节点系统的碳排和费用





可以发现节点4的碳排放量趋势与节点4的有 功功率变化趋势是一致的,这与按照负荷比例分配 的原则一致。

此外,在单时段和多时段仿真中,分别增加 0.34%和 0.53%的发电成本,却可以分别降低 6.8% 和 5.7%的总碳排放。因此在调度中,考虑碳排放是 具有现实意义的,若只考虑发电成本,或许可以略 微地降低成本,但却远不足以弥补治理环境所付出 的代价。

后续可以结合碳市场的研究,分摊碳排放配额 造成的额外的发电成本,落实双碳目标下的减排责 任;此外,也可以鼓励碳排放超额的用户错峰用电 或者安装分布式新能源,否则可能施加限电政策, 从而有效促进双碳目标的实现。

#### 3.4 算法性能比较

本文比较了3种不同的求解方法:

1)方法1。利用基于潮流计算更新的粒子群算 法进行求解。

2) 方法 2。利用 yalmip 建模,将 0-1 变量 *a<sub>ij</sub>* 松弛成连续变量,并在目标函数中添加惩罚项确保 其接近 0 或者 1,使用 Ipopt 求解器进行精确求解。 3)方法 3。利用传统粒子群算法求解。
利用方法 3 对 3.3.1 节中的场景 2 进行求解,
经 2000 次迭代后,仍旧无法满足等式约束,各个
节点的潮流方程差值如图 5 所示。

传统粒子群算法的计算结果违反了潮流方程 的约束,这是因为最优潮流的等式约束十分复杂, 因此难以满足。若罚函数取得过大,则发电成本相 较于惩罚项会变得可以忽略,因此容易陷入局部最 优解。若罚函数取得过小则容易违反约束,使得结 果不具有参考意义。因此后续只比较方法1和方法 2 的收敛性能和计算速度。



图 5 14 节点系统方法 3 潮流方程差值结果 Fig. 5 14 bus system method 3 power flow equation results

对14节点系统节点4施加小于等于37.36 tCO<sub>2</sub>/h 的碳排放配额约束;对30节点系统的节点2施加 小于等于16.59 tCO<sub>2</sub>/h 的碳排放配额约束;对118 节点系统的节点27施加小于等于42.06 tCO<sub>2</sub>/h 的碳 排放配额约束。利用方法1和2进行求解,计算结 果见表5和图6。

表 5 2 种算法下 14、30 和 118 节点系统碳排和费用 Table 5 Carbon emissions and costs of 14, 30 and 118 bus systems of two algorithms

		•	0		
至休	子斗	系统	系统总碳排/	约束点碳排放	计算
尔坈	刀伝	费用/(\$/h)	(tCO <sub>2</sub> /h)	量/(tCO <sub>2</sub> /h)	时间/s
14 节点	方法 1	8 298	166.16	37.36	8
系统	方法2	8297	166.13	37.36	13
30节点	方法 1	9 128	182.06	16.59	24
系统	方法2	9 138	185.94	16.59	516
118 节点	方法 1	130 946	2 800.49	42.06	96
系统	方法2	—	—	—	>86400

将方法1和方法2的结果进行比较,对于小规 模系统(14节点系统),如图6所示。2种算法的发 电机出力基本一致,在碳排放约束满足的情况下, 从目标函数发电成本最低而言,Ipopt的结果略微好 于改进粒子群算法,改进粒子群算法速度优于 Ipopt 求解器。当模型增大到30节点系统时,在碳排放 约束满足的情况下,从目标函数发电成本最低而



#### 图 6 14 和 30 节点系统方法 1 和方法 2 的计算结果 Fig. 6 Calculation results of method 1 and method 2 of the 14 and 30 bus system

言,改进粒子算法要明显好于 Ipopt 的计算结果, 而且 2 种算法的风电机组出力结果差异较大, Ipopt 求陷入了局部最优解,且 Ipopt 求解器的计算时间 约为粒子群算法的 20 倍。当模型复杂到 118 节点 时,改进粒子群算法在 2min 内仍旧可以收敛到最 优解,然而 Ipopt 求解器无法收敛,在规定求解时 间内无法求解,且由 30 节点系统的计算结果可以 预测 Ipopt 求解器大概率会陷入局部最优解。通过 3 个算例对比,进一步说明了原先模型求解的复杂 性,也验证了改进粒子群算法无论是计算速度还是 收敛性能,相对于 Ipopt 求解器而言都具有显著的 优势。

基于潮流计算更新的粒子群算法的迭代收敛 曲线如图7所示。

可以从图7发现在3个算例中, 粒子群在50~



图 7 基于潮流计算更新的粒子群算法迭代收敛曲线 Fig. 7 Iterative convergence curve of particle swarm optimization based on power flow calculation update 100 次迭代后能收敛到最终解的附近,后续的迭代 次数较多是因为当前设置的收敛精度较高:连续15 次迭代适应性函数值之差小于10<sup>-6</sup>。

#### 4 结论

本文提出了在用户侧考虑碳排放配额的最优 潮流计算模型和求解方法,经 IEEE 14、30 和 118 节点系统算例测试,可以得到如下结论:

1)建立的基于碳流理论、考虑用户侧碳约束 的最优潮流模型具有现实意义,能够满足各类用户 的用电碳排放需求,在保证碳排放不超过配额的情 况下,实现总体发电成本最低,兼顾了双碳目标下 区域减排责任的公平原则,同时能为碳市场的研究 提供一些新的方向。

2)在电力系统拓扑的枢纽节点施加碳排放配额约束会对系统的潮流分布造成较大的影响;在发电侧施加总碳排放约束,虽然也能降低碳排,但无法满足实际情况中不同用户对用电碳排的差异性需求,在用户侧施加碳配额约束是一个更加严格的模型。

3)考虑用户侧碳排放配额的非凸混合整数非 线性模型十分复杂,本文采用的基于潮流计算更新 的粒子群算法在系统规模较大时,不仅能比非线性 求解器节省 20 倍以上的时间,且具有更好的收敛 性能,与传统粒子群算法相比具有高收敛性能、参 数整定容易等优势。

后续研究中,会尝试将用户侧碳排放约束进行 合适的凸优化处理,从而能够将整个模型变成凸优 化问题从而能够采用数学优化算法进行精确求解。

#### 参考文献

- [1] 国网能源研究院有限公司.中国能源电力发展展望 2020[M].北 京:中国电力出版社,2020.
- [2] 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): 2830-2841.

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): 2830-2841(in Chinese).

- [3] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望
  [J].中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2818.
  ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818(in Chinese).
- [4] 侯金鸣,孙蔚,肖晋宇,等.电力系统关键技术进步与低碳转型的协同优化[J].电力系统自动化,2022,46(13):1-9.
   HOU Jinming, SUN Wei,XIAO Jinyu, et al. Collaborative optimization of key technology progress and low-carbon transition of

power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(13): 1-9(in Chinese).

- [5] 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).
- [6] KUO M T, LU S D, TSOU M C. 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.
- [7] KANG Chongqing, ZHOU Tianrui, CHEN Qixin, et al. Carbon emission flow in networks[J]. Scientific Reports, 2012, 2: 479.
- [8] KANG Chongqing, ZHOU Tianrui, CHEN Qixin, et al. Carbon emission flow from generation to demand: a network-based model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2386-2394.
- [9] 汪超群,陈懿,文福拴,等.电力系统碳排放流理论改进与完善
  [J].电网技术,2022,46(5):1683-1691.
  WANG Chaoqun, CHEN Yi, WEN Fushuan, et al. Improvement and perfection of carbon emission flow theory in power systems[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1683-1691(in Chinese).
- [10] CHENG Yaohua, ZHANG Ning, ZHANG Baosen, et al. Low-carbon operation of multiple energy systems based on energy-carbon integrated prices[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1307-1318.
- [11] POURAKBARI-KASMAEI M, LEHTONEN M, CONTRERAS J, et al. Carbon footprint management: a pathway toward smart emission abatement[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(2): 935-948.
- [12] 邱纯,应展烽,冯奕,等. 计及碳配额的混合储能综合微能源网 优化运行研究[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 119-127.
  Qiu Chun, Ying Zhanfeng, Feng Yi, et al. Optimal operation of hybrid energy storage integrated micro-energy network considering carbon quote[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 119-127(in Chinese).
- [13] ZHANG Yuejun, WANG Aodong, DA Yabin. Regional allocation of carbon emission quotas in China: evidence from the Shapley value method[J]. Energy Policy, 2014, 74: 454-464.
- [14] CUI Xiaoyan, ZHAO Tao, WANG Juan. Allocation of carbon emission quotas in China's provincial power sector based on entropy method and ZSG-DEA[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 284: 124683.
- [15] HAN Rong, TANG Baojun, FAN Jingli, et al. Integrated weighting approach to carbon emission quotas: an application case of Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 131: 448-459.
- [16] LI Lixu, LI Yina, YE Fei, et al. Carbon dioxide emissions quotas allocation in the Pearl River Delta Region: evidence from the maximum deviation method[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 177: 207-217.
- [17] MA Chaoqun, REN Yishuai, ZHANG Yuejun, et al. The allocation of carbon emission quotas to five major power generation corporations in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 189: 1-12.
- [18] 中华人民共和国生态环境部.关于做好 2022 年企业温室气体排放 报告管理相关重点工作的通知[EB/OL].(2022-03-15).https://www. mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202203/t20220315\_971468.html.
- [19] FANG Kai, ZHANG Qifeng, LONG Yin, et al. How can China achieve its Intended Nationally Determined Contributions by 2030? A multi-criteria allocation of China' s carbon emission allowance[J].

Applied Energy, 2019, 241: 380-389.

- [20] 张晓辉,梁军雪,赵翠妹,等.基于碳交易的含燃气机组的低碳 电源规划[J].太阳能学报,2020,41(7):92-98.
  ZHANG Xiaohui, LIANG Junxue, ZHAO Cuimei, et al. Research on low-carbon power planning with gas turbine units based on carbon transactions[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(7): 92-98(in Chinese).
- [21] GAREY M R, JOHNSON D S. Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness[M]. New York: W.H. Freeman and Co., 1979.
- [22] 刘明明,崔春风,童小娇,等.混合整数非线性规划的算法软件 及最新进展[J].中国科学:数学,2016,46(1):1-20.
  LIU Mingming, CUI Chunfeng, TONG Xiaojiao, et al. Algorithms, softwares and recent developments of mixed integer nonlinear programming[J]. SCIENTIA SINICA Mathematica, 2016, 46(1): 1-20(in Chinese).
- [23] 马英姿,马兆兴.基于博弈算法的电动汽车有序充电优化及效益 分析[J].电力工程技术,2021,40(5):10-16.
  Ma Yingzi, Ma Zhaoxing. Orderly charging optimization and benefit analysis of electric vehicles based on game algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(5): 10-16(in Chinese).
- [24] 詹红霞,肖竣文,邓小勇,等. 计及柔性负荷的高比例风光渗透 下配电网孤岛划分策略[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 108-116. ZHAN Hongxia, XIAO Junwen, DENG Xiaoyong, et al. Islanding strategy for distribution network with high proportion of wind/ photovoltaic penetration considering flexible load[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4): 108-116(in Chinese).
- [25] 余建树,李朝霞,龚雪娇,等.基于并行粒子群算法的电力系统 分区抗差状态估计[J].电网技术,2022,46(8):3139-3148.

YU Jianshu, LI Zhaoxia, GONG Xuejiao, et al. Robust state estimation of power system based on parallel particle swarm optimization and partition calculation[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 3139-3148(in Chinese).

[26] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案 的通知[EB/OL]. (2021-10-26). http://www.gov.cn/zhengce/content/ 2021-10/26/content\_5644984.htm.



在线出版日期:2023-04-06。 收稿日期:2023-01-10。 作者简介:

黄铭浩(1998),男,硕士研究生,主要从事低 碳电力、最优潮流的研究工作,E-mail: 3170102286 @zju.edu.cn;

黄铭浩

唐坤杰(1994),男,博士,主要从事输配协同 优化、电力系统高性能计算的研究工作,E-mail: tangkunjie1994@zju.edu.cn;

董树锋(1982),男,通信作者,博士生导师, 主要从事电力系统优化运行、电力系统高性能计算 的研究工作,E-mail:dongshufeng@zju.edu.cn;

南斌(1998),男,硕士研究生,主要从事电力 系统和综合能源系统优化运行方面的研究工作, E-mail: 3160105500@zju.edu.cn;

宋永华(1964),男,博士,教授,主要从事电 力系统与智慧能源的研究工作。

(责任编辑 徐梅)

# Optimal Power Flow Considering User-side Carbon Emission Allowances Based on Carbon Flow Theory

HUANG Minghao<sup>1</sup>, TANG Kunjie<sup>1</sup>, DONG Shufeng<sup>1</sup>, NAN Bin<sup>1</sup>, SONG Yonghua<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China;

2. State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City, University of Macau, Taipa 999078, Macau SAR, China)

**KEY WORDS:** carbon flow theory; carbon emission allowance constraints; optimal power flow; particle swarm algorithm; non-convex mixed-integer nonlinear model

Carbon emission allowances will be a limited public resource under the carbon peak and carbon neutrality targets. Current research on carbon reduction in power system dispatch focuses on imposing a total carbon emission constraint at the source side or considering carbon cost in the objective function, considering demand response at the user side, etc.

In this paper, a non-convex mixed-integer nonlinear optimal power flow (OPF) model based on carbon flow theory and user-side carbon emission allowances is established, where the power flow direction problem of user-side carbon emission constraints is solved. Then, a particle swarm algorithm based on a power flow calculation update is used to solve the model.

Basing on carbon flow theory, the formula for calculating the user-side carbon emission intensity  $e_x$  is as follows:

$$e_{x} = \frac{\sum_{i \in x^{+}} P_{i} \rho_{i} + P_{G,x} e_{G,x}}{\sum_{i \in x^{+}} P_{i} + P_{G,x}}$$
(1)

Where,  $x^+$  is the set of branches flowing into node *x*;  $P_i$  is the active power of branch *i*;  $\rho_i$  is the carbon emission intensity of branch *i*;  $P_{G,x}$  is the active power of the generator at node *x*;  $e_{G,x}$  is the carbon emission intensity of the generator at node *x*.

It can be noted that  $x^+$  does not include the branches that flow out of node x. When it is used as a constraint, the flow direction of the branch power cannot be judged until the OPF result is obtained. To solve the flow direction problem, this paper introduces the 0-1 variable  $a_{ij}$ . Thus, (1) can be rewritten as (2):

$$e_{x} = \frac{\sum_{i \in X^{+}} P_{ix} \rho_{i} a_{ix} + \sum_{j \in X^{-}} P_{xj} \rho_{j} (a_{xj} - 1) + P_{G,x} \cdot e_{G,x}}{\sum_{i \in X^{+}} P_{ix} a_{ix} + \sum_{j \in X^{-}} P_{xj} (a_{xj} - 1) + P_{G,x}}$$
(2)

where, X+ and X- are the sets of branched paths for which the inflow node *x* is specified as the positive direction and the outflow node is specified as the positive direction, respectively.

Table 1 compares the variability of the conventional OPF with the OPF considering carbon emission allowances. Where  $n_g$ ,  $n_b$  and  $n_l$  are the number of generators, nodes, and branches, respectively.

Table 1 Comparison of optimal power flow models

	- •••••		F • ·· •	
	Number of	Number	Number of	Types of
	continuous	of integer	non-linear	mathematical
	variables	variables	constraints	planning
conventional OPF	<i>ng</i> *2	0	$n_b*3$	Non-convex nonlinear programming
OPF considering carbon emission allowances	$n_g*2$	<i>ni</i> *2	$n_b$ *3+ $n_l$	Non-convex mixed-integer nonlinear programming

For mixed integer nonlinear programming problems, solving the corresponding nonlinear programming problems after relaxing the integer variables usually only yields locally optimal solutions. There are relatively few studies on carbon emission allowance constraints, so there is a lack of targeted convex optimization treatment. Therefore, this paper adopts a particle swarm algorithm based on power flow calculation update.

A case study illustrates that introducing carbon allowances on the user-side can meet the user's carbon emission demand for electricity, and take into account the fairness principle of emission reduction responsibility of the power sector in the dispatching, which plays a significant role in implementing the emission reduction responsibility under the carbon peak and carbon neutrality targets. The proposed algorithm has a significant advantage in computational speed compared to the exact solution in small-scale cases. In large-scale cases, the proposed algorithm has a significant advantage in convergence compared with the common nonlinear programming solver. The problems of convergence and parameter tuning in the traditional particle swarm algorithm are solved.