

文章编号:1673-5005(2019)01-0145-09

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2019.01.018

# 计及绿证交易和发电权交易的含光伏系统 两级优化调度

王艳松, 宋阳阳, 宗雪莹

(中国石油大学(华东)信息与控制工程学院, 山东青岛 266580)

**摘要:**油田的电力供应主要来源于自备电厂,随着油田电网大规模光伏发电的接入,针对自备热电厂收益降低和绿色配额约束的问题,引入绿证交易和发电权交易,以油田为全局、以自备热电厂为局部,制定两级优化策略。考虑双方收益均衡问题,基于博弈理论,建立油田全局供电博弈模型,针对自备热电厂内部优化问题,计及可行性约束、技术性约束和政策性约束,建立自备热电厂机组出力优化模型。利用教与学优化算法求解模型,得到自备热电厂与光伏博弈均衡解和热电厂最优机组组合出力。结果表明:考虑绿证交易和发电权交易的两级优化均衡了热电厂及光伏的利益,提高了自备热电厂的效益,在满足绿色配额约束下,减轻了政府可再生能源补贴压力,提高了社会的全局效益。

**关键词:**光伏发电;绿证交易;发电权交易;机组出力优化;教与学优化

**中图分类号:**TM 62      **文献标志码:**A

**引用格式:**王艳松,宋阳阳,宗雪莹.计及绿证交易和发电权交易的含光伏系统两级优化调度[J].中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(1):145-153.

WANG Yansong, SONG Yangyang, ZONG Xueying. Two-level optimal dispatch of power system with photovoltaic power generation based on green certificate trading and generation rights trading[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(1): 145-153.

## Two-level optimal dispatch of power system with photovoltaic power generation based on green certificate trading and generation rights trading

WANG Yansong, SONG Yangyang, ZONG Xueying

(College of Information and Control Engineering in China University of Petroleum (East China),  
Qingdao 266580, China)

**Abstract:** The power supply of oil field is mainly from its own off-grid thermoelectric power plant. With the access of large-scale photovoltaic power generation into oil field power grid, green certificate trading and generation rights trading usually lead to problems such as low revenue and green quota restrictions. A two-level optimization strategy, in which the oil field is at the first level and the local thermoelectric plant the second level, is proposed. Considering the revenue balance between the two levels, a game model of power supply for oilfield is established based on game theory between the thermoelectric plant and photovoltaic power producer. In view of the internal optimization problem of the thermoelectric plant, and taking into account the feasibility, technical and policy constraints, an optimization model for the thermoelectric plant unit output is established. Using the teaching and learning optimization algorithm to solve the model, game equilibrium solution between thermoelectric and photovoltaic, and optimal unit commitment of the thermoelectric plant can be achieved. The example analysis shows that the two-level optimal dispatch, which considers green certificate trading and power generation trading, balances

收稿日期:2018-06-29

基金项目:国家重点研发计划(2018YFB0904800)

作者简介:王艳松(1965-),女,教授,博士,硕士生导师,研究方向为电网的优化规划与运行控制、电网故障诊断与配电自动化、电力负荷预测及电能质量分析与谐波治理等。E-mail:wys91517@163.com。

通信作者:宋阳阳(1993-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统优化调度。E-mail:604765963@qq.com。

the benefits of the thermoelectric and the photovoltaic plants, and improves the efficiency of the thermoelectric plant. Under the pressure of green quota, this also leads to significant reduction in government's renewable energy subsidies, and improvement of overall social benefit.

**Keywords:** photovoltaic power generation; green certificate trading; generation rights trading; unit commitment optimization; teaching-learning-based optimization

为促进可再生能源开发和利用,政府设计了不同的要求发电商采购可再生能源电力的方法,其中可再生能源配额制度,也称绿色证书交易制度是较为常见的一种。绿证制度已在美、英、法、日等多国得以应用<sup>[1-2]</sup>。绿色证书配额制在美国应用很成功,地方、企业和电网有绿色配额,必须每年购买一定数量的绿色电力,因此美国不存在弃风弃光的问题。由于可再生能源发电具有不可控性<sup>[3-4]</sup>,对电力系统的调峰提出了挑战。吕泉等<sup>[5-6]</sup>对提高传统热电机组调峰能力的措施进行了研究。李佳佳等<sup>[7-9]</sup>以热/电系统煤耗量最低为目标,建立热电联产消纳可再生能源调度模型,降低了热电厂收益。为了减轻国家的补贴压力<sup>[10]</sup>,激励传统火电机组参与调峰,提高社会全局效益,中国鼓励新能源发电与自备电厂进行发电权交易<sup>[11]</sup>,自2018年将可再生能源补贴从单一补贴方式逐步转向“配额制+绿证交易”方式<sup>[12-14]</sup>。华夏等<sup>[15-16]</sup>分析了引入发电权交易后的利益空间,实现了自备电厂和可再生能源利益共享,建立了双赢模型,但并未考虑绿色配额约束和社会全局效益。赵文会<sup>[17]</sup>综合考虑碳交易和绿色证书交易,以区域最大净收益为目标,建立各供电商之间交易模型,根据交易电量对增量利润进行分配,但并未涉及各台机组发电量的最优分配问题<sup>[18-19]</sup>。中国各大油田是石化能源的产能大户,也是耗能大户,其所需电力主要来源于自备热电厂,为达到绿色配额制的要求,油田电网逐步提高可再生能源渗透率。笔者以油田为典型研究背景,以市电为无限大平衡节点,利用绿色配额约束提高光伏消纳的同时,兼顾自备热电厂收益和政府可再生能源补贴压力,引入绿证交易和发电权交易,提出油田和自备热电厂上下两级优化调度策略,兼顾热电厂、光伏发电商的利益,基于博弈理论<sup>[20-21]</sup>达到油田全局收益均衡,并进一步优化自备热电厂内部的机组出力,在不影响光伏发电商收益的基础上最大化热电厂收益。

## 1 油田全局的发电博弈模型

油田中的自备热电厂和光伏发电全部自发自用,自备热电厂的日等效上网电量为零,仅当油田自

发电量不足时由市电供给,作为油田最大发电方的自备热电厂通常采用计划调峰模式,为光伏发电提供发电空间,近年来随着油田电网中光伏接入容量的不断增大,热电厂发电量大幅降低,严重影响了热电厂的利益;光伏发电占用大量热电厂发电空间,同时享受大额政府补贴的,降低了社会全局效益。

为了提高社会全局效益,以政府的监督和控制为基础,在电力市场中引入绿色证书交易和发电权交易,形成辅助调峰模式,热电厂以出售发电权的方式为光伏发电提供上网空间,同时通过购买绿色证书完成绿色配额的任务。在辅助交易调峰模式下,发电权和绿色证书交易量影响热电厂和光伏发电商的利益分配,为均衡双方利益,需以热电厂和光伏发电商为主体进行博弈。

### 1.1 热电厂综合收益模型

油田自备热电厂既为油田生产和生活提供电力,也担负着冬季供暖。发电权交易是指发电企业将基数电量合同、优先发电合同等合同电量,通过电力市场的交易平台,以双边协商、集中竞价、挂牌等市场化方式向其他发电企业进行转让的交易行为。在辅助交易调峰模式下,热电厂与新能源企业进行发电权交易时从中获得收益,其中热电厂为满足绿色配额约束,需要认购绿色证书,并支付绿证购买费用,因此热电厂辅助交易收益  $C_{\text{pass}}$  是由发电权和绿证交易决定的,如下式所示:

$$C_{\text{pass}} = C_{\text{ptf}} - C_{\text{psub}} = \sum_{t=1}^T (c_{\text{if}} P_{\text{pvt}} - c_{\text{sub}} P'_{\text{pvt}}). \quad (1)$$

式中,  $C_{\text{ptf}}$ 、 $C_{\text{psub}}$  分别为发电权交易收益和绿色证书认购费用,元;  $P_{\text{pvt}}$ 、 $P'_{\text{pvt}}$  分别为  $t$  时段发电权交易量和绿色证书认购量, kW;  $c_{\text{sub}}$ 、 $c_{\text{if}}$  分别为单位绿色证书交易价格和单位发电权交易价格,元/kW;  $T$  为日调度周期,取 24 h。

自备热电厂与光伏发电商进行发电权和绿证交易后,热电厂实际承担的油田电负荷为热电厂合同电量与发电权交易量之差,绿证交易量与热电厂实际承担的油田电负荷的比值需达到配额制要求。

通过搜集自备热电厂的发电量与发电收益的历史数据、供暖量与供暖收益的历史数据,可以拟合热

电厂发电收益函数  $C_{ine}(\cdot)$  和供暖收益函数  $C_{inh}(\cdot)$ , 热电厂供能收益  $C_{pinc}$  包括发电收益和供暖收益两部分:

$$C_{pinc} = C_{pine} + C_{pinh} = \sum_{t=1}^T [C_{ine}(P_{et} - P_{pvt}) + C_{inh}(P_{ht})]. \quad (2)$$

式中,  $C_{pine}$ 、 $C_{pinh}$  分别为热电厂发电收益和供暖收益, 元;  $P_{et}$  为  $t$  时段热电厂合同电量, kW;  $P_{ht}$  为  $t$  时段系统供暖负荷, kW。

在辅助交易调峰模式下, 综合考虑热电厂的供能收益和辅助交易收益, 建立热电厂综合收益模型

$$C_p = C_{pinc} + C_{pass}. \quad (3)$$

## 1.2 光伏发电商综合收益模型

光伏发电商初始投资可折算到等值年偿还, 进一步可将等值年费用平均到每日, 计及投资等值费用、运行维护费用和发电权交易支出费用, 光伏发电商的日综合发电成本  $C_{pvinc}$  为

$$C_{pvinc} = C_{pvCP} + C_{pvOM} + C_{pvtf} = C_{Bpv} \frac{r(1+r)^y}{(1+r)^y - 1} / 365 + C_{pvOM} + \sum_{t=1}^T c_{if} P_{pvt}. \quad (4)$$

式中,  $C_{pvCP}$ 、 $C_{pvOM}$ 、 $C_{pvtf}$  分别为光伏发电商的日等值投资费用、运行维护费用和发电权交易支出, 元;  $C_{Bpv}$  为光伏板的初始投资, 元;  $r$  为折现率, 取 7.6%;  $y$  为光伏板的工程寿命, 取 25 a;  $c_{if}$  为单位发电权交易价格, 元/kW。

光伏发电商的日上网电量收益  $C_{pvc}$  包括售电收益、政府补贴以及绿色证书交易收益:

$$C_{pvc} = C_{pvs} + C_{pvG} + C_{pvsSub} = \sum_{t=1}^T (c_{pvin} P_{pvt} + c_{sub} P'_{pvt} + c_{subG} (P_{pvt} - P'_{pvt})). \quad (5)$$

式中,  $C_{pvs}$ 、 $C_{pvG}$ 、 $C_{pvsSub}$  分别为日售电收益、政府补贴和绿证交易收益, 元;  $c_{subG}$ 、 $c_{pvin}$  分别为政府对光伏发电的补贴价格和光伏售电价格, 元/kW。

综合考虑光伏发电商发电成本和上网电量收益, 建立光伏发电商日综合收益模型:

$$C_{pv} = C_{pvinc} - C_{pvc}. \quad (6)$$

计及光伏年发电量, 得到光伏渗透率:

$$\delta = \sum_{t=1}^T P_{pvt} / \sum_{t=1}^T P_{allt}. \quad (7)$$

式中,  $\delta$  为光伏渗透率, %;  $P_{allt}$  为  $t$  时段油田总电负荷量, kW。

## 1.3 博弈模型

将自备热电厂和光伏发电商作为博弈主体, 自

备热电厂选取发电权交易价格和绿色证书认购量  $\{c_{if}, P'_{pvt}\}$  构成控制策略; 光伏发电商选取单位绿色证书价格和发电权交易量构成控制策略  $\{c_{sub}, P_{pvt}\}$ , 2 个博弈者的纯策略组合为  $[\{c_{if}, P'_{pvt}\}, \{c_{sub}, P_{pvt}\}]$ 。

油田全局供电博弈时, 基于  $n-1$  轮博弈优化中光伏发电商的最优博弈策略  $\{c_{sub}^{*(n-1)}, P_{pvt}^{*(n-1)}\}$  和热电厂的最优博弈策略  $\{c_{if}^{*(n-1)}, P'_{pvt}^{*(n-1)}\}$ , 分别建立第  $n$  轮热电厂的最优策略模型

$$\{c_{if}^{*(n)}, P'_{pvt}^{*(n)}\} = \arg \max_{c_{if}, P'_{pvt}} C_p(c_{if}, P'_{pvt}, c_{sub}^{*(n-1)}, P_{pvt}^{*(n-1)}). \quad (8)$$

第  $n$  轮光伏发电商的最优策略模型如下式所示:

$$\{c_{sub}^{*(n)}, P_{pvt}^{*(n)}\} = \arg \max_{c_{sub}, P_{pvt}} C_{pv}(c_{if}^{*(n-1)}, P'_{pvt}^{*(n-1)}, c_{sub}, P_{pvt}). \quad (9)$$

在博弈过程中, 光伏发电商通过发电权交易获得上网空间, 因此仅有获得发电权指标的光伏发电功率允许上网, 光伏上网量与发电权交易量相等, 且绿证交易量为光伏上网量的一部分。

热电厂需考虑绿色配额、电价政策和运行安全性约束。

绿色证书认购量与热电厂实际承担的油田电负荷的比值称为热电厂绿色发电占比  $\beta$ , 应满足配额约束:

$$\beta = \frac{\sum_{t=1}^T P'_{pvt}}{\sum_{t=1}^T (L_{et} - P_{pvt})} \geq 15\%. \quad (10)$$

式中,  $L_{et}$  为交易前热电厂  $t$  时段电负荷, kW。自备热电厂与可再生能源的绿证交易量约束为

$$P'_{pvt} \leq P_{pvt}. \quad (11)$$

根据政府政策发电权交易价格约束为

$$c_{if} \leq c_{ifmax}. \quad (12)$$

式中,  $c_{ifmax}$  为政策规定的发电权交易价格最大值, 元/kW。

光伏发电商需考虑定价政策和运行技术性约束, 如式(13)和(14)所示。

发电权交易量约束:

$$P_{pvt} \leq P_{pvtmax}. \quad (13)$$

绿证交易价格约束:

$$c_{sub} \leq c_{subG}. \quad (14)$$

式中,  $P_{pvt}$  为  $t$  时段光伏上网功率, kW;  $P_{pvtmax}$  为  $t$  时段光伏发电功率, kW。

## 2 热电厂内部机组出力优化模型

基于热电厂的最优博弈策略和热电厂合同电量,可以得到热电厂实际承担的油田电负荷  $P_{pet}$ :

$$P_{pet} = P_{et} - P_{pvt}^* \quad (15)$$

式中,  $P_{et}$  为  $t$  时段热电厂合同电量, kW;  $P_{pvt}^*$  为  $t$  时段热电厂博弈后的最优发电权交易量, kW。

热电厂的供能成本与其发电、供暖量呈非线性关系,不同容量机组的耗量特性也不相同,为提高自备热电厂的供能收益,需对热电厂各机组出力进行优化。

计及发电收入和供暖收入,热电厂的日供能收入  $C_{ps}$  如下式所示:

$$C_{ps} = C_{sh} + C_{se} = c_h \sum_{t=1}^T P_{ht} + c_e \sum_{t=1}^T P_{pet} \quad (16)$$

式中,  $C_{se}$ 、 $C_{sh}$  分别为发电收入和供暖收入,元;  $P_{ht}$ 、 $P_{pet}$  分别为  $t$  时段供暖负荷和热电厂实际承担的油田电负荷, kW;  $c_h$ 、 $c_e$  分别为售热价格和售电价格,元/kW。

综合考虑设备折旧维护费用、运行管理费用和燃料费用,热电厂的日运行成本  $C_{pc}$  如下式所示:

$$C_{pc} = C_{pDP} + C_{pOM} + C_{pFC} = C_{pOM} + \sum_{t=1}^T (C_{DPt} + C_{FCt}) \quad (17)$$

式中,  $C_{pDP}$ 、 $C_{pOM}$ 、 $C_{pFC}$  分别为热电厂的折旧维护费用、运行管理费用和燃料费用,元;  $C_{DPt}$ 、 $C_{FCt}$  分别为  $t$  时段折旧维护费用和燃料费用,元。

其中燃料费用  $C_{FCt}$  和折旧维护费用  $C_{DPt}$  如下式所示:

$$C_{FCt} = \sum_{i=1}^N c_{fuel} \times F_i(P_{it}) \quad (18)$$

$$C_{DPt} = \sum_{i=1}^N P_{it} \times C_{Bi} \frac{r(1+r)^{y_i}}{(1+r)^{y_i} - 1} / (P_{imax} \times t_{iy}) \quad (19)$$

式中,  $N$  为热电厂机组台数;  $c_{fuel}$  为煤炭价格,取 800 元/t;  $F_i(P_{it})$  为机组  $i$  的煤耗特性函数;  $P_{it}$  为  $t$  时段机组  $i$  的总出力, kW;  $P_{imax}$  为机组  $i$  的出力上限, kW;  $C_{Bi}$  为机组  $i$  的初始投资,元;  $r$  为折现率,取 12%;  $y_i$  为机组  $i$  的工程寿命, a;  $t_{iy}$  为机组  $i$  的年可利用小时数, h。

综合考虑热电厂供能收入和运行成本,以热电厂供能收益最大为目标,建立目标函数如下式所示:

$$\max C_{pinc} = C_{ps} - C_{pc} \quad (20)$$

综合考虑机组出力技术约束、功率平衡约束、政

策约束,建立约束条件。

机组热出力约束:

$$0 \leq P_{iht} \leq P_{ihmax} \quad (21)$$

机组出力上下限约束:

$$u_{it} P_{imin} \leq P_{it} \leq u_{it} P_{imax} \quad (22)$$

$$P_{it} = P_{iet} + \alpha_i P_{iht} \quad (23)$$

机组爬坡约束:

$$u_{it}(P_{it-1} - P_i^d) \leq P_{it} \leq u_{it}(P_{it-1} + P_i^r) \quad (24)$$

电功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^N u_{it} P_{iet} = P_{pet} + P_{gridt} + P_{selft} \quad (25)$$

$$P_{selft} = \sum_{i=1}^N (P_{iet} + \alpha_i P_{iht}) \lambda_i \quad (26)$$

热功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^N u_{it} P_{iht} = P_{ph} \quad (27)$$

自备热电厂等效上网电量为零的政策约束:

$$\sum_{t=1}^T P_{gridt} = 0 \quad (28)$$

式中,  $P_{imin}$ 、 $P_{imax}$ 、 $P_{ihmax}$  分别为机组  $i$  的出力下限、上限和产热上限, kW;  $P_{iet}$ 、 $P_{iht}$  分别为  $t$  时段机组  $i$  的发电量和供暖量, kW;  $u_{it}$  为  $t$  时段机组  $i$  的启停状态, 1 为运行状态, 0 为停机状态;  $P_i^r$ 、 $P_i^d$  分别为机组  $i$  的最大上坡功率和最大下坡功率, kW;  $P_{gridt}$ 、 $P_{selft}$  分别为  $t$  时段与市网交换功率(正为上网送电,负为从网上买电)和热电厂厂用电功率, kW;  $\alpha_i$ 、 $\lambda_i$  分别为机组  $i$  单位供暖量减少的发电量和机组  $i$  发电厂用电率。

## 3 两级模型的求解方法

### 3.1 两级优化策略

针对油田电网中自备热电厂与光伏收益均衡问题和热电厂机组出力优化问题,制定以油田为全局、以自备热电厂为局部的两级优化策略。

油田全局发电博弈:引入辅助交易,基于博弈理论,以热电厂与光伏发电商各自的综合收益最大为目标进行博弈,最终达到 Nash 均衡。

热电厂内部机组优化:基于博弈的最优策略,针对热电厂实际承担的油田电负荷,以供能收益最大为目标,在满足各种约束的前提下,优化热电厂内部机组出力,降低供能成本。

### 3.2 基于教与学优化算法的求解

教与学优化算法 (teaching-learning-based optimization algorithm, TLBO) 通过模拟一个自然班的教

学行为,实现对复杂问题的求解。首先对种群进行初始化并设置迭代次数;随后,选出适应度最优的个体作为教师,通过“教”的行为来提升种群的平均值;最后,种群中的学生通过“相互学习”向相对优秀的个体靠近,实现优势互补,从而继续提升种群的整体水平。循环“教”与“学”的过程,直至满足终止条件。

本文中采用教与学优化算法求解发电博弈模型和机组出力优化模型的流程,如图1所示。

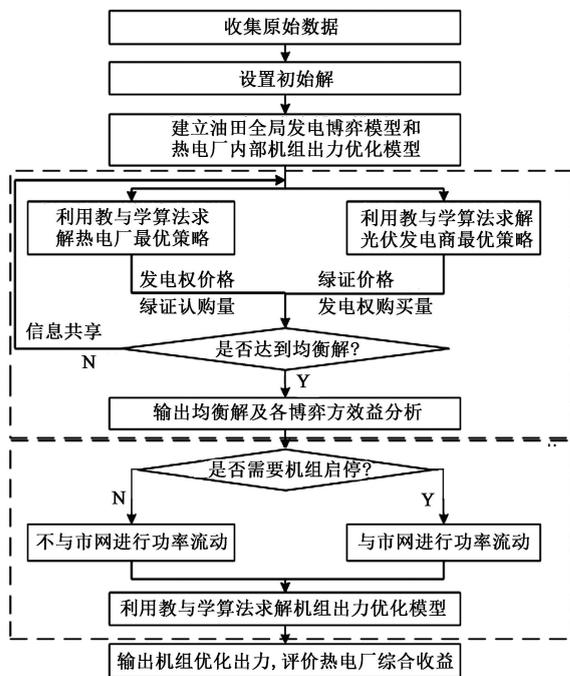


图1 两级优化求解流程

Fig. 1 Flow charts for solving bi-level optimization

关键步骤说明如下。

步骤1,收集并输入原始数据和参数,主要包括光伏出力预测数据、光伏接入容量、负荷预测数据、热电厂机组技术参数和运行参数、电价信息、光伏补贴政策。

步骤2,设置初始解作为初始博弈最优策略  $\{ \{ C_{if}^{*(0)}, P_{pvt}^{*(0)} \}, \{ C_{sub}^{*(0)}, P_{pvt}^{*(0)} \} \}$ 。

步骤3,建立油田全局供电博弈模型和热电厂内部机组出力优化模型。

步骤4,油田全局博弈优化。

(1)应用光伏发电商  $n-1$  轮博弈策略  $\{ C_{sub}^{*(n-1)}, P_{pvt}^{*(n-1)} \}$  的基础上,利用教与学优化算法求解热电厂第  $n$  轮最优策略。应用热电厂  $n-1$  轮博弈策略  $\{ C_{if}^{*(n-1)}, P_{pvt}^{*(n-1)} \}$  的基础上,利用教与学优化算法求解光伏发电商第  $n$  轮最优策略模型。

(2)判断是否达到均衡解的条件:若连续两次

迭代所得到的解相同,则认为此次博弈达到了均衡点,若未达到均衡点,返回步骤(1)。

(3)通过博弈策略的循环优化,得到 Nash 均衡解即各发电商最优交易策略,发电权交易价格、单位绿色证书价格、发电权指标交易量、绿色证书认购量,分析各博弈方综合收益。

步骤5,热电厂内部机组出力优化。

(1)判断热电厂在当前油田发电份额分配情况下,是否需要进行机组启停,当需要机组启停时,则通过与市网功率交换避免启停。

(2)基于油田全局发电博弈的最优交易策略,利用教与学优化算法求解热电厂机组出力优化模型。设置种群规模为20,迭代次数为50。

步骤6,根据机组出力优化结果计算热电厂供能收益,评价热电厂综合收益。

## 4 算例分析

以油田电网为例,发电厂一期装机容量为  $2 \times 220$  MW、二期为  $2 \times 300$  MW。2017年引入80 MW 光伏,为达到绿色发电占比15%<sup>[22]</sup>,后期需对光伏进行扩容。油田年用电量约70亿  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ,其中86%由油田发电厂承担,同时,发电厂冬季日供暖为7万 GJ,火电价格为0.4023元/ $(\text{kW} \cdot \text{h})$ ,供暖价格为41元/GJ。光伏日发电曲线见图2,光伏价格为0.57元/ $(\text{kW} \cdot \text{h})$ ,政府补贴为0.42元/ $(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

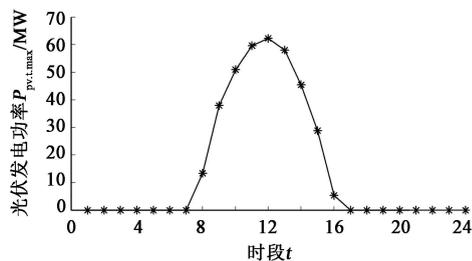


图2 80 MW 光伏日发电曲线

Fig. 2 80 MW photovoltaic power generation curve

按电/热负荷特性,在一年四季中,由于春秋季节典型日电负荷相似,夏季典型日电负荷较大,冬季典型日存在供暖负荷,因此本文中按春/秋、夏和冬三类季节典型日进行分析。

### 4.1 光伏渗透率对各主体收益的影响

以春/秋季典型日为例,当油田光伏发电渗透率为15.17%时,对应的自备电厂绿色发电占比可达到21.42%,能够满足绿色配额制要求。

按计划调峰模式,各利益主体的收益或补贴随着光伏渗透率的变化规律如图3所示。

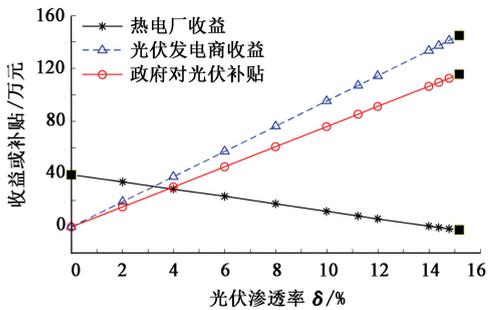


图3 计划调峰各主体收益与光伏渗透率的关系  
Fig.3 Relation of individual's income and pv penetration in planning mode

由图3可以看出,在计划调峰模式下,热电厂和光伏发电的收益和政府补贴均与光伏发电渗透率呈线性关系,光伏发电渗透率每增加1%,热电厂日收益减少2.757万元,光伏发电商日收益增加9.552万元,政府对可再生能源补贴支出增加7.620万元。

按辅助调峰模式,绿色发电占比与光伏渗透率的关系如图4所示,其各利益主体的收益或补贴随着光伏渗透率的变化规律如图5所示。

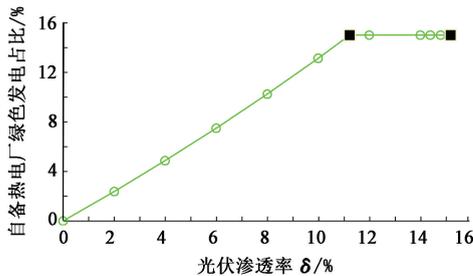


图4 辅助调峰绿色发电占比与光伏渗透率的关系  
Fig.4 Relation of green generation and pv penetration in secondary trading mode

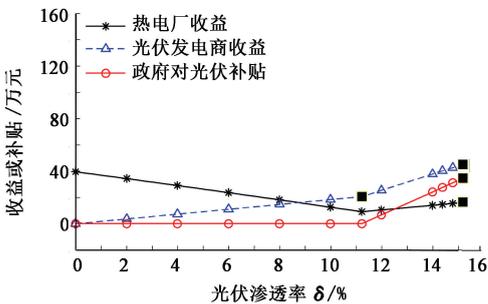


图5 辅助调峰各主体收益与光伏渗透率的关系  
Fig.5 Relation of individual's income and pv penetration in secondary trading mode

对比图4和图5可以看出,辅助调峰模式下,热电厂、光伏商和政府各方收益与光伏渗透率不再呈线性关系,当光伏渗透率处于[0, 11.21%)时,由于光伏发电量未达到热电厂绿色配额15%的要求,因此光伏绿色发电全部被热电厂认购,政府补贴为0,

且随着光伏渗透率的增加,热电厂绿证认购支出增加,光伏渗透率每增加1%,热电厂绿色发电占比增加1.338%,收益减少2.709万元,光伏发电商收益增加1.842万元;当光伏渗透率处于[11.21%, 15.17%]时,热电厂绿色发电占比达到15%,满足了绿色配额要求,热电厂不再购买更多的绿色证书,此时,发电权指标出售量大于绿色证书购买量,热电厂收益回升,同时,未被认购的光伏发电接受政府的补贴,光伏渗透率每增加1%,热电厂收益增加1.830万元,光伏发电商收益增加6.217万元,政府补贴支出增加8.753万元。

4.2 辅助调峰模式下的优化策略和经济性分析

在春/秋季典型日中,当光伏渗透率为11.98%时,达到绿色配额制15%的要求,在辅助交易模式下,应用本文算法得到的博弈策略为:发电权交易价格为0.215元/kW,绿色证书价格为0.210元/kW,各时段的发电权指标交易量和绿色证书认购量如图6所示;各时段的热电厂机组优化出力及其与市网功率交换情况如图7所示。

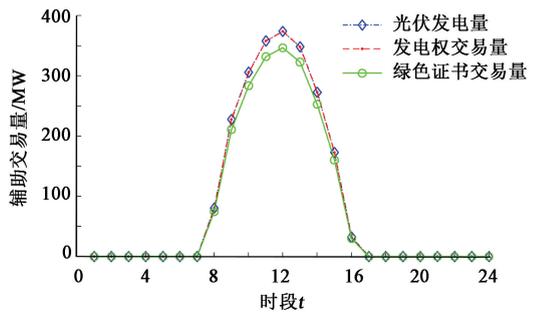


图6 发电权交易量和绿证认购量曲线  
Fig.6 Curve of power generation rights transactions and green certificate subscriptions

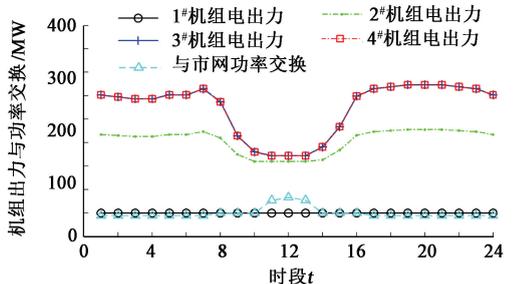


图7 热电厂机组优化出力和市网功率交换曲线  
Fig.7 Curve of units optimized outputs and network power exchange

由图6和7可以看出,发电权交易量曲线与光伏发电量曲线重合,光伏全部被消纳,无弃光现象发生;光伏发电商的上网电量大于热电厂配额制要求,即绿证认购量略低于发电权交易量。热电厂1#机

组处于停机状态,2#、3#、4#机组全天运行,在12~13时段,2#、3#、4#机组处于机组出力下限,热电厂通过向市网送电避免机组在日调度期内启停,为满足等效上网电量为零的政策约束,其他时段由市网向热

电厂送电。

针对春/秋、夏、冬三类季节的典型日油田负荷情况,对比热电厂内部机组出力优化前后的热电厂经济指标,如表1所示。

表1 热电厂内部机组优化对热电厂经济指标的影响

Table 1 Influence of units optimization on economic indexes of thermal power plant

季节典型日	机组出力优化前					机组出力优化后				
	实际电负荷/万kW	发电收益/万元	供暖收益/万元	辅助交易收益/万元	净收益/万元	实际电负荷/万kW	发电收益/万元	供暖收益/万元	辅助交易收益/万元	净收益/万元
春/秋季典型日	1342.71	5.890	—	4.4180	10.308	1342.71	6.108	—	4.4180	10.526
夏季典型日	1462.71	23.984	—	4.4232	28.407	1462.71	24.125	—	4.4232	28.548
冬季典型日	1462.71	61.560	92.51	4.4216	158.490	1462.71	61.810	92.60	4.4216	158.830

由表1分析可知,根据热电厂实际承担的油田电负荷变化优化热电厂内部机组出力,实现了热/电负荷最优分配。在春/秋季典型日中,热电厂发电收益增加,辅助交易收益不变,日净收益增加0.218万元;在夏季典型日中,热电厂发电收益增加,辅助交易收益不变,日净收益增加0.141万元;在冬季典型日中,热电厂发电和供暖收益增加,辅助交易收益不变,日净收益增加0.34万元。

由此可见,基于博弈的热电厂最优发电量,对机组出力进行优化,增加了发电厂的日净收益,其中冬季收益最大。

在春/秋季典型日中,热电厂实际承担的油田电负荷为1342.71万kW·h/d,光伏上网电量为217.29万kW·h/d,计划调峰模式和辅助调峰模式下自备热电厂和光伏发电商的运营经济指标对比,如表2所示。

表2 不同调峰模式下热电厂与光伏发电商经济指标对比

Table 2 Economic indexes comparison between thermal power plant and photovoltaics power producer in different pattern of peak-load regulation

调峰模式	热电厂						光伏发电商						
	日发电量/(万kW·h)	单位发电成本/(元·kW <sup>-1</sup> )	发电收益/万元	发电权收入/万元	绿证交易支出/万元	净收益/万元	日发电量/(万kW·h)	单位发电成本/(元·kW <sup>-1</sup> )	售电收益/万元	政府补贴/万元	发电权支出/万元	绿证交易补贴/万元	净收益/万元
计划调峰	1342.71	0.3978	6.1078	—	—	6.1078	217.29	0.4635	23.1382	91.2618	—	—	114.400
辅助调峰	1342.71	0.3978	6.1078	46.713	42.295	10.5270	217.29	0.4635	23.1382	6.6711	46.713	42.295	25.392

由表2分析,在发电量相同的基础上,春/秋季典型日中,热电厂辅助交易调峰与计划调峰相比,净收益增加了4.4192亿元,光伏发电商通过购买发电权指标获得上网空间,发电权支出46.713万元,同时部分电量被热电厂认购,不再享受政府补贴,净收益降低了89.008万元,政府补贴降低了84.6万元,社会效益增加了84.6万元。由此可见,辅助交易实现了热电厂和光伏发电商的利益均衡,通过降低政府可再生能源补贴压力,提高了社会全局效益。

(3)两级优化策略在保证热电厂与光伏利益均衡的基础上,根据调度周期内电负荷波动优化热电厂机组出力,进一步降低了发电成本,有效地提高了热电厂供能收益。

## 参考文献:

- [1] APARICIO N, MACGILL I, ABBAD J R, et al. Comparison of wind energy support policy and electricity market design in Europe, the United States, and Australia [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3 (4): 809-818.
- [2] HASANI-MARZOONI M, HOSSEINI S H. Dynamic interactions of TGC and electricity markets to promote wind capacity investment [J]. IEEE Systems Journal, 2012, 6 (1): 46-57.
- [3] CHAI C I, LEE W J, FUANGFOO P, et al. System impact study for the interconnection of wind generation and utility system [J]. IEEE Transactions on Industry Appli-

## 5 结论

(1)在辅助调峰模式下,随着光伏渗透率的增加,热电厂、光伏发电商的收益和政府补贴在满足绿色配额约束处会出现拐点。

(2)引入绿证交易和发电权交易的辅助调峰模式均衡了自备热电厂与光伏的收益,同时减轻了政府对可再生能源补贴压力,提高了社会全局效益。

- cations, 2005, 41(1):163-168.
- [4] HUANG D, SHU Y, RUAN J, et al. Ultra high voltage transmission in China: developments, current status and future prospects[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(3):555-583.
- [5] 吕泉, 陈天佑, 王海霞, 等. 配置储热后热机组调峰能力分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11):34-41. LÜ Quan, CHEN Tianyou, WANG Haixia, et al. Analysis on peak-load regulation ability of cogeneration unit with heat accumulator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11):34-41.
- [6] 吕泉, 陈天佑, 王海霞, 等. 热电厂参与风电调峰的方法评述及展望[J]. 中国电力, 2013, 46(11):129-136, 141. LÜ Quan, CHEN Tianyou, WANG Haixia, et al. Review and perspective of integrating wind power into CHP power system for peak regulation[J]. Electric Power, 2013, 46(11):129-136, 141.
- [7] 李佳佳, 胡林献. 基于二级热网电锅炉调峰的消纳弃风方案研究[J]. 电网技术, 2015, 39(11):3286-3291. LI Jiajia, HU Linxian. Research on accommodation scheme of curtailed wind power based on peak-shaving electric boiler in secondary heat supply network[J]. Power System Technology, 2015, 39(11):3286-3291.
- [8] 吕泉, 陈天佑, 王海霞, 等. 含储热的电力系统电热综合调度模型[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5):79-85. LÜ Quan, CHEN Tianyou, WANG Haixia, et al. Combined heat and power dispatch model for power system with heat accumulator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5):79-85.
- [9] 魏小淤. 储热系统在解决光伏消纳问题中的应用[J]. 供用电, 2017, 34(4):19-23. WEI Xiaoyu. Application of thermal energy storage for absorbing photovoltaic energy[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(4):19-23.
- [10] 张晓. 我国可再生能源电力价格与补贴分析[D]. 南昌:江西财经大学, 2015. ZHANG Xiao. The analysis of renewable energy electricity price and subsidies in our country[D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics, 2015.
- [11] 尚金成. 基于节能减排的发电权交易理论及应用(一)发电权交易理论[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12):46-52. SHANG Jincheng. Generation right exchange theory and its applications based on energy-saving and emission-reducing: part one-generation right exchange theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12):46-52.
- [12] 徐基光. 基于绿色证书交易的含风电系统低碳经济调度[J]. 中国电力, 2016, 49(7):145-150. XU Jiguang. Low-carbon economic dispatching for power grid integrated with wind power system based on the green certificate trading mechanism[J]. Electric Power, 2016, 49(7):145-150.
- [13] 金秋龙, 刘文霞, 成锐, 等. 基于完全信息动态博弈理论的光储接入网源协调规划[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21):112-118. JIN Qiulong, LIU Wenxia, CHENG Rui, et al. Coordinated planning model for photovoltaic station, storage battery and grid based on complete information dynamic game[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21):112-118.
- [14] 钟宇峰, 黄民翔, 文福拴, 等. 计及绿色证书交易机制的大用户直购电市场均衡分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2):144-150. ZHONG Yufeng, HUANG Minxiang, WEN Fushuan, et al. Equilibrium analysis of direct electricity purchase with green certificate mechanism[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2):144-150.
- [15] 华夏, 罗凡, 张建华, 等. 促进新能源消纳的自备电厂发电权交易模式可行性探讨[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12):200-206. HUA Xia, LUO Fan, ZHANG Jianhua, et al. Feasibility analysis of trade mode promoting new energy consumption based on generation rights trade of self-generation power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12):200-206.
- [16] 王剑波, 谭正卯, 刘瑞叶. 自备电厂发电权交易模式及能耗效益最优研究[J]. 黑龙江电力, 2011, 33(1):43-45, 49. WANG Jianbo, TAN Zhengmao, LIU Ruiye. Study on generation right transaction mode and optimization of energy-saving and efficiency for self-owned power plant[J]. Heilongjiang Electric Power, 2011, 33(1):43-45, 49.
- [17] 赵文会. 计及碳交易和绿色证书交易机制的发电权交易模型[J]. 可再生能源, 2016, 34(8):1129-1137. ZHAO Wenhui. Generation rights trade model with carbon trading and green certificate trading mechanisms[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(8):1129-1137.
- [18] 王伟, 常浩, 石永锋, 等. 面向综合经济效益最大化的全厂负荷分配[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9):54-60. WANG Wei, CHANG Hao, SHI Yongfeng, et al. Power plant load distribution for optimal comprehensive eco-

- conomic benefit [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2015,35(9):54-60.
- [19] 黎静华,兰飞. 适合于机组组合问题的扩展优先顺序法[J]. *电力系统保护与控制*,2010,38(2):1-7.  
LI Jinghua, LAN Fei. Extended priority list method for unit commitment problem[J]. *Power System Protection and Control*, 2010,38(2):1-7.
- [20] 梅生伟. 一类电力系统鲁棒优化问题的博弈模型及应用实例[J]. *中国电机工程学报*,2013,33(19):47-56.  
MEI Shengwei. A game model for robust optimization of power systems and its application [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013,33(19):47-56.
- [21] 王晶,王宗礼,陈骏宇,等. 基于萤火虫优化算法的电网源-荷博弈模型及分析[J]. *电力系统自动化*, 2014,38(21):7-12.  
WANG Jing, WANG Zongli, CHEN Junyu, et al. A game model for DGs-loads in microgrid based on firefly algorithm and its analysis [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014,38(21):7-12.
- [22] 赵新刚,冯天天,杨益晟. 可再生能源配额制对我国电源结构的影响机理及效果研究[J]. *电网技术*, 2014,38(4):974-979.  
ZHAO Xingang, FENG Tiantian, YANG Yisheng. Impacting mechanism of renewable portfolio standard on china's power source structure and its effect [J]. *Power System Technology*, 2014,38(4):974-979.

(编辑 修荣荣)