DOI:10. 3969/j. issn. 2097-0706. 2022. 02. 010

电力现货市场背景下的水电出力优化与光伏发电消纳

Hydropower generation optimization and photovoltaic generation consumption in the spot market for electricity

王一铮[1],胡嘉骅[1],唐琦雯[2],赵一琰[3],沈琪[4]
WANG Yizheng[1],HU Jiahua[1],TANG Qiwen[2],ZHAO Yiyan[3],SHEN Qi[4]

(1.国网浙江省电力有限公司经济技术研究院,杭州 310020;2.国网浙江省电力有限公司,杭州 310007;3.国网浙江省电力有限公司电力科学研究院,杭州 310014;4.杭州华电半山发电有限公司,杭州 310015)
(1.Economic and Technology Research Institute,State Grid Zhejiang Electric Power Company Limited,Hangzhou 310020,China;2.State Grid Zhejiang Electric Power Company Limited,Hangzhou 310007,China;3.Electric Power Research Institute,State Grid Zhejiang Electric Power Company Limited,Hangzhou 310014,China;4.Hangzhou Huadian Banshan Power Generation Company Limited,Hangzhou 310015,China)

摘 要:在"双碳"目标实现、新型电力系统建设和电力现货市场建设中,水电发挥着重要的灵活调节作用的同时,面临着发电收益下降的风险。水电机组可以通过出力优化来提升自身的市场化发电收益,同时为光伏等新能源提供更多消纳空间。基于浙江电力现货市场,针对水电机组出力优化和光伏发电消纳进行研究。对现货市场背景下的水电与光伏发电特点以及二者之间的关系进行分析。构建了水电机组出力的优化模型,在日发电量和日发电能力不变的前提下,优化水电日内发电策略,最大化水电机组的市场化发电收益。以浙江3次电力现货结算试运行为案例进行分析,并针对现货市场建设和新能源消纳提出建议。

关键词:"双碳"目标;电力现货市场;光伏发电;出力优化;新能源消纳
中图分类号:TK 79 **文献标志码**:A **文章编号**:2097-0706(2022)02-0073-07

Abstract: In the construction of new power system and electricity spot market to achieve the goals of carbon peaking and carbon neutrality, hydropower plays a crucial role in boosting the flexibility of power regulation. But it might reduce the total revenue of power generation. Hydropower generation units can increase their income of power generation by optimizing the output, and strengthen the renewable energy accommodation capacity of the power grid. Taking the spot market for electricity in Zhejiang as the example, the optimal scheduling of hydropower and the consumption of photovoltaic power are studied. The characteristics of hydropower and photovoltaic power in the power spot market and their interrelationship are analyzed. Then, based on the output optimization model of a hydropower unit, an optimal power generation strategy pursuing the maximum power generation revenue under constant power generation and daily power generation capacity is made. Three settle transactions during the trial operation of the energy spot market in Zhejiang are analyzed, and corresponding suggestions for the energy spot market construction and renewable energy accommodation are put forward.

Keywords: goals of carbon peaking and carbon neutrality; electricity spot market; PV power; output optimization, renewable energy accommodation

0 引言

2020年9月,我国正式提出了"碳达峰、碳中和"目标[1]。作为减碳的重要切入点,光伏、风电等新能源受到了广泛关注。随后,各地区、各行业相继出台了"双碳"行动方案[2-4],国家也进一步提出建设以新能源为主体的新型电力系统[5-6]。与此同时,浙江省等8个省市作为第1批试点,正在探索建立电力现货交易机制,构建中长期交易与现货交易相结合的电力市场体系。实现"双碳"目标、新型电力系统建设和电力现货试点建设相叠加,带来了更多的机遇和挑战。

截至目前,浙江省已经完成了季度现货结算试运行,其他试点地区也都在推进长周期的结算试运

收稿日期:2021-09-25;**修回日期**:2022-01-25

行。根据国情省情，不同地区有着差异化的电力现货市场建设路径，在探索过程中也遇到了不同的阶段性问题。浙江省是典型的能源受端省份，同时有着相对丰富的水电资源，水电在电力系统中发挥着重要作用。在“双碳”背景下，浙江省计划在“十四五”期间实施“风光倍增”，新能源装机规模和发电量都将有明显提升，这给系统电力电量平衡带来了新的挑战[7]。

在电力现货市场背景下，水电机组的收益较计划模式发生了一定的变化，尤其是在辅助服务市场机制仍需完善、辅助服务产品种类仍待补充的情况下，水电机组面临较大的收益下降风险。与此同时，在市场中，水电企业尚未完全掌握现货市场规则和电价规律，水电机组出力曲线与市场中电能需求的匹配程度有待提升，造成其电能量潜在收益的流失，相应地也挤占了光伏发电的消纳空间。浙江省负荷谷值时段与光伏发电峰值时段部分重叠，在未来光伏发电倍增后，新能源消纳需要更多空间。

文献[8]—[11]针对水电研究了电力现货市场机制设计、与中长期交易衔接、竞价策略等关键问题。针对水电出力优化，现有文献中已有一些研究。文献[12]针对外送能源受端的调峰压力较大问题，研究了兼顾多电网调峰与水电消纳的水电调度方法。部分文献还考虑了电力现货市场。文献[13]在日前市场的背景下，针对下游水电站，提出了“峰前腾库、峰后蓄水”的出力调整策略和两阶段出力优化策略。文献[14]考虑电力现货市场，提出了一种耦合日合同分解及日前市场竞价的梯级水电站短期鲁棒优化调度方法，以最大化梯级水电站总收益。部分文献考虑了新能源与水电的协同。文献[15]针对大规模间歇性可再生能源接入系统，提出了构建考虑库容弹性空间的水电经济调度模型，以促进水电、风电消纳，降低电网运行成本。文献[16]针对含风电、抽水蓄能、水电和火电4类异质电源的多能互补系统，建立了协调调度模型，充分发挥多能互补作用，提升清洁能源消纳能力。文献[17]针对自调度的水电站，提出了促进间歇性可再生能源消纳的水电定价与能量管理策略，在最大化水电发电收益的同时，最小化弃风弃光量。但是截至目前，在现货市场背景下，关于水电出力优化以及水电新能源发电协同的研究还不够深入。

在此背景下，本文针对水电机组出力优化和光伏发电消纳进行研究。首先，基于浙江省电力现货市场，对现货市场背景下的水电与光伏发电特点以及二者之间的关系进行分析。然后，构建以最大化水电机组的市场化电能电费为目标的优化模型。最后，以浙江省3次电力现货结算试运行为案例进行分析，并针对现货市场建设和新能源消纳提出建议。

1　现货市场背景下的水电与光伏发电特点

1.1　水电与光伏的发电量时间分布

以浙江省2020年5月（单周）、2020年7月和2021年3—5月（选取3月数据）3次电力现货结算试运行期间的数据为例进行分析，见表1。在3次试运行中，水电机组均在日前申报固定出力曲线，无需申报价格，不参与出清，事后与其他统调机组一同结算；光伏发电机组不实际参与市场，仍按照计划模式进行结算。总体而言，水电机组主要集中在白天发电，一般在日内单一时段内或多个时段内连续发电，出力曲线多为阶梯状。在相近日期内，光伏发电机组每日的发电时段基本一致，发电量在日间存在差异。

水力发电与光伏发电机组存在较多重叠。在每日光伏发电时段，统调水电机组的发电量平均为1 953.29，4 128.20，1 960.81 MW·h，占全天发电量的77.6%，72.6%，72.3%，与季节变化的关系不明显；而光伏发电时段大约占全天发电量的56.0%，67.0%，46.0%，与季节变化的关系较为明显。在每日的光伏发电出力水平较高时段（出力水平超过当月最大值的50.0%），统调水电机组的电量平均为586.02，796.19，355.51 MW·h。统调负荷扣除光伏发电后（以下称为净负荷）的尖峰时段（当日负荷水平最高的30 min），统调水电机组的发电量平均为112.88，140.14，89.42 MW·h；在净负荷高峰时段（负荷水平超过当日最大值的90.0%），水电机组的发电量平均值为1 254.70，2 359.40，1 275.20 MW·h。

1.2　电力现货市场量价关系

能否有效地将市场中电能供需求关系反映在电能价格上，是评价市场效用的重要方面。以2020年5月现货市场单周结算试运行结果为例。如图1所示（每30 min为1个时点，下同），日前和实时市场中，全量电量（现货市场中出清的总电量）与全量平均电价曲线波动趋势较为相近，峰谷时段也较为匹配。由于全量电量可以体现市场对电能的需求，因此，可以认为市场中电能的量价关系较为匹配，全量平均电价可以体现电能量的市场价值。

对于水电机组而言，其电量与全量平均电价曲线波动趋势存在较大差异，峰谷时段也不完全匹配。如图2所示，水电机组在全量平均电价谷值时段的出力仍处于当日较高水平，全量平均电价峰值

表 1　不同时段水电与光伏发电量统计

Table 1　Hydropower and photovoltaic power generation in different period

项目	2020 年 5 月	2020 年 7 月	2021 年 3 月
水电日均发电量/(MW·h)	1 953.29	4 128.20	1 960.81
光伏发电时段内的水电发电量(每日)/(MW·h)	1 515.29	2 995.31	1 418.33
水电、光伏发电量分布的重合率/%	77.60	72.60	72.30
光伏大发时段内的水电发电量(每日)/(MW·h)	586.02	796.19	355.51
净负荷尖峰时段的水电发电量(每日)/(MW·h)	112.88	140.14	89.42
净负荷高峰时段的水电发电量(每日)/(MW·h)	1 254.70	2 359.40	1 275.20

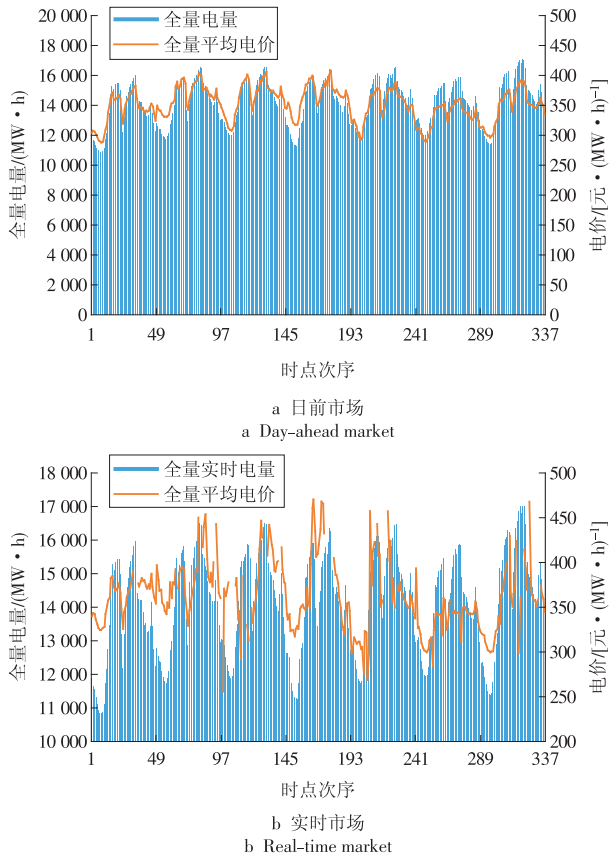


图 1　电力现货市场中的全量电量与平均电价（2020 年 5 月单周）

Fig. 1　Total generation quantity of a week and average electricity price in the spot market (a week in May, 2020)

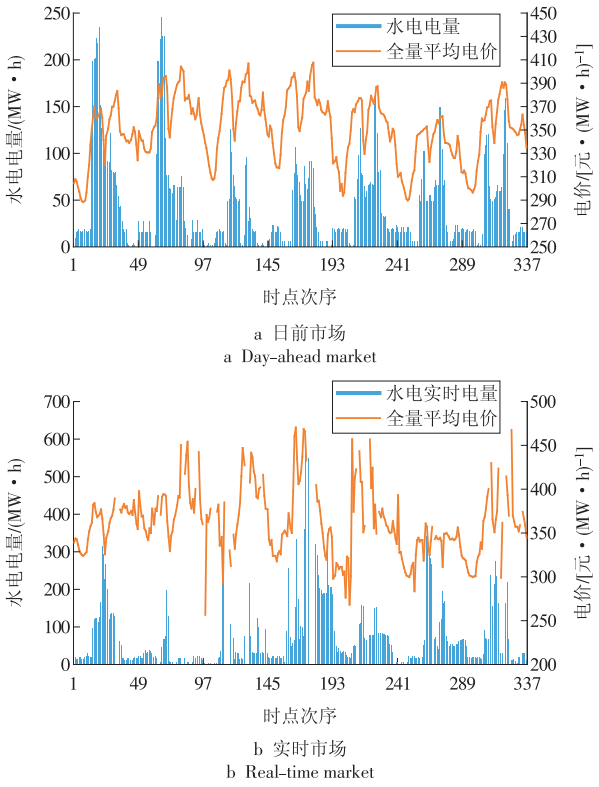


图 2　电力现货市场中的水电电量与平均电价（2020 年 5 月单周）

Fig. 2　Hydropower generation quantity and average electricity price in the spot market (a week in May, 2020)

时段的电量也远不及次高峰时段的电量（为便于展示分析，剔除图 2 b 中的异常点，即超过四分位距的 1.5 倍的数据点）。

全量平均电价体现了电能的市场价值，而水电电量与全量平均电价的匹配性却相对较低，因此，当前的水电量价关系还存在一定的优化空间。水电机组本身具有较强的灵活性，可通过优化申报的出力曲线，充分利用机组灵活性，尽可能在价格较高时段申报出力，最大化电能量市场收益。同时，光伏出力的高峰时段与电价的低谷时段存在一定重叠。量价相关性的改善，也可以为光伏发电腾挪更多空间。

2　电力现货市场背景下的水电出力优化

在不改变日发电量的基础上对水电日出力曲线进行事后优化分析，将发电量尽可能分布在市场出清电价的较高时段，提高水电电量与市场电能量需求的相关性。

2.1　目标函数

在现货市场环境下，每个水电站的电能电费都按照“日前基准、实时差量、合约差价”进行结算，即水电站在日前市场的出清电量按照日前市场价格结算；然后，其在实时市场的出清电量超出日前市场的部分，按照实时价格结算；最后，其合约电量按

照合约价格与日前市场价格的差值进行结算。优化模型的目标函数为最大化水电站的电能电费，可表示为

$$\max F=\sum_{t=1}^{T}p_t^{\mathrm{da}}q_t^{\mathrm{da}}+\sum_{t=1}^{T}p_t^{\mathrm{rt}}(q_t^{\mathrm{rt}}-q_t^{\mathrm{da}})+\sum_{t=1}^{T}(p_t^{\mathrm{cm}}-p_t^{\mathrm{da}})q_t^{\mathrm{cm}},\quad(1)$$

式中：F为水电站的电能电费；T为一天的时段数；p_t^{da}为水电站在第t个时段的日前市场电价；p_t^{rt}为水电站在第t个时段的实时市场电价；p_t^{cm}为水电站在第t个时段的合约电价；q_t^{da}为水电站在第t个时段的日前市场出清电量；q_t^{rt}为水电站在第t个时段的实时市场出清电量；q_t^{cm}为水电站在第t个时段的合约电量。

2.2　约束条件

实际运行中，不靠考虑弃水的情况下，水电机组的日发电量主要由水的调度方式决定，与水流量成正比。在事后优化分析的情境下，水电站日发电量可以取当日实际发电量，即不改变水电站日发电能力。假定水电作为价格接受者，以“报量不报价”的形式参与现货市场，水电机组在日前市场和实时市场中的出清电量保持不变，需要满足

$$\sum_{t=1}^{T}q_t^{\mathrm{da}}=Q^{\mathrm{da}},\quad(2)$$

$$\sum_{t=1}^{T}q_t^{\mathrm{rt}}=Q^{\mathrm{rt}},\quad(3)$$

式中：Q^{da}为水电站在第t个时段的日前市场电量；Q^{rt}水电站在第t个时段的实时市场电量。

水电站的出力受到机组容量、来水量、水位等因素的综合影响。在事后优化分析的情境下，假定水电站受到的影响因素不发生变化，即需要满足

$$q_t^{\mathrm{da}}\leqslant\max(\{q_t^{\mathrm{da}\prime},t\in[1,T]\}),\quad(4)$$

$$q_t^{\mathrm{rt}}\leqslant\max(\{q_t^{\mathrm{rt}\prime},t\in[1,T]\}),\quad(5)$$

式中：$q_t^{\mathrm{da}\prime}$为水电站在实际运行中第t个时段的日前市场电量；$q_t^{\mathrm{rt}\prime}$为水电站在实际运行中第t个时段的实时市场电量。

式(1)—(5)所构建的模型是线性规划问题，可以在Matlab环境中采用Yalmip/Gurobi求解器求解。

3　算例与分析

3.1　算例介绍

以浙江省电力现货市场2020年5月(单周)、2020年7月和2020年3月结算试运行的实际电量、电价数据为案例，对水电出力进行事后优化分析，并研究其对光伏发电消纳的影响。考虑到水电发电量占总发电量的比例较小，这里忽略水电出力优化对现货市场中电价的影响。同时，由于光伏发电机组暂未参与浙江省电力现货市场，因此在水电出力优化后，光伏发电机组的出力曲线不发生改变。

3.2　水电机组电能量收益

水电机组通过优化在日前市场和实时市场中的发电量分布，提高自身电能电费。以2020年7月7日为例，如图3所示，发电量较大为08:30—11:00和13:00—17:00，上述时段的电能需求较大，电价水平较高，发电收益也较高。在11:00—13:00时段，水电发电量接近0，上述时段的电能需求相对较低，电价水平也较低；由于该时段同时是光伏大发的时段，水电的出力优化也为光伏发电的消纳提供了空间。

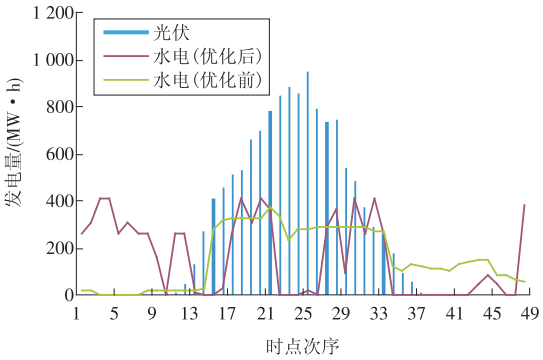
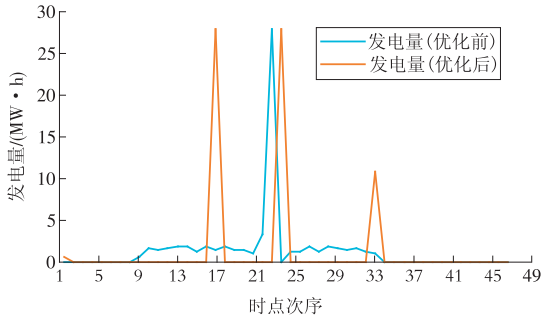


图3　水电和光伏发电量时间分布

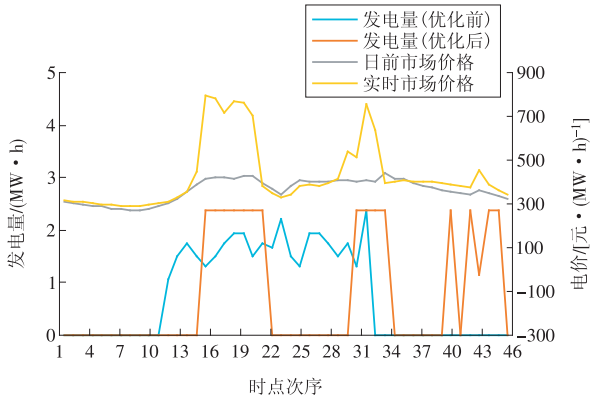
Fig. 3　Generation time distribution of hydropower and photovoltaic power

优化结果显示，水电机组收益提升主要源于2个方面：一是通过发电量的时移提升收益，即尽可能在电价较高的时段发电，该调整在日前市场价格和实时市场价格较为接近的日期较为明显。由于电价能够反映市场中对电能量的需求，因此水电发电量的时移也能够改善水电发电量与全量平均电价的匹配关系。以B水电站为例，如图4所示，当日日前市场与实时市场价格接近，相较于优化前，优化后的电量主要分布在电价的高峰和次高峰时段；二是水电机组也依靠日前市场与实时市场的价格差进行盈利，该调整主要发生在日前市场价格和实时市场价格差距较大的日期。以B水电站为例，优化后，水电站除，将发电量时移至电价的高峰和次高峰时段(08:00—11:00，16:30—17:30)，在21:00—23:30通过日前和实时市场的价差获利。

各个发电厂的平均电价以及电费见表2。在2020年5月(单周)试运行期间，优化前，平均电价最高为662.42元/(MW·h)，最低为406.99元/(MW·h)；整体平均电价为521.23元/(MW·h)。优化后平均电价最高为739.69元/(MW·h)，最低为446.25元/(MW·h)，整体平均电价为566.60元/(MW·h)。在2020年7月试运行期间，优化前整体平均电价为



a 2021 年 3 月 5 日
a March 5th , 2021



b 2021 年 3 月 8 日
b March 8th , 2021

图 4　B 站的发电量时间分布

Fig. 4　Generation time distribution of station B

449.63 元/(MW·h)；优化后为 536.40 元/(MW·h)。在 2021 年 3 月试运行期间，优化前整体平均电价为 501.29 元/(MW·h)；优化后为 646.93 元/(MW·h)。在现货市场试运行周期内，各站的平均电价普遍提高，在电能量市场中获得更多收益。

表 2　水电平均电价和水电站电费

Table 2　Average electricity price of hydropower stations

项目	2020 年 5 月(单周)	2020 年 7 月	2021 年 3 月
原有平均电价/[元·(MW·h)$^{-1}$]	521.23	449.63	501.29
优化后平均电价/[元·(MW·h)$^{-1}$]	566.60	536.40	646.93
优化后水电电费增量/万元	124.08	2 220.77	1 770.57
水电电费增量比例/%	8.7	19.3	29.1

3.3　水电与光伏发电量的分布

水电出力优化后，水电与光伏的发电量重叠明显减少，水电机组在光伏发电时段的发电量大幅降低，见表 3。在 2020 年 5 月(单周)、2020 年 7 月和 2020 年 3 月分别降低了 21.1%，19.8%，32.6%。在光伏大发时段，水电发电量的降幅更为明显，分别降低了 37.7%，53.9%，87.2%。主要因为光伏发电的峰值时段与负荷谷值时段存在一定重叠，这些时段的电价水平也相对较低，出力优化后水电机组将更多发电量时移到了光伏发电的非峰值时段，为光伏发电腾挪了消纳空间。

从净负荷角度来看，不同月份的水电出力优化带来了差异化的影响。在 2020 年 5 月(单周)和 2020 年 7 月，尖峰负荷时段的水电发电量都有所提升，且 2020 年 5 月(单周)提升幅度较大，较优化前提升了 42%，发挥了平衡电力供需的作用。但在 2021 年 3 月，尖峰负荷时段的水电发电量反而下降，这是由于出力优化后，水电机组出现了较多利用日前和实时市场价差获利的行为，电价信号没有发挥应有的引导作用。在 2020 年 5 月(单周)，高峰负荷时段的水电发电量有所提升，但在 2020 年 7 月和 2021 年 3 月，高峰负荷时段的水电发电量却下降，引起差异的原因与尖峰负荷时段相似。

表 3　不同时段水电发电量统计

Table 3　hydropower generation in different period　MW·h

时段		2020 年 5 月	2020 年 7 月	2021 年 3 月
每日光伏发电时段	优化前	1 515.29	2 995.31	1 418.33
	优化后	1 195.72	2 401.45	956.59
每日光伏大发时段	优化前	586.02	796.19	355.51
	优化后	365.03	366.99	45.44
每日净负荷尖峰时段	优化前	112.88	140.14	89.42
	优化后	160.35	144.29	49.07
每日净负荷高峰时段	优化前	1 254.70	2 359.40	1 275.20
	优化后	1 304.30	2 050.40	1113.20

4　结论

本文针对水电机组出力优化和光伏发电消纳进行研究。首先，在浙江电力现货市场背景下，分析了水电与光伏的发电量分布特点，以及市场中的电能量价关系。然后，构建以最大化水电机组的市场化电能电费为目标的优化模型，对其发电量的日内时间分布进行优化。最后，以浙江 3 次电力现货结算试运行为案例进行事后仿真分析，仿真结果显示，水电出力优化可以为光伏发电消纳提供空间，在一定条件下可以降低负荷尖峰和高峰时段的电能平衡压力。根据仿真结果，提出以下建议。

(1)加强市场主体能力建设。应当引导水电企业主动积累市场数据和经验，加强对市场供需情况和出清价格情况的预测，优化日出力曲线申报，依靠灵活性在电能量市场中获得更多收益，进而实现不同种类发电资源的互补配合，促进风电、光伏等间歇性可再生能源消纳。

(2)完善信息披露机制。电力市场各主体交易

策略的完善，依赖于市场信息的及时合规披露。市场运营机构应按照信息发布的要求，及时合规向市场主体提供市场相关信息，支撑市场主体更好优化申报策略。

(3)完善电力市场机制。考虑到能源受端的特点和“双碳”目标，需要继续鼓励水电发展，不适合对其在日前和实时市场间的盈利进行过多限制。为了降低市场间盈利行为对量价关系的影响，应当持续完善辅助服务市场，适时引入备用、灵活调节产品等服务，以市场化手段引导水电机组在净负荷尖端和高峰时段提高出力水平，发挥市场机制提升新型电力系统灵活性的重要作用。

参考文献：

[1]人民日报社.习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话[N].人民日报，2020-09-23(1).

[2]国家电网公司.国家电网公司发布“碳达峰、碳中和”行动方案[N].国家电网报，2021-03-02(1).

[3]浙江省科技厅.浙江省出台碳达峰碳中和科技创新行动方案[EB/OL].(2020-7-19)[2021-12-20].http://www.most.gov.cn/dfkj/zj/zxdt/202106/t20210618_175262.html.

[4]吉斌，孙绘，梁肖，等.面向“双碳”目标的碳电市场融合交易探讨[J].华电技术，2021，43(6)：33-40.
JI Bin, SUN Hui, LIANG Xiao, et al. Discussion on convergent trading of the carbon and electricity market on the path to carbon peak and carbon neutrality[J].Huadian Technology，2021，43(6)：33-40.

[5]人民日报社.推动平台经济规范健康持续发展把碳达峰碳中和纳入生态文明建设整体布局[N].人民日报，2021-03-16(1).

[6]喻小宝，郑丹丹，杨康，等.“双碳”目标下能源电力行业的机遇与挑战[J].华电技术，2021，43(6)：21-32.
YU Xiaobao, ZHENG Dandan, YANG Kang, et al. Opportunities and challenges faced by energy and power industry with the goal of carbon neutrality and carbon peak[J].Huadian Technology，2021，43(6)：21-32.

[7]浙江省发改委.浙江省可再生能源发展“十四五”规划(征求意见稿)[EB/OL].(2021-07-19)[2021-12-20].http://fzggw.zj.gov.cn/art/2021/3/12/art_1229123367_2251024.html.

[8]路轶，胡晓静，孙毅，等.适应高水电占比的电力现货市场机制设计与实践[J].电力系统自动化，2021，45(9)：162-170.
LU Yi, HU Xiaojing, SUN Yi, et al. Design and practice of electricity spot market mechanism adapting to characteristics of high proportional hydropower [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45 (9) : 162-170.

[9]于旭光，李亚鹏，贾泽斌，等.考虑现货市场竞价空间的梯级水电站中长期合同电量分解模型[J].电力系统自动化，2021，45(6)：62-71.
YU Xuguang, LI Yapeng, JIA Zebin, et al. Medium and long term contract energy decomposition model for cascade hydropower station considering spot market bidding space [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45 (6) : 62-71.

[10]于旭光，李刚，李亚鹏，等.计及电价风险和差价合同的梯级水电站日前市场竞价模型[J/OL].电力系统自动化：1-11(2021-11-29)[2022-2-15].http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20211126.1321.002.html.
YU Xuguang, LI Gang1, LI Yapeng, et al. Day-ahead market bidding model for cascade hydropower station considering price risk and contract for price difference [J/OL]. Automation of Electric Power Systems: 1-11(2021-11-29) [2022-2-15]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/32.1180.TP.20211126.1321.002.html.

[11]贾泽斌，申建建，程春田，等.基于梯级电量联动控制的高比例水电电力市场日前现货出清方法[J].中国电机工程学报，2021，41(23)：8033-8046.
JIA Zebin, SHEN Jianjian, CHENG Chuntian, et al. Day-ahead clearing method for high proportion hydropower electricity market based on cascade energy linkage control [J].Proceedings of the CSEE，2021，41(23)：8033-8046.

[12]钟儒鸿，程春田，廖胜利，等.兼顾多电网调峰与水电消纳的跨流域梯级水电站调度方法[J].电力系统自动化，2021，45(14)：114-122.
ZHONG Ruhong, CHENG Chuntian, LIAO Shengli, et al. Inter-basin scheduling method of cascaded hydropower plants considering multi-grid peak shaving and hydropower accommodation[J].Automation of Electric Power Systems，2021，45(14)：114-122.

[13]张粒子，刘方，许通，等.多主体梯级水电参与日前市场下游电站自调度投标策略[J].电力系统自动化，2018，42(19)：27-33.
ZHANG Lizi, LIU Fang, XU Tong, et al. Self-scheduling bidding strategy for downstream station in day-ahead market with participation of multi-operator cascade hydropower stations [J]. Automation of Electric Power Systems，2018，42(19)：27-33.

[14]于旭光，李刚，李亚鹏，等.耦合日合同分解及日前市场竞价的梯级水电站短期鲁棒优化调度[J].电网技术，2021，45(10)：4016-4025.
YU Xuguang, LI Gang, LI Yapeng, et al. Short-term robust optimization scheduling of cascade hydropower stations coupled withdaily contract decomposition and day-ahead market bidding [J]. Power System Technology, 2021, 45 (10)：4016-4025.

[15]温世杨，余娟，代伟，等.考虑水电库容弹性的电力系统

经济调度[J].电力系统自动化，2020，44(19)：73-82.
WEN Shiyang，YU Juan，DAI Wei，et al.Economic dispatch of power system considering capacity flexibility of hydropower reservoir [J]. Automation of Electric Power Systems，2020，44(19)：73-82.
[16]李健华，刘继春，陈雪，等.含可再生能源的多能互补发电系统容量配置方法[J].电网技术，2019，43(12)：4387-4398.
LI Jianhua，LIU Jichun，CHEN Xue，et al. Capacity allocation of multi energy complementary system including renewable energy[J].Power System Technology，2019，43(12)：4387-4398.
[17]王一铮，李忠憓，黄晨宏，等.促进间歇性可再生能源发电消纳的水电定价与能量管理策略[J].电力建设，2021，42(3)：107-116.
WANG Yizheng，LI Zhonghui，HUANG Chenhong，et al. Hydropower pricing and energy management strategies for promoting accommodation of intermittent renewable energy power generation[J].Electric Power Construction，2021，42(3)：107-116.

（本文责编：齐琳）

作者简介：

王一铮(1997)，男，工程师，工学硕士，从事电力市场改革、电价机制方面的研究工作，sgcc_wangyz@163.com；

胡嘉骅(1992)，男，工程师，工学博士，从事电力市场改革、电价机制方面的研究工作，dreaminghu2009@163.com；

唐琦雯(1989)，女，高级工程师，工学硕士，从事电力市场方面的研究工作，tangqiwen8888@126.com；

赵一琰(1984)，女，高级工程师，工学硕士，从事电力市场和电力系统分析方面的研究工作，finalfantasy4ever@qq.com；

沈琪(1983)，男，工程师，从事电力市场和发电计划管理方面的研究工作，56735487@qq.com。

****

“固体氧化物电池”专刊征稿启事

化石能源是当今时代主要的燃料，燃烧时会释放出大量二氧化碳以及硫、氮氧化物，造成了严重的温室效应和环境污染。气候变化是人类面临的全球性问题，随着温室效应的进一步加剧，如何控制二氧化碳的排放量已经成为全球性的系统问题。

在这一背景下，世界各国以全球协约的方式减排温室气体，我国由此提出了“2030 年碳达峰，2060 年碳中和”的战略目标。然而，想要实现“双碳”目标，还必须改变以化石能源为主体的能源结构，建立以清洁能源为源头、以氢能作为媒介的新型能源体系。在新型能源体系中，固体氧化物燃料电池(SOFC)和固体氧化物电解池(SOEC)将起到关键的作用。通过 SOEC 可将风光水电等低品质电能直接、高效地转化为储存在碳氢化合物中的高品质化学能，通过 SOFC 可将碳氢化合物中的化学能持续、高效、稳定地转化为电能，并且这个过程不受卡诺循环的限制。然而，想要真正发挥 SOFC 和 SOEC 在新型能源体系中的关键用，必须要克服性能、衰退、规模这三大挑战。

鉴于当前的问题和机遇，《综合智慧能源》(原《华电技术》)特推出“固体氧化物电池”专刊，邀请武汉大学刘通副研究员、哈尔滨工业大学张雁祥教授、武汉大学王瑶副教授担任特约主编，共同探讨固体氧化物电池性能、稳定性和产业化发展等方面的研究进展，并对相关研究进行总结和展望，欢迎业内同仁踊跃投稿。

一、征稿范围(包括但不限于)

(1)固体氧化物电池高温 CO2 电解研究。(2)固体氧化物电池原位溶出纳米电极研究。(3)管式电池及管式电池堆研究。(4)平板电池及平板堆研究。(5)固体氧化物电池电极材料研究。(6)固体氧化物电池质子导体研究。(7)固体氧化物电池电极表面过程研究。(8)固体氧化物电池电极内传质行为研究。(9)质子型固体氧化物电池堆研究。(10)固体氧化物电池电极制备工艺研究。(11)固体氧化物电池电极结构-性能模拟研究。

二、时间进度

专刊拟于 2022 年 5 月 31 日截稿，2022 年择期优先出版。

三、征稿要求

(1)专刊只收录未公开发表的论文，拒绝一稿多投。作者对论文内容的真实性和客观性负责。

(2)按照《综合智慧能源》论文格式要求使用 Word 软件排版，论文模板请在网站(www.hdpower.net 或 www.iienergy.cn)首页作者中心下载。

(3)请保留论文图片、曲线和表格原始文件，并在投稿时按规定提交。

(4)论文作者应遵守相关学术不端规定。

四、投稿方式

(1)在线投稿(推荐)：登录在线采编系统(www.hdpower.net 或 www.iienergy.cn)，完成在线全文投稿，欢迎投稿时推荐审稿人。

(2)邮箱投稿：liu_tong@whu.edu.cn(刘老师)；hdjs-chd@vip.163.com(编辑部)。

(3)咨询联系：刘芳 0371-58501060/13838002988；杨满成 010-63918755/13801175292。