

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200932

# 基于碳排放流理论的电力系统源-荷协调低碳优化调度

陈厚合<sup>1</sup>, 茅文玲<sup>1</sup>, 张儒峰<sup>1</sup>, 于温方<sup>2</sup>

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132000; 2. 国网吉林省电力有限公司松原供电公司, 吉林 松原 138000)

**摘要:** 在低碳电力的背景下, 需求侧资源逐渐参与电力系统调度, 为降低电力系统碳排放提供了新思路。建立了一种考虑碳排放流理论和以碳价为价格信号的需求响应电力系统两阶段低碳优化调度模型。首先, 以电力系统经济调度为一阶段优化模型。其次, 基于 Shapley 值碳责任分摊方法, 计算出各负荷侧碳责任合理范围并由此提出阶梯碳价定制方法, 然后基于碳排放流理论计算出负荷侧碳排放责任情况及碳排放成本。再次, 构建以碳价为信号的需求响应低碳优化调度为二阶段优化模型, 利用负荷侧调节能力降低总碳排放量, 从而降低负荷侧碳排放成本。最后, 基于改进的 PJM-5 节点系统分别对全火电机场景和含风电机场景进行算例分析, 通过仿真算例对不同场景下系统的碳排放量以及碳排放成本进行了分析。同时, 在 IEEE-118 节点系统中进行验证, 结果表明所提出模型合理计算了碳排放责任, 有效降低了系统碳排放量, 验证了所提模型的合理性和可行性。

**关键词:** 碳排放; 低碳调度; 需求响应; 碳责任分摊

## Low-carbon optimal scheduling of a power system source-load considering coordination based on carbon emission flow theory

CHEN Houhe<sup>1</sup>, MAO Wenling<sup>1</sup>, ZHANG Rufeng<sup>1</sup>, YU Wenfang<sup>2</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132000, China;

2. Songyuan Power Supply Company, State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Songyuan 138000, China)

**Abstract:** In a low-carbon power system, the demand side gradually participates in power system scheduling, providing new approaches for reducing carbon emissions. This paper proposes a two-stage low-carbon optimal scheduling model for power systems considering carbon emission flow theory and demand response based on carbon prices. First, power system economic dispatch is proposed as the first-stage model. Secondly, based on the Shapley value carbon responsibility sharing method, a calculation method for the reasonable range of carbon responsibility of each load bus is proposed. A method of formulating the step-wise carbon prices is proposed, and then the distribution of demand side carbon emissions and the carbon emission cost based on carbon emission flow theory are calculated. The demand response low-carbon scheduling is proposed as the second-stage model, using the demand side adjustment capability to reduce the carbon emissions. Finally, based on the modified PJM-5 bus system, a case study is performed on the scenario of all thermal power plants and the scenario with a wind power plant, and the carbon emissions and their costs in the system in different scenarios through simulation examples are analyzed. At the same time, it is tested in the IEEE-118 bus system, and the results verify that the model proposed reasonably calculates the carbon emission responsibility, effectively reduces the carbon emission of the system, and verifies the rationality and feasibility of the proposed model.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0903402).

**Key words:** carbon emissions; low carbon scheduling; demand response; carbon responsibility allocation

## 0 引言

过度消耗化石燃料所导致的全球变暖是当前人

类社会生存与发展面临的最严峻的挑战之一<sup>[1]</sup>。其中, CO<sub>2</sub> 导致气候变暖的作用高达 77%<sup>[2]</sup>。电力行业作为 CO<sub>2</sub> 减排的主力军, 努力实现低碳化已经成为其可持续发展的一项必要措施<sup>[3-4]</sup>。

目前, 传统发电侧仍使用煤炭等不可再生能源,

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0903402)

造成了严重的碳排放<sup>[5]</sup>。从表面上看,碳排放与发电侧紧密相关,因此,大量有关碳排放责任研究仍从发电侧展开。文献[6-8]计算发电侧碳排放系数时使用宏观方法和全寿命周期方法;文献[9-11]均在能源系统中的发电侧考虑了碳排放因素,引入了含碳排放成本的目标函数或碳排放量约束,进而降低系统的总碳排放量。以上方法虽然在减少碳排放方面有一定效果,但难以引导用户侧用电行为。然而,对于与负荷侧相联系的低碳运行策略没有进行深入研究。作为发展低碳电力的一种有效分析工具,碳排放流理论得到了进一步的发展与完善。文献[12-14]详细阐述了电力系统碳排放流的基本概念,完善了其理论架构并提出相应计算方法,从而为分摊负荷侧碳责任提供了新思路。

随着智能电网的发展,负荷侧可通过需求响应合理平移尖峰负荷,从而避免某时段负荷侧承担过高的碳责任以降低碳排放成本<sup>[15-16]</sup>。文献[17-18]分别介绍了国内外根据碳排放轨迹,针对负荷侧碳排放额的分配方法;文献[19-22]分别从合作博弈、图论、碳追踪等不同的角度对负荷侧碳责任进行分摊,并介绍了4种负荷侧碳责任分摊方法;文献[23]通过Aumann-Shapley法在发电侧和负荷侧对碳排放责任进行共同分摊,证明了两侧都具有节能减排的能力。但以上文献并未考虑需求响应的自身调节能力以降低碳排放量。

综上,本文将电力系统碳排放责任从发电侧转移至负荷侧进行归算,在负荷侧基于Shapley值对各负荷节点碳责任进行合理分摊,提出阶梯碳价制定方法,提出一种基于碳排放流理论和以碳价为价格信号的需求响应的电力系统两阶段低碳调度模型。本文主要工作如下:

1) 构建了一种基于碳排放流理论和以碳价为价格信号的需求响应电力系统两阶段低碳优化调度模型。电力系统经济调度模型为一阶段模型,利用碳排放流理论,将发电侧碳排放责任归算至负荷侧;以碳价为价格信号的需求响应的低碳优化调度模型为二阶段模型,利用负荷侧调节能力降低系统碳排放量和负荷侧碳排放成本。

2) 提出一种基于Shapley值分摊方法的碳责任合理范围计算方法,从而更公平、更有效地计算负荷侧碳责任,进而提出一种基于碳责任范围的负荷节点阶梯碳价制定方法,更加合理地计算负荷侧碳排放成本。

3) 利用负荷侧需求响应能力,通过调节负荷在调度周期内的分布,降低系统总碳排放量和负荷侧碳排放成本,最后分析了需求响应参与调度后对系

统运行成本、负荷侧碳排放责任及风电消纳能力的影响。

## 1 电力系统碳排放流理论简介

### 1.1 电力系统碳排放流理论概述

当采用煤炭等不可再生能源发电时,其燃烧后会产生大量二氧化碳,形成碳排放。假定这些二氧化碳并非从电厂直接排入大气,伴随着电力潮流的虚拟“碳流”,直至用户侧。用户侧消费了电能,需要支付生产时所产生的碳排放成本,所以碳排放责任不应单一从发电侧进行归算,也应由用户侧主动承担,为了追踪从发电侧到负荷侧的碳排放,电力系统碳排放流方法应运而生,如图1所示。因此,应考虑如何从用户侧公平合理地进行责任归算<sup>[22]</sup>。通过碳排放流理论,可以将发电侧的碳排放责任归算至用户侧,因此,碳排放流理论可用于计算负荷侧碳排放责任。

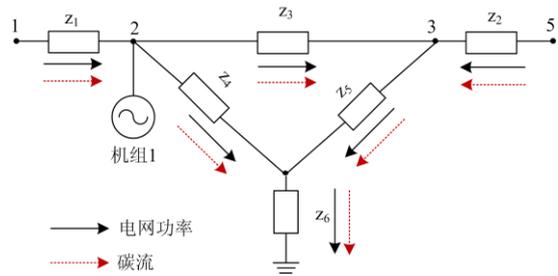


图1 电力系统碳排放流示意图

Fig. 1 Illustration of carbon emission flow in power system

### 1.2 电力系统碳排放流理论基础定义

电力系统碳排放流理论介绍了在电网系统中碳排放数据的若干新定义。

#### 1.2.1 碳排放流率

碳排放流率(Carbon Emission Flow Rate, CEFR)  $R_{\text{CEF}}$ 表示在单位时间内通过网络节点或支路的碳排放流能量  $C_{\text{CEF}}$ , 单位  $\text{tCO}_2/\text{h}$ 。

$$R_{\text{CEF}} = \frac{dC_{\text{CEF}}}{dt} \quad (1)$$

#### 1.2.2 碳流密度

电力系统碳排放流依附在有功潮流上,支路传输单位电量消费所造成的发电侧的碳排放值被称为支路碳流密度(Branch Carbon Emission Intensity, BCEI)  $I_{\text{BCEI}}$ , 即任一支路碳流率  $R_{\text{BCEF}}$  与有功潮流  $P_{\text{line}_l}$  的比值, 单位  $\text{tCO}_2/(\text{kWh})$ 。

$$I_{\text{BCEI}} = \frac{R_{\text{BCEF}}}{P_{\text{line}_l}} \quad (2)$$

节点  $i$  处消费单位电量对应发电侧的碳排放量

被称为节点碳流密度(Nodal Carbon Emission Intensity, NCEI)  $I_{NCEi}$ , 又称节点碳势, 单位一般为  $tCO_2/(kWh)$ 。

$$I_{NCEi} = \frac{\sum_{l \in N^+} Pline_l \rho_l}{\sum_{l \in N^+} Pline_l} = \frac{\sum_{l \in N^+} R_l}{\sum_{l \in N^+} Pline_l} \quad (3)$$

其中:  $Pline_l$  为支路  $l$  的有功潮流;  $N^+$  是与节点  $i$  相连的支路有潮流流入节点的所有支路的集合。

为了更好地区分系统中各节点类型, 本文将节点碳流密度又细分为: 发电机节点碳势(generation carbon intensity), 用  $I_{NCEgi}$  表示, 其碳势等于电厂实时的发电碳排放强度; 负荷节点碳势(load carbon intensity), 用  $I_{NCEdi}$  表示, 需要通过计算得出。

根据比例共享原则、能量合并原则<sup>[13]</sup>, 任何一条流出节点支路潮流中, 都存在流入该节点支路潮流的分量, 那么流出支路有功潮流的碳流率应为所有流入节点中支路对流入该节点支路碳排放流之和。

$$I_{BCEl_2} = \frac{\sum_{s \in N^+} Pline_{l_2} \sum_{s \in N^+} Pline_s I_{BCEl_1}}{Pline_{l_2}} = \frac{\sum_{l \in N^+} Pline_{l_1} I_{BCEl_1}}{\sum_{s \in N^+} Pline_s} = \frac{\sum_{s \in N^+} R_{CEFs}}{\sum_{s \in N^+} Pline_s} = I_{NCEi} \quad (4)$$

其中:  $N^+$  为潮流流入节点的支路集合;  $I_{BCEl_1}$ 、 $I_{BCEl_2}$  分别为第  $l_1$ 、 $l_2$  条支路的碳流密度; 流入节点的第  $l_1$  条支路和流出节点的第  $l_2$  条支路的有功潮流为  $Pline_{l_1}$  和  $Pline_{l_2}$ 。

由上可知, 支路碳流密度应与流入该支路的首节点碳势相等<sup>[14]</sup>。因此, 只要已知流入节点的潮流及发电节点的碳排放系数, 就可算出整个电力系统中各节点碳势、支路碳流分布情况。

### 1.3 电力系统碳排放流计算方法

将图 1 标上电网数据、碳排放数据, 得到图 2, 根据 1.2 节可知, 以节点 2 为例, 系统节点 2 的碳势  $I_{NCEi_2}$  为

$$I_{NCEi_2} = \frac{\sum_{i \in l^+} Pline_i I_{BCEl} + P_2 I_{NCEgi_2}}{\sum_{i \in l^+} Pline_i + P_2} = \frac{Pline_{l_1} \cdot I_{BCEl_2} + P_2 \cdot I_{NCEgi_2}}{Pline_{l_1} + P_2} \quad (5)$$

根据碳排放流理论推导后, 可知支路碳流密度由本支路首节点决定, 则

$$I_{BCEl_2} = I_{NCEi_2} \quad (6)$$

由各机组碳排放系数及系统潮流相关数据可得各个节点的碳排放量  $E_{emi}$ :

$$E_{emi} = I_{NCEdi} D_i \quad (7)$$

其中,  $D_i$  为节点负荷量。

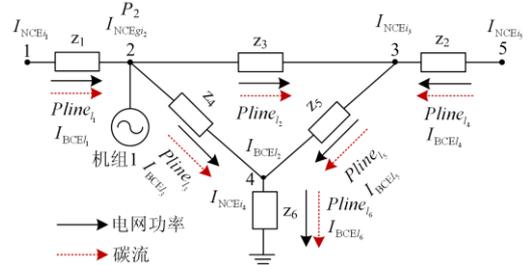


图 2 电力系统碳排放流示意图

Fig. 2 Illustration of carbon emission flow in power system

综上所述, 在碳排放流理论基础上, 支路碳排放流量和支路碳排放率与潮流中各支路上的电量及有功功率相互对应, 有明确的物理意义。碳排放流理论体系的建立, 可以由发电侧发出功率及电网潮流推算出系统中负荷侧的碳排放量, 使原本在发电侧归算的碳排放责任可以转移至负荷侧进行计算, 实现对负荷侧更有效的碳排放责任分摊。

## 2 基于 Shapley 值的负荷侧碳责任分摊与阶梯碳价区间计算方法

碳排放流理论将发电侧的碳排放责任转移至负荷侧进行归算, 但由于各负荷节点存在所在位置不同、消耗电能数量不同、输电阻塞问题等因素, 导致分摊到的碳排放责任不同, 而导致各负荷节点承担的碳排放责任成本不同。负荷侧如何公平合理地分摊各负荷节点碳排放责任, 如何制定合理的阶梯碳价区间具有重要意义。因此, 本文引入 Shapley 值<sup>[24]</sup>, 通过分摊碳排放责任来计算各负荷节点的碳排放合理范围, 更加合理地对各负荷进行碳排放责任分摊, 进而提出一种阶梯碳价制定方法, 并计算负荷侧碳排放成本。

### 2.1 基于 Shapley 值的碳责任分摊理论

在处理负荷侧碳排放责任分摊问题上, 文献[22]采用基于 Shapley 值的碳排放责任分摊方法, 强调各子联盟对联盟的边际作用, 根据 Shapley 值的分摊理论定义, 各子节点成员的碳排放责任由边际作用平均值所决定。

$$x_i = \sum_{S \subseteq N/i} P(S)(c(S \cup \{i\}) - c(S)) \quad (8)$$

其中:  $x_i$  为联盟成员  $i$  所分摊的碳排放责任量;  $S$  为排序在联盟成员  $i$  之前的子联盟成员组成的子联盟;  $P(S)$  为该子联盟  $S$  发生的概率;  $S \cup \{i\}$  为将联

盟成员  $i$  并入联盟  $S$  中形成的新的联盟； $c(S \cup \{i\}) - c(S)$  表示联盟成员  $i$  加入子联盟  $S$  时产生的边际影响。其中

$$P(S) = \frac{n_S!(n_N - n_S - 1)!}{n_N!} \quad (9)$$

子联盟成员承担的碳排放责任应在一定范围之内<sup>[24]</sup>，不大于该子联盟成员边际作用的最大值  $x_{\max}(i) = \max(c(S \cup \{i\}) - c(S))$ ，也不小于其边际作用的最小值  $x_{\min}(i) = \min(c(S \cup \{i\}) - c(S))$ ，即

$$x_{\min}(i) \leq x(i) \leq x_{\max}(i) \quad (10)$$

## 2.2 阶梯碳价区间计算方法

由上节理论可知，根据碳排放责任边际作用的最大值  $x_{\max}$ 、最小值  $x_{\min}$  以及平均值  $x_{\text{ave}}$ ，就可以形成碳排放合理范围，在其范围之内制定阶梯碳价。在每一时段将各负荷节点碳排放责任合理范围分为 4 个区间：免费碳责任价格区间  $0 \sim x_{\min}$ 、低碳责任价格区间  $x_{\min} \sim x_{\text{ave}}$ 、中碳责任价格区间  $x_{\text{ave}} \sim x_{\max}$ 、高碳责任价格区间  $x_{\max} \sim \infty$ 。在不同区间，对节点碳排放量依照不同的区间实行阶梯碳价，则有

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_1 = 0 & 0 \leq E_{i,t} < x_{\min}(i) \\ \lambda_2 = 5 & x_{\min}(i) \leq E_{i,t} - x_{\min}(i) < x_{\text{ave}}(i) \\ \lambda_3 = 10 & x_{\text{ave}}(i) \leq E_{i,t} - x_{\text{ave}}(i) < x_{\max}(i) \\ \lambda_4 = 20 & E_{i,t} \geq x_{\max}(i) \end{cases} \quad (11)$$

其中： $\lambda$  为阶梯碳排放成本，单位为  $\$/\text{tCO}_2$ ； $E_{i,t}$  为单位时间负荷节点碳排放总量。

根据阶梯碳价计算碳排放总成本  $C_{emi,i,t}$

$$C_{emi,i,t} = \begin{cases} \lambda_1 E_{i,t} & \text{if } 0 \leq E_{i,t} < x_{\min}(i) \\ \lambda_1 x_{\min}(i) + \lambda_2 (E_{i,t} - x_{\min}(i)) & \text{if } x_{\min}(i) \leq E_{i,t} < x_{\text{ave}}(i) \\ \lambda_1 x_{\min}(i) + \lambda_2 x_{\text{ave}}(i) + \lambda_3 (E_{i,t} - x_{\text{ave}}(i)) & \text{if } x_{\text{ave}}(i) \leq E_{i,t} < x_{\max}(i) \\ \lambda_1 x_{\min}(i) + \lambda_2 x_{\text{ave}}(i) + \lambda_3 x_{\max}(i) + \lambda_4 (E_{i,t} - x_{\max}(i)) & \text{if } E_{i,t} \geq x_{\max}(i) \end{cases} \quad (12)$$

本文通过基于 Shapley 值的方法分摊碳排放责任，使各负荷节点都有一个合理的碳排放责任区间，在不同区间内规定阶梯碳价，可以使负荷侧碳排放责任的阶梯定价更公平。

## 3 两阶段低碳经济调度模型

### 3.1 电力系统两阶段低碳调度模型

#### 3.1.1 一阶段模型：电力系统日前经济调度模型

电力系统日前经济调度模型的目标函数为发电成本最小。

$$\min \sum_{t=0}^T \left( \sum_{g=1}^N c_g P_{g,t} + \sum_{w=1}^N c_w P_{w,t} \right) \quad (13)$$

其中： $c_g$ 、 $c_w$  为火电机组和风电机组发电成本，单位  $\$/\text{MW}$ ； $P_{g,t}$ 、 $P_{w,t}$  分别为  $t$  时刻火电机组和风电机组输出功率，单位  $\text{MW}$ 。

约束条件

1) 火电机组容量上下限约束

$$P_{\min,g} \leq P_{g,t} \leq P_{\max,g} \quad (14)$$

其中， $P_{\max,g}$ 、 $P_{\min,g}$  为各火电机组有功出力上下限。

2) 风电机组容量上下限约束

$$P_{\min,w} \leq P_{w,t} \leq P_{\max,w} \quad (15)$$

其中， $P_{\max,w}$ 、 $P_{\min,w}$  为各风电机组有功出力上下限。

3) 线路潮流上下限约束

$$Pline_{\min,l} \leq Pline_{l,t} \leq Pline_{\max,l} \quad (16)$$

其中： $Pline_{l,t}$  为  $t$  时刻线路  $l$  的有功潮流； $Pline_{\max,l}$ 、 $Pline_{\min,l}$  为各线路之间传输功率上下限。

4) 平衡节点约束

$$\theta_{\text{ref},t} = 0 \quad (17)$$

其中， $\theta_{\text{ref},t}$  为  $t$  时刻的平衡节点相角。

5) 节点功率平衡约束

$$\sum_{g=1}^N P_{g,t} + \sum_{w=1}^N P_{w,t} + \sum_{l=1}^l (Pline_{l,t}^{\text{in}} - Pline_{l,t}^{\text{out}}) = D_{\text{exp},t} \quad (18)$$

其中： $Pline_{l,t}^{\text{in}}$  为  $t$  时刻的节点流入功率； $Pline_{l,t}^{\text{out}}$  为  $t$  时刻的节点流出功率； $D_{\text{exp},t}$  为  $t$  时刻的预测负荷。

6) 火电机组爬坡约束

$$Ramp_{\min} \leq P_{g,t} - P_{g,t-1} \leq Ramp_{\max} \quad (t \geq 2) \quad (19)$$

其中， $Ramp_{\max}$ 、 $Ramp_{\min}$  分别为火电机组有功出力爬坡上下限值。

3.1.2 二阶段模型：以碳价为价格信号的需求响应低碳优化调度模型

一阶段模型中计算出发电机组功率及线路功率，并将数据送至二阶段模型；通过碳排放流理论计算此时的节点碳排放量以及系统总碳排放成本，并基于 Shapley 值碳排放责任分摊法计算出各负荷节点碳排放责任合理范围；在二阶段模型中，以碳价为价格信号进行需求响应，将响应后的实际节点负荷量重新代入一阶段，再计算出各负荷节点碳排放量以及系统碳排放责任成本。二阶段需求响应低碳优化调度模型的目标函数为碳排放责任成本与需求响应成本之和最小。

$$\min \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^N (C_{emi,i,t} + c_{\text{dis}} D_{\text{dis},i,t}) \quad (20)$$

其中： $C_{emi,i,t}$  为  $t$  时刻负荷节点碳排放成本，单位为  $\$/\text{MW}$ ； $c_{\text{dis}}$  为每响应单位功率的成本系数，单位为  $\$/\text{MW}$ ；

$D_{dis,i,t}$  为  $t$  时刻负荷响应量, 单位为 MW。

约束条件:

1) 负荷变化量约束

$$\begin{cases} 0.8D_{exp,i,t} \leq D_{tr,i,t} \leq 1.2D_{exp,i,t} \\ D_{dis,i,t} = D_{exp,i,t} \pm D_{tr,i,t} \end{cases} \quad (21)$$

其中,  $D_{tr,i,t}$  为经过响应后的  $t$  时刻节点负荷值。负荷变化量的上限和下限一般情况下假设为节点负荷的 20%。

$$\sum_{t=1}^T D_{exp,i,t} = \sum_{t=1}^T D_{tr,i,t} \quad (22)$$

约束(22)可保证调度周期内响应前后系统总负荷不变。

2) 碳排放约束等式

$$\begin{cases} E_{i,t} = I_{NCEdi,t} D_{tr,i,t} \\ I_{NCEi,t} = I_{BCEl,t} (i \in l^+) \end{cases} \quad (23)$$

$$I_{NCEi,t} = \frac{\sum_{g=1}^N P_{g,t} I_{NCEgi,t} + \sum_{l \in l^+} Pline_{l,t} I_{BCEl,t}}{\sum_{g=1}^N P_{g,t} + \sum_{l \in l^+} Pline_{l,t}} \quad (24)$$

其中:  $E_{i,t}$  为  $t$  时刻系统负荷节点碳排放总量, 单位为  $tCO_2$ ;  $I_{NCEgi,t}$  为  $t$  时刻发电机组节点碳势;  $I_{NCEdi,t}$  为  $t$  时刻负荷节点碳势;  $I_{BCEl,t}$  为  $t$  时刻支路碳排放率, 单位均为  $tCO_2/(kW \cdot h)$ 。

3) 负荷侧碳排放责任成本

$$C_{emi,i,t} = \begin{cases} \lambda_1 E_{i,t} & 0 \leq E_{i,t} < x_{min,i,t}(i) \\ \lambda_1 x_{min,i,t}(i) + \lambda_2 (E_{i,t} - x_{min,i,t}(i)) & x_{min,i,t}(i) \leq E_{i,t} < x_{ave,i,t}(i) \\ \lambda_1 x_{min,i,t}(i) + \lambda_2 x_{ave,i,t}(i) + \lambda_3 (E_{i,t} - x_{ave,i,t}(i)) & x_{ave,i,t}(i) \leq E_{i,t} < x_{max,i,t}(i) \\ \lambda_1 x_{min,i,t}(i) + \lambda_2 x_{ave,i,t}(i) + \lambda_3 x_{max,i,t}(i) + \lambda_4 (E_{i,t} - x_{max,i,t}(i)) & E_{i,t} \geq x_{max,i,t}(i) \end{cases} \quad (25)$$

### 3.2 两阶段低碳优化调度模型求解流程图

在本文所提出的两阶段低碳优化调度模型中, 由于二阶段需求响应后系统负荷分布情况改变, 需要对一阶段经济调度模型重新进行求解以调度各机组发电量。故本文所提出的两阶段低碳优化调度模型求解流程如图 3 所示。

1) 首先, 输入机组参数、线路参数和负荷预测值等基础数据;

2) 求解一阶段经济调度模型, 输出机组出力  $P_{g,t}$  以及  $Pline_{l,t}$ , 利用碳排放流理论计算出节点碳势  $e_{i,t}$  和总碳排放量  $E_{i,t}$ ;

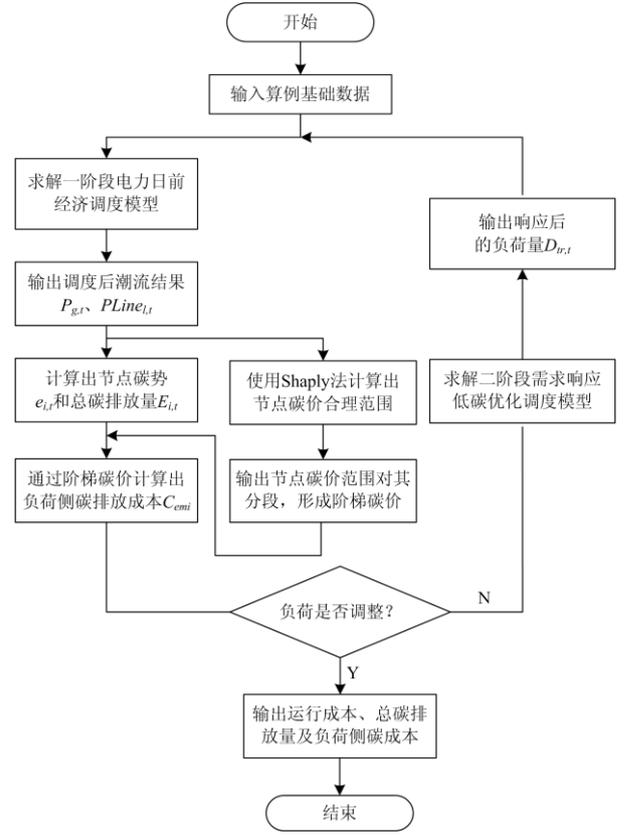


图 3 两阶段优化调度流程图

Fig. 3 Flow chart of two-stage low-carbon power optimization scheduling

3) 利用 Shapley 值分摊方法计算出此时的各负荷节点的碳责任合理范围, 计算阶梯碳价, 并根据阶梯碳价结果, 求解负荷侧碳排放责任成本  $C_{emi,i,t}$ ;

4) 然后, 建立计及以碳价为价格信号的二阶段需求响应低碳优化调度模型, 优化调整负荷;

5) 最后, 将调整后的负荷数据代入一阶段模型中, 重新求解经济调度模型, 输出此时的最优调度结果, 计算此时的负荷侧总碳排放量和总碳排放责任成本, 输出结果。

## 4 算例分析

本节以 PJM-5 节点系统为例进行算例分析, 所建立的调度模型均为线性规划问题, 通过在 GAMS 软件平台下调用 CPLEX 求解器进行求解, 计算平台硬件配置: CPU 为 Core i5-8th Gen, 内存 4.00 GB。经济调度周期为 24 h, 时间间隔为 1 h。

### 4.1 PJM-5 节点系统

#### 4.1.1 基础数据

以 PJM-5 节点为例, 具体网络结构如图 4 所示, 该系统包括: 5 台发电机组、6 条输电线路和 3 个负

荷节点 B、C、D。机组的基本参数见文献[25]，24 h 负荷及风电出力预测值如图 5 所示。

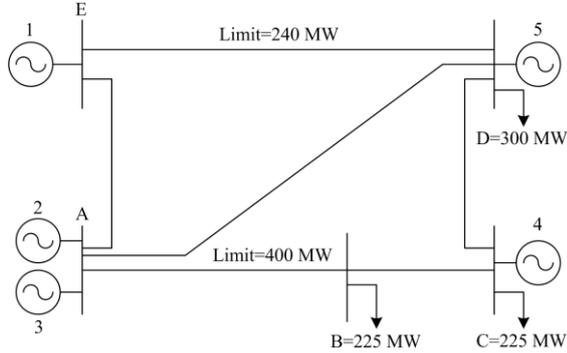


图 4 PJM-5 节点系统模型

Fig. 4 PJM-5 bus system

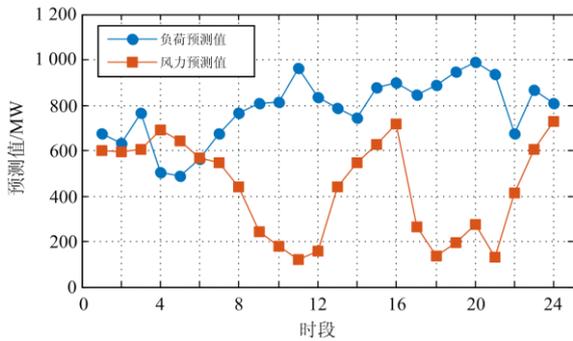


图 5 负荷及风电出力预测值

Fig. 5 Forecasting values of load and wind power

由于不同类型的发电机组有不同的碳排放系数，文献[26]中运用生命周期分析方法，详细计算了迁移转化过程产生的碳排放，求得归一计算后的机组碳排放系数，故发电侧机组参数如表 1 所示。

表 1 机组参数

Table 1 Parameters of generation units

机组编号	发电类型	最大出力/MW	报价成本系数/(\$/MW)	碳排放系数/(tCO <sub>2</sub> /MW)
1	风力	预测值	10	0.043
2	天然气	100	15	0.564
3	燃煤	110	14	1.303
4	燃煤	520	35	1.303
5	燃煤	200	30	1.303

首先，对负荷侧阶梯碳价结果进行分析。根据所提出的阶梯碳价计算方法，基于 Shapley 值的碳责任分摊理论，可得出阶梯碳价的分段依据：第一段为 0 到  $x_{\min}(i)$ ；第二段为  $x_{\min}(i)$  到  $x_{\text{mid}}(i)$ ；第三段为  $x_{\text{mid}}(i)$  到  $x_{\text{max}}(i)$ ，第四段为  $x_{\text{max}}(i)$  到  $\infty$ ，阶梯碳价参数参考文献[10]，如表 2 所示。

表 2 阶梯碳价参数

Table 2 Step-wise carbon price

分段	价格/(\$/tCO <sub>2</sub> )
$0 \sim x_{\min}(i)$	$\lambda_1=0$
$x_{\min}(i) \sim x_{\text{mid}}(i)$	$\lambda_2=5$
$x_{\text{mid}}(i) \sim x_{\text{max}}(i)$	$\lambda_3=10$
$x_{\text{max}}(i) \sim \infty$	$\lambda_4=20$

#### 4.1.2 基于 Shapley 值的负荷侧碳责任分摊

由 PJM-5 节点系统结构图可知，系统中共有 3 个负荷节点，分别位于节点 B、C、D 上，分别称为负荷成员 B、负荷成员 C、负荷成员 D，故  $N=\{B, C, D\}$ ，而全联盟中有 6 个非空子联盟，分别为  $\{B\}$ ， $\{C\}$ ， $\{D\}$ ， $\{B, C\}$ ， $\{C, D\}$ ， $\{B, D\}$ 。以  $t=1$  时刻为例，在不同子联盟情况下，求解电力系统经济调度模型，得到各子联盟情况下的系统碳排放量结果如表 3 所示。

表 3 各子联盟的碳排放责任量

Table 3 Carbon sub-obligation allocated for each coalition

联盟	系统碳排放量/(tCO <sub>2</sub> h <sup>-1</sup> )
{B}	180.87
{C}	180.87
{D}	121.40
{B,C}	127.21
{C,D}	130.11
{B,D}	130.11
{B,C,D}	138.82

由合理性可知，节点碳排放合理范围应不大于该负荷成员边际作用的最大值(即  $\max(c(S \cup \{i\}) - c(S))$ )，也不小于其边际作用的最小值(即  $\min(c(S \cup \{i\}) - c(S))$ )。以  $t=1$  时刻节点 B 为例，子联盟  $\{B\}$  情况下的碳排放量  $E\{B\}$  为 180.87 tCO<sub>2</sub> h<sup>-1</sup>， $E\{B,C\} - E\{C\}$  为 -53.66 tCO<sub>2</sub> h<sup>-1</sup>， $E\{B,D\} - E\{D\}$  为 8.70 tCO<sub>2</sub> h<sup>-1</sup>， $E\{B,C,D\} - E\{C,D\}$  为 8.70 tCO<sub>2</sub> h<sup>-1</sup>。故节点 B 所分得的碳排放责任量的合理范围为：8.70~180.87 tCO<sub>2</sub> h<sup>-1</sup>。同时，利用式(12)可得

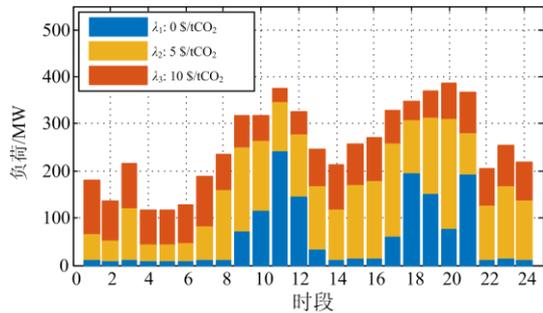
$$x_{\text{mid}}(B) = P(1)[c(B, C, D) - c(C, D)] + P(2)[c(B, D) - c(D)] + P(3)[c(B, C) - c(C)] + P(4)c(B) \quad (26)$$

其中， $P(1)$  为  $2!(3-2-1)!/3! = 1/3$ ，同理， $P(2)$  为  $1/6$ ， $P(3)$  为  $1/6$ ， $P(4)$  为  $1/3$ ，可得节点 B 的平均碳排放量为 64.64 tCO<sub>2</sub> h<sup>-1</sup>。

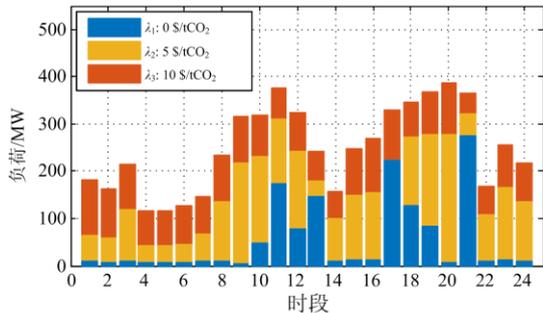
综上可得，负荷侧节点 B 在  $t=1$  时段的阶梯碳责任成本分摊结果如下：

$$C_{emi,B,1} = \begin{cases} \lambda_1 E_{i,t} & 0 \leq E_i < 8.70 \\ 8.7\lambda_1 + \lambda_2 (E_i - x_{\min}(i)) & 8.70 \leq E_i < 64.64 \\ 8.7\lambda_1 + 64.64\lambda_2 + \lambda_3 (E_i - x_{\text{mid}}(i)) & 64.64 \leq E_i < 180.87 \\ 8.7\lambda_1 + 64.64\lambda_2 + 180.87\lambda_3 + \lambda_4 (E_i - x_{\max}(i)) & E_i \geq 180.87 \end{cases} \quad (27)$$

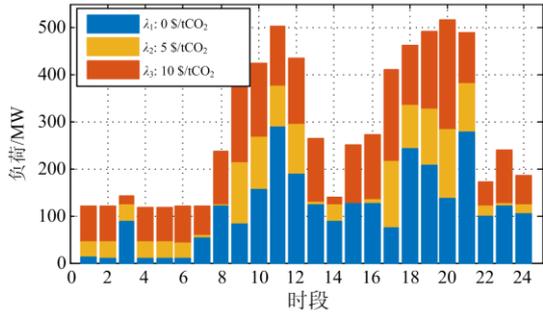
基于 Shapley 值法进行碳责任分摊后, 可以算出 24 时段各负荷节点的碳排放责任合理范围, 之后进行阶梯碳价区间的划分, 在每一时段将各负荷节点的阶梯碳价区间分为 4 段, 依次用蓝色、黄色、红色以及超出红色范围表示, 结果如图 6 所示。



(a)节点B阶梯碳价范围



(b)节点C阶梯碳价范围



(c)节点D阶梯碳价范围

图 6 各节点阶梯碳价范围

Fig. 6 Intervals of step-wise carbon emission prices

通过分析图 6(a)、图 6(b)的阶梯碳价范围划分结果可知, 在 B、C 节点拥有相同负荷量的情况下,

其总碳排放责任范围曲线基本一致, 而时段 9-12 以及时段 16-21 情况下, 蓝色免费额度范围有很大不同, 原因在于两节点在系统中的位置不同, 由于线路传输功率约束的原因, 造成了不同价格范围分配结果存在差异; 将图 6(a)、图 6(b)与图 6(c)进行比较, 在两个不同的节点具有不同负荷量的情况下, 在时段 1-3, 节点 D 的负荷量比节点 B、C 大 75 MW, 但是总碳排放责任区间比节点 B、C 小 100 MW 左右, 因为此时段的系统所需的总负荷量小, 节点 D 负荷需求由机组 1 提供, 由于机组 1 为风力发电机组, 碳排放系数小, 故此时节点 D 的阶梯碳排放成本总区间比节点 B、C 的区间小; 而在时段 9-12 以及时段 18-21 期间, 系统负荷量升高, 由于线路传输极限约束, 碳排放系数小的机组 1 发电量受到传输极限约束, 来自其他碳排放系数较大火电机组的功率比例增加, 故上述时段中节点 D 的总碳排放责任比节点 B、C 大。由此, 基于 Shapley 值理论分摊碳责任的方法可以在考虑不同节点的负荷大小、网络约束等综合因素的基础上, 合理计算出不同节点应承担的碳责任范围, 从而制定合理的阶梯碳价范围。

从图 6(a)可以看出, 节点 B 的时段 8-12、时段 18-21 属于高碳时段, 其他时段属于低碳时段, 其总碳责任成本走势跟负荷走势相吻合, 由于高碳时段存在较大的用电量, 低碳时段存在较小的用电量, 如果用统一的单一区间去计算高碳时段和低碳时段的碳责任成本就会存在不公平问题, 由此, 采用基于 Shapley 值理论分摊碳责任的方法可以更合理地进行各时段的碳责任价格阶梯分段。

## 4.2 全火电机组场景和含风电机组场景分析

### 4.2.1 全火电机组场景

在 PJM-5 节点系统的基础上, 将位于节点 1 的风力机组更换为成本系数为 17 \$/MW 的燃气轮机机组。经过 4.1.2 小节中的 Shapley 值碳责任分摊方法算出阶梯碳责任成本分段情况, 结果如图 7 所示。将图 7(a)与图 6(a)相比较, 在负荷不变的情况下, 总碳排放责任量曲线仍跟负荷曲线基本一致, 没有明显变化, 全火电机组场景下, 负荷侧需求均以火力发电机组发电提供, 火力发电机组碳排放系数大, 系统中各节点碳势上升。

基于所提出的两阶段源-荷协调低碳优化调度方法, 分别对考虑与不考虑需求响应的场景进行求解, 对所得到的响应前后运行成本及系统碳排放量进行比较, 结果如表 4、表 5 所示。

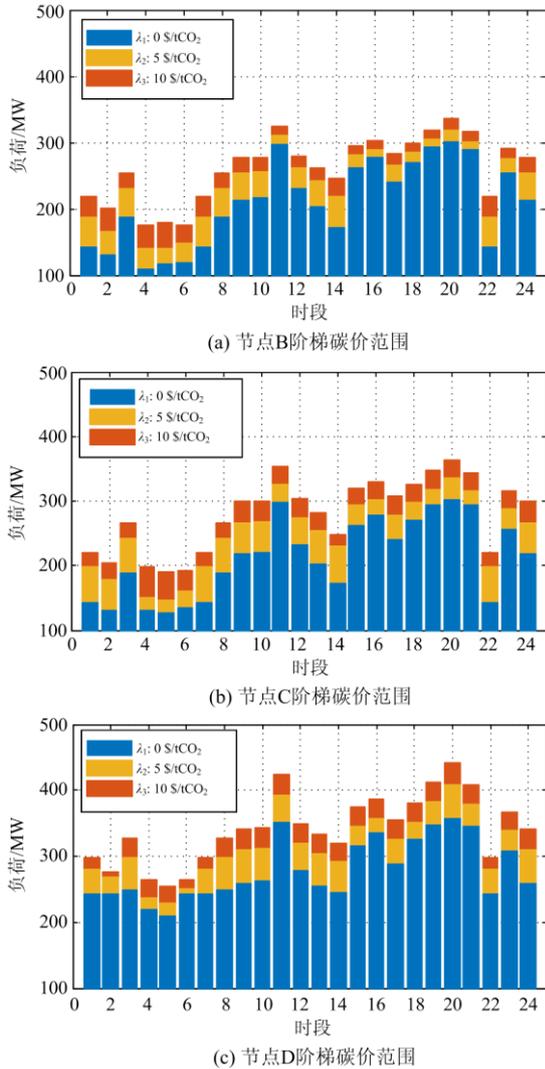


图7 全火电机场景下各节点碳排放责任阶梯分段  
Fig. 7 Intervals of step-wise carbon emission prices in the case of all-thermal power units

表4 考虑需求响应前后运行成本及碳排放成本对比  
Table 4 Comparison of operating costs and carbon emission costs before and after considering demand response

CASE	发电成本/\$	碳排放成本/\$
响应前	$4.53 \times 10^4$	$2.02 \times 10^4$
响应后	$4.55 \times 10^4$	$1.87 \times 10^4$

表5 考虑需求响应前后节点总碳排放量对比  
Table 5 Comparison of total carbon emissions of nodes before and after considering demand response

节点碳排放量	响应前/(tCO <sub>2</sub> )	响应后/(tCO <sub>2</sub> )
B	5 239.31	5 189.81
C	6 855.43	6 812.52
D	7 396.64	7 381.94
总碳排放量	$1.95 \times 10^4$	$1.93 \times 10^4$

从表4和表5可以看出,考虑需求响应后,系统运行成本上升了200\$,而碳排放成本降低了1500\$,总碳排放量也相比响应前下降了200 tCO<sub>2</sub>。总碳排放量及碳排放成本下降,说明本文所提出方法可有效降低碳排放,但是发电侧成本上升,是因为不同时段负荷分配情况在需求响应后发生变化,而发电侧未考虑碳排放成本,故发电成本有少量的增加。

4.2.2 含风电机组场景

采用4.1.1节所提到的PJM-5系统算例,考虑风电机组情况下对模型进行求解。含风电机组场景中各节点碳排放责任阶梯分段结果仍如图5所示,图8和图9为考虑需求响应前后风电调度出力 and 负荷情况。

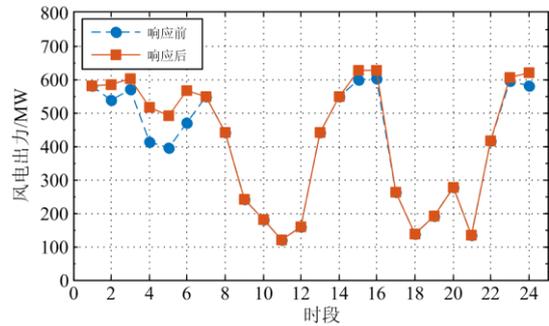


图8 考虑需求响应前后风电出力结果  
Fig. 8 Wind power output results before and after considering demand response

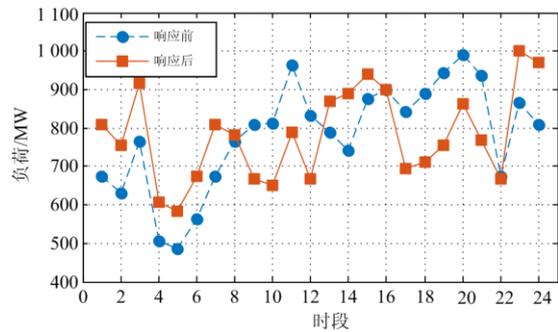


图9 考虑需求响应前后负荷结果  
Fig. 9 Load curve comparison before and after considering demand response

由图8和图9可知,在时段4-7和时段14-16,考虑需求响应后风电出力比响应前增大,是因为响应后调整了负荷量,在这些时段内,负荷量有所上升,富余风电得以消纳,减少了弃风。由于这些时段的风力机组增加了出力,降低了高碳排放强度火电机组的出力,故降低了系统的总碳排放量,因此,考虑需求响应后,含风电系统中的总碳排放量降低,运行成本也相应减少。

表 6、表 7 分别为含风电机组场景下考虑需求响应前后运行成本和碳排放情况对比。在可调范围内进行负荷调节, 用户侧可以自主调节用电方式, 通过多时段平移负荷, 将高碳排放量时刻的负荷进行转移。由表 6、表 7 可知, 在保证需求侧负荷不变的条件下, 经过二阶段需求响应优化调度后, 负荷分布改变, 提高了运行成本较低且碳排放系数小的风电机组出力, 使系统运行成本减少了 23 068.24 \$, 总碳排放减少了 958.54 tCO<sub>2</sub>, 从而使负荷侧碳排放成本降低了 7 943.21 \$, 证明了本文所提出的两阶段源-荷协调低碳优化调度模型的合理性与有效性。

表 6 考虑需求响应前后运行成本及碳排放成本对比

Table 6 Comparison of operating costs and carbon emission costs before and after considering demand response

CASE	发电成本/\$	碳排放成本/\$
响应前	3.38×10 <sup>4</sup>	3.57×10 <sup>4</sup>
响应后	3.15×10 <sup>4</sup>	2.78×10 <sup>4</sup>

表 7 考虑需求响应前后节点总碳排放量对比

Table 7 Comparison of total carbon emissions of nodes before and after considering demand response

节点碳排放量	响应前/(tCO <sub>2</sub> )	响应后/(tCO <sub>2</sub> )
B	3 065.76	2 764.4
C	4 668.75	4 336.7
D	3 848.36	3 523.1
总碳排放量	1.16×10 <sup>4</sup>	1.06×10 <sup>4</sup>

### 4.3 IEEE-118 节点系统

按照 4.1.2 节中所提到的 Shapley 值分摊碳排放责任方法计算出 IEEE-118 系统各节点碳排放责任, 并求解两阶段模型。

表 8 对比了响应前后的系统运行成本和碳排放成本。由表 8 可知, 响应后比响应前运行成本减少了 150 \$, 通过转移负荷有效促进了风电的消纳, 减小了成本较高的火电出力, 降低了系统的运行成本。表 9 对比了响应前后的碳排放成本和碳排放量。由表 9 可知, 响应后比响应前碳排放成本减少了 3.1×10<sup>4</sup> \$, 碳排放量减少了 6.6 tCO<sub>2</sub>, 因此通过 IEEE-118 系统算例也证实了通过考虑需求响应、平移负荷, 提高风电消纳, 可以有效地降低系统碳排放量。

表 8 考虑需求响应前后运行成本及碳排放成本对比

Table 8 Comparison of operating costs and carbon emission costs before and after considering demand response

CASE	发电成本/\$	碳排放成本/\$
响应前	1.808×10 <sup>4</sup>	2.606×10 <sup>4</sup>
响应后	1.793×10 <sup>4</sup>	2.296×10 <sup>4</sup>

表 9 考虑需求响应前后节点总碳排放量对比

Table 9 Comparison of total carbon emissions of nodes before and after considering demand response

节点碳排放量	响应前/(tCO <sub>2</sub> )	响应后/(tCO <sub>2</sub> )
总碳排放量	1.151×10 <sup>3</sup>	1.144×10 <sup>3</sup>

## 5 结论

本文提出一种基于碳排放流理论和以碳价为价格信号的需求响应的电力系统两阶段低碳优化调度模型, 将原本在发电侧归算的碳排放成本, 利用碳排放流理论归算至负荷侧; 利用 Shapley 值碳排放分摊法合理分摊负荷侧节点碳责任, 进而提出一种负荷节点阶梯碳价计算方法; 通过二阶段需求响应低碳优化调度, 降低负荷侧碳排放量和碳排放成本。本文对基于碳排放流理论的电力系统源-荷协调低碳优化调度进行了初步探究, 通过 PJM-5 节点系统分别建立全火电机组场景和含风电机组场景进行算例分析, 并对 IEEE-118 节点系统进行模型仿真, 在不改变总用电量的前提下, 所提模型可提高风电利用率, 降低总碳排放量, 减少碳排放成本, 验证了所提模型的合理性和有效性。同时, 本文研究内容可为低碳背景下的电力调度方法提供较为可行的借鉴。

后续研究拟在此基础上, 进一步对发电侧和负荷侧共同基于以碳价为信号的低碳调度策略进行研究。

## 参考文献

- [1] 康重庆, 陈启鑫, 夏清. 低碳电力技术的研究展望[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 1-7.  
KANG Chongqing, CHEN Qixin, XIA Qing. Prospects of low-carbon electricity[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 1-7.
- [2] 张坤民, 潘家华, 崔大鹏. 低碳经济论[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [3] 董晓宁, 杨国华, 王岳, 等. 基于碳交易的含风光发电的电力系统低碳经济调度[J]. 电气技术, 2019, 20(3): 67-71.  
DONG Xiaoning, YANG Guohua, WANG Yue, et al. Low-carbon economic dispatch of power system with wind power generation based on carbon trading[J]. Electrical Engineering, 2019, 20(3): 67-71.
- [4] 朱晔, 兰贞波, 隗震, 等. 考虑碳排放成本的风光储多能互补系统优化运行研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 127-133.  
ZHU Ye, LAN Zhenbo, WEI Zhen, et al. Research on optimal operation of wind-PV-ES complementary system

- considering carbon emission cost[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 127-133.
- [5] 赵东声, 高忠臣, 刘伟. 碳捕集火电与梯级水电联合优化的低碳节能发电调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 148-155.  
ZHAO Dongsheng, GAO Zhongchen, LIU Wei. Low-carbon energy-saving power generation dispatching optimized by carbon capture thermal power and cascade hydropower[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 148-155.
- [6] 陈启鑫, 康重庆, 夏清, 等. 电力行业低碳化的关键要素分析及其对电源规划的影响[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(15): 18-23.  
CHEN Qixin, KANG Chongqing, XIA Qing, et al. Low-carbon factors in the evolution of power decarbonisation and their impacts on generation expansion planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15): 18-23.
- [7] WANG C, LU Z, QIAO Y. A consideration of the wind power benefits in day-ahead scheduling of wind-coal intensive power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 236-245.
- [8] 齐敏芳, 李晓恩, 刘潇, 等. 基于大数据的燃煤机组供电煤耗特性分析[J]. 热力发电, 2019, 48(9): 51-57.  
QI Minfang, LI Xiao'en, LIU Xiao, et al. Characteristics analysis of power supply coal consumption for coal-fired power units based on big data[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(9): 51-57.
- [9] 卢志刚, 隋玉珊, 冯涛, 等. 考虑储热装置与碳捕集设备的风电消纳低碳经济调度[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 41-51.  
LU Zhigang, SUI Yushan, FENG Tao, et al. Wind power accommodation low-carbon economic dispatch[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 41-51.
- [10] 许汉平, 李姚旺, 苗世洪, 等. 考虑可再生能源消纳效益的电力系统“源-荷-储”协调互动优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 18-25.  
XU Hanping, LI Yaowang, MIAO Shihong, et al. Optimization dispatch strategy considering renewable energy consumptive benefits based on “source-load-energy” coordination in power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 18-25.
- [11] 宋宸宇, 王承阳, 李宝宽. 面向未来绿色家园的多能流系统建模与优化[J]. 热力发电, 2020, 49(9): 32-38.  
SONG Chenyu, WANG Chengyang, LI Baokuan. Modeling and optimization of multi-energy flow system for future green homes[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(9): 32-38.
- [12] KANG C, ZHOU T, CHEN Q, WANG J, et al. Carbon emission flow from generation to demand: a net-work-based modeling[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2386-2394.
- [13] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 电力系统碳排放流的计算方法初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 44-49.  
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qian Yao, et al. Preliminary investigation on a method for carbon emission flow calculation of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 44-49.
- [14] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 碳排放流在电力网络中分布的特性与机理分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 39-44.  
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qian Yao, et al. Analysis on distribution characteristics and mechanisms of carbon emission flow in electric power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 39-44.
- [15] 彭春华, 刘兵, 左丽霞, 等. 计及分类需求响应的孤岛微网并行多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 60-68.  
PENG Chunhua, LIU Bing, ZUO Lixia, et al. Parallel multi-objective optimal dispatch of island micro-grid considering load classified demand response[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 60-68.
- [16] 负毓韵, 董海鹰, 马志程, 等. 考虑需求响应与光热电站参与的多源系统优化经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 140-149.  
YUN Yunyun, DONG Haiying, MA Zhicheng, et al. Optimization economic dispatch of a multi-source system considering the participation of demand response and concentrating solar power plant[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 140-149.
- [17] 李保卫, 胡泽春, 宋永华, 等. 电力碳排放区域分摊的原则与模型[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 12-18.  
LI Baowei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Principle and model for regional allocation of carbon emission from electricity sector[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 12-18.
- [18] 李保卫, 胡泽春, 宋永华, 等. 用户侧电力碳排放强度的评估原则与模型[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 6-11.  
LI Baowei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Principle and model for assessment on carbon emission intensity caused electricity at consumer side[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 6-11.
- [19] 袁书林, 马瑞. 基于电力系统碳排放流理论的碳排放分摊模型研究[J]. 现代电力, 2014, 31(6): 70-75.

- YUAN Shulin, MA Rui. A research on the allocation model of carbon emission in power system based on carbon emission flow theory[J]. Modern Electric Power, 2014, 31(6): 70-75.
- [20] LI B, SONG Y, HU Z. Carbon flow tracing method for assessment of demand side carbon emissions obligation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(4): 1100-1107.
- [21] ZHOU Q, SHAHIDEHPOUR M, SUN T, et al. Game for carbon obligation allocation among distribution system operators to incentivize the proliferation of renewable energy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6355-6365.
- [22] 周全, 冯冬涵, 徐长宝, 等. 负荷侧碳排放责任直接分摊方法的比较研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 153-159.  
ZHOU Quan, FENG Donghan, XU Changbao, et al. Methods for allocating carbon obligation in demand side: a comparative study[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 153-159.
- [23] 陈丽霞, 孙弢, 周云, 等. 电力系统发电侧和负荷侧共同碳责任分摊方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 106-111.  
CHEN Lixia, SUN Tao, ZHOU Yun, et al. Method of carbon obligation allocation between generation side and demand side in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 106-111.
- [24] 刘念, 赵璟, 王杰, 等. 基于合作博弈论的光伏微电网群交易模型[J]. 电工技术学报, 2018, 33(8): 1903-1910.
- LIU Nian, ZHAO Jing, WANG Jie, et al. A trading model of PV microgrid cluster based on cooperative game theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(8): 1903-1910.
- [25] LI G, ZHANG R, JIANG T, et al. Optimal dispatch strategy for integrated energy systems with CCHP and wind power[J]. Applied Energy, 2017, 192: 408-419.
- [26] 王泽森, 石岩, 唐艳梅, 等. 考虑 LCA 能源链与碳交易机制的综合能源系统低碳经济运行及能效分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1614-1626, 1858.  
WANG Zesen, SHI Yan, TANG Yanmei, et al. Low carbon economy operation and energy efficiency analysis of integrated energy systems considering LCA energy chain and carbon trading mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1614-1626, 1858.

收稿日期: 2020-08-04; 修回日期: 2020-09-17

作者简介:

陈厚合(1978—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统安全性和稳定性; E-mail: chenhouhe@126.com

茅文玲(1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统低碳优化运行; E-mail: 727282957@qq.com

张儒峰(1990—), 男, 通信作者, 博士, 主要研究方向为综合能源建模、分析与优化运行。E-mail: zhangrufeng@neepu.edu.cn

(编辑 魏小丽)