

计及碳交易-绿证的“源-荷”互动优化调度策略

苏宜强,刘盛松

(国网江苏省电力有限公司,南京 210024)

Source-demand interactive optimal scheduling strategy considering carbon trading and green certificate

SU Yiqiang, LIU Shengsong

(State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

摘要:在可再生能源不断发展的背景下,研究了计及碳交易-绿证成本的“源-荷”互动优化调度策略。模型中同时考虑发电侧资源和可平移负荷、可转移负荷、可削减负荷3种柔性负荷资源,成本中同时考虑了碳交易-绿证成本和柔性负荷调用成本,以成本最优为目标,建立优化模型,实现发电侧资源与多种柔性负荷资源的最优分配。通过算例验证了方法的有效性。

关键词:碳交易;绿证;优化调度;柔性负荷

Abstract: Under the background of the development of renewable energy, the “source-demand” interactive optimal scheduling strategy taking into account the cost of carbon trading (CT) and green certificate (TGC) is investigated. The proposed model considers generation resources and 3 kinds of flexible loads including shiftable loads, transferable loads, and curtailable loads. The cost considers CT-TGC cost and load scheduling cost. Taking the overall cost as the objective, the optimization model is developed to realize the optimal allocation of generation resources and various flexible loads. Testing examples verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: carbon trading; green certificate; optimal scheduling; flexible load

0 引言

近年来,随着传统化石能源的过度开采利用和全球气候变暖,人们逐渐意识到改善能源结构的重要性,积极开发可再生能源成为当今解决能源问题的有效措施^[1-2]。为减少碳排放、增加可再生能源出力,碳交易机制和可再生能源配额制受到了广泛关注。在碳排放交易机制中,交易主体可以购买或出售碳排放配额,使得碳排放较少的发电企业受益;可再生能源配额制规定了地区电网可再生能源发电所占比例,不足或超出部分可在不同地区间进行交易。

围绕碳交易机制、可再生能源配额制,学者们开展了大量的研究。文献[3]介绍了碳交易机制,提出了考虑碳排放的经济调度策略,并证实了碳交易机制在降低系统碳排放方面的有效性。文献[4]研究了可再生能源配额制下的风电并网节能经济调度模型,输出不同机组的发电计划,证实了该模型在促进风电消纳方面的有效性。文献[5]、文献[6]在优化调度中均建立了碳排放交易成本模型。文献[5]引入电储能,利用Yalmip求解以机组运行成本、储能装

置运行成本和碳交易成本等多项成本最小为目标的调度模型。文献[6]利用模糊自修正粒子群算法求解考虑碳交易成本的冷热电联供系统低碳调度多目标优化模型。文献[7]同样建立了绿证交易机制模型和碳抵消机制模型,在此基础上以总成本最小为目标建立综合考虑以上两种机制的含风电电力系统优化调度模型,但仅从发电侧的角度出发,仅考虑了发电机组针对新政策两项机制的优化方案。

尽管上述研究对碳交易机制、可再生能源配额制的数学模型和求解算法进行了详细的研究,但未考虑柔性负荷对碳交易-绿证机制下调度结果的影响。文献[8]将单一电动汽车作为负荷侧调度资源,提出了一种计及电动车碳配额的经济调度模型,结果证实了碳排放交易机制在有效减少碳排放的同时,也减少了用电成本。以上研究表明,碳交易-绿证机制是节能降耗、平抑可再生能源波动的重要措施,柔性负荷对于碳交易-绿证机制下的调度结果具有重要的影响,因此开展相应的研究具有重要意义。

本文针对大规模新能源消纳的情形,提出了同时包含碳交易-绿证以及需求响应的“源-荷”互动优化调度策略,充分考虑了可平移负荷、可削减负荷、可转移负荷在碳交易-绿证机制下的影响,利用多机制协同,促进新能源消纳。

收稿日期:2021-05-08;修回日期:2021-07-30

基金项目:江苏省高校自然科学基金(16KJB470009)

1 计及碳交易-绿证的电力优化调度模型

针对风电大规模接入电网的情形,考虑碳交易-绿证机制,建立针对区域电网的优化调度模型。

1.1 优化调度目标函数

经济调度目标函数为火电机组运行成本、绿证(tradable green certificate, TGC)成本、碳交易(carbon trading, CT)成本、购买备用成本以及柔性负荷调用成本之和最小,具体如下

$$\min(f)=f_1+f_2+f_3+f_4+f_5 \quad (1)$$

式中: f_1 为火电机组报价成本; f_2 为 TGC 成本; f_3 为 CT 成本; f_4 为备用成本; f_5 为柔性负荷调用成本。

1.1.1 火电机组运行成本

火电机组发电运行中基于燃料成本给出的报价成本为

$$f_1=p_{\text{fuel}} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} (a_i+b_i P_{i,t}+c_i P_{i,t}^2) \quad (2)$$

式中: p_{fuel} 为单位碳排放下的燃料价格,元/t; a_i 、 b_i 、 c_i 分别为第 i 台火电机组的 CO_2 排放系数; $P_{i,t}$ 为第 i 台火电机组在 t 时刻的出力; N_G 为该系统火电机组的数量; T 为调度时间,取 24 h。

1.1.2 TGC 成本

可再生能源配额制实施后,电网公司会同时参与电力市场和 TGC 市场的交易,TGC 将和电能一样具有经济价值,其成本和收益将成为目标函数的重要组成部分。TGC 成本公式如下

$$f_2=p_{\text{TGC}} \left(k_{\text{TGC}} \sum_{t=1}^T \left(\sum_{d=1}^{N_D} E(P_{d,t}^D) - \sum_{d=1}^{N_D} P_{d,t}^{\text{FL}} \right) - \sum_{t=1}^T \sum_{w=1}^{N_W} E(P_{w,t}^W) \right) \quad (3)$$

式中: $E(P_{w,t}^W)$ 和 $E(P_{d,t}^D)$ 分别为 t 时刻该系统风电和负荷的预测值; $P_{d,t}^{\text{FL}}$ 为 d 节点 t 时刻平移负荷、削减负荷和转移负荷总量; p_{TGC} 为单位 TGC 价格; k_{TGC} 为可再生能源发电量占总上网电量的配额比; N_D 为该系统负荷的数量; N_W 为该系统风电的数量。

1.1.3 CT 成本

选择“基准线法”,即按照各发电厂的发电量按比例分配碳排放配额, t 时刻分摊得到的碳排放配额为

$$C_{\text{CT}}=k_{\text{CT}} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} P_{i,t} \quad (4)$$

式中: C_{CT} 为 t 时刻系统分配得到的碳排放配额; k_{CT} 为区域单位电量碳排放配额分配系数。

CT 成本的计算公式如下

$$f_3=p_{\text{CT}} \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} (a_i+b_i P_{i,t}+c_i P_{i,t}^2) - C_{\text{CT}} \right) \quad (5)$$

式中: p_{CT} 为单位碳排放价格。

1.1.4 辅助服务(备用容量)成本

$$f_4=p_R \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} P_{i,t}^R \quad (6)$$

式中: $P_{i,t}^R$ 为第 i 台火电机组在 t 时刻提供的备用容量; p_R 为单位备用的价格。

1.1.5 柔性负荷调用成本

$$f_5=f_{\text{shift}}+f_{\text{cut}}+f_{\text{trans}} \quad (7)$$

式中: f_{shift} 、 f_{cut} 、 f_{trans} 分别为可平移负荷、可削减负荷和可转移负荷的调用成本。

1.2 优化调度约束条件

1.2.1 功率平衡约束

为保证电网安全稳定运行,单位时间内所有火电出力和风电出力应等于该时刻的负荷预测值

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{i,t} + \sum_{w=1}^{N_W} E(P_{w,t}^W) = \sum_{d=1}^{N_D} E(P_{d,t}^D) - \sum_{d=1}^{N_D} P_{d,t}^{\text{FL}} \quad (8)$$

1.2.2 机组启停变量约束

$$u_{i,t} = \begin{cases} 1 & \text{机组运行} \\ 0 & \text{机组停机} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $u_{i,t}$ 为 t 时刻第 i 台机组的运行状态。

1.2.3 开关状态约束

$$\begin{cases} x_{i,t} - y_{i,t} = u_{i,t} - u_{i,t-1} \\ x_{i,t} + y_{i,t} \leq 1 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $x_{i,t}$ 为第 i 台火电机组在 t 时刻的启动状态,启动为 1,不启动为 0; $y_{i,t}$ 为第 i 台火电机组在 t 时刻的停机状态,退出为 1,不退出为 0; $u_{i,t}$ 为第 i 台火电机组在 t 时刻的状态变量,开机为 1,停机为 0。

1.2.4 火电机组出力约束

$$P_{i,\min} \cdot u_{i,t} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} \cdot u_{i,t} \quad (11)$$

式中: $P_{i,\min}$ 和 $P_{i,\max}$ 分别为第 i 台火电机组的最小、最大技术出力。

1.2.5 火电机组爬坡速率约束

$$-SD_i \leq P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq SU_i \quad (12)$$

式中: SU_i 为第 i 台机组爬坡速率的上界; $-SD_i$ 为第 i 台机组爬坡速率的下界。

1.2.6 支路潮流约束

$$PL_{l,t} = \sum_{i=1}^{N_G} QG_{l,i} \cdot P_{i,t} + \sum_{w=1}^{N_W} QW_{l,w} \cdot E(P_{w,t}^W) - \sum_{d=1}^{N_D} QD_{l,d} \cdot E(P_{d,t}^D) + \sum_{d=1}^{N_D} QD_{l,d} \cdot P_{d,t}^{\text{FL}} \quad (13)$$

$$-PLM_l \leq PL_{l,t} \leq PLM_l \quad (14)$$

式中: $PL_{l,t}$ 为第 l 条支路在 t 时刻的传输功率; PLM_l 为第 l 条支路的功率限值; $QG_{l,i}$ 、 $QW_{l,w}$ 、 $QD_{l,d}$ 分别为支路-火力发电机、支路-风力发电机、支路-负荷节点关联矩阵。

2 柔性负荷模型

柔性负荷功率总量可以表示为可平移负荷、可削减负荷和可转移负荷之和

$$P_{d,t}^{FL} = P_{shift,d,t} + P_{cut,d,t} + P_{trans,d,t} \quad (15)$$

式中: $P_{shift,d,t}$ 、 $P_{cut,d,t}$ 、 $P_{trans,d,t}$ 分别为可平移负荷、可削减负荷和可转移负荷,各变量的约束条件分别定义如下。

2.1 可平移负荷

可平移负荷在用电时序上具有一定的前后关联性,故在优化调度过程中需在保证时序关联的基础上对负荷曲线进行整体平移。

假设第 ds 个可平移负荷在平移前的负荷曲线可以用向量表示为

$$P_{shift0,ds} = [0 \cdots P_{shift,ds,ts1^*} \cdots P_{shift,ds,ts2^*} \cdots P_{shift,ds,tsD^*} \cdots 0] \quad (16)$$

式中: $ts1^*, \dots, tsD^*$ 为可平移负荷平移前所处时间段,则可建立第 ds 个可平移负荷的可行求解空间 $P_{shift_sel,ds}$

$$P_{shift_sel,ds} = \begin{bmatrix} P_{shift,ds,ts1} & P_{shift,ds,ts2} & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & P_{shift,ds,ts1} & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & P_{shift,ds,ts2} & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & P_{shift,ds,ts1} & \cdots & P_{shift,ds,tsD} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中: $P_{shift_sel,ds}$ 中的每一行为一种可能的可平移负荷曲线。利用0-1变量 $y_{shift,ds,t}$ 来表示平移后的可平移负荷 $P_{shift,ds}$ 在求解空间 $P_{shift_sel,ds}$ 中的位置, $y_{shift,ds,t}=1$ 为可平移负荷从 t 时刻开始,根据开始时刻的唯一性,则

$$\sum_{t=1}^T y_{shift,ds,t} = 1 \quad (18)$$

则第 ds 个可平移负荷在平移后的负荷曲线可以通过下式计算

$$P_{shift,ds} = [y_{shift,ds,1} \ y_{shift,ds,2} \ \cdots \ y_{shift,ds,T}] \cdot P_{shift_sel,ds} \quad (19)$$

式中: $P_{shift,ds}$ 中的第 t 个元素 $P_{shift,d,t}$ 即为第 d 个可平移负荷在第 t 个时刻的负荷大小。

可平移负荷的成本可通过下式计算

$$f_{shift} = \sum_{t=1}^T \sum_{ds=1}^{N_{DS}} p_{shift,ds,t} \cdot y_{shift,ds,t} \quad (20)$$

式中: $p_{shift,ds}$ 为第 ds 个可平移负荷单位电量的价格; N_{DS} 为可平移负荷的个数。第 d 个节点的可平移负荷与第 ds 个可平移负荷存在如下关系

$$P_{shift,d,t} = \sum_{ds \in d} P_{shift,ds,t} \quad (21)$$

2.2 可削减负荷

可削减负荷通过一定的价格或激励手段实现

负荷的部分或全部削减。

第 t 个时刻的可削减负荷需满足其自身的功率限值约束

$$0 \leq P_{cut,d,t} \leq P_{cut_max,d} \quad (22)$$

式中: $P_{cut_max,d}$ 为第 d 个节点的最大消减量,可削减负荷的成本可通过下式计算

$$f_{cut} = \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^{N_D} p_{cut} \cdot P_{cut,d,t} \quad (23)$$

式中: p_{cut} 为可削减负荷单位电量的价格。

2.3 可转移负荷

可转移负荷能够在调度周期内转移用电功率而不减少电能的使用,相比于可平移负荷,可转移负荷能够实现功率的灵活转移而不受用电时序的约束。

第 t 个时刻的可转移负荷需满足功率限值约束

$$0 \leq P_{trans,d,t} \leq P_{trans_max,d} \quad (24)$$

式中: $P_{trans_max,d}$ 为第 d 个节点的最大转移量,此外,由于转移前后总电能消耗不变,可转移负荷还应满足电能约束

$$\sum_{t=1}^T P_{trans,d,t} = \sum_{t=1}^T P_{trans0,d,t} \quad (25)$$

式中: $P_{trans0,d,t}$ 为第 d 个节点的可转移负荷在转移前第 t 个时刻的负荷大小。

可转移负荷的成本可通过下式计算

$$f_{trans} = \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^{N_D} p_{trans} |P_{trans,d,t} - P_{trans0,d,t}| \quad (26)$$

式中: p_{trans} 为可转移负荷单位电量的价格。

3 算例分析

算例考虑由4台火电机组和1个风电场组成的区域电网,如图1所示。火电机组的参数如表1所示。算例所考虑的负荷曲线和风电功率曲线如图2所示。碳交易配额取0.95 t/MWh,可再生能源配额取0.25,假设碳交易和绿色证书的价格通过上一级碳交易市场和绿色证书交易市场确定,碳交易价格取100元/t,绿证交易价格取500元/MWh。

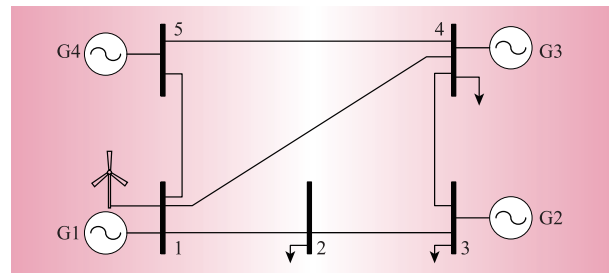


图1 5节点系统

Fig. 1 5-node power system

表1 火电机组参数
Table 1 Thermal power unit parameters

机组	a/t	$b/(t \cdot \text{MW} \cdot \text{h}^{-1})$	$c/(t \cdot (\text{MW} \cdot \text{h}^2)^{-1})$	最大出力/ MW	最小出力/ MW
1	43.6	0.502 3	0.000 774	55	10
2	38.5	0.982 7	0.004 511	55	10
3	54.8	0.451 0	0.000 539	130	20
4	53.2	0.638 0	0.001 646	130	20

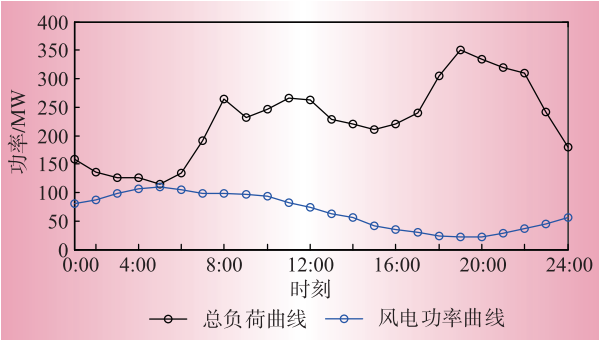


图2 负荷曲线与风电功率曲线
Fig. 2 Load curve and wind power curve

为了进行对比分析,算例考虑以下两种情形,分别为:① 情形1,不考虑柔性负荷;② 情形2,考虑可平移负荷、可削减负荷、可转移负荷3种类型的柔性负荷,其中可平移负荷考虑5种不同的可平移负荷,平移前的时间范围和允许平移的时间范围在表2中列出。

表2 可平移负荷参数(5节点系统)
Table 2 Shiftable load parameters (5-node system)

可平移 负荷编号	平移前的 时间范围	允许平移的 时间范围
1	5:00—7:00	1:00—24:00
2	17:00—19:00	1:00—24:00
3	19:00—21:00	1:00—24:00
4	20:00—22:00	12:00—24:00
5	12:00—14:00	12:00—24:00

情形1(不考虑柔性负荷的火电机组)的调度结果如图3所示;情形2(考虑柔性负荷的火电机组)的调度结果如图4所示。对比图3和图4可以发现,引入柔性负荷后,第1台和第3台火电机组的最大功率有所减小。

图5给出了情形2中优化前后可平移负荷调度结果的对比,图6给出了情形2中优化前后各类柔性负荷在总负荷中的占比。从图中可以看出,优化后的柔性负荷从中午高峰(11:00—14:00)和晚高峰时段(18:00—22:00)转移到了夜晚低谷时段(1:00—6:00),优化后的负荷曲线在高峰时段低于优化前的负荷曲线,验证了本文的优化调度模型的合理性。

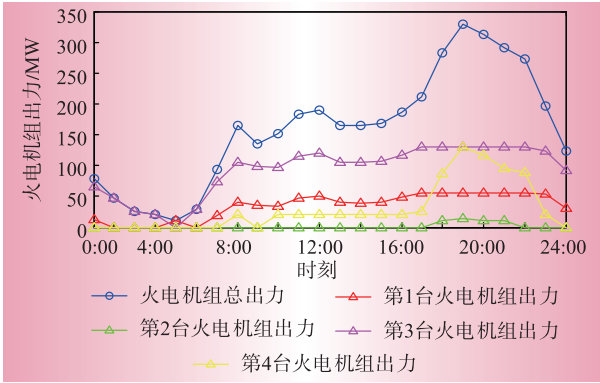


图3 不考虑柔性负荷的火电机组调度结果
Fig. 3 Scheduling results of thermal units without considering the flexible loads

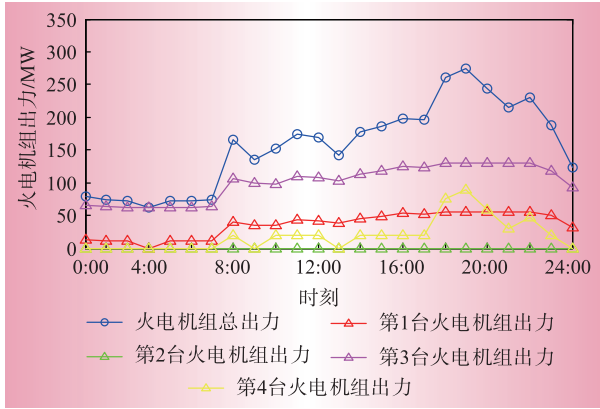


图4 考虑柔性负荷的火电机组调度结果
Fig. 4 Scheduling results of thermal units considering the flexible loads

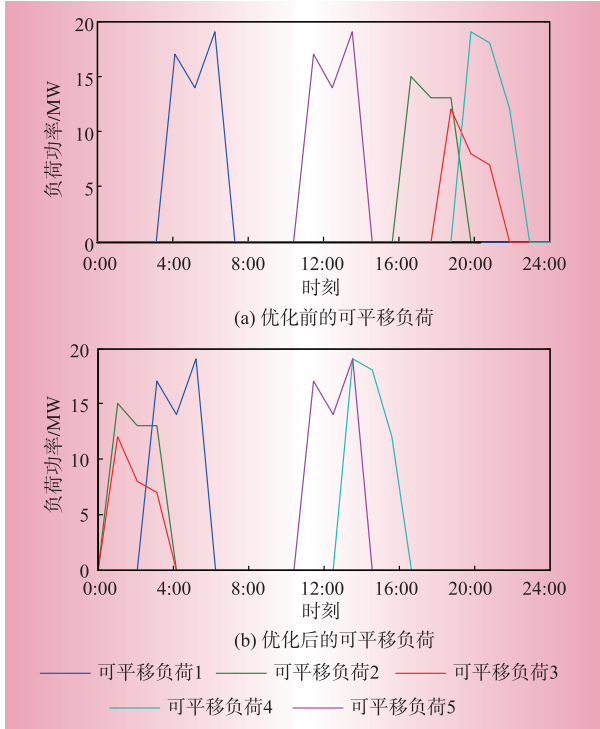


图5 可平移负荷的调度结果
Fig. 5 Scheduling results of shiftable loads

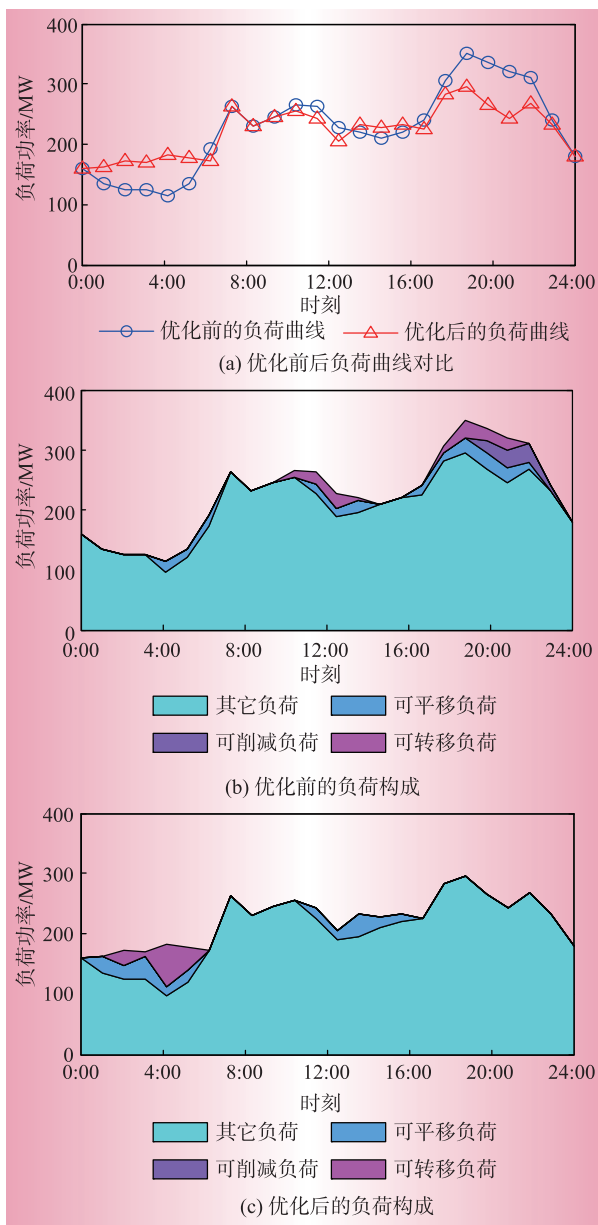


图6 优化前后各类型柔性负荷在总负荷中所占比例
Fig. 6 Amount of different flexible loads before and after optimization

为了进一步说明碳交易-绿证机制下柔性负荷对电网企业的影响,表3给出了考虑柔性负荷和不考虑柔性负荷两种情形下的碳交易成本和绿证交易成本。由表3可以看出,考虑了柔性负荷后的碳交易成本(303 830元)相较于不考虑柔性负荷时(311 340元)有所下降,同时,出售绿证所获得的收益(117 080元)比不考虑柔性负荷时(113 880元)有所增加。算例结果验证了本文所提出的优化调度模型的合理性和有效性,同时说明柔性负荷的引入能够节能降耗、平抑可再生能源波动及促进可再生能源消纳,从而更好地发挥碳交易-绿证机制的作用。

表3 两种情形下的优化结果对比

Table 3 Comparison of optimization results in the 2 scenarios

	弃风量/ MWh	碳交易 成本/元	绿证交易 成本/元
情形1 (不考虑柔性负荷)	6.396 4	311 340	-113 880
情形2 (考虑柔性负荷)	0	303 830	-117 080

4 结论

本文在低碳排放和可再生能源大力发展的背景下,考虑绿证和碳交易成本,建立了计及多类型柔性负荷资源的优化调度模型。通过算例分析主要得到以下结论。

(1) 在优化模型中加入可平移负荷、可削减负荷和可转移负荷后得到的优化结果表明,柔性负荷可以有效减少部分火电机组的最大功率。

(2) 本文所建立的柔性负荷模型使得可平移负荷从用电高峰时段转移至低谷时段,并且优化后的负荷曲线明显优于优化前的负荷曲线,有效缓解了用电高峰时段的压力。

(3) 本文将两种情形下(即是否考虑柔性负荷)的弃风量、碳交易成本以及绿证成本进行对比,得到考虑柔性负荷后的3项指标均低于未考虑柔性负荷时的指标值,证明了柔性负荷的引入可以更好地促进风电消纳和发挥碳交易-绿证机制的作用。

参考文献:

- [1] 黄伟,柳思岐,叶波. 考虑源-荷互动的园区综合能源系统站-网协同优化[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14):44-53.
HUANG Wei, LIU Siqu, YE bo. Station-network cooperative optimization of integrated energy system for park considering source-load interaction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14):44-53.
- [2] 卓振宇,张宁,谢小荣,等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9):171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9):171-191.
- [3] 陈俐,彭道鑫,张翔宇,等. 计及碳排放权交易与需求响应的风电并网调度优化模型[J]. 华北电力大学学报, 2016, 43(1):104-110.

(下转第45页)