

考虑多源互补特性的新能源打捆销售交易策略

张晋磊¹,付春立¹,唐志均²,张思逸¹,杜锡力³,王允祥³

(1. 大唐凉山新能源有限公司,四川 成都 610094;2. 四川大唐国际新能源有限公司,四川 成都 610094;
3. 四川大学电气工程学院,四川 成都 610065)

摘要:随着新能源交易电量在电力市场的比例迅猛上升,为解决由于新能源出力波动性造成的中长期电力市场合同履行执行率的问题,提出了一种考虑多源互补的新能源场站打捆销售的电力市场交易策略。首先,设计了新能源场站与常规机组打捆销售的中长期交易框架,提出了通过集中式交易平台调整机组出力满足新能源合同签订电量的联盟交易方案;其次,以多源互补联盟交易模型收益最大为目标,构建了基于合作博弈的新能源场站打捆销售交易模型;最后,以四川某区域风电场的实际数据对所构建交易模型进行了仿真分析,对打捆销售联盟的交易电量和收益结果进行了讨论。仿真结果表明,多源互补合作交易的方式在提高参与主体收益的基础上还能满足电力市场的合同签订电量。

关键词:新能源场站交易联盟;多源互补;中长期交易;打捆销售

中图分类号:TM 73 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2024)03-0031-08

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240306

Trading Strategy for Bundle Sales of Renewable Energy Stations Considering Multi-source Complementary Characteristics

ZHANG Jinlei¹, FU Chunli¹, TANG Zhijun², ZHANG Siyi¹, DU Xili³, WANG Yunxiang³

(1. Datang Liangshan New Energy Co., Ltd., Chengdu 610094, Sichuan, China;2. Sichuan Datang International New Energy Co., Ltd., Chengdu 610094, Sichuan, China; 3. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: With the rapid increase of trading electricity of renewable energy in electricity market, and in order to solve the problem of execution rate of medium and long-term electricity market contract performance due to the output fluctuation of renewable energy, an electricity market trading strategy for bundled sales of renewable energy stations is proposed considering multi-source complementation. Firstly, a medium and long-term trading framework for bundled sales of renewable energy stations and conventional units is designed, and an alliance trading scheme is proposed to adjust the unit output to meet the contracted energy quantity of renewable energy contracts through a centralized trading platform. Secondly, aiming at the maximum revenue of multi-source complementary alliance trading model, a bundled sales trading model for renewable energy stations based on cooperative game is constructed. Finally, the constructed trading model is simulated and analyzed with the actual data of wind farms in a certain region of Sichuan, and the results of trading volume and revenue of bundled sales alliance are discussed, which shows that the way of multi-source complementary cooperative trading can satisfy the contracted energy quantity in electricity market on the basis of improving the revenue of the participating entities.

Key words: trading alliance of renewable energy stations; multi-source complementation; medium and long-term trading; bundled sales

0 引言

随着双碳目标和新型电力系统建设要求的提

出,新能源正在逐步成为新型电力系统的主导电力与电量来源^[1],同时在电力市场的深入推进下,新能源凭借边际成本低的优势在电力市场的能量交易中竞争力明显^[2-3]。中长期电力市场交易有利于促

进新能源场站的消纳、稳定电力市场的供需平衡。但受高比例新能源出力随机性和波动性强等因素的影响,新能源在参与电力市场过程中的合同执行率难以得到保障。通过解决新能源在中长期交易合同履行过程中的偏差电量,可进一步提高新能源场站的稳定消纳能力。因此,研究设计新能源场站与电源侧其他主体在电力市场的联盟打捆出售交易策略具有重要意义。

目前,中国新能源场站参与电力市场的交易模式尚处于初级阶段,中长期电力市场下电能量结算是其收益的主要来源。现有研究大多从新能源场站中长期市场的交易机制设计和交易偏差电量结算方面来进行研究。在中长期市场的交易机制设计方面,文献[4]分析了不同阶段高比例新能源电力市场架构,市场逐步向电力中长期-现货-辅助服务市场一体化演进,机制逐步向集中式与分布式并存演进,新能源收益更依赖于从市场多主体的协同交易中获得;文献[5]总结了电力市场不同时间尺度下的衔接问题,设计了中长期电力市场交易方式和机制;文献[6]主要从宁夏省新能源电力中长期交易机制的政策解读出发,对新能源中长期市场下发电权交易进行了总结;文献[7]计及容量成本分摊得到的分时容量成本,提出了系统平均成本和边际成本、发电弃电和用户失负荷价值4种电力市场交易典型场景下的中长期分时段交易电价形成机制;文献[8]提出了考虑不同电源侧主体特性的中长期合约电量分解机制,设计了计及合约分解的省内电力市场出清策略。在中长期市场的偏差电量结算方面,文献[9]通过考虑电力市场交易主体的交易优先级,将新能源交易合同中的年度交易电量分解到了月度交易电量中,构建了以提高新能源场站消纳为目标的新能源中长期交易电量协调优化模型;文献[10]根据不同场景下基数电量和偏差电量,分别提出了偏差电量替代法、预期收益补偿法以及平均价差补偿法3种结算方法;文献[11-12]提出了不同的新能源场站合同交易电量的分解方式和结算方式,分别通过考虑新能源在交易市场的比例和电量预测方法构建了新能源电量优化分解模型,但均未考虑与短期电力市场交易策略协同优化以及滚动修正的问题。

总体而言,新能源场站参与电力市场的交易

方式较为单一,在中长期市场交易合同的履约过程中由于超发和弃电存在的电力不平衡导致难以与电力市场的调度计划合理衔接;另一方面,受限于可调节性灵活资源的影响,以提升新能源场站消纳率为基础,亟需研究新能源联合其他电源侧主体下联合出清的中长期交易机制以及市场合同履约的新方式,保证新能源场站交易合同的可执行性。

为此,下面提出了一种考虑多源互补特性的新能源场站打捆销售交易策略。以新能源场站的电力优先消纳为主,设计了多源互补下新能源场站中长期打捆销售交易框架与机制,通过集中式交易平台调整常规机组出力满足新能源合同签约电量。在此基础上,以电力市场交易联盟收益最大化为目标,构建了新能源场站电力市场合作博弈交易模型。算例对比分析了有无打捆销售对于新能源场站交易结果的影响,验证了所提的多源互补联盟交易策略模型的有效性,为后续新能源场站参与电力市场的提质增效研究奠定了基础。

1 考虑多源互补的新能源场站交易机制设计

1.1 新能源场站中长期打捆销售交易框架

以多个新能源场站与常规机组打捆销售为例研究考虑多源互补的新能源场站合作博弈电力市场交易机制,交易框架如图1所示。在该交易框架下,同一区域内新能源场站与常规机组组成电力交易联盟,通过联络线实现场站间信息交互与交易电量的传递功能。在电力市场交易过程中,新能源场站与常规机组进行打捆销售电力,在最大化电力交易合作联盟的基础上,常规机组通过调节自身出力弥补

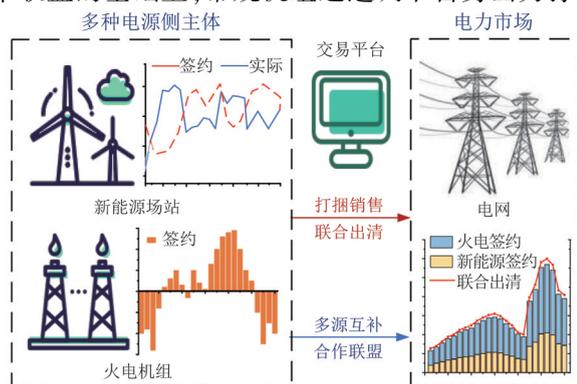


图1 多源互补下新能源场站交易框架

新能源场站出力的波动性,满足新能源场站与常规机组打捆销售的合同电量,合作联盟形成了稳定的出力结构,实现了区域内多种电源侧主体的联合出清。

1.2 多源互补下新能源场站交易策略设计

所提出的新能源场站交易策略构建了新能源场站与常规机组的电力交易模型,通过获取新能源场站和常规机组在每个时刻的电量签约情况和出力情况,以新能源场站为主,对比新能源场站的合同签约电量和实际发电功率,确定联盟内参与主体的运行状态,优先执行新能源场站的合同签约电量,通过协调联盟中参与主体的出力,提高新能源场站和联盟的整体收益。

如图2所示,基于合作博弈的新能源场站参与电力市场打捆联盟交易策略,按照新能源场站的实际出力进行划分,详述如下:

新能源场站合同签约电量存在功率缺额时,通过调整常规机组出力弥补新能源场站缺额签约电量。这时存在两种情况:1)常规机组可以完全弥补新能源场站的缺额功率;2)常规机组最大出力无法满足新能源场站的缺额功率,新能源场站产生合同缺额电量。

新能源场站实际发电功率存在发电过剩时,通过降低常规机组出力来提高新能源场站的消纳。这时也存在两种情况:1)常规机组向下调整出力可以完全消纳新能源场站超发的合同外电量;2)常规机

组向下调整出力无法全部消纳新能源场站超发的合同外电量,新能源场站产生弃电量。

2 新能源场站中长期市场交易合作博弈模型构建

2.1 博弈的基本元素分析

1)参与者:新能源场站 N_w 和常规机组 N_u 。将参与者集合表示为 $N=[N_w, N_u]$ 。

2)策略:新能源场站和常规机组在 t 时刻的打捆上网电量。具体包括:新能源场站的决策变量,即 t 时刻的实际上网电量 $P_w(t)$;常规机组的决策变量,即 t 时刻的实际上网电量 $P_u(t)$ 。将参与者策略表示为 $\Omega=[P_w(t), P_u(t)]$ 。

3)支付:针对电力市场下新能源场站交易策略问题,在电力市场合同电量交易期内设计新能源场站和常规机组的支付函数,满足新能源场站和常规机组合作联盟收益最大化。将参与者支付表示为 $I=[I_w, I_u]$ 。

2.2 新能源场站合作博弈模型构建

2.2.1 目标函数

新能源场站电力市场交易模型的总收益 I_t 包括新能源场站的收益 I_w 、常规机组的收益 I_u 以及新能源场站和常规机组打捆销售产生的偏差考核成本 C_p 。综上,可将合作博弈模型的特征函数表述为

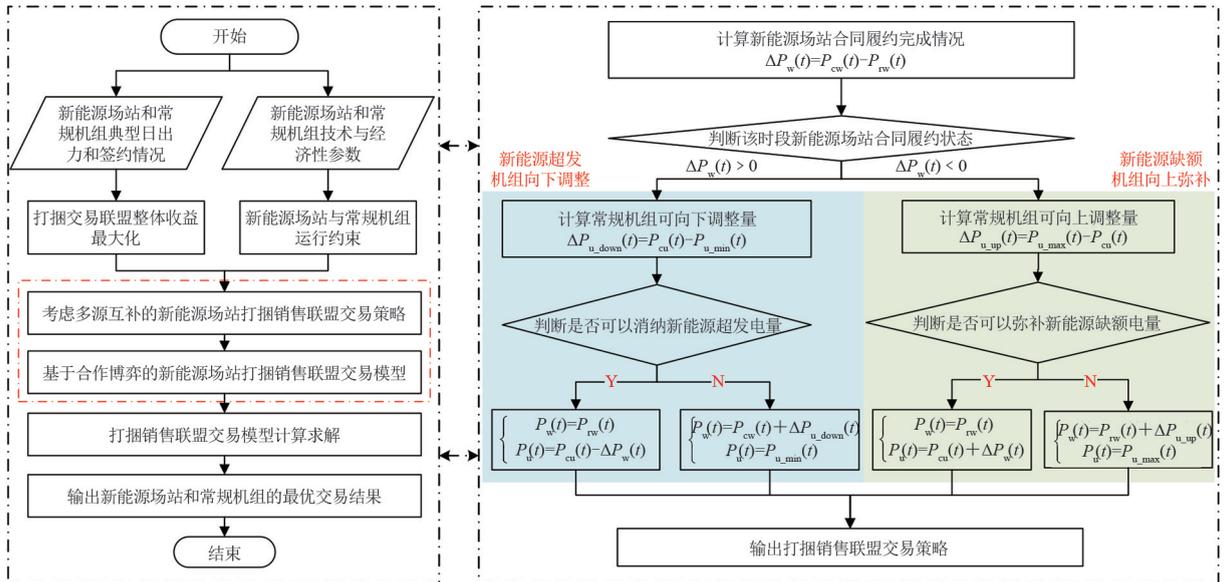


图2 新能源场站打捆联盟交易策略与求解

$$\max I_f = I_w + I_u - C_p$$

$$\begin{cases} I_w = \sum_{t=1}^T R_w(t)P_w(t)\Delta t \\ I_u = \sum_{t=1}^T R_u(t)P_u(t)\Delta t + I_{uc} - C_{u,on} - C_{u,off} \\ I_{uc} = \sum_{t=1}^T R_{uc}(t)(P_{cu}(t) - P_u(t))\Delta t \quad P_{cu}(t) - P_u(t) > 0 \\ C_p = \xi_p \sum_{t=1}^T |P_e(t) - P_w(t) - P_u(t)|\Delta t \\ C_{u,on} = \xi_{on} \sum_{t=1}^T \left[\frac{|\lambda(t) - \lambda(t-1)| + (\lambda(t) - \lambda(t-1))}{2} \right] \Delta t \\ C_{u,off} = \xi_{off} \sum_{t=1}^T \left[\frac{|\lambda(t) - \lambda(t-1)| - (\lambda(t) - \lambda(t-1))}{2} \right] \Delta t \end{cases} \quad (1)$$

式中： $R_w(t)$ 为新能源场站在 t 时刻实际上网的价格； $R_u(t)$ 为常规机组在 t 时刻实际上网的价格； $R_{uc}(t)$ 为常规机组在 t 时刻关停补偿的价格； I_{uc} 为常规机组关停补偿的费用； $C_{u,on}$ 、 $C_{u,off}$ 分别为常规机组的开机成本和关机成本； ξ_p 为电力市场合作联盟的偏差考核系数； $P_{cu}(t)$ 为常规机组在 t 时刻的合同签约电量； $P_e(t)$ 为电力市场中 t 时刻新能源场站和常规机组打捆销售的合约签约电量； ξ_{on} 、 ξ_{off} 分别为常规机组的开机成本系数和停机成本系数； $\lambda(t)$ 为 t 时刻常规机组的开机和停机状态的布尔变量，其中 $\lambda(t) = 1$ 表示开机， $\lambda(t) = 0$ 表示停机。

2.2.2 约束条件

1) 新能源场站与常规机组的合同签约打捆销售比例以及联络线传输功率的约束表示为

$$\text{s.t.} \begin{cases} P_{cw} : P_{cu} = 1 : n \\ P_e(t) = P_{cw}(t) + P_{cu}(t) \\ P_{l,min} \leq P_e(t) \leq P_{l,max} \end{cases} \quad (2)$$

式中： P_{cw} 为新能源场站合同签约电量； $1:n$ 为新能源场站与常规机组的合同签约电量的打捆销售比例； $P_{l,max}$ 、 $P_{l,min}$ 分别为联络线传输功率的上限和下限。

2) 常规机组的出力约束、爬坡约束和开停机约束表示为

$$\text{s.t.} \begin{cases} \lambda(t)P_{u,min} \leq P_u(t) \leq \lambda(t)P_{u,max} \\ V_{u,down} \leq P_u(t) - P_u(t-1) \leq V_{u,up} \\ [\lambda(t) - \lambda(t-1)][t_{on}(t) - t_{on,min}] \geq 0 \\ [\lambda(t-1) - \lambda(t)][t_{off}(t) - t_{off,min}] \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $P_{u,max}$ 、 $P_{u,min}$ 分别为常规机组出力的上限和下限； $V_{u,up}$ 、 $V_{u,down}$ 分别为常规机组向上、向下爬坡速率； $t_{on}(t)$ 、 $t_{off}(t)$ 分别为常规机组的累计开、停机时间； $t_{on,min}$ 、 $t_{off,min}$ 分别为常规机组的最短开、停机时间。

3) 考虑多源互补的新能源场站交易联盟的交易策略约束与实际上网电量约束如式(4)一式(8)所示，其中式(4)表示新能源场站在合同履行过程中存在的超发/缺额电量以及常规机组调整/弥补的灵活出力电量；式(5)一式(8)表示电力打捆销售联盟不同情况下的交易策略。

$$\begin{cases} \Delta P_w(t) = P_{cw}(t) - P_{rw}(t) \\ \Delta P_{u,up}(t) = P_{u,max}(t) - P_{cu}(t) \\ \Delta P_{u,down}(t) = P_{cu}(t) - P_{u,min}(t) \end{cases} \quad (4)$$

当 $\Delta P_w(t) > 0 \cap \Delta P_{u,up}(t) > \Delta P_w(t)$ 时，

$$\begin{cases} P_w(t) = P_{rw}(t) \\ P_u(t) = P_{cu}(t) + \Delta P_w(t) \end{cases} \quad (5)$$

当 $\Delta P_w(t) > 0 \cap \Delta P_{u,up}(t) < \Delta P_w(t)$ 时，

$$\begin{cases} P_w(t) = P_{rw}(t) + \Delta P_{u,up}(t) \\ P_u(t) = P_{u,max}(t) \end{cases} \quad (6)$$

当 $\Delta P_w(t) < 0 \cap \Delta P_{u,down}(t) > \Delta P_w(t)$ 时，

$$\begin{cases} P_w(t) = P_{rw}(t) \\ P_u(t) = P_{cu}(t) - \Delta P_w(t) \end{cases} \quad (7)$$

当 $\Delta P_w(t) < 0 \cap \Delta P_{u,down}(t) < \Delta P_w(t)$ 时，

$$\begin{cases} P_w(t) = P_{cw}(t) + \Delta P_{u,down}(t) \\ P_u(t) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中： $P_{cw}(t)$ 、 $P_{rw}(t)$ 分别为新能源场站在 t 时刻的合同签约电量和实际发电出力； $P_{u,max}(t)$ 、 $P_{u,min}(t)$ 分别为常规机组在 t 时刻的最大出力和最小出力； $\Delta P_w(t)$ 为新能源场站在 t 时刻的合同签约电量履约状态； $\Delta P_{u,up}(t)$ 、 $\Delta P_{u,down}(t)$ 分别为常规机组 t 时刻在满足自身合同签约电量外的向上、向下可调整灵活出力。

2.3 新能源场站合作博弈模型收益分配

基于合作博弈的电力市场交易模型兼顾联盟的整体理性和新能源场站与常规机组的个体理性，在参与者追求自身收益最大化的基础上将电力市场合作打捆售出带来的收益增量按照一定的方法分配给各个成员，参与者的个体收益和联盟的合作收益之和就是新能源场站与常规机组分配到的最终收益

值^[13]。计算新能源场站电力市场合作交易模型产生的收益增量 ΔI_f , 需要计算联盟组建之前的常规机组的收益 I_{cu} 、新能源场站的出力偏差惩罚费用 C_{cw} 、合同签约偏差考核费用 C_{pw} 和履约电量收益 I_{cw} , 如式(9)所示。

$$\Delta I_f = I_f - I_{cw} - I_{cu} - C_{pw}$$

$$\begin{cases} I_{cw} = \sum_t R_w(t) P_{cw}(t) \Delta t - C_{cw} \\ I_{cu} = \sum_t R_u(t) P_{cu}(t) \Delta t - C_{u,on} - C_{u,off} \\ C_{pw} = \xi_p \sum_t |\Delta P_w(t)| - \alpha \cdot P_{cw}(t) \Delta t, \\ \Delta P_w(t) > \alpha \cdot P_{cw}(t) \\ C_{cw} = \xi_w \sum_t |\Delta P_w(t)| \Delta t \end{cases} \quad (9)$$

式中: α 为电力市场合同允许的偏差比例; ξ_w 为新能源场站出力偏差的惩罚系数。

综上, 考虑到常规机组在联盟打捆销售中的贡献度, 将多源互补联盟创造的增量效益的比例 η 分配给常规机组, 将增量效益的 $1-\eta$ 分配给新能源场站, 形成新能源场站-常规机组“共赢”的方案。

3 算例分析

3.1 参数设置

采用四川省某区域3个风电场(330 MW、130 MW、50 MW), 对所提出的新能源电力市场合作交易模型进行算例分析。选取风电场2023年3月典型日中96个时段的风电场实际出力和签约电量, 如图3所示。常规机组在3月典型日中的签约电量如图4所示。参考2023年3月该区域风电场在四川电力交易中心的交易情况, 设置的电力市场交易实际签约价格为401元/MWh。参考2023年国家能源局发布的2022年可再生能源发展情况, 设置常规机组的电力市场实际签约价格为449元/MWh。设置常规机组厂商和新能源厂商的收益增量分配比例分别为0.56和0.44^[14]。算例所采用的时间间隔 T 为0.25 h。

根据四川省2023年省内电力市场交易总体方案, 结合本算例设置新能源场站和常规机组的打捆销售比例按照1:2计算, 常规机组的关停补偿价格为80元/MWh。参考2023年四川电力市场结算细

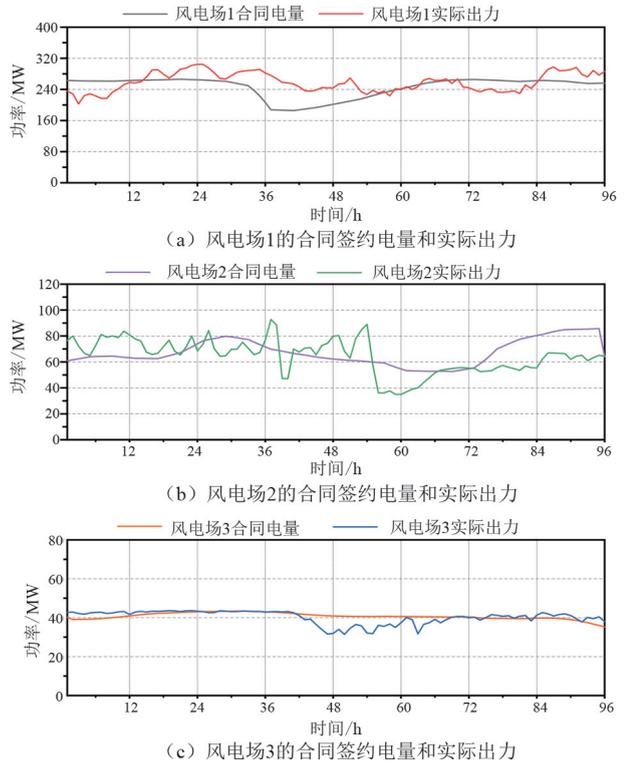


图3 新能源场站的合同签约电量和实际出力

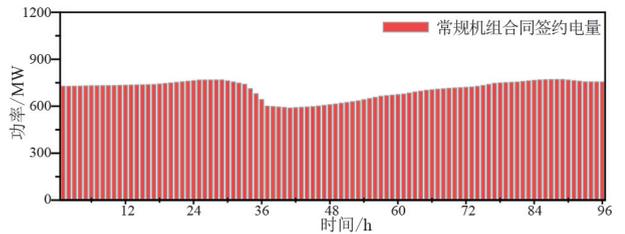


图4 常规机组的合同签约电量

则^[15], 电力市场偏差量在合同交易电量2%及以下的部分, 按照新能源场站交易价格的10%支付偏差考核费用; 在2%以上的部分, 按照新能源场站交易价格的50%支付偏差考核费用。

3.2 多源互补打捆销售联盟交易结果分析

为更好地对比分析多源互补交易联盟对新能源场站交易电量以及收益的影响, 设置了以下3种场景进行对比分析:

1) 初始场景: 新能源场站按场站实际出力通过交易平台签订的初始合约电量进行交易。

2) 场景1: 风电场与常规机组在交易平台根据出力情况独立决策完成交易。

3) 场景2: 风电场通过交易平台与常规机组联合出清完成交易。

3.2.1 风电场和常规机组电量交易情况分析

计及打捆销售的联盟主体交易电量结果如表1所示。从表1可以看出, 风电场机组组建联盟的情

况下(场景 2)新能源场站总体交易电量比场景 1 增加了 2 485.04 MW,较场景 1 提高了 7.6%。需要指出的是,相较于初始签约的合同电量,风电场 2 和风电场 3 的交易电量分别降低了 283.33 MW 和 51.27 MW,这是由于风电场 2 和风电场 3 在全天的电量交易中,将其超发时段的电量交易后,仍然存在合同未履约电量,需要进行场站间(风电场 1)的电量协调或者用常规机组进行弥补。常规机组在场景 1 时与初始场景一致,按照合同签约电量进行交易。在场景 2 中,为消纳新能源场站发电过剩的功率,常规机组整体下调交易电量 866.01 MW。

相较于风电场和常规机组组建联盟进行交易的场景,独立决策时打捆交易电量降低 1 619.03 MW,这是由于新能源场站出力的波动性,造成场景 1 下全部风电场在典型日全天的实际出力整体低于预测出力,联盟存在合同履约电量缺额情况。此外场景 2 下打捆交易电量与初始合同签约电量保持一致,这是由于风电场通过交易平台协调常规机组满足自身的合同电量。

表 1 计及打捆销售的联盟主体交易电量结果

交易主体	初始场景	场景 1	场景 2
风电场 1/MW	23 636.44	22 883.85	24 837.06
风电场 2/MW	6 478.74	5 748.31	6 195.40
风电场 3/MW	3 916.16	3 780.14	3 864.88
新能源总体/MW	34 031.34	32 412.31	34 897.35
常规机组/MW	68 062.68	68 062.68	67 196.67
打捆联盟/MW	102 094.02	100 474.99	102 094.02

联盟内不同时段风电场和常规机组的交易情况如图 5 所示,主要分析了风电场场间的协调出力情况和常规机组合同外出力情况以及参与主体的合同电量履约情况。

观察图 5(a)中 3 个风电场合同电量外的超发电量 and 欠发电量时段以及图 5(b)联盟内主体的协调出力时段和变化趋势,同时结合图 2 交易策略流程可以发现在合作模式下,打捆销售联盟执行了不同情况下的策略,使得各风电场的合同未履约电量均得到满足,其中风电场间协调交易电量 660.71 MW,常规机组合同外上调交易电量为 958.32 MW,合同外下调交易电量为 1 824.32 MW。综上,在风电场和常规机组打捆销售比例 1:2 的情况,风电场和常规机组能够完全满足初始整体合同签约电量。风电场通过交易平台调整常规机组出力也增加了风电场的交易电量,实现了风电场之间的 100%消纳,提升

了联盟整体的电力交易水平。

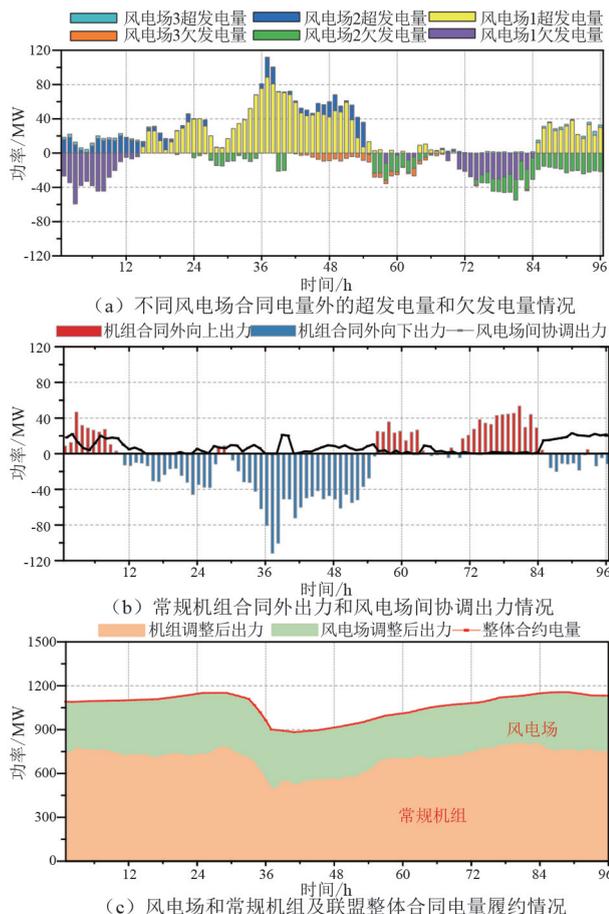


图 5 风电场和常规机组不同时段交易情况分析

3.2.2 风电场和常规机组电力市场收益分析

计及打捆销售的联盟主体收益结果如表 2 所示。从表 2 可以看出,打捆销售联盟的总体收益增加了 11 077 773.12 元,相较于场景 1 风电场收益额外增加了 273 487.46 元,常规机组额外增加了 306 436.93 元。同时联盟产生额外增量收益 289 962.19 元,按照增量收益分配比执行,风电场分配收益 162 378.83 元,常规机组分配收益 127 583.37 元。此外,联盟内参与主体根据电力市场“谁受益、谁分担”的分摊原则,风电场承担了常规机组向下调整出力降低的收益。综上,可见通过常规机组与新能源之间的打捆交易,有效促进了新能源的消纳和各方收益的提升。

风电场和常规机组在不同场景下收益情况如图 6 所示。单一的风电场发电难以产生稳定的电力输出,组成联盟的新能源场站间协调出力能够充分利用风电场在同一时段的不同出力特性而可以产生稳定的电力输出,使得风电场的消纳能力和合同履约能力得到提升,风电场的收益也得到提升。

表2 计及打捆销售的联盟主体收益结果

参数	数值/元	参数	数值/元
联盟		联盟额外	
总体收益	11 077 773.12	增加收益	289 962.19
风电场联盟增量		常规机组联盟	
分配收益	162 378.83	增量分配收益	127 583.37
风电场		常规机组	
增加收益	273 487.46	增加收益	306 436.93
风电场		常规机组	
售电收益	3 498 459.39	售电收益	7 542 827.15
风电场偏差		常规机组	
考核费用	101 559.36	补偿收益	36 486.57

■ 独立合约 ■ 独立决策 ■ 联合出清

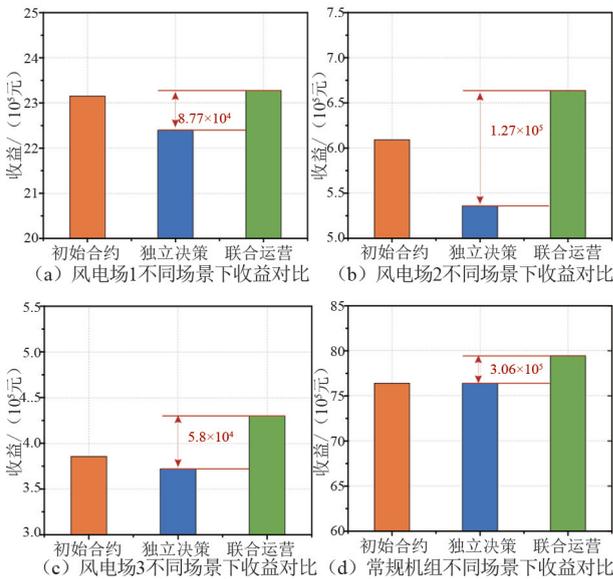


图6 多源互补联盟参与主体在不同场景下收益情况

综上所述,相较于场景1,场景2下风电场1、风电场2、风电场3收益分别增加了87 785.81元、127 683.32元、58 018.32元,提高的主要原因是通过减少风电场偏差考核和联盟产生的增量收益来提高各风电场收益。同时,与场景1相比,常规机组在参与联合出清时的收益提高14.7%,其通过交易平台在满足合同签约电量外还可以获得电力市场关于关停替代的补偿费用36 486.57元。上述结果表明新能源场站和常规机组的合作联盟在提高多源互补联盟整体收益的同时还实现了多个新能源场站间与常规机组间资源的灵活互补。

4 结论

上面对考虑了电力市场打捆销售的新能源场站

交易策略进行了研究,为新能源场站在四川省电力市场的收益增收渠道与合同签约方式提供了有益的参考,主要得出以下结论:

1)设计了多源互补的新能源场站电力市场交易机制。该机制能够实现多个新能源场站间以及常规机组的灵活性互补,形成稳定的出力结构。风电场和常规机组的总体交易电量较独立决策提高了1.61%。

2)建立了合作博弈的新能源场站电力市场交易模型。该模型在最大化电力交易合作联盟的基础上,通过常规机组与新能源之间的打捆交易,有效促进了新能源的消纳和各方收益的提升,实现了风电场和常规机组的联合出清。该模型下新能源场站交易合作联盟总体收益提高了2.69%。

所提交易策略未对联盟的最佳打捆销售比例以及联盟不同电源侧主体组合下的交易策略进行研究,后续将综合考虑风、光、水、火等不同电源侧主体的响应特性,研究不同主体组合下联盟的交易策略,并寻找不同电力市场交易联盟的最佳打捆比例。

参考文献

- [1] 张英杰.构建以新能源为主体的新型电力系统的发展路径研究[J].电工技术,2022(18):172-174.
- [2] 国家能源局,国家发展改革委.国家能源局关于积极推进风电、光伏发电无补贴平价上网有关工作的通知[EB/OL].(2019-01-10)[2023-12-06].http://www.nea.gov.cn/2019-01/10/c_137731320.htm.
- [3] 娄奇鹤,谢国辉,李娜娜.平价上网时代新能源发电经济性分析和发展趋势[J].中国电力,2019,52(12):1-9.
- [4] 孙瑜歌,丁涛,黄雨涵,等.高比例新能源电力市场不同发展阶段划分及形态结构演进[J].高电压技术,2023,49(7):2725-2743.
- [5] 宋少群,郑旭冬,程鑫,等.现货市场过渡期的中长期电力市场交易机制分析[J].电气应用,2021,40(2):93-97.
- [6] YAO Y T, GAO C W, TIAN H J, et al. Review of mid-to long-term trading mechanism for renewable electricity consumption in Ningxia, China [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 134: 110325.
- [7] 黄姗姗,叶泽,罗迈,等.中国电力中长期市场分时段交易价格形成机制及模型[J].中国电力,2023,56(1):17-27.
- [8] 李竹,宋莉,于松泰,等.促进可再生能源市场化的省内

中长期运行策略研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(2): 317-325.

- [9] 许彦平, 黄越辉, 李湃, 等. 计及优先级及电力平衡的新能源中长期交易电量分解方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(17): 117-125.
- [10] 徐帆, 谢旭, 施磊, 等. 电力中长期市场基数偏差电量处理方法分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 186-191.
- [11] 何蕾, 包铁, 刘闯, 等. 可再生能源年度合同电量优化分解及滚动修正算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(11): 56-65.
- [12] 赵书强, 胡利宁, 田捷夫, 等. 基于中长期风电光伏预测的多能源电力系统合约电量分解模型[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 13-19.
- [13] 孙偲, 陈来军, 邱欣杰, 等. 基于合作博弈的发电侧共享储能规划模型[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(4):

360-366.

- [14] 田海青, 郭金辉, 周瑜, 等. 基于合作博弈模型的新能源参与电力交易的调控策略[J]. 现代电力, 2022, 39(6): 640-648.
- [15] 四川电力交易中心. 2023 年四川电力市场结算细则[R]. 成都: 四川电力交易中心, 2023.

作者简介:

张晋磊(1977), 男, 高级工程师, 从事新能源管理工作;
付春立(1973), 男, 高级工程师, 从事新能源管理工作;
唐志均(1984), 男, 高级工程师, 从事新能源管理工作;
张思逸(2000), 男, 高级工程师, 从事新能源管理工作;
杜锡力(1998), 男, 博士研究生, 研究方向为电力市场、新能源与储能规划运行技术;
王允祥(2001), 男, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车有序充放电。

(收稿日期: 2024-01-07)

(上接第 21 页)

- [5] 江崇熙, 周靖皓, 石鹏, 等. 考虑超低频振荡的水轮机调速器参数多目标鲁棒设计[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 125-131.
- [6] 贺静波, 张剑云, 李明节, 等. 直流孤岛系统调速器稳定问题的频域分析与控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 137-143.
- [7] 路晓敏, 陈磊, 陈亦平, 等. 电力系统一次调频过程的超低频振荡分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 64-70.
- [8] 付超, 柳勇军, 涂亮, 等. 云南电网与南方电网主网异步联网系统试验分析[J]. 南方电网技术, 2016, 10(7): 1-5.
- [9] 张建新, 刘春晓, 陈亦平, 等. 异步联网方式下云南电网超低频振荡的抑制措施与试验[J]. 南方电网技术, 2016, 10(7): 35-39.
- [10] 史华勃, 陈刚, 丁理杰, 等. 兼顾一次调频性能和超低频振荡抑制的水轮机调速器 PID 参数优化[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 221-226.
- [11] 贺子润. 水电高占比电网超低频振荡机理分析与抑制方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [12] CHEN G, TANG F, SHI H B, et al. Optimization strategy of hydro-governors for eliminating ultra low frequency oscillations in hydro-dominant power systems [J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(3): 1086-1094.
- [13] 牛梓宇. 水电直流孤岛系统超低频振荡分析及调速器参数优化[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [14] WANG G T, XU Z, GUO X Y, et al. Mechanism analysis and suppression method of ultra-low-frequency oscillations

caused by hydropower units[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 103: 102-114.

- [15] 李洋. 应用 SVC 的附加控制抑制新疆皇林线低频振荡的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2013.
- [16] 马幼捷, 陈寿孙, 张宝霖. SVC 非线性控制对改善电力系统稳定的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1994(4): 1-8.
- [17] 赵士正, 李雪峰, 蔡卫江. 基于遗传算法的 SVC 电力系统低频振荡抑制技术[J]. 甘肃科学学报, 2021, 33(3): 148-152.
- [18] 蔡卫江, 李雪峰, 赵士正. 基于粒子群算法的 SVC 抑制阻尼系统振荡控制器设计[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(5): 60-65.

作者简介:

郭亮(1982), 男, 高级工程师, 从事电力系统调度自动化工作;
赵静(1982), 女, 高级工程师, 从事电力系统调度自动化工作;
邓志森(1978), 男, 高级工程师, 从事电力系统调度自动化工作;
杨小磊(1985), 男, 高级工程师, 从事电力系统调度自动化工作;
史华勃(1987), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制;
吕飞鹏(1968), 男, 博士, 教授, 研究方向为继电保护和智能变电站;
王渝红(1971), 女, 博士, 教授, 研究方向为高压直流输电、新能源并网等;
李沛阳(2001), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流电网。

(收稿日期: 2024-01-12)