

Study on Low Carbon Economic Dispatch of Wind Power System Considering Generation Rights Trading and Carbon Trading

Jialin Hu¹, Cuimei Zhao², Cheng Xiao³, Deyang Hu², Jiaqing Zhong²

¹China Electric Power Complete Equipment Co., Ltd., Beijing

²Hebei Provincial Key Laboratory of Power Electronics Energy Saving and Drive Control (Yanshan University), Qinhuangdao Hebei

³Tangshan City Fengrun District Power Supply Branch, State Grid North Hebei Electric Power Co., Ltd., Tangshan Hebei

Email: zhaocuimeisu@163.com

Received: Feb. 6th, 2018; accepted: Feb. 20th, 2018; published: Feb. 27th, 2018

Abstract

Low carbon economy is the future direction of power dispatching, the introduction of wind power and other clean energy can ease fossil energy depletion, slow down environmental degradation, and promote the low-carbon development of the power industry. The output of wind power has the characteristics of intermittence and randomness. In view of this characteristic, the cost of wind farm surplus penalty and the reserve penalty cost are introduced into the cost of wind power, and the point effect cost and start stop cost are introduced into the generation cost of conventional unit. Power generation trading is a unique type of transaction in the power industry, and has the function of energy saving and emission reduction. Therefore, the power generation transaction is integrated into the power generation transaction in the carbon trading, taking into account the combined effects of carbon trading and power generation trading. In summary, this paper proposes a scheduling model of low carbon balance and economy, and the use of bacterial colony chemotaxis algorithm is used to verify the effectiveness of the new scheduling model.

Keywords

Carbon Trading, Power Generation Right Transaction, Wind Power, The Optimization Model Transaction Type

计及发电权交易和碳交易的含风电电力系统 低碳经济调度研究

胡佳琳¹, 赵翠妹², 肖成³, 胡德洋², 钟嘉庆²

¹中国电能成套设备有限公司, 北京

²河北省电力电子节能与传动控制重点实验室(燕山大学), 河北 秦皇岛

³国网冀北电力有限公司唐山市丰润区供电分公司, 河北 唐山

Email: zhaocuimeisu@163.com

收稿日期: 2018年2月6日; 录用日期: 2018年2月20日; 发布日期: 2018年2月27日

摘要

低碳经济是未来电力调度的发展方向, 风电等清洁能源的引入能够缓解化石能源枯竭、减缓环境恶化, 促进电力行业低碳化发展。风电出力具有间歇性和随机性的特点。为应对此特点, 在风电成本中引入风电场盈余惩罚成本和备用惩罚成本, 在常规机组发电成本中引入调峰效应成本和启停成本。发电权交易是电力行业特有的交易类型, 具有节能减排的作用, 因此在碳交易中融入了发电权交易, 考虑碳交易和发电权交易的综合作用。综上, 本文提出了一种兼顾低碳性和经济性的优化调度模型, 并采用了细菌群体趋药性算法进行优化求解, 通过算例验证了该新型调度模型的有效性。

关键词

碳交易, 发电权交易, 风电, 低碳经济调度

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

面对能源危机, 电力部门作为能源转换与生产的关键环节正通过发电权交易、发电调度等途径改变发电结构, 提高电力资源的综合利用效率。针对环境问题, 中国政府正开展碳交易试点建设, 电力企业作为二氧化碳排放的主要源头, 将成为碳交易推广的主要对象。燃煤发电机组的碳排放量与煤耗量存在一定的正比例关系, 通过发电权交易降低发电煤耗量从而减少碳排放, 因此, 发电权交易与碳交易在交易目标上具有较高的一致性。同时, 将风电大范围地应用到电力系统中, 可促进我国能源结构优化调整, 及减小环境污染。

国内外学者对电力系统的调度模型开展研究工作。文献[1]建立了考虑电价响应和用户满意度的含风电电力系统优化调度新模型, 降低了系统运行费用特别是大幅降低了机组的启停费用, 提高了含风电电力系统运行的经济性。文献[2]建立考虑节能减排的含有间歇性电源多目标模糊机会约束动态经济调度模型。文献[3] [4]分析了碳排放权交易的特点对于发电环节可能造成的影响, 探讨了实现各个行业碳减排的方法。文献[5]将碳排放限额分配给基于电力输出的电源生产商, 考虑排放交易计划和可再生能源促进政策建立调度模型。文献[6]提出的经济调度模型, 结合了发电机组的热能和动能, 明确考虑了旋转备用需求等现实约束。文献[7] [8] [9]建立了新颖的优化调度模型, 分别考虑了环保性、不确定性与节能性。文献[10]建立了考虑经济性和环保性的多目标环保经济调度模型, 采用混沌粒子群算法对模型进行求解, 对比传统调度模型的调度结果分析了多目标优化结果的优势。文献[11]考虑了机组的故障停运、负荷与风电的预测偏差这三种不确定因素, 并引入超前调度思想, 从而实现多时段动态优化调度。文献[12]建立了风

电和火电机组间配合运行的调度方案,充分考虑了风电的不确定因素。文献[13]引入具有很好灵活性和优先性的机会约束目标规划处理含多个机会约束的不确定模型。结果表明,模型能够很好地兼顾系统安全性与经济性对风电进行消纳。文献[14]构建了考虑大规模光伏接入和碳排放的经济价值的电力系统优化调度模型,兼顾了经济性、低碳性和可靠性。文献[15]提出一种碳排放约束下考虑静态电压稳定的发电权交易模型,满足了电力系统在经济性、环保性和稳定性方面的要求。文献[16][17][18]提出“以大代小”发电,实现了机组发电节能减排的目标。文献[19]介绍了电力系统优化调度问题主要考虑在满足系统负荷平衡、备用要求和发电机出力限制等约束条件下,实现机组负荷的合理分配,以达到排放量最小等目标。

以碳交易机制和以风能为首的清洁能源发电为基础的低碳经济调度模型已不能应对目前环境变化所带来的挑战,而发电权交易由于能够使低排放机组代替高排放机组发电,起到节能减排的效果,也作为一种重要的减排措施逐渐受到重视,因此研究发电权交易及碳交易共同作用下的低碳经济调度模型对电力行业低碳化发展具有重要意义。本文提出了一种在发电权交易及碳交易共同作用下的低碳经济调度模型。该模型包含了系统总发电成本最低的经济调度目标和系统在发电权交易/碳交易下的成本最低的低碳调度目标。分析在两种交易模式共同作用下碳价对调度结果的影响。此外,本文充分考虑了风电的间歇性和随机性,从而保证系统在安全约束的条件下实现调度。应用随机模拟混合 PSO 算法对模型进行优化,通过算例仿真分析并验证了所提模型的优越性。

2. 计及发电权交易和碳交易的含风电电力系统低碳经济调度模型

在本文的调度模型中包括 2 个调度目标。考虑到风电出力的随机性,应用机会约束规划理论构造模型,并以概率的形式表示其约束条件。

2.1. 系统在发电权交易和碳交易下成本最低的低碳调度目标

2.1.1. 基于发电权交易的调度模型

发电权交易,是指发电份额的有偿出让和买入。交易双方在平等自愿的原则下,在不影响电力消费者利益的前提下,采取双边交易或集中交易的方式完成电量指标的买卖。通过发电权交易,引导鼓励和促使发电成本高的机组将其发电份额的部分或全部出售给发电成本低的机组替代其发电,从而达到优化电源结构,降耗减排的目的。

由于进行了发电份额的有偿出让或买入,产生了发电权交易成本,可表示为:

$$F_g = \phi^g \sum_{i=1}^N \left(\sum_{t=1}^T P_{Gi} - g_{0i} \right) \quad (1)$$

式中, F_g 表示发电权交易成本,万元; ϕ^g 为发电份额交易价格,元/(MW·h); g_{0i} 为发电份额, MW·h。

2.1.2. 基于碳交易的低碳调度目标

碳交易是通过将碳排放权进行买卖,从而实现碳排放量减少的交易机制。在控制碳排放总量的原则下,政府将碳排放权分配到各排放源。当排放源的实际排放量小于分到的排放额度,就可将剩余额度放到市场出售获利;而当排放源的实际碳排放量超过了分配的排放额度,就必须到市场上购买超出的部分,否则将面对高额罚款。

本文采用基于发电量的免费初始碳排放权分配方式,对于不同发电机组类型均采用排放限额与发电量成正比的分配方法,则含风电的电力系统分配给常规发电机组的碳排放限额表示为:

$$E_{G,q} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N P_{Gi} (\delta_i - \eta) \quad (2)$$

分配给风电机组的碳排放限额为:

$$E_{W,q} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^M P_{Wjt} (0-\eta) \quad (3)$$

式中, η 表示单位电量碳排放的分配额, $t(\text{MW}\cdot\text{h})$; 国家发改委规定的“区域电网基准线排放因子”确定 [20]。本文采用系统区域电量边际排放因子(OM)和区域容量边际排放因子(BM)加权平均得到。 M 表示系统风电机组的数目, P_{Wjt} 表示单位时段内风电机组的计划发电量, MW 。

本文电力系统碳交易量考虑两种情况: 1) 当电力系统实际碳排放量超过电力系统分配限额时, 则需购买碳排放权, 支付碳交易成本; 2) 当电力系统的碳排放量小于分配限额时, 系统可将盈余的碳排放权出售而获得碳交易收益。系统碳交易成本最小化的目标函数为:

$$\min F_c = \min(F_{G,c} + F_{W,c}) \quad (4)$$

式中, F_c 表示系统碳交易成本, 万元; $F_{G,c}$ 为常规发电机组碳交易成本, 万元; $F_{W,c}$ 为风电场碳交易成本, 万元。

$$F_{G,c} = \phi_{\text{CO}_2} \max[E_p - E_{G,q}, 0] + \gamma_{\text{CO}_2} \min[E_p - E_{G,q}, 0] \quad (5)$$

式中, ϕ_{CO_2} 为碳交易价格, 元/t; γ_{CO_2} 为碳排放权期望出售的价格, 元/t。当某一机组的碳排放强度高于基准线排放因子时, 该机组需要支付碳交易成本; 当某机组的碳排放强度低于基准线排放因子时, 可获得碳交易收益(以成本为负值表示)。

由于风力发电过程中不产生碳排放, 则风电场的碳交易成本可表示为:

$$F_{W,c} = \gamma_{\text{CO}_2} E_{W,q} \quad (6)$$

风电场的碳交易成本为负值, 即风电在碳交易过程中获得收益。由于风能是清洁能源, 不产生碳排放, 所以含风电系统的碳排放主要源自常规火电机组。因此系统碳排放量最小化目标为

$$\min E_p = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N C_{it}(P_{G_{it}}) \quad (7)$$

式中: T 为研究周期时段数目; N 为常规火电机组的数目; $P_{G_{it}}$ 单位时段 t 内常规火电机组 i 的发电出力, MW ; $C_{it}(P_{G_{it}})$ 为单位时段 t 内常规火电机组 i 的碳排放量, t ; 记 δ_i 为常规火电机组 i 单位电量碳排放强度, t/MW , 则 $C_{it}(P_{G_{it}}) = \delta_i P_{G_{it}}$ 。

因此系统在发电权交易和碳交易下的成本最低的低碳调度目标为

$$\min F_1 = \min(F_g + F_c) \quad (8)$$

2.2. 系统总发电成本最低的经济调度目标

2.2.1. 计及阀点效应的常规机组发电成本

在实际系统中, 汽轮机进气阀突然开启时会出现拔丝现象, 即会在机组的耗量特性曲线上叠加一个脉动效果, 称为阀点效应。所以, 发电成本中应该考虑阀点效应产生的成本。另外, 风电虽不需要消耗化石燃料, 但由于风电具有间歇性和随机性, 从而使常规火电机组启停调度策略发生了改变, 由此需将常规火电机组的启停成本加入到经济调度目标函数中, 即

$$\min F_G = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \left[\left[U_{it} C_{i_2}(P_{G_{it}}) + U_{it} (1 - U_{i(t-1)}) S_i \right] + Q_{it} \right] \quad (9)$$

式中, F_G 为常规火电机组运行的综合成本, 元; T 为系统调度期间的时段数; N 表示常规火电机组数; $P_{G_{it}}$ 为常规火电机组 i 在 t 时段的有功出力, MW ; U_{it} 为机组 i 在 t 时段的状态, $U_{it} = 1$ 表示开机, $U_{it} = 0$

表示停机； S_i 为机组*i*的开机费用元； $C_{i_2}(P_{G_{it}})$ 为常规火电机组*i*在*t*时段的发电成本。

$$C_{i_2}(P_{G_{it}}) = a_{i_2} P_{G_{it}}^2 + b_{i_2} P_{G_{it}} + c_{i_2} \quad (10)$$

式中， a_{i_2} 、 b_{i_2} 、 c_{i_2} 为机组*i*的发电成本参数，单位分别为元/(MW²·h)、元/(MW·h)、元/h； Q_{it} 为阀点效应产生的能耗成本，元，即

$$Q_{it} = \left| e_i \cdot \sin \left[f_i \cdot (P_{i_{\min}} - P_{G_{it}}) \right] \right| \quad (11)$$

式中， e_i 和 f_i 为阀点效应系数； $P_{i_{\min}}$ 为机组*i*的出力下限。

2.2.2. 风电运行成本

风电的并网运行为电力行业的碳减排做出了突出贡献，并且节约了能源消耗，但风电的不确定性也给系统的调度问题带来新的挑战。在考虑风电场计划发电量的成本基础上，本文引入备用惩罚成本以应对风电预测偏差造成的系统成本增加，同时考虑盈余惩罚成本以弥补弃风损失。因此，风电场运行成本的构成为：风电运营成本、备用惩罚成本和盈余惩罚成本。

- 风电运营成本

风电运行过程中无能源消耗，在计及风电投资和运行维护成本的基础上，风电全寿命周期内的平均发电成本可近似表示为

$$F_W = \sum_{j=1}^M C_W P_{W_{jt}} \quad (12)$$

式中， C_W 表示风电机组在某单位时段*t*的发电成本系数，万元/(MW·h)。

- 备用惩罚成本

由于风电随机性等特性导致风电并网后，风电场预报出力与实际出力存在偏差，为了保证系统的安全和稳定，系统需要预留旋转备用容量。为此，引入基于风电预测可信度的备用惩罚成本，其表达式为

$$F_S = \sum_{j=1}^M C_S (1 - \theta_{jt}) P_{S_{jt}} \quad (13)$$

式中， θ_{jt} 表示单位时段*t*内风电机组*j*预测出力的可信度； C_S 表示容量补偿成本，万元/(MW·h)； $P_{S_{jt}}$ 表示单位时段*t*内第*j*台风电机组的预测出力，MW。

- 盈余惩罚成本

盈余惩罚成本是风电场负效率运行时的运行成本。所谓风电场负效率运行指的是由调度原因而造成的不满足电网技术标准的风电弃风行为，这将导致风电资源的浪费和风电场的经济损失。为了鼓励风电的发展，政府部门对风电场的负效率运行做出一定经济补偿，则盈余惩罚成本表示为

$$F_R = \sum_{j=1}^M (C_W - C_R) (P_{S_{jt}} - P_{W_{jt}}) \quad (14)$$

式中， C_R 为风电场负效率运行补偿价格，万元/(MW·h)。

系统总发电成本最低目标函数主要由风电场运行成本和常规机组发电成本组成，可表示为

$$\min F_2 = \min \sum_{t=1}^T (F_S + F_R + F_W + F_G) \quad (15)$$

2.3. 基于机会约束规划的低碳经济调度优化模型

2.3.1. 目标函数

机会约束规划用于解决在给定置信度水平下具有不确定性因素的优化问题。风电出力具有随机性，

这会使常规机组出力也是随机的，因此，建立基于机会约束规划的低碳经济调度模型以应对不确定性因素。

对于多个目标函数模型的求解，本文采用求和的方法将多目标问题转化为单目标问题，在充分考虑了碳排放经济价值和电能生产成本的基础上建立模型目标，以实现系统低碳化和经济性的协调优化。碳交易的成本或收益不考虑在系统的发电成本中，而是以此来优化调节清洁机组的调度权，则考虑低碳效益和经济效益的系统总运行成本最小化目标可表示为

$$\min F = \min(F_1 + F_2) \quad (16)$$

2.3.2. 约束条件

- 系统功率平衡约束。电力系统中发电厂的发电量必须满足系统的负荷才能保证电力系统正常运行。

$$P_r \left\{ \sum_{i=1}^N P_{Gi} + \sum_{j=1}^M P_{Wjt} - P_{Lt} \geq 0 \right\} \geq \beta_0 \quad (17)$$

- 系统的正、负旋转备用约束。风电场接入系统后，系统需要增加正负旋转备用容量来应对风电出力的随机性对系统的影响。

$$P_r \left\{ \sum_{i=1}^N P_{Gi}^{\max} + \sum_{j=1}^M P_{Wjt} \geq P_{Lt} (1 + R_u) \right\} \geq \beta_1 \quad (18)$$

$$P_r \left\{ \sum_{i=1}^N P_{Gi}^{\min} + \sum_{j=1}^M P_{Wjt} \leq P_{Lt} (1 - R_d) \right\} \geq \beta_2 \quad (19)$$

- 系统的爬坡能力的约束。系统的爬坡速率是系统单位时间内可以增加或减少出力。

$$\begin{cases} P_r \left\{ \sum_{i=1}^N r_i^{up} \geq \sum_{j=1}^M \phi_j P_{Wjt} \right\} \geq \beta_3 \\ P_r \left\{ \sum_{i=1}^N r_i^{down} \geq \sum_{j=1}^M \phi_j P_{Wjt} \right\} \geq \beta_4 \end{cases} \quad (20)$$

- 常规火电机组出力约束。每台发电机组都应该满足自身的输出功率限制。

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Git} \leq P_{Gi}^{\max} \quad (21)$$

- 机组爬坡能力约束。发电机组的爬坡速率，每个机组单位时间内可以增加或减少出力。

$$-r_i^{down} \Delta T \leq P_{Git} - P_{Gi(t-1)} \leq r_i^{up} \Delta T \quad (22)$$

- 风电出力波动范围约束。风电功率的预测往往存在偏差，允许其出力上下偏差 $\pm 25\%$ ，则风电场的随机出力范围满足以下约束条件[21]:

$$0.75 P_{Wjt} \leq P_{Wjt} \leq 1.25 P_{Wjt} \quad (23)$$

- 风电穿透功率极限约束。

$$P_{Wjt} \leq \mu P_{Lt} \quad (24)$$

式中， P_{Lt} 为时段 t 的系统总负荷需求量，MW； R_u 为时段 t 系统的正旋转备用率； R_d 为时段 t 系统的负旋转备用率； ϕ_j 为风电机组 j 每分钟可能的最大出力变化率，%/min； P_{Gi}^{\max} 为常规机组 i 在单位时段 t 内的出力上限，MW； P_{Gi}^{\min} 为常规机组 i 在单位时段 t 内的出力下限，MW； r_i^{up} 为常规发电机组 i 分钟出力的最大上升速率，MW/min； r_i^{down} 为常规发电机组 i 分钟出力的最大下降速率，MW/min； ΔT 为时段延

续时间。 μ 为风电穿透功率系数。各不等式约束条件中的 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 表示置信水平。

3. 模型求解方法

细菌群体趋药性算法(Bacterial Colony Chemotaxis, BCC)是一种从生物行为中获取灵感的智能优化算法，具有收敛速度快、精度高的特点[22]。BCC 算法细菌编码、种群初始化过程、更新机制以及收敛过程如图 1 所示。

4. 算例分析

4.1. 初始数据

为验证本文所提出的新型优化调度模型的合理性与算法的可行性，以 1 个装机容量为 30 MW 的风电场和 6 台火电机组的测试系统进行仿真计算。调度周期为 1 天，分为 24 个时段。火电机组参数如表 1 所示，风功率预测曲线如图 2 所示。其中 pu 为标么值，其基准值为 100 MW·h。

风电场的发电成本价格为 0.05 万元/(MW·h)，旋转备用容量价格为 0.02 万元/(MW·h)，风电场负效率运行补偿价格为 0.03 万元/(MW·h)。系统正、负旋转备用容量取系统总负荷的 5%，风电机组出力的最大变化率取 25%，风电穿透功率系数取 22%。置信水平 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 均取 0.99。该系统的区域电量边际排放因子(OM)为 1.002，容量边际排放因子(BM)为 0.594，以二者权重各 50%加权平均得到该系统的电网基准线排放因子为 0.798。系统负荷需求数据见表 2。

4.2. 优化调度结果

碳交易成本价格取欧洲交易市场的平均价格 136 元/t，碳排放权期望出售价格定为 150 元/t，发电权交易的价格定为 20 元/MW·h。采用本文所提优化算法对含风电系统的低碳经济调度模型求解。模型优化

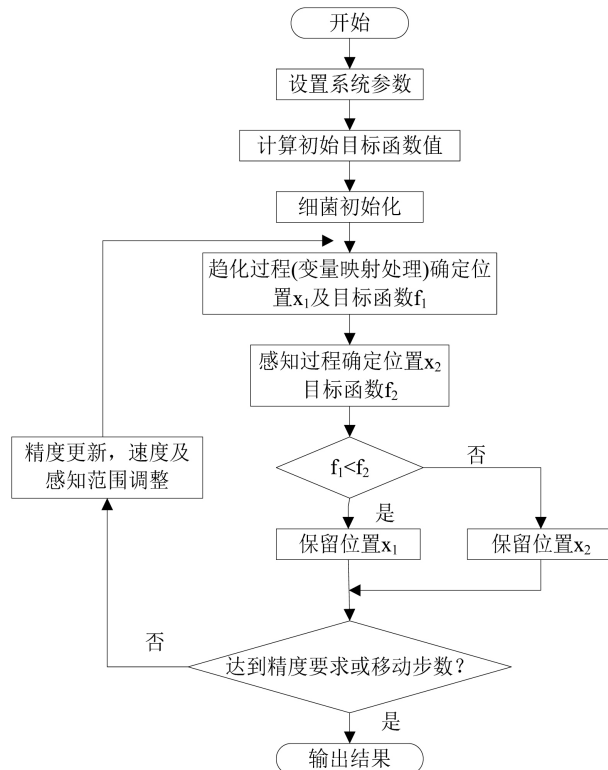


Figure 1. Curve: BCC algorithm process
图 1. BCC 算法流程

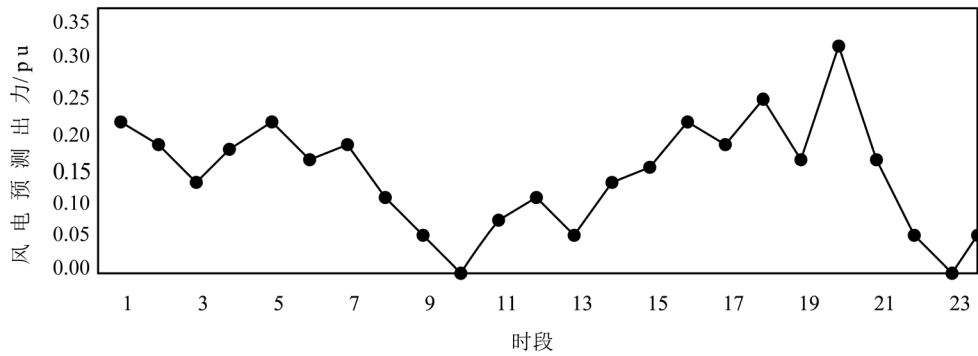


Figure 2. Curve: The wind power prediction

图 2. 风功率预测曲线

Table 1. Thermal power unit parameters

表 1. 火电机组参数

参数	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6
$P_{G_i}^{\max}$ (MW)	200	80	50	35	30	40
$P_{G_i}^{\min}$ (MW)	50	20	15	10	10	12
r_i^{up} (MW/min)	5	2	1.25	0.875	0.75	1
r_i^{down} (MW/min)	5	2	1.25	0.875	0.75	1
a_i	150	25	0	0	0	0
b_i	2	2.5	1	3.25	3	3
c_i	0	0	0	0	0	0
e_i	50	40	0	0	0	0
f_i	0.063	0.098	0	0	0	0
δ_i (t/MW-h)	0.88	0.96	1.12	0.4	0.98	0.42
g_{0i} (MW-h)	1900	1000	700	600	500	600

Table 2. Load demand data

表 2. 负荷需求数据

时段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
总负荷/pu	1.868	1.779	1.721	1.669	1.672	1.712	2.086	2.445	2.678	2.721	2.734	2.694
时段	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
总负荷/pu	2.692	2.692	2.642	2.662	2.801	2.834	2.817	2.732	2.567	2.358	2.046	1.774

调度结果即火电机组和风电场在研究周期的各时段的出力数据如表 3 所示。

由表 3 可知，本文的低碳经济调度模型中，在满足各约束条件下实现了风电的全额上网。另外，各火电机组的出力保持了与系统负荷的大小相同的变化趋势，在 18 至 22 时段的负荷高峰期，机组 2、机组 3 以及机组 4 的出力逐渐降低，低排放的机组 1 出力逐渐增加，获得一定的优先调度权，保证了系统排放的低碳性。而高排放的机组 5 和机组 6，由于进行了发电权交易，在负荷高峰期的 18 至 22 时段出力降低速率低于非高峰期的 9 到 12 时段，且每个时段出力均小于 9 到 12 各时段出力，减少了二氧化碳排放。在 19 到 20 时段的负荷高峰期，风电机组出力明显增加，其获得了优先调度权。因此，本文的调度方案

Table 3. System thermal power unit and the optimization of wind farm output results
表 3. 系统各火电机组和风电场的优化出力结果

时段	P_{G1}	P_{G2}	P_{G3}	P_{G4}	P_{G5}	P_{G6}	P_w
1	0.5112	0.2036	0.3017	0.2785	0.2457	0.1623	0.2144
2	0.4987	0.2015	0.2602	0.2344	0.1616	0.2487	0.1697
3	0.5003	0.2054	0.2567	0.2634	0.1993	0.1711	0.1161
4	0.5001	0.2007	0.2402	0.1761	0.1711	0.2321	0.1654
5	0.5021	0.2006	0.2334	0.1987	0.1683	0.1976	0.1955
6	0.5068	0.2017	0.2417	0.2097	0.1779	0.1892	0.1723
7	0.5032	0.4787	0.2663	0.2312	0.1822	0.2394	0.1811
8	0.9977	0.5088	0.2344	0.2112	0.2097	0.1816	0.0997
9	1.0311	0.5199	0.2577	0.2791	0.2579	0.3214	0.0388
10	1.0364	0.5084	0.2601	0.3371	0.2566	0.3188	0.0101
11	1.0377	0.5221	0.2779	0.3417	0.2479	0.2977	0.0732
12	0.9871	0.5149	0.2712	0.3117	0.2463	0.2813	0.1161
13	0.9772	0.5177	0.3098	0.3308	0.2197	0.2489	0.0786
14	0.9984	0.5184	0.2611	0.2941	0.2144	0.2717	0.1314
15	1.0013	0.5338	0.2673	0.2473	0.1913	0.2777	0.1783
16	0.9993	0.5201	0.2771	0.3097	0.1997	0.1715	0.2087
17	1.0042	0.5167	0.3011	0.3287	0.2707	0.2041	0.1869
18	0.9778	0.5273	0.2418	0.3232	0.2913	0.2385	0.2277
19	0.9785	0.5269	0.2599	0.3474	0.2611	0.2512	0.1689
20	0.9882	0.5311	0.2414	0.2962	0.2221	0.1499	0.2885
21	0.9844	0.5189	0.2401	0.2617	0.2374	0.1697	0.1693
22	1.0121	0.5167	0.2027	0.1786	0.2416	0.1674	0.0623
23	0.5074	0.5097	0.2797	0.2887	0.1789	0.2579	0.0054
24	0.5066	0.2348	0.2553	0.2716	0.1519	0.2998	0.1112

在发电系统安全运行的同时，更大程度地调用了风电和较清洁的火电机组，实现低碳调度与经济调度的平衡。

4.3. 不同模型对比分析

为了分析本文新型优化模型的优势，提出两种模式：模式 1 为基于碳交易的含风电的低碳经济调度模型，模式 2 为本文所提考虑发电权交易的低碳经济调度模型，如表 4 所示。

由表 4 可知，模式 2 中二氧化碳排放量仅为 5374.56 t，与模式 1 相比少排放 570.79 t，降低了 9.6%；考虑发电权交易的碳交易成本为 2.192 万元，比模式 1 减少了 0.167 万元，降低了 7.1%；常规发电机组发电成本为 11.140 万元，比模式 1 减少了 1.155 万元，降低了 9.4%。因此，本文所提出的考虑发电权交易的低碳经济调度模型兼顾了系统的经济性和系统碳排放的低碳性。

是否考虑发电权交易会对常规发电机组的碳交易成本产生较大影响。当不考虑发电权交易时为模式 1，当考虑发电权交易时为模式 2。不同模式下各火电机组碳交易成本对比，如图 3 所示。

由图 3 可知, 在模式 2 中, 由于机组 5 和机组 6 排放高、碳交易收益低, 所以优先进行发电权交易, 将高排放机组的发电量出售给低排放机组获得收益。但由于出售了机组 5 和机组 6 的发电权, 其出力减小, 其他机组出力会略有增加以确保负荷。因此, 在模式 2 中机组 1 到机组 4 的出力反而较模式 1 有所上升, 碳交易成本也会略有上升。但从总体上来看, 由于模式 2 中机组 5 和机组 6 的碳交易成本较其他机组与模式 1 相比有较大降低。模式 2 碳交易总成本低于模式 1。

图 4 为不同模式下各火电机组二氧化碳排放量对比。模式 2 中机组 5 和机组 6 二氧化碳排放量均远低于模式 1, 而机组 1 到机组 4 的二氧化碳排放量略高于模式 1。由图 4 分析可知, 机组 5 和机组 6 将大

Table 4. Different model optimization results
表 4. 不同模型优化结果

模式	E_p /t	F_c /万元	F_G /万元	F_w /万元	F_s /万元	F /万元
1	5945.35	2.359	12.295	0.534	0.120	15.308
2	5374.56	2.192	11.140	0.534	0.120	13.986

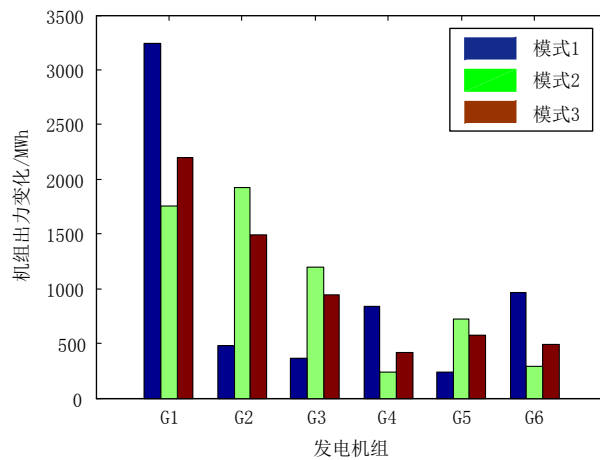


Figure 3. Different mode of each thermal power unit cost of carbon trading

图 3. 不同模式下各火电机组碳交易成本对比

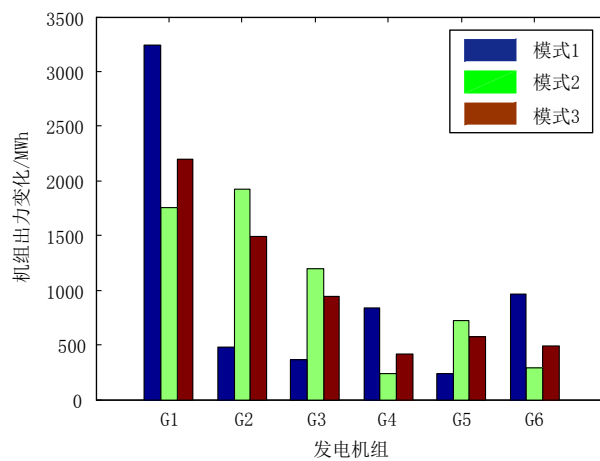


Figure 4. Different mode of each thermal power unit carbon dioxide emissions

图 4. 不同模式下各火电机组二氧化碳排放量对比

部分的发电权出售给了低排放机组，这样就节省了大量煤炭，从而大量减少二氧化碳的排放。但为了保证负荷，其他的机组出力会增加，所以二氧化碳排放量均略有增加，但从总体上来看，模式 2 中总二氧化碳排放量仍低于模式 1。因此本文所提考虑发电权交易的含风电电力系统节能低碳经济调度模型兼顾了低碳性与经济性的同时，还节约了能源。

4.4. 碳交易价格对低碳经济调度模式的影响

图 5 为不同碳排放权交易价格下，系统总运行成本的变化趋势。当碳价为 0 时，即不考虑低碳调度因素，所得目标结果与单目标的经济调度模型相同；碳价较低时，低碳调度目标对系统总运营成本影响较小，结果基本保持与经济调度相同的结果；随着碳价的提高，系统低碳调度对系统总运营成本的影响越来越大，当碳价增长到 80 元/t 时，系统总运营成本迅速上升；当碳价超过 200 元/t 时，趋近于饱和，系统总运营成本接近于单目标的低碳调度模型的总成本。

由图 6 可见，当碳排放权购买价格与碳排放权出售价格一致时，常规发电机组的碳交易成本明显低

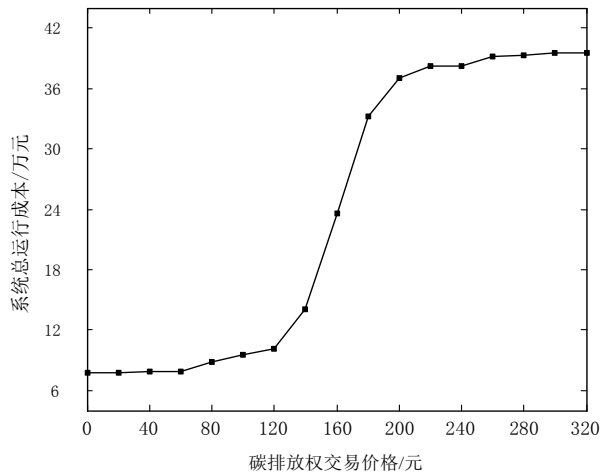


Figure 5. System total operating costs of the carbon price change curve

图 5. 系统总运行成本随碳价变化曲线

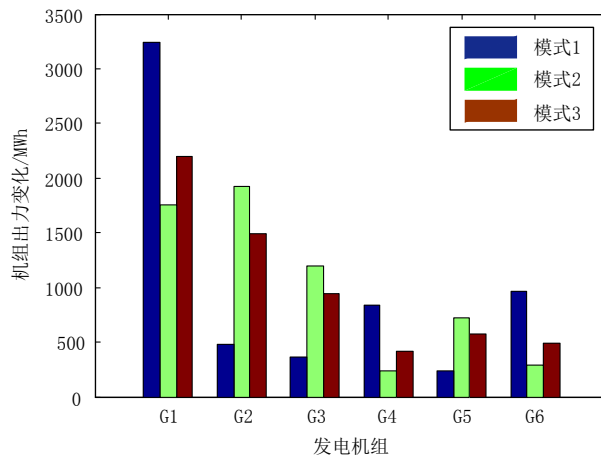


Figure 6. Mode 2 when the average price and average conventional generators carbon trading cost comparison

图 6. 模式 2 下均价与不均价时常规发电机组碳交易成本对比

于不一致时的成本,由于当本文所提出的模型中实行了期望出售碳排放权价格与期望购买碳排放权价格,所以碳排放权可以高价出售,低价购买,获得了多余均价时的收益,从而降低了常规发电机组的碳交易成本。体现了本文所提考虑发电权交易的含风电电力系统低碳经济调度的经济性。

5. 结论

发电权交易与碳交易机制的联合开展对电力系统经济调度的低碳减排产生积极影响,本文将发电权交易引入到低碳调度目标中,建立了基于发电权交易的碳交易含风电的低碳调度模型。在经济调度目标的常规发电机组成本中引入了阀点效应成本以应对拔丝效应对成本造成的影响。引入启停成本以应对由于风电的间歇性和随机性使得机组启停调度策略发生改变所带来的影响。此外,还建立了风电与火电分别应分得的碳排放份额模型,使得风电碳交易成本与火电碳交易成本分开,风电碳交易部分全部,获得收益,使得碳交易成本降低。通过 BCC 算法进行求解,结果表明,本文所提模型更加全面的考虑了经济性与低碳性。

基金项目

本文得到河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZD2016049)和燕山大学青年教师自主研究计划课题(16LGA006)的资助,在此表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] 别朝红, 胡国伟, 谢海鹏, 李更丰. 考虑需求响应的含风电电力系统的优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 115-159.
- [2] 刘文学, 梁军, 负志皓, 李正茂, 董晓明. 考虑节能减排的多目标模糊机会约束动态经济调度[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 62-70.
- [3] Streimikiene, D. and Roos, I. (2009) GHG Emission Trading Implications on Energy Sector in Baltic States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**, 854-862. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.02.005>
- [4] OECD/IEA. (2003) Policies to Reduce Greenhouse Gas Emissions in Industry. Successful Approaches and Lessons Learned, Workshop Report.
- [5] Yajvender, P. and Ashwanikumar, V. (2012) Influence of Renewable, Promotion Policies on Power System Operation with Carbon Emission Trading. Nirma University International Conference, 1-6.
- [6] Bahmani-Firouzi, B., Farjah, E. and Seifi, A. (2013) A New Algorithm for combined Heat and Power Dynamic Economic Dispatch Considering Valve-Point Effects. *Energy*, **52**, 320-332. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.004>
- [7] Basu, M. (2005) A Simulated Annealing-Based Goal-Attainment Method for Economic Emission Load Dispatch of Fixed Head Hydrothermal Power Systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **27**, 147-153. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2004.09.004>
- [8] 王士柏, 韩学山, 杨明, 顾世龙. 计及不确定性的等备用边际效用约束的电力系统经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1143-1152.
- [9] 刘晓, 艾欣, 彭谦. 计及需求响应的含风电场电力系统发电与碳排放权联合优化调度[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 213-218.
- [10] Cai, J., Ma, X., Li, Q., et al. (2009) A Multi-Objective Chaotic Particle Swarm Optimization for Environmental/Economic Dispatch. *Energy Conversion and Management*, **50**, 1318-1325. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.01.013>
- [11] 傅利, 周步祥, 林虹江, 王小红. 基于混合变量动态优化算法的含风电电力系统多目标动态优化调度[J]. 电测与仪表, 2015, 52(10): 1-7.
- [12] Chen, C.L. (2008) Optimal Wind-Thermal Generating Unit Commitment. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **23**, 273-280. <https://doi.org/10.1109/TEC.2007.914188>
- [13] 赵书强, 王扬, 徐岩, 殷加球. 基于机会约束目标规划的高风电接入比例下大规模储能与火电协调调度[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 969-977.

- [14] 娄素华, 胡斌, 吴耀武, 卢斯煜. 碳交易环境下含大规模光伏电源的电力系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 91-97.
- [15] 杨胡萍, 左士伟, 陈欢. 碳排放约束下考虑静态电压稳定的发电权交易优化[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3011-3015.
- [16] Yang, M. (2007) China's Energy Efficiency Target 2010. *Energy Policy*, **36**, 561-570. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.09.032>
- [17] Steenhof, P.A. (2006) Decomposition of Electricity Demand in China's Industrial Sector. *Energy Economics*, **28**, 370-384. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2006.02.006>
- [18] 魏一鸣, 等. 中国可持续发展战略报告[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [19] 朱永胜, 王杰, 瞿博阳, Suganthan, P. N. 含风电场的多目标动态环境经济调度[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1315-1322.
- [20] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 关于公布 2012 年中国区域电网基准线排放因子的公告[EB/OL]. 2012.
- [21] 陈道君, 龚庆武, 张茂林. 考虑能源环境效益的含风电场多目标优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 10-17.
- [22] 张晓辉, 闫鹏达, 钟嘉庆, 卢志刚. 可再生能源激励制度下的低碳经济电源规划[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 655-662.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2328-0514, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: aepe@hanspub.org