

支撑新能源基地电力外送的电源组合优化配置策略研究

刘泽洪, 周原冰, 金晨

(全球能源互联网发展合作组织, 北京市 西城区 100031)

Optimization Strategy Study on Installation Mix of Renewable Energy Power Base for Supporting Outbound Delivery

LIU Zehong, ZHOU Yuanbing, JIN Chen

(Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, Xicheng District, Beijing 100031, China)

Abstract: Renewable energy power base development and outbound power delivery is an important way to achieve clean and low-carbon transition in the energy and power sector. Both the intermittency and fluctuation nature of renewable energy power generation and the limited terrain conditions of the power transmission corridor require the power base to be equipped with regulating power source to improve the reliability and utilization of the power delivery project. In this work, we propose a method of strategy study approaching optimized power installation mix of regulating source and renewable energy by using the chronological operation simulation power expansion optimization model, in which wide area long-term historical meteorological data is employed and various power transmission schemes have been considered. Taking the proposed renewable power base in Inner Mongolia desert as an example, it is found that the passive regulating power represented by battery storage should be configured at around 35% of the outbound transmission capacity, so as to achieve reasonable utilization rate of transmission channel and power base generation and delivery cost-effectiveness. The active regulating power deployment can achieve higher utilization rate of delivery channel. Through further research and analysis on the regulating power demand change under conditions of altering the power delivery curve to follow the renewable power output and the receiving-end monthly power demand characteristics, we propose the solutions of joint development on multiple renewable energy power bases and configuring seasonally adjustable green electricity energy carrier industry.

Keywords: renewable energy power base; regulating power; power delivery; installation mix optimization

摘 要: 新能源基地化开发和电力外送是实现能源电力清洁低碳转型的重要途径。新能源发电间歇性和波动性以及有限的输电走廊资源要求基地配置调节电源以提高新能源电力外送工程的可靠性和源网利用率。提出了基于广域长期历史气象数据, 采用时序生产模拟电源扩展优化模型, 进行不同送

电方案下调节电源与新能源装机优化组合策略的研究方法。以内蒙古沙漠地区新能源基地为例的研究表明, 电化学储能为代表的无源型调节电源应配置为外送通道容量的35%左右, 从而实现合理的通道利用率和基地发输电经济性; 配置有源型调节电源, 可实现更高的外送通道利用率。以送电曲线为研究对象, 进一步分析了按照新能源出力特性和考虑受端用电月特性送电两种情景下的调节电源需求变化, 提出了新能源多基地联合开发、配置可季节性调整的绿电载能产业等解决思路。

关键词: 新能源发电基地; 调节电源; 电力外送; 电源优化组合

0 引言

对可再生能源的开发利用有助于节约化石能源, 减少碳排放, 助力解决气候变化问题。目前全世界136个国家陆续宣布碳中和目标^[1], 中国作为当前全球最大的能源生产国、消费国, 于2020年宣布了碳中和目标, 即二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和。中国能源活动碳排放占全国二氧化碳排放总量的80%以上^[2], 实现2060年前碳中和目标, 重点在于能源相关活动的脱碳, 关键是能源消费电气化和电力供应清洁化。根据研究, 要实现2060年前碳中和目标, 清洁能源发电装机占比需达到90%, 其中风电和光伏发电装机占比达75%左右^[2]。风电、光伏发电作为最重要和最富发展潜力的清洁低碳发电方式, 总装机规模持续扩大, 开发成本持续下降, 在中国的发展不断提速。

中国西部和北部地区风能太阳能资源富集, 具备优越的基地化开发条件。同时, 在西部北部进行大型风光新能源基地化开发, 具有保障能源安全、实现绿

色转型、提升国土治理、加速生态修复等多重意义。然而,西部北部地区人口稀疏,能源电力需求远低于数千千米外中东部的能源电力负荷中心地区,新能源电力远距离大规模输送需求强烈。根据中国电网发展研究^[3-6],特高压直流输送系统将成为中国西部北部清洁电力送出的主要手段。尤其是在电网建设相对薄弱的西部北部沙漠、戈壁和荒漠地区,大型风光新能源发电基地拟主要采用特高压直流方式将清洁电力送抵负荷中心。值得关注的是,远距离大规模特高压输电工程建设成本高,输电走廊资源有限,需全力提高输电工程的利用率及可靠性。然而,新能源出力具有间歇性和波动性,对实现上述电力外送目标形成挑战。采用“新能源+调节电源”打捆外送的方式,可提高外送通道利用率和送电置信率^①,降低输电成本,盘活存量传统电源。对新能源基地的风电、光伏装机规模和调节电源装机需求的量化优化配置研究具有重要意义。

通过配置调节电源来提高新能源电力送出质量已引起学术界广泛关注,主要集中在新能源资源潜力研究、电网规划建设方案、输电技术选择以及调度计划安排等方面。潘垣等^[7]综述了西部高原地区可再生能源集中开发及其大规模外送方案,讨论了需要研发的关键技术及装备等,分析了特高压直流输电对解决西部高原地区新能源电力外送问题的适用性。许丹等^[8]提出了特高压直流外送风光火电一体化调度计划模型,并仿真验证了配套火电和直流外送计划参与调整可有效提升风光电力外送能力。刘振亚等^[3]提出基于年度输电量与典型风、光伏发电曲线的配套电源装机容量优化计算方法和调度生产模拟方法,通过优化风、光、火电装机容量,可有效提高风光利用率,实现大型能源基地及其风电、光伏等清洁能源的集约高效开发和利用。Xie等^[9]提出了一种分布式鲁棒优化模型来确定电源规模,以实现在保证输电利用率前提下的成本最低优化目标。李湃等^[10]研究以新能源最大化外送消纳为目标,考虑各类电源与特高压直流运行约束的中长期运行方式优化模型,实现特高压直流年/月运行曲线优化。相关研究大多通过采用模拟量化优化的方式,提出并证明新能源基地电源组合合理规划或运行方案。鲁宗相等^[11]指出了兼顾不同天气过程的模拟场景构建是极高比例可再生能源电力系统灵活性供需平衡研究的关键问题之一,并提出了长时序滚动模拟

方法以及基于极值理论的天气场景构建方法的解决思路,为基于气象数据的电力系统调节资源相关研究指出了方向。然而,从新能源基地多电源组合优化配置以支撑电力可靠送出研究来看,已有研究局限有二:一是新能源出力相关支撑数据局限。目前新能源出力数据多采用短时期局部地理位置的风速或辐照数据进行出力重构,或采用数学概率方法构造具备一定波动性、间歇性,甚至某类天气特征的新能源出力数据,缺乏广域、长期的实测和分析数据支撑,欠缺基于多年气象数据的极端情况电源方案可靠性验证。二是模型方法侧重于灵活调节电源与新能源出力协同调度,一定程度上忽略了新能源与调节电源组合配置优化对于解决上述问题的潜力,忽略了新能源电源出力在空间上的互补特性。

本文基于全球能源互联网发展合作组织构建的全球清洁能源开发评估平台(Global Renewable-energy Exploration Analysis Platform, GREAN)^[12],使用覆盖广域地理位置和长期时间跨度的风速和辐照等气象数据,重构地理格点级的波动新能源逐小时发电特性曲线,并通过数值处理方法得到新能源发电基地区域典型8760逐小时出力特性数据。对于调节电源,通过分析各类灵活性调节电源的工作原理与特性,从有源型和无源型角度进行分类和简化,并构造计算模型。基于以上数据方法和模型工具,本文以内蒙古西部沙漠地区为例开展研究,首先构造规划基地范围内风电和光伏的典型8760逐小时出力特性,以及不同通道利用率的电力外送目标曲线。然后,以新能源利用率、送电量保证率等为约束条件,利用源网储扩展规划模型(generation transmission storage expansion planning, GTSEP)^[13-15],量化分析研究新能源与调节电源在不同外送通道利用率和送电曲线特性条件下的经济最优组合配比,形成大型新能源基地的多能互补开发方案。

1 思路和方法

1.1 研究思路

本文采用时序生产模拟方法,以电源投资成本最低为优化目标,对新能源基地电源组合进行扩展优化研究。主要输入参数包括送端新能源基地的风光出力特性曲线、调节电源调节能力技术参数、送电曲线形态特征、各类电源投资成本等,在各类技术约束和设定边界条件下,经过优化求解计算,得到新能源和调节电源装机容量、发电成本等结果。研究流程如图1所示。

① 指年度送电量达到预计目标的置信概率。

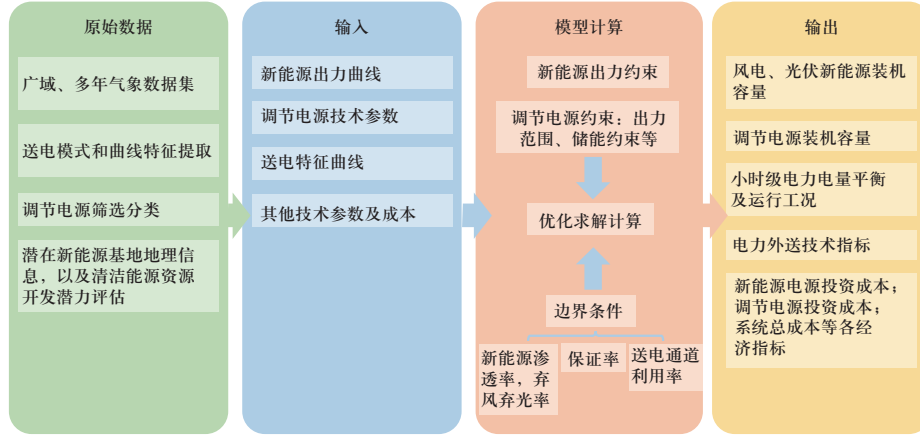


图1 研究流程示意图

Fig. 1 Study procedure schematic diagram

对多种调节电源基于工作原理进行分类, 具体而言, 可以将燃煤电站、燃气电站、水电站、光热发电站等划分为有源型调节电源, 此类电源仅具有正向调节能力; 将电化学储能电站、氢储能、抽水蓄能、新型抽水蓄能^[16]划分为无源型调节电源, 具备双向调节能力, 即“削峰填谷”功能。各类调节电源出力调节范围见附录A。

此优化问题各项技术连接示意如图2所示。针对新能源基地的电源组合优化研究, 忽略光伏或风电电力汇集、升压和输电电力损耗和设备技术约束, 暂不考虑送端就地消纳。

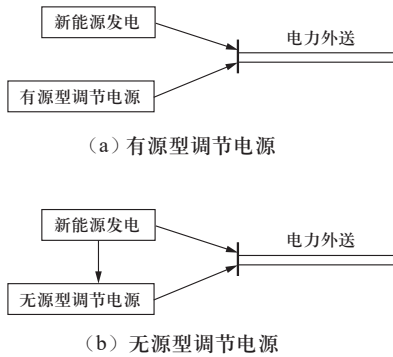


图2 新能源基地电源组合与外送技术连接示意图

Fig. 2 Schematic diagram of power mix and outbound delivery technology connection of renewable power base

1.2 模型方法

此模型主要包含新能源电源模型、电力传输模型、有源和无源调节电源模型3个部分, 数学描述如下。

1.2.1 新能源电源模型

在风光新能源建模中引入机组 w 在 t 时刻出力系数 $\omega_{w,t}^w$, 并在日运行模拟中允许弃电, 即允许系统在调

节能力不足时切除部分可再生能源出力。

$$P_{w,t}^W + P_{w,t}^{W,Cur} = \omega_{w,t}^W C_w^W, \forall w, t \quad (1)$$

$$P_{w,t}^W, P_{w,t}^{W,Cur} \geq 0, \forall w, t \quad (2)$$

式中: $P_{w,t}^W$ 、 $P_{w,t}^{W,Cur}$ 分别表示发电和弃电功率; C_w^W 表示装机容量。

1.2.2 电力传输模型

基于管道模型建立电力传输潮流模型, 应用于新能源基地电力送出。约束方程可表示为

$$P_{w,t}^W + P_{b,t}^{B,dis} - P_{b,t}^{B,cha} = F_t, \forall w, b, t \quad (3)$$

$$P_{w,t}^W + P_{i,t}^I = F_t, \forall w, i, t \quad (4)$$

$$F_t + L_t^{lack} = L_t, \forall t \quad (5)$$

$$0 \leq L_t^{lack} \leq L_t, \forall t \quad (6)$$

$$G^{elec} = \left(1 - \sum_{t=1}^{8760} L_t^{lack} \right) \times 100\% \quad (7)$$

其中式(3)和式(4)分别表示配置无源型和有源型调节电源情况下新能源基地节点的功率平衡方程。 $P_{b,t}^{B,cha}$ 、 $P_{b,t}^{B,dis}$ 分别表示无源型调节电源装置 b 在时刻 t 的充放电功率; F_t 是新能源基地实际送出功率; $P_{i,t}^I$ 为系统中有源型电源出力, I 代指所有发电机组类型的集合。式(5)中 L_t 、 L_t^{lack} 分别为送电目标功率和功率缺额; 式(6)限制了送电功率缺额的上限; 式(7)定义了年度送电量保证率。

1.2.3 调节电源模型

对有源型和无源型调节电源分别建模。对有源型调节电源来说, 虽然不同种类发电机组出力约束各有差异, 如气电比火电或水电机组的功率调节范围更大等, 通过将模拟的发电机组单元进行聚类^[17], 有源型调节电源可简化为具有一定综合功率调节范围的电源

而忽略其单个发电机组的出力约束差异,通过赋予该类型电源综合出力上下限,来趋近此类电源的实际出力情况。

$$\alpha_{\min} C_i^I \leq P_{i,t}^I \leq \alpha_{\max} C_i^I, \forall i, t \quad (8)$$

式(8)限制了有源型调节电源发电功率范围不超过出力上下限。

无源型调节电源参考储能装置工作原理建模。由于本研究重点关注小时级电力平衡的电源优化组合,因此忽略用于一次调频等场景的超短时储能需求。从储能所提供的不同调节能力和具体应用场景来看,以氢储能为代表的长期储能主要为新能源基地电力外送提供跨季节电量调节能力^[14,18],应具备长期存储功能;以电化学储能为代表的短时储能提供功率调节能力^[19],主要用于日内削峰填谷。参考储能模型的无源型调节电源运行约束如下:

$$0 \leq P_{b,t}^{B,cha}, P_{b,t}^{B,dis} \leq C_b^B, \forall b, t \quad (9)$$

$$E_{b,t}^B - E_{b,t-1}^B = \eta_b^B P_{b,t}^{B,cha} - P_{b,t}^{B,dis} / \eta_b^B, \forall b, t \quad (10)$$

$$0 \leq E_{b,t}^B \leq H_b^B C_b^B, \forall b, t \quad (11)$$

$$E_{b,t=0}^B = E_{b,t=N_T}^B = \lambda_b^{B,ini} H_b^B C_b^B, \forall b, t \quad (12)$$

其中式(9)限制了储能装置 b 充放电功率不超过上限 C_b^B ,式(10)为相邻时段的能量平衡方程, $E_{b,t}^B$ 表示储能装置的载荷状态(SOC), η_b^B 为充放电效率;式(11)限制了储能的能量状态 $E_{b,t}^B$ 不得超过装置容量上限,其中 H_b^B 表示储能装置 b 的持续放电时长;式(12)限制了储能设备的储能水平在初始时段 $t=0$ 和最后时段 $t=N_T$ 均回归初始水平 $\lambda_b^{B,ini}$,需要注意的是长、短期储能的平衡周期 N_T 不同。

1.2.4 系统成本优化目标

优化目标为系统总成本最低,系统总成本由新能源电源年化成本、调节电源年化成本、年度运行成本组成。

$$\begin{aligned} \arg \min f(C_b^B, C_i^I, C_w^W) = & \\ \sum_{b=1}^{N_B} I_{Cb}^B C_b^B + \sum_{i=1}^{N_I} I_{Ci}^I C_i^I + \sum_{w=1}^{N_W} I_{Cw}^W C_w^W + C_{Sys}^{Oper} & \quad (13) \\ \text{s.t.} & \quad \text{时序运行模拟约束集(1)-(12)} \end{aligned}$$

通过最小化系统总成本,可优化计算在不同边界条件下新能源和调节电源配置方案。

2 数据准备

风电、光伏出力波动是由于风速、辐照等自然条件变化导致的。根据风机高度风速数据和风机厂商提

供的风速-出力关系曲线,可得到不同风速下的风机理论出力大小^[20];光伏理论出力可参考铭牌标称的标准工况(如IEC61215测量标准^[21])下的发电功率,考虑温度、遮挡、并网损耗等因素后,以实际接收到的辐照强度计算得到,工程上可近似认为光伏出力大小与辐照强度成线性关系^[22]。小时级的风速、辐照强度等气象数据是构造风电、光伏发电特性曲线的基础。

本文采用欧洲中期天气预报中心建立的一套再分析数据集ERA5^[23]开展新能源出力特性构造。此开源数据库包含全球区域,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (约30 km网格),时间分辨率为1 h。选用数据时间跨度为1979年至2020年。数据具体介绍见附录B。

研究新能源基地风、光发电典型年度出力数据,并以此为基础来优化电源组合,有利于实现电源合理配置,避免过度投资。典型年概念由Hall^[24]于1978年提出,其基本思想是从历年的数据中选出最具有代表性的目标月数据,然后进行拼接组合得到全年8760 h时序数据。因为没有做平均处理,小时级的风速、辐照等数据更能代表真实的气象情况。

以库布齐沙漠地区地理坐标东经 108° 、北纬 40.7° 格点为例,图3展示了1979年至2020年每年风电出力月特性数据,红色曲线则由每个月份的42年平均值得构成。通过选取每月与平均值(红线)最接近的年份,来构成典型年数据,使得典型年月发电量趋近于多年平均水平。采用同样的方法,可构造光伏的典型年出力特性,这里不再赘述。

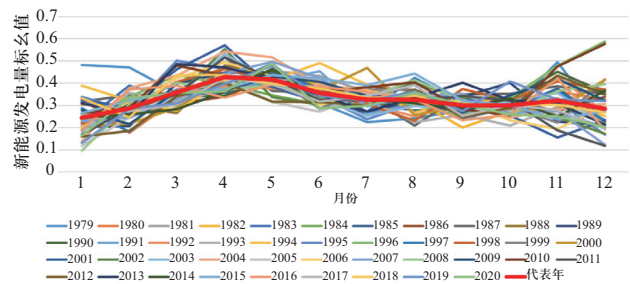


图3 库布齐某地1979—2020年风电出力月特性及42 a内逐月平均曲线(红色)

Fig. 3 Monthly average wind power output from 1979 to 2020 and average curve of every month in the 42 years (red) at a grid point in Kubuqi

库布齐沙漠地区新能源基地开发方案占地超过 $10\,000\text{ km}^2$ ^[12],采集1979年至2020年区域内涉及若干格点的风速和辐照数据,构造各点的小时级风、光出力特性并计算区域平均值,然后采用上述典型年出力

特性构造方法, 得到风电和光伏的典型年出力特性。
风电典型年构成年份如表1所示。

表 1 风电典型年数据构成	
Table 1 Composition of wind power typical annual data	
风电典型年数据构成	选取年份
1月	2010
2月	1994
3月	1982
4月	1991
5月	2016
6月	1988
7月	2006
8月	1996
9月	2014
10月	2018
11月	1984
12月	1987

先计算各点平均值再构造典型年数据, 而非先构造各点典型年数据再计算其平均值, 是因为各点典型年月份构成一般不同, 若采用第二种方法, 则忽略了同一基地内新能源小时级出力同时性, 尤其对于风电来说, 将低估风电场小时级出力波动程度, 导致调节电源配置不足。需要指出的是, ERA5格点数据覆盖了较大地理范围, 且与气象站实测数据有一定差距^[25], 因此, 基于ERA5数据的研究可用于新能源基地开发建设前期的宏观分析和规划, 而实际工程上还需结合具体发电场实测气象数据对新能源基地综合出力特性进行校正。

库布齐地区风电和光伏月发电能力如图4所示。风电具有鲜明的季节变化规律, 春季发电量较高, 而夏冬季节发电量较低。光伏发电则与各月正午太阳高度角相关, 呈现夏季高于冬春的特征。

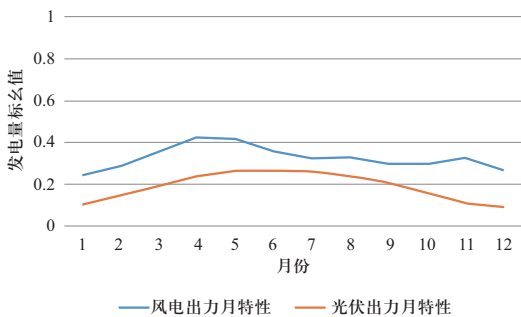


图 4 风电光伏月发电特性

Fig. 4 Wind and photovoltaic power monthly generation characteristics

3 算例构造及结果分析

制定电力外送曲线需考虑源侧电源种类和发电特点、受端负荷需求情况以及受端电网电力受入能力等多重因素。当前, 以新能源为主要电源的特高压直流电力外送工程较少, 缺乏可供参考的资料, 尤其是外送曲线方案。

当前, 受端火电具备一定的月度发电调节能力, 月间长期尺度上可按照新能源发电特性送电, 在日内短时尺度上可采用阶梯送电模式趋近日内新能源发电特性, 但日内调频需进一步探讨; 随着存量火电退役, 新能源基地按受端用电需求送电的压力将逐步显现。

基于以上分析, 首先采用当前使用的三段式特高压直流送电模式, 结合送端新能源发电小时级和月特性, 以及日内负荷特性, 构造全年8760 h的三段式送电目标曲线, 研究在不同送电通道利用率下的调节电源需求。考虑到新能源发电利用小时数和利用率, 以及受端最大负荷利用小时数, 主要研究送电利用小时数在4000~6000 h范围内的案例, 详见第3.1节。图5展示了外送通道利用小时数为4000 h和6000 h的冬季(1月)和春季(5月)日内小时级电力外送曲线。随着送电通道利用小时数提高, 送电曲线形态差异主要表现在夜间负荷高峰时段的送电功率抬升, 日内小时级波动愈发不明显, 而月度送电量趋势依旧与新能源发电月特性一致。

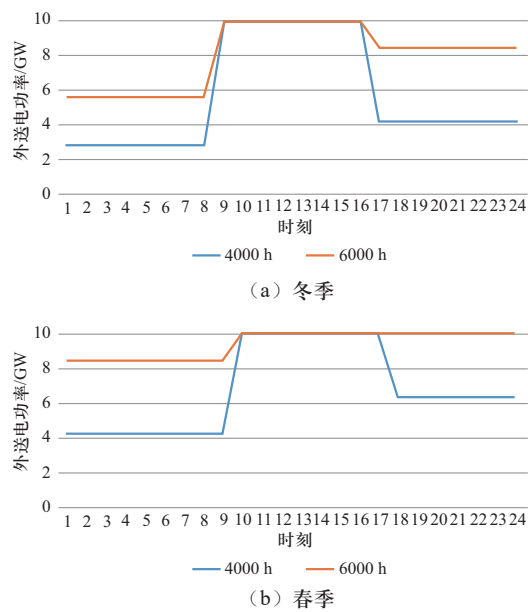


图 5 冬季(1月)和春季(5月)日内三段式送电曲线

Fig. 5 Three-stage daily power delivery curve in winter (January) and spring (May)

选取典型情景，以送电曲线特征为对象开展延伸研究，分别计算在按照送端风光小时级出力特性送电和考虑受端用电需求月特性送电两情况下新能源基地对调节电源配置需求的变化。详见3.2和3.3节。

以库布齐沙漠地区新能源基地为研究对象，取10 GW为外送通道最大容量，以上述典型年法得到的基地新能源出力特性数据为基础，利用优化计算模型，分别计算各算例的调节电源需求，对比分析新能源装机、利用率、投资成本、发电成本等技术经济指标。本研究涉及的新能源及调节电源投资成本数据来源于全球能源互联网发展合作组织相关研究^[2]，各类电源成本数据详见附录C。考虑到新能源基地资源充分开发以及碳中和方案下全国风光开发比例^[2]，基地风电和光伏装机比例大致以1:2进行配置。

3.1 不同送电通道利用率下的调节电源需求

在新能源利用率（≥90%）和年送电量保证率（≥95%）的约束条件下，对送电通道利用小时数分别为4000 h、4500 h、5000 h、5500 h、6000 h和6500 h这6种情景进行电源组合优化计算。以电化学储能为例的无源型调节电源需求测算结果如表2所示。

表2 无源型调节电源优化配置结果
Table 2 Optimal configuration results of passive regulating power

技术经济指标	不同送电通道利用率方案对比					
外送规模/GW	10					
输电利用小时数/h	4000	4500	5000	5500	6000	6500
新能源利用率/%	91	97	96	96	95	94
风电装机/GW	9	9	9	10	10	12
光伏装机/GW	12	13	16	18	20	21
新能源总装机/GW	21	22	25	28	30	33
无源调节电源/GW	2.9	3.4	5.8	7.5	9.5	9.6
风电利用小时数/h	2408	2475	2541	2531	2505	2429
光伏利用小时数/h	1707	1753	1774	1776	1775	1769
无源调节电源利用小时数/h	1393	1385	1259	1254	1256	1229
风光电源年化成本/亿元	79.8	84.4	93.0	101.5	111.2	122.0
调节电源年化成本/亿元	41.4	48.6	83.2	107.3	136.1	138.6
综合发电成本/ (元·(kWh) ⁻¹)	0.286	0.282	0.332	0.361	0.392	0.384
输电价 (IRR=10%) / (元·(kWh) ⁻¹)	0.085	0.075	0.067	0.062	0.057	0.053

由以上结果可知，随着外送通道利用率逐渐提

高，在相同外送规模（10 GW）情况下，所需送电量相应增加，风电、光伏新能源电源装机规模随之增加，新能源利用率维持在95%左右的较高水平。新能源和调节电源装机需求如图6所示，在送电利用小时数从4000 h提高至6000 h过程中，电源基地对无源型调节电源需求从2.9 GW增加至9.5 GW，而达到6000 h后未见明显增加，对调节资源的需求趋于饱和。从投资成本角度来看，在送电通道利用小时数在4500 h的情况下，调节电源投资和综合发电成本较低，新能源基地的综合发电成本低至0.282元/kWh；随着送电量增加，调节电源投资逐渐增大，在送电通道利用率达到较高水平后不再明显增加，基地发电度电成本维持在0.39元/kWh左右，发电成本增加40%。采用±800 kV特高压输电技术，计及输电能量损耗，在内部收益率为10%的条件下测算输电电价，通道利用小时数在4500~5000 h的情况下输电成本下降较快，最终的发输电综合成本优势进一步显现。

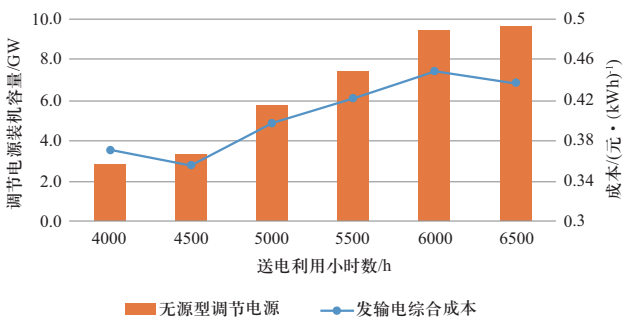


图6 不同送电利用小时情况下调节电源装机及发输电综合成本
Fig. 6 Regulating power installation and generation transmission cost under different channel utilization hours

送端调节能力需求源于发电能力与外送计划不匹配，需求量由新能源发电能力与外送目标曲线电力缺额共同决定，图7展示了典型日无源型调节电源的调节功能，在新能源大发时间段将超过外送需求的电量储存起来，在夜间新能源出力不足时发电，如图7中19:00—24:00所示，起到保证全天电力高质量外送的作用。

随着外送利用小时数提高，外送低谷时段（主要在夜间）功率抬升，对调节电源功率需求不断增加，最终达到与外送功率相当规模。新能源零出力或低出力持续时长则决定了调节电源储能容量需求，本算例预置4 h储能充放电时长，通过增大储能充放电时长，优化计算得到的调节电源功率并无显著变化，表明4 h储能时长充足，可满足日内调节需求。

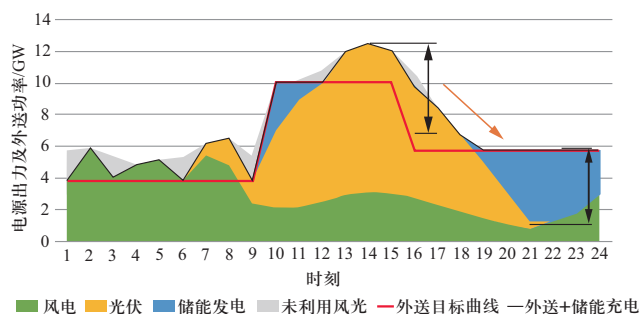


图7 典型日无源型调节电源功能

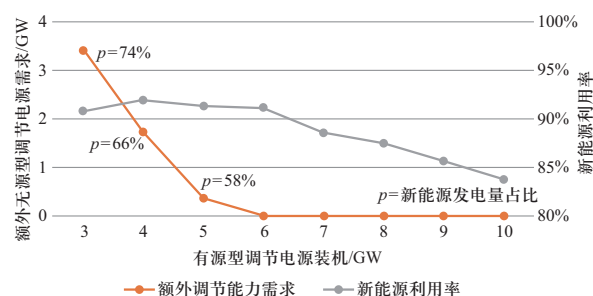
Fig. 7 Regulating function of passive regulating power on typical day

与无源型调节电源不同的是，有源型调节电源仅能发电而不能作为储能设备存储新能源超发电量，即仅能“顶峰”而不能“填谷”，且最小出力率一般要高于以电化学储能为代表的无源型调节电源。有源型调节电源主要包含火电、气电等需要消耗化石燃料的碳排放型电源，以及水电、光热等地理和资源条件强依赖型电源，火电和水电等是现有特高压直流外送工程的主力电源。对于未来电力外送工程，新能源电源具有高装机和发电量占比预期，西北地区以火电为代表的传统存量电源将肩负起新能源发电基地的灵活调节任务，其主力电源角色逐步转变为配合清洁电力安全稳定送出。

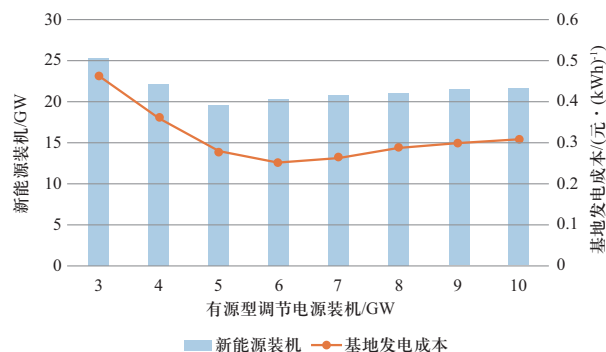
选取6000 h外送目标曲线场景，设置年送电量保证率（ $\geq 95\%$ ）约束，新能源最低50%电量渗透率为边界条件，以有源型调节电源装机容量为变量，通过计算其下降过程中对额外调节能力需求的变化，来研究发电基地有源型调节电源最优配置。

计算结果如图8所示，有源型调节电源装机容量大于6 GW时，调节能力充足，无需配置额外调节电源，此阶段通过适当放宽新能源利用率限制可增强新能源发电调节能力；当配置6 GW左右有源型调节电源，即最大外送容量的60%时，调节能力充分发挥，且新能源利用率提高至91%，基地综合发电成本最低。随着调节电源装机容量继续下降，为避免新能源利用率急剧降低，系统产生对额外调节能力的需求并快速增加，同时新能源发电量占比逐渐提高，表明在此阶段火电“顶峰”调节能力已得到充分发挥。为解决系统调节能力不足的问题，可额外配置电储能等无源型调节电源，构成“新能源+火+储”的电源组合结构。

综上所述，在年送电量保证率95%和新能源利用率90%的约束条件下，采用三段式送电方式，新能源发电基地对无源型调节电源容量需求与外送通道利用率相关。在通道利用小时数为4500 h的情况下，无源



(a) 额外调节能力需求和新能源弃电率变化



(b) 新能源装机和发电成本变化

图8 有源型调节电源装机逐渐减少过程中的技术指标变化

Fig. 8 Change of technical indicators during gradual reduction of the installed capacity of active regulating power

型调节电源装机容量应达到电力外送容量的35%。当外送通道利用小时数达到6000 h及以上时，需配置与外送容量相当的无源型调节电源，新能源装机容量（风光按1:2比例配置）约为无源型调节电源的3倍，但基地综合发电成本由0.28元/kWh大幅增加至0.39元/kWh；利用有源型调节电源配合新能源电力送出时，需配置外送工程最大容量60%的有源型调节电源，新能源装机容量约为有源型调节电源装机总功率的2.5倍。

3.2 按照风光出力特性送电的方案

若仅从输电技术角度来看，特高压直流输电理论上可实现输电功率快速变化，对于本研究采用的小时级时间尺度来讲，足以实现外送功率的灵活快速变动。本节从输电灵活性考虑，按照新能源小时级出力特性构造外送目标曲线，并优化计算相应的无源型调节电源需求。考虑到新能源实际出力利用小时数较低，若外送目标曲线与送端风光出力特性完全一致，则送电通道利用小时数仅2000 h左右。通过对新能源出力特性曲线进行整体抬升并约束其最大值，可生成利用小时数为4500 h且与新能源小时级出力特性形态相符的送电目标曲线。小时级送电电力平衡图如图9(a)所示。

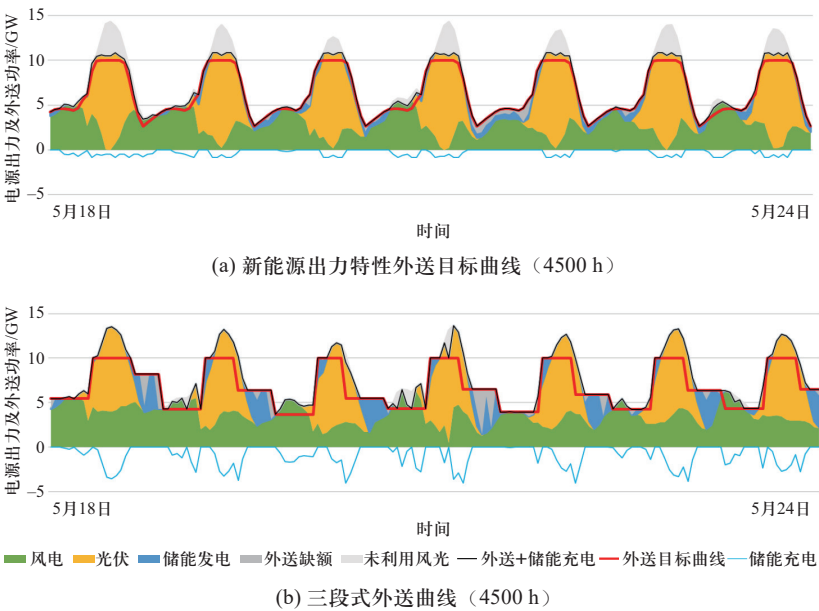


图 9 不同送电目标曲线下的电力平衡图

Fig. 9 Power balance diagram under different power delivery objective curve

与采用三段式模式构造的4500 h外送目标曲线情况(如图9(b)所示)对比,无源型调节电源装机需求从3.4 GW急剧缩减至0.4 GW,得益于对输电灵活性的充分利用,新能源电力送出对调节能力需求大幅下降,调节电源投资成本降低,发电成本降至0.190元/kWh。三段式送电与按风光出力特性送电两方案对比如表3所示。

表 3 不同送电目标曲线情况下优化配置结果

Table 3 Optimal configuration results of passive regulating power under different power delivery objective curve

技术经济指标	不同送电通道利用率方案对比	
外送规模/GW	10	
送电目标曲线	三段式	风光出力特性
输电利用小时数/h	4500	4500
新能源利用率/%	93	91
风电装机/GW	9	8
光伏装机/GW	13	15
新能源总装机/GW	22	23
无源调节电源/GW	3.4	0.4
风电利用小时数/h	2475	2298
光伏利用小时数/h	1753	1750
无源调节电源利用小时数/h	1385	1508
风光电源年化成本/亿元	84.4	84.4
调节电源年化成本/亿元	48.6	5.1
综合发电成本/ (元·(kWh) ⁻¹)	0.282	0.190

基于以上结果分析,若按照新能源出力特性设计电力外送目标曲线,可降低对调节能力的需求,然而整个系统将面临日前新能源预测依赖性强,受端电网调频、调峰困难,送电安全可靠性和较差等技术风险和经济损失;采用兼顾送端新能源出力特性和负荷特性的三段式送电曲线方式,直流工程运行平稳有序,系统对调节电源需求在通道规模的35%左右,综合来看,是技术经济合理的一种送电方案。

3.3 考虑用电需求月特性的调节电源配置

受端用电需求一般呈现夏季和冬季大而春季小的特点,以库布齐沙漠地区为例,风电和光伏综合月发电量具有“春大秋小”特征,这与受端用电量需求季节变化趋势相反。

如果以用电需求季节性变化趋势为依据来构造外送目标曲线,系统将产生对长期调节能力的需求。有四种方案可以解决此问题,一是利用火电等具备长期调节能力的有源型调节电源;二是配置一定量的具有跨季节电力存储功能的储能设备,如结合电制氢和氢发电技术的P2H2P,将新能源大发季节富余电量转移至缺电季节使用;三是配置额外的新能源电源装机以解决冬季缺电时期的电量紧张问题,但会导致发电量富余季节的新能源电量无法利用的问题;四是联合开发多地的新能源,发挥不同新能源基地的出力互补潜力,缓解与用电需求在月特性上的矛盾。库布齐沙漠风电具有“春大秋小”的特点,通过数据收集和筛选

发现, 临近省份青海的柴达木地区风电则呈现“夏大冬小”变化趋势, 两地的风电月出力特性如图10所示。

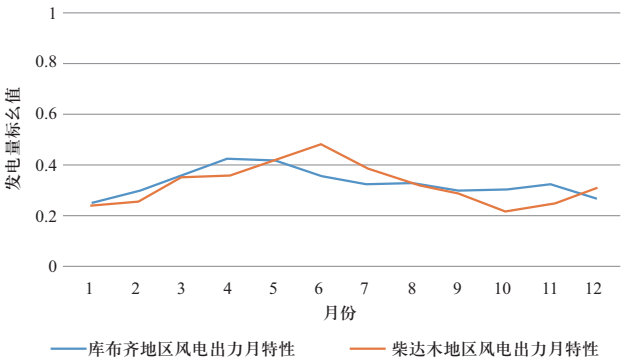


图 10 库布齐和柴达木两地风电月出力特性对比
Fig. 10 Comparison of monthly wind power output characteristics between Kubuqi and Qaidam

以送电通道利用小时数为5000 h的方案为基准, 分别构造4种测算方案。方案1和2开发与基准方案等量的风电、光伏装机容量并配置相同储能装机, 仅分别优化计算系统对火电和跨季节调节电源的需求; 方案3在方案2基础上, 允许库布齐地区风电装机扩容, 优化计算风电装机以及跨季节调节电源的需求; 方案4允许库布齐地区风电装机扩容, 同时优化开发一定柴达木沙漠风电以取代库布齐沙漠的部分风电, 同时优化计算跨季节调节电源需求配置。同样设置新能源利用率($\geq 90\%$)和年送电量保证率($\geq 95\%$)约束。计算结果如表4所示。

表 4 考虑用电需求月特性优化配置结果					
Table 4 Optimal configuration results of regulating power considering monthly power demand change					
技术经济指标	基准方案	方案1	方案2	方案3	方案4
外送规模/GW		10			
外送目标曲线	三段式	考虑用电需求月特性的三段式			
输电利用小时数/h		5000			
新能源利用率/%	96	93	98	91	91
风电装机 (库布齐/柴达木)/GW	9/0	9/0	9/0	11/0	9/2
光伏装机/GW	16	16	16	16	15
跨季节调节电源/GW	0	0.7	1.5	0	0
无源调节电源/GW	5.8	5.8	5.8	5.8	5.6
跨季节调节电源利用小时数/h		3000	1080		

续表					
技术经济指标	基准方案	方案1	方案2	方案3	方案4
无源电源利用小时数/h	1259	1191	1197	1171	1187
风光电源年化成本/亿元	93	93	93	104	103
调节电源年化成本/亿元	83	93	147	83	80
综合发电成本/ (元·(kWh) ⁻¹)	0.332	0.365	0.461	0.358	0.352

当外送目标曲线月特性与受端用电需求变化趋势一致时, 系统对跨季节电量调节能力的需求明显。方案1结果表明火电具备长期电量调节能力, 可有效缓解季节性电量供需矛盾。在方案2中, 跨季节调节电量约为总送电量的3.1%, 新能源利用率维持在较高水平, 对跨季节调节电源的需求导致发电成本急剧增加至0.461元/kWh。配置跨季节储能可实现较长周期内的电量供需平衡, 其储能容量由新能源可发电量与需求电量缺额共同决定, 跨季节调节电源工作原理示意图如图11所示。

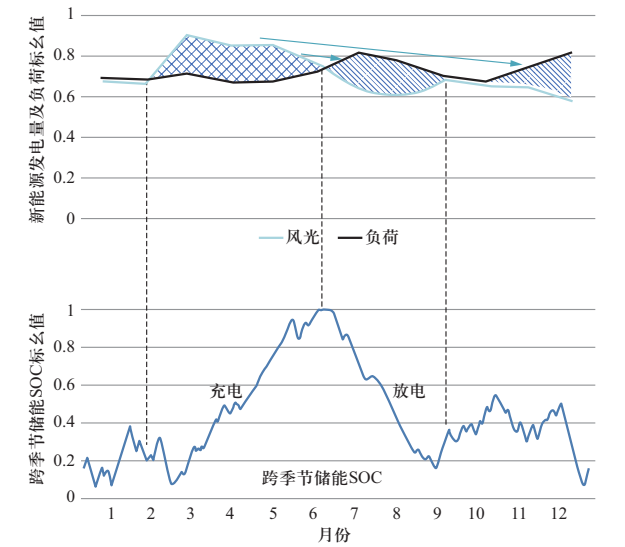


图 11 跨季节调节电源工作原理示意图
Fig. 11 Schematic diagram of the working principle of the seasonal regulating power

对于方案3, 当允许库布齐风电装机扩容时, 风电装机从9 GW增加至11 GW, 同时新能源利用率降低至91%, 无跨季节调节电源需求, 表明通过扩建新能源装机同时适度减小新能源利用率可为系统带来一定的跨季节灵活调节能力, 替代系统对长期储能的需求; 由于跨季节调节电源预测成本远高于风电投资成本, 系统发电成本下降明显。方案4结果证明了两基

地风电的地理平滑效益,当开发2 GW柴达木风电替代库布齐风电时,系统无跨季节调节电源需求。

综上所述,在考虑受端用电需求季节性变化情况下,除配置火电等有源型调节电源外,新能源基地可通过配置一定量的跨季节调节电源,实现电量的跨季节转移,以适应社会用电需求的季节性变化,但成本代价大;联合开发具有发电互补效益的多个新能源基地,可缓解新能源发电量与社会用电需求量的季节性供需矛盾。

4 结论

本文提出支撑新能源基地电力外送调节电源优化配置方法。以广域长期的历史气象数据为基础,采用时序生产模拟电源扩展优化模型,对新能源基地调节电源与新能源装机开展优化组合策略研究。

以内蒙古沙漠地区新能源基地开发为例,首先,基于长期历史气象数据构造了具有地理代表性的年度小时级风电、光伏出力特性数据。然后,采用兼顾新能源出力和日内负荷特性的三段式送电曲线构造方法,分别构造不同通道利用率情况下的全年逐小时送电曲线,利用优化模型计算调节电源配置需求。最后,以送电曲线为研究对象,进一步分析了按照新能源出力特性和考虑受端用电需求月特性送电两种情景下的调节电源需求变化,并对相关技术经济指标进行对比分析。结论如下。

1) 电力外送目标曲线若完全按照新能源出力特性设计,输电线路利用率低(低于3000 h),直流工程频繁调节压力大;从送受端系统来看,对日前新能源预测依赖性强,受端电网调频、调峰困难,送电安全可靠度较差。兼顾送端新能源出力特性和受端负荷特性,采用年利用小时数为4500~5000 h的三段式送电曲线,输电费用相对较低,直流工程运行难度较小,综合来看,是技术经济合理的一种送电方案。

2) 新能源发电基地采用三段式方式送电时,在送电通道利用小时数为4500~5000 h的情况下,需配置电力外送容量35%的无源型调节电源。利用有源型调节电源配合新能源电力送出时,外送通道利用小时数可提高至6000 h,调节电源容量为外送规模的60%左右,新能源发电量占比为50%。

3) 通过在送端配置跨季节调节电源,如电制氢及氢发电设备等,可实现按照受端用电需求季节变化送电,但成本代价大;对新能源基地的广泛布局和充分

互联可发挥多基地发电季节互补效益,或依托当地化工产业链优势,发展可季节性调节的绿色化工原材料产业,形成P2X的电力跨季节存储,均是相对经济可行的方案。但总体来看,受端区域火电、气电等可控电源较多,通过优化其月度发电计划更易实现跨季节电量平衡。

4) 确定合理的电力外送电源组合,需考虑多重影响因素,如气象要素、新能源基地出力特性、受端负荷特性和电量需求、系统调节电源类型、规模和成本等。拟定送电曲线方案是协同送受端特点的过程。当前受端可用于电力电量调节的手段较丰富,以通道利用小时数为4500~5000 h送电,系统总体成本低;随着电力系统进入快速碳减排阶段,受端火电逐步退出,系统调节电源需求矛盾突出,若受端不具备其他调节电源建设条件,则应提高送端调节电源规模,从而在满足送电置信率要求下提升通道利用率水平(达到6000 h左右)。

在本研究基础上,下一步将继续开展影响新能源基地发电能力的极端天气事件研究。近年来,全球气候变化导致极端天气事件频发,威胁新能源基地发电和供电可靠性。基于广域长期的历史气象数据,可对极端天气事件在时间和空间维度上发生的概率和严重程度进行分析研究,检验新能源基地调节电源配置可靠性,并提出应对策略。

参考文献

- [1] 博鳌亚洲论坛. 博鳌亚洲论坛可持续发展的亚洲与世界2022年度报告(2022)[R]. 博鳌: 2022.
- [2] 全球能源互联网发展合作组织. 中国2060年前碳中和研究报告(2020)[R]. 北京: GEIDCO, 2020.
- [3] 刘振亚, 张启平, 董存, 等. 通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2513-2522.
LIU Zhenya, ZHANG Qiping, DONG Cun, et al. Efficient and security transmission of wind, photovoltaic and thermal power of large-scale energy resource bases through UHVDC projects[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2513-2522 (in Chinese).
- [4] 刘振亚, 张启平. 国家电网发展模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 1-10.
LIU Zhenya, ZHANG Qiping. Study on the development mode of national power grid of China[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 1-10 (in Chinese).
- [5] 辛保安, 单葆国, 李琼慧, 等. “双碳”目标下“能源三要素”再思考[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3117-3126.

- XIN Baoan, SHAN Baoguo, LI Qionghui, et al. Rethinking of the “three elements of energy” toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3117-3126 (in Chinese).
- [6] 章建华. 全面构建现代能源体系 推动新时代能源高质量发展[N]. 中国电力报, 2022-05-20(1).
- [7] 潘垣, 尹项根, 胡家兵, 等. 论基于柔直电网的西部风光能源集中开发与外送[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3621-3629. PAN Yuan, YIN Xianggen, HU Jiabing, et al. Centralized exploitation and large-scale delivery of wind and solar energies in West China based on flexible DC grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3621-3629 (in Chinese).
- [8] 许丹, 王斌, 张加力, 等. 特高压直流外送风光火电力一体化调度计划模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(6): 25-29. XU Dan, WANG Bin, ZHANG Jiali, et al. Integrated transmission scheduling model for wind-photovoltaic-thermal power by ultra-high voltage direct current system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(6): 25-29 (in Chinese).
- [9] XIE R, WEI W, GE M F, et al. Coordinate sizing of energy storage and transmission line for a remote renewable power plant[J]. IET Renewable Power Generation, 2022, 16(12): 2508-2520.
- [10] 李湃, 王伟胜, 黄越辉, 等. 大规模新能源基地经特高压直流送出系统中长期运行方式优化方法[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 31-40. LI P, WANG W S, HUANG Y H, et al. Method on optimization of medium and long term operation modes of large-scale renewable energy power base through UHVDC system[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 31-40 (in Chinese).
- [11] 鲁宗相, 林弋莎, 乔颖, 等. 极高比例可再生能源电力系统的灵活性供需平衡[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 3-16. LU Zongxiang, LIN Yisha, QIAO Ying, et al. Flexibility supply-demand balance in power system with ultra-high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 3-16 (in Chinese).
- [12] WU J W, XIAO J Y, HOU J M, et al. A multi-criteria methodology for wind energy resource assessment and development at an intercontinental level: facing low-carbon energy transition[J]. IET Renewable Power Generation, 2023, 17(2): 480-494.
- [13] 姜海洋, 杜尔顺, 金晨, 等. 高比例清洁能源并网的跨国互联电力系统多时间尺度储能容量优化规划[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2101-2115. JIANG Haiyang, DU Ershun, JIN Chen, et al. Optimal planning of multi-time scale energy storage capacity of cross-national interconnected power system with high proportion of clean energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2101-2115 (in Chinese).
- [14] JIN Chen, XIAO Jinyu, HOU Jinming, et al. Flexibility improvement evaluation of hydrogen storage based on electricity-hydrogen coupled energy model[J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4(4): 371-383.
- [15] 金晨, 任大伟, 肖晋宇, 等. 支撑碳中和目标的电力系统源-网-储灵活性资源优化规划[J]. 中国电力, 2021, 54(8): 164-174. JIN Chen, REN Dawei, XIAO Jinyu, et al. Optimization planning on power system supply-grid-storage flexibility resource for supporting the “carbon neutrality” target of China[J]. Electric Power, 2021, 54(8): 164-174 (in Chinese).
- [16] 刘泽洪, 梁旭明, 周原冰, 等. 基于新型抽蓄的绿色蓄能调水工程研究[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(6): 525-534. LIU Zehong, LIANG Xuming, ZHOU Yuanbing, et al. Research on green water transfer project with energy storage based on new-type pumped storage[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(6): 525-534 (in Chinese).
- [17] DU E S, ZHANG N, KANG C Q, et al. A high-efficiency network-constrained clustered unit commitment model for power system planning studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2498-2508.
- [18] 姜海洋, 杜尔顺, 朱桂萍, 等. 面向高比例可再生能源电力系统的季节性储能综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 194-207. JIANG Haiyang, DU Ershun, ZHU Guiping, et al. Review and prospect of seasonal energy storage for power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 194-207 (in Chinese).
- [19] 肖晋宇, 侯金鸣, 杜尔顺, 等. 支撑电力系统清洁转型的储能需求量化模型与案例分析[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(18): 9-17. XIAO Jinyu, HOU Jinming, DU Ershun, et al. Quantitative model and case study of energy storage demand supporting clean transition of electric power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18): 9-17 (in Chinese).
- [20] 杨秀媛, 肖洋, 陈树勇. 风电场风速和发电功率预测研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 1-5. YANG Xiuyuan, XIAO Yang, CHEN Shuyong. Wind speed and generated power forecasting in wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 1-5 (in Chinese).
- [21] International Electrotechnical Commission. Solar photovoltaic energy systems, IEC61215 [EB/OL]. (2022-09) [2023-02], https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:38:601240397192328:::FSP_ORG_ID,FSP_APEX_PAGE,FSP_PROJECT_ID:1276,23,113052.
- [22] 王飞, 米增强, 甄钊, 等. 基于天气状态模式识别的光伏电站发电功率分类预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 75-82. WANG Fei, MI Zengqiang, ZHEN Zhao, et al. A classified forecasting approach of power generation for photovoltaic plants based on weather condition pattern recognition[J].

Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 75-82 (in Chinese).

[23] ECWMF. ECMWF Reanalysis v5 (ERA5) [DB/OL]. [2023-02]<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>.

[24] Sandia National Laboratories. Generation of typical meteorological years for 26 SOLMET stations [R]. SAND78-1601, Albuquerque, 1978.

[25] LIU Laibao, WANG Yang, WANG Zheng, et al. Potential contributions of wind and solar power to China's carbon neutrality[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 180: 106155.

收稿日期：2023-03-02；修回日期：2023-03-10。



刘泽洪

作者简介：
刘泽洪（1961），男，硕士，教授级高级工程师，长期组织和参与交、直流超/特高压输电系统的规划、科研、设计、工程建设及管理工作，E-mail: zehong-liu@sgcc.com.cn。
周原冰（1971），男，硕士，教授级高级工程师，从事能源电力发展战略规划、政策、能源互联网、能源经济环境等研究，E-mail: yuanbing-zhou@geidco.org。
金晨（1990），男，博士，高级工程师，主要研究方向为能源电力系统规划、储能、太阳能光伏技术等，E-mail: chen-jin@geidco.org。

（责任编辑 张宇）

附录 A 调节电源调节能力范围

表 A1 调节电源调节能力范围
Table A1 Adjustability range of regulating power

类型	调节能力
有源型调节电源（火电、气电等）	0.15~1
无源型调节电源（抽水蓄能、电储能等）	-1~1

附录 B ERA5再分析数据简介

ERA5再分析资料是欧洲中期天气预报中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECWMF）利用新一代四维变分同化技术制作的第五代ECMWF再分析资料集（the fifth generation ECMWF re-analyses, ERA5），包含全球区域，时间跨度为1979年至今。空间分辨率为0.25°，时间分辨率为1 h。数据包含37层压强高度的风速、温度、湿

度、位势高度等常用大气物理量，以及距地表10 m和100 m高度的风速风向，2 m高度的温度，2 m高度的湿度，地表压强、短波和长波辐射等物理量。数据下载地址：<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>。

附录 C 各类调节电源成本

表 C1 各类调节电源成本
Table C1 Costs of regulating power

机组名称	年化投资成本/ (元·kW ⁻¹)	使用寿命/a
跨季节调节电源	40 000	25
无源型调节电源（电储能）	4800	8
风电	5000	25
光伏	3000	25