DOI: 10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2024.08.001

考虑送端资源与受端调峰模式匹配的 多能互补清洁直流外送研究

冯士春¹, 郭 飞², 郭津瑞³, 胡剑波⁴
(1.中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 江苏 南京 211102;
2.中国能源建设集团市场开发事业部, 北京 100022;
3.电力规划设计总院, 北京 100120;
4.中国长江三峡集团有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘要:为实现我国二氧化碳排放"2030年碳达峰、2060年碳中和"以及"构建以新能源为主体的新型电力系统"的目标,能源行业发展态势发生深刻转变,新能源渗透率需进一步提升。以金沙江流域为代表的西南清 洁水电群是我国清洁电力外送的重要基地,利用大型梯级水电的调蓄能力,打捆近区风电、光伏电站外送, 实现整体多能互补发电,可以为送端省份提供稳定、持续的清洁电力支撑。本文选取以西南水电多能互补基 地为研究对象,按照区域内清洁能源弃电率最小为目标构建优化模型,提出一种基于模式匹配算法的兼顾送 端资源匹配、受端负荷与调峰需求直流外送曲线优化方法。研究结果表明,利用大型水电的调节能力与外送 通道,可以实现水风光多能互补,合理优化水电站风光配比,改善新能源外送的电力品质,提升新能源消纳 水平以及外送通道的利用效率。

关键词: 多能互补基地; 弃电率; 调峰; 模式匹配 中图分类号: TK01; TM715 文献标志码: A 文章编号: 1671-9913(2024)08-01-08

Research on Multi-Energy Complementary Clean DC Delivery Considering Sending-End Resources and the Matching Mode of Receiving-End Peak Load Regulation

FENG Shirui¹, GUO Fei², GUO Jinrui³, HU Jianbo⁴

(1. China Energy Engineering Group Jiangsu Power Design Institute Co., Ltd., Nanjing 211102, China;
2. China Energy Engineering Group Market Development Division, Beijing 100022, China;
3. China Electric Power Planning & Engineering Institute, Beijing 100120, China;
4. China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, China)

Abstract: In order to achieve Chinese goals of "carbon emission peaking in 2030 and carbon neutrality in 2060" and "building a new power system with new energy as the main body", there shall be a profound change in the development trend of energy industry and a further improvement in the penetration rate of new energy. The clean hydropower cluster in southwest China represented by the Jinsha river basin is an important base for clean power outgoing. The regulation and storage capacity of large-scale cascade hydropower may be utilized to bundle nearby

^{*} 收稿日期: 2024-05-28

第一作者简介:冯士睿(1992一),男,硕士,工程师,从事电力供需、新能源消纳以及新型电力系统研究。

wind and photovoltaic power stations for outgoing, thus realizing an overall multi-energy complementary power generation and providing stable and continuous clean power support for the receiving-end provinces. With a typical hydropower multi-energy complementary base in southwest China as the object, this study proposes an annual power transmission curve optimization method, which takes into account both electric abandoned rate of sending ends and the power load matching rate of receiving ends, and based on the sequence matching mode of peak load regulation for the receiving-end power grid, further puts forward a daily power transmission curve optimization method for DC outgoing. In this study, the optimization model is constructed based on the objective of minimizing the electric abandoned rate of clean energy in the region. The results have shown that a stable output of multi-energy complementary base can be realized by using the regulation capacity of large-scale hydropower. Through a reasonable optimization of wind-solar power ratio considering the demand for sending-end resources and peak load regulation for receiving ends, the consumption level of new energy and the utilization efficiency of the outgoing channels can be improved effectively. **Keywords:** multi-energy complementary base; electric abandoned rate; peak load regulation; sequence matching mode

0 引言

为实现"双碳"目标,非化石能源消费在 终端能源消费的占比中需不断提升。2021年 2月,国家发展改革委、国家能源局发布《关于 推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导 意见》^[1],提出"源网荷储一体化""多能互补" 的范畴与内涵,强调统筹协调各类电源开发、提 高清洁能源利用效率、适度配置储能设施、充分 发挥负荷侧调节能力。同时,为加快构建以新能 源为主体的新型电力系统,新能源渗透率将不断 提升,如何合理配置新能源规模,提升电网消纳 能力,在满足电网安全稳定的前提下降低新能源 弃电率,成为亟待解决的重要问题。

近年来针对在风光水火储大型电源基地的 多能互补领域,国内外学者都开展了深入研究。 研究的焦点主要针对多电源机组的优化调度、电 源容量配置方法以及时序生产模拟等方面。文 献 [2] 提出了解决问题的关键主要包括建立清洁 能源时空多尺度模型、优化协同调度算法以及 建立综合运行管控机制三个方面。文献 [3] 针对 风光水多能源电力系统,基于场景法建立了风 光水互补短期优化运行模型,提出基于随机规 划的短期优化调度方法。文献 [4] 基于水风光储 的联合系统,构建了以最大收入、最小弃电与 最小波动为目标的互补模型。文献 [5] 重点研究 了不同场景下光伏出力波动特性对水电的影响, 提出了以波动电量比为目标的水光互补策略。

除了针对多能源优化调度的策略研究之外,

多能互补基地的电源规模配比也是研究的重点 之一。文献 [6] 考虑负荷时间和空间可转移特性 的基础上建立互补发电系统多目标容量配置模 型。文献 [7-9] 分别提出采用粒子群算法与混合 整数线性规划算法求解混合发电系统的容量最 优配置。文献 [10] 通过研究新能源的中长期出 力互补特性,建立拉格朗日方程组求解电源配 比的最优解。

考虑到新能源出力的随机性,以上研究通 常选择风电光伏出力的典型场景,无法对于系统 运行的复杂情况进行全面的模拟,因此结合新能 源特性进行时序生产模拟理应成为研究的重点。 文献 [11] 通过考虑水风光出力特性、负荷特性、 机组调峰能力以及电网网络传输等约束,建立了 清洁能源时序生产模拟模型。文献 [12] 提出了 一种考虑网络约束与洗呢能源随机特性的时序运 行模拟技术,并对中国西部新能源大规模开发进 行了生产运行模拟。

综上,大规模水风光多能互补开发的研究 领域主要聚焦在机组建模与优化调度模型的研 究,以及基于刚性约束的时序生产模拟。然而, 大规模水风光多能互补基地通常通过特高压交 直流通道送往负荷中心,如何兼顾送端资源特 性与受端负荷、调峰特性,优化电源配比与送 电曲线,成为影响多能互补基地清洁能源消纳 水平与外送电力品质的关键。

本文选取我国西南水电典型流域的水风光 多能互补基地为研究对象,提出一种兼顾送端 资源匹配、受端负荷特性与调峰需求优化直流 外送曲线的方法,对风光水多能互补应用研究 的一系列关键问题加以探讨。

1 能源特性分析

大规模水风光多能互补基地实施的前提是 在资源侧具备良好的互补特性。

1.1 水电出力特性与调节能力

以白鹤滩水电站为例,白鹤滩水电出力特性 呈现出明显的季节性特征如图1所示。平水年的 丰(6月~10月)枯(11月~5月)发电量比例, 在单独运行时约为55%:45%,呈现明显的"丰 盈枯缺"的特征。考虑上游龙头水库的调蓄作用, 流域联合运行时丰枯比优化至45%:55%。



图 1 白鹤滩水电站平水年出力曲线

一般而言,具有调节库容的季调节、年调 节水电站,其预想出力与平均出力的差值为可 用于电力系统的调节能力。丰期来水充沛,水 库水位高,电站可调节能力弱;枯期水位低, 电站可打捆风光的能力强。

1.2 新能源出力特性

金沙江历经川滇藏三省,流域内具有丰富的风光资源。初步预计上游光伏可开发规模约3500万kW,下游风电、光伏可开发规模约1500万kW,具备建设国家级大型清洁能源多能互补发电基地的良好基础,其风光典型特性如图2所示。

由图可知, 金沙江流域风电场的出力具有 明显的季节性差异, 总体呈"冬春季大、夏秋 季小"的显著特点。另一方面, 风电场日内出 力变化具有明显的波动性, 夏季典型日曲线每 小时出力变率平均值为 19.7%; 大风季节日出



力变化度较大,冬季典型日曲线每小时出力变 率平均值达 26.2%。

金沙江流域在枯期降水较少、天气以晴 为主,光伏电站月内出力较为稳定,日平均出 力系数为0.18以上,但丰期降水增加,阴雨 天气使得光伏电站出力降低,日平均出力系 数下降至0.15以下,全年光伏丰枯电量比为 46%:54%。从日典型出力曲线来看,光伏相较 于风电呈现出明显的周期性特征。

1.3 水风光互补特性

从年内互补特性来看,丰期风光发电量低, 新增的清洁电量对于送受两端消纳压力较小; 枯期风光发电量大,对于直流外送是有力的支 撑。从日内互补特性来看,利用水电的调节作用, 在风光大发时段通过加大水库蓄水降低水电出 力,用风光电量"置换"水电电量,在风光少 发时段,通过释放水库水量抬高水电工作位置, 因此,风光水日内互补是一个"此消彼涨"的 过程,互补后系统整体出力趋于平滑稳定。

2 水风光一体化优化模型

充分利用梯级水电站的调蓄能力以应对风 电、光伏随机性出力给系统带来的冲击,针对 地区新能源的不同出力特性,如何配置合理的 新能源规模是建设多能互补发电基地的关键。

2.1 水风光互补优化目标

水风光互补优化需要充分考虑清洁能源的 出力特性,实现清洁能源弃电率最低,提升电 网"清洁替代"水平,其优化目标综合弃电率 *R*(*W*, *S*)为:

$$\min \mathbf{R}(W,S) = \sum_{t=1}^{T} D_{hws}^{t} \Delta T / \sum_{t=1}^{T} P_{hws}^{t} \Delta T \qquad (1)$$

式中: W 为可配置风电场站集合; S 为可配置 光伏场站集合; AT 为时段时长; T 为计算总时长; P^t_{hws}、D^t_{hws} 分别代表 t 时刻互补发电系统的理论 出力与弃电出力, 其计算公式如下:

$$\begin{cases} P_{hws}^{t} = P_{h}^{t} + \sum_{i=1}^{N_{w}} P_{W_{i}}^{t} + \sum_{j=1}^{N_{s}} P_{S_{j}}^{t} \\ D_{hws}^{t} = P_{hws}^{t} - P_{a}^{t} - P_{c}^{t} \end{cases}$$
(2)

式中: P'_{h} 、 P'_{W} 、 P'_{s} 分别代表t时刻水电站、第 i个风电场以及第j个光伏电站出力; P'_{o} 、 P'_{c} 为 t时刻系统外送直流通道(跨省区消纳)与外送 交流通道(本地消纳)的送电电力。

2.2 优化约束条件

水风光配比规模是系统性优化问题,需要 从送端、直流、受端三个方面,电源和电网两 个维度统筹考虑。

2.2.1 电力系统平衡约束

外送与本地消纳的电力总需求与水电出力 之差为新能源电力空间。电力平衡约束式:

$$P_o^t + P_c^t - P_h^t = \sum_{i=1}^{N_w} P_{W_i}^t + \sum_{j=1}^{N_s} P_{S_j}^t - D_{hws}^t$$
(3)

考虑到光伏出力的变化趋势呈现出明显的 日周期特征,本文建立以日为调度期的水风光 互补优化模型,水电的日发电电量应满足日平 衡约束,如式(4)所示:

$$\sum_{t=1}^{T_d} P_h^t \Delta T = \overline{P_h^t} \sum_{t=1}^{T_d} \Delta T$$
(4)

式中:依据水电的平均出力曲线, $\overline{P_h}$ 为 t 时刻所属月份水电的平均出力; T_d 为每日的时长。

同时,系统外送也应满足外送直流通道与

送端电网交流通道的输送能力约束:

$$0 \leq P_o' \leq P_{o\max}$$

$$0 \leq P_c' \leq P_{c\max}$$
(5)

式中: *P_{omax}、P_{cmax}*分别为外送直流通道与本地 交流通道的送电能力上限。

2.2.2 电站平衡约束

梯级水电站的出力由水头、发电的水流量 决定^[6],水电站出力可以表示为:

$$\begin{cases} P_h^t = g\eta H^t Q^t \\ V^t = V^{t-1} + (I^t - Q^t) \Delta T \end{cases}$$
(6)

式中:g为重力加速度;η为水电站机组发电 效率;H'为水电站t时刻的发电净水头;Q'为 t时刻的下泄流量;V'为t时刻的水库库容;I' 为t时刻的水库流入水量。水电站的出力、库 容和下泄流量需满足以下约束:

$$\begin{cases} P_{h\min} \leqslant P'_h \leqslant P_{h\max} \\ V_{\min} \leqslant V' \leqslant V_{\max} \\ Q_{\min} \leqslant Q' \leqslant Q_{\max} \end{cases}$$
(7)

式中: P_{hmin}、P_{hmax}分别为水电站的出力上下限; V_{min}、V_{max}分别为水电站库容上下限; Q_{min}、Q_{max} 分别为水电站下泄流量上下限。

新能源出力也应满足电站额定容量的约束:

$$\begin{vmatrix}
0 \leqslant P_{W_i}^t \leqslant P_{W_i \max} \\
0 \leqslant P_{S_j}^t \leqslant P_{S_j \max}
\end{cases}$$
(8)

式中: $P_{W_i,\max}$ 、 $P_{S_i,\max}$ 分别为第i个风电场与第j个光伏电站的额定容量。

3 兼顾送受的直流送电曲线优化

水风光多能互补发电系统的主要定位是利 用直流通道外送,从上节的优化模型中可知, 直流通道外送电力 P'o成为限制新能源出力空间 的主要因素之一。直流送电曲线优化是贯彻水 风光互补优化始终的重要环节,优化目标主要 包括以下三个方面:①直流通道应保证合理的 送电电量与利用小时数;②送端水风光的清洁 电源弃电率应保持在合理水平;③兼顾受端电 力保障与调峰要求。

3.1 匹配资源的年送电曲线优化

直流年送电曲线主要基于配套清洁电源电 量,尽可能实现清洁能源充分消纳,枯期不弃电、 丰期少弃水;同时也应充分考虑受端电网的负 荷特性,在受端负荷高峰时刻起到电力支撑 作用。

假设受端区域在夏季和冬季存在较大的用 电缺口,如图3所示,展示了在相同的直流利 用小时数下,依据送端资源分布的送电曲线与 依据受端负荷需求送电曲线的差异。



图 3 基于资源匹配与负荷匹配的直流年送电曲线

由图 3 可知,送端水风光发电量与受端需 求存在季节差异,多能互补发电系统应充分与 送端电网电力交换,在送端电网电力富余时组 织余电外送,在受端电网需求下降时组织电力 本地消纳。针对送端电网第 *k* 个月份,计算在 *t* 时刻的电力平衡盈亏 *P^t_{c k}*:

$$P_{c,k}^{t} = G_{c,k}^{t} - L_{c,k}^{t}$$
(9)

式中: $G_{c,k}^{t}$, $L_{c,k}^{t}$ 分别代表送端电网第k个月份 t时刻电源出力与负荷。选取 $P_{c,k}^{t}$ 中的最小值 作为第k个月份装机控制时刻的电力平衡盈亏 $P_{c,k}$,则该区域第k个月份的电量空间 $E_{c,k}$ 可通 过式(10)估算:

$$E_{c,k} = -P_{c,k}N_k \sum_{t=1}^{r_d} \Delta T \tag{10}$$

式中: N_k代表第 k 个月份的天数。E_{c,k}>0表示 送端有余量空间可以消纳水风光多能互补发电 系统的富余电力; E_{c,k}<0表示送端有富余电力 可以利用直流通道外送。

年送电曲线的优化主要在考虑匹配负荷曲 线变化趋势的基础上,同时兼顾匹配送端的水 风光资源。其优化目标包括清洁能源弃电率 R_{g,k} 与受端负荷匹配度 R_{l,k}两方面,具体如下:

$$\min R_{g,k} + \lambda_k R_{l,k} \tag{11}$$

式中: λ_k 为权重因子。

本阶段清洁能源弃电率 *R_{g,k}* 与受端负荷匹 配度 *R_{1,k}* 的估算方法如下:

$$\begin{cases} R_{g,k} = \sum_{k=1}^{12} (E_{g,k} - E_{o,k}) \omega(k) / E_{o,k} \\ R_{l,k} = \sum_{k=1}^{12} \sqrt{(E_{o,k} - E_{l,k})^2} / E_{o,k} \end{cases}$$
(12)
$$\int \omega(k) = 1, E_{g,k} > E_{o,k} + E_{c,k}$$
(13)

 $\omega(k) = 0, E_{g,k} \leq E_{o,k} + E_{c,k}$ 式中: $E_{g,k}$ 、 $E_{l,k}$ 为在相同直流利用小时数下依 据送端资源分布的送电电量与依据受端负荷需 求的送电电量,如图 3 所示。 $E_{o,k}$ 为优化后的直 流送电量, $\omega(k)$ 为第k个月的资源弃电指示函 数。清洁能源弃电率 $R_{g,k}$ 不应超过弃电率限定值,

即 0 《
$$R_{g,k}$$
 《 $R_{g,kmax}$; $E_{o,k}$ 还应满足相同直流利
用小时数 T_{dc} 下的全年送电量的约束,即 :
$$\sum_{k=1}^{12} E_o^k = \sum_{k=1}^{12} E_g^k = \sum_{k=1}^{12} E_l^k = T_{dc} \times P_{omax}$$
(14)

3.2 兼顾送端的日送电曲线优化

3.2.1 优化目标函数

上文最优全年送电曲线确定了每个月的送电电量。在此基础上,日送电时序曲线 $P_{ok} = [P_{ok}^{1}, P_{ok}^{2}, \dots, P_{ok}^{\prime}, \dots, P_{ok}^{Td}]$ 应与受端日负荷特性相匹配,同时也应考虑到受端地区配套新能源的反调峰特性,减轻受端消纳压力。

对于第 k 个月的受端电网典型日负荷曲线 $L_{o,k} = [L_{o,k}^{1}, L_{o,k}^{2}, \cdots, L_{o,k}^{t}, \cdots, L_{o,k}^{Td}]$, 受送端电量资 源限制, 难以完全按照负荷变化趋势送电, 应 重点保障负荷高峰期的电力需求。本文提出不 同时段的送电权重 λ_{L}^{t} , 如式 (15) 所示:

$$\lambda_{L}^{t} = (L_{o,k}^{t} - L_{o,k\min}) / (L_{o,k\max} - L_{o,k\min})$$
(15)

式中: $L_{o,k}^{t}$ 代表 t 时刻受端电网的负荷水平; $L_{o,kmax}$ 、 $L_{o,kmin}$ 分别为 $L_{o,k}$ 中的最大值与最小值。

为匹配受端电力需求,在同一电量水平下, 对日送电曲线进一步优化,其优化函数如下:

$$\min \sum_{t=1}^{T_d} \lambda_L^t \left| P_{o,k}^t / P_{o\max} - L_{o,k}^t / L_{o,k\max} \right| / N_k \quad (16)$$

3.2.2 调峰时序约束

06

优化过程中应满足一系列约束。首先是年 送电曲线的电量约束,即:

$$\sum_{t=1}^{T_d} P_{o,k}^t \Delta T \times N_k = E_o^k \tag{17}$$

其次应满足受端电网的调峰约束,计算 该月的受端调峰平衡序列 $C_{o,k} = [C_{o,k}^{l}, C_{o,k}^{2}, \cdots, C_{o,k}^{t}], 具体如下:$

$$C_{o,k}^{t} = L_{o,k}^{t} - G_{o,k\min}^{t} - W_{o,k}^{t} - S_{o,k}^{t}$$
(18)

式中: $G_{o,kmin}^{t}$ 为受端电网常规电源机组的最小 出力, $W_{o,k}^{t}$ 、 $S_{o,k}^{t}$ 代表t时刻受端电网的风电及 光伏出力。 $C_{o,k}^{t} < 0$ 表示受端电网风光调峰困难, 直流送电应降低出力参与调峰。

序列 $C_{o,k}$ 体现了受端电网新能源出力与负荷的变化趋势。为了能够细致地反映调峰变化的趋势,将其趋势分为7种情况:快速上升、迅速上升、缓慢上升、持平、缓慢下降、迅速下降、快速下降,分别用 { $3\varepsilon_c, 2\varepsilon_c, \varepsilon_c, 0, -\varepsilon_c, -2\varepsilon_c, -3\varepsilon_c$ }的模式序列加以描述, ε_c 为模式序列的单位变化量。

斜率是反映曲线变化快慢的变量,为了能 准确刻画调峰序列的形态模式,本文提出了调 峰平衡序列的斜率计算方法,如下:

$$\begin{cases} C_{o,k}^{'} = \left[\Delta c_{o,k}^{1}, \Delta c_{o,k}^{2}, \cdots, \Delta c_{o,k}^{t}, \cdots, \Delta c_{o,k}^{T_{d}}\right] \\ \Delta c_{o,k}^{t} = \lambda_{c}^{t} \left(C_{o,k}^{t} - C_{o,k}^{t-\Delta T}\right) / P_{o\max} \\ \lambda_{c}^{t} = C_{o,k}^{t} \times P_{o\max} / C_{o,k\max} \end{cases}$$
(19)

式中: $\Delta c_{o,k}^{t}$ 为 $C_{o,k}^{t}$ 的变化斜率; $C_{o,kmax}$ 为序列 $C_{o,k}$ 中绝对值最大值; λ_{c}^{t} 为压缩因子。

获得调峰斜率时序序列 $C_{o,k}$ 后,参考表1 可以进一步获取斜率序列与模式序列的关系。 模式序列 $\varepsilon_{o,k} = [\varepsilon_{o,k}^1, \varepsilon_{o,k}^2, \cdots, \varepsilon_{o,k}^{t_d}]$ 的值可 以通过表1对照获得,表中 ε_o 为模式序列变化 单元值。

表1 斜率序列与模式序列对照表

$\mathcal{E}_{o,k}^{t}$	$ \Delta c_{o,k}^{t} < \varepsilon_{o}^{l}$	$ \Delta c_{o,k}^{t} \ge \varepsilon_{o}^{l}$	$ \Delta c_{o,k}^{t} \geq \varepsilon_{o}^{m}$	$ \Delta c_{o,k}^{t} \geq \varepsilon_{o}^{h}$
$\Delta c_{o,k}^{t} \ge 0$	0	ε _c	$2\varepsilon_c$	$3\varepsilon_c$
$\Delta c_{o,k}^{t} < 0$	0	$-\varepsilon_c$	$-2\varepsilon_c$	$-3\varepsilon_c$

若调峰时序序列 $\Delta c_{o,k}^{t} \ge 0$ 且 $|\Delta c_{o,k}^{t}| \ge \varepsilon_{o}^{h}$, 说明此时调峰序列处于快速上升的状态,形

态序列 $\varepsilon_{o,k}^{t} = 3\varepsilon_{c}$;若调峰时序序列 $\Delta c_{o,k}^{t} < 0$ 且 | $\Delta c_{o,k}^{t}$ | $\geq \varepsilon_{o}^{h}$,说明此时调峰序列处于快速下降 的状态,形态序列 $\varepsilon_{o,k}^{t} = -3\varepsilon_{c}$ 。其他形态可以类 推得到。基于调峰模式序列,t时刻的调峰送电 上限 P_{cmax}^{t} 可以由下式得出:

$$P_{c\,\max}^{t} = P_{c\,\max}^{t-\Delta T} + \mathcal{E}_{o,k}^{t} \times P_{o\,\max}$$
(20)

日送电曲线 P^t_{o,k} 应满足调峰送电约束, 即:

$$P_{o,k}^t \leqslant P_{c\,\max}^t \tag{21}$$

4 西南典型流域多能互补案例研究

4.1 边界条件

选取西南水电中金沙江流域作为典型案例 进行研究。金沙江流域配套直流的送受端主要 包括四川、云南、上海、浙江、江苏、广东以 及湖北,直流送端省份主要为经济发展迅速的 华东、华南、华中地区,负荷与用电量"十四五" 期间发展迅速,有充足的增量水风光消纳空间。 考虑联合调节,四川金沙江流域金上7级电站、 金下乌东德、白鹤滩、溪洛渡电站的平水年平 均出力曲线如图4所示。金沙江流域风电与光 伏的典型出力特性详见第一章节。





基于以上送受端电网的负荷与电源规划, 结合水电、风电、光伏的全年出力特性曲线, 考虑以单个直流外送通道为研究核心,建立以 水电站配套风光依靠直流外送的子系统模型, 同步建立四川、云南省级电网的区域电力系统 模型,对每条直流可打捆的最优风光配比方案 进行时序仿真研究。

4.2 直流送电曲线优化

4.2.1 直流利用小时数框选

新能源的电力空间与电量空间受到直流 送电曲线的约束, 直流利用小时数的提高将为 新能源的接入带来电力电量空间。现阶段考虑 留存四川、云南的枯水期电力电量后,乌东德 水电站对直流通道贡献的送电利用小时数约 为2993h, 白鹤滩水电站对直流通道贡献的 送电利用小时数约为3027h,通道的利用率 不高。

结合现有外送直流通道送电情况,考虑 充分消纳水电基础上,适当提高风电光伏送 电电量,考虑拟定配套直流利用小时数 T_{dt} 在 4 500 h ~ 6 000 h 的区间。基于此区间考虑拟 定不同利用小时数下各直流的高中低年送电量 方案。

4.2.2 年送电曲线优化

以白鹤滩左岸送电江苏为例,该直流送端 为四川省, 受端为江苏省。四川省"十四五" 期间的电力盈亏发展趋势如图5所示。四川省 电力供需具有以水为主、丰枯结构性矛盾突出 的特点。



图5 四川省电力盈亏趋势

由图5中可知,四川省在2025年出现季 节性缺口,最大缺口达到353万kW,基于上 述电力盈亏结果依据式(10)估算四川电网可消 纳的电量空间,进一步结合清洁能源弃电率 R_{ak} 与受端负荷匹配度 R_{Lk} 对白鹤滩左岸送电江苏 的年送电曲线进行迭代优化,其中,控制参数 $R_{g,kmax}$ =10%, λ_k =0.2, 得到白鹤滩左岸至江苏最 优年送电曲线如图6所示。



图6 白鹤滩左岸直流年送电曲线

从图6中可以看出,为保障送端水风光多 能互补发电系统的弃电率,优化曲线优秀匹配 送端的资源禀赋。考虑到四川水电在丰期有富 余水电可以组织外送,送电曲线适当上调以满 足受端电力支撑需求;枯期送端本地电力亏缺 而受端春秋季电力需求不足,送电曲线适当下 调以满足送端本地需求。

4.2.3 日送电曲线优化

日送电曲线需要兼顾受端地区的不同场景, 主要包括高负荷场景与反调峰场景两类。在高 负荷场景下直流日送电曲线应确保电力支撑, 在反调峰场景时应配合调峰控制。

在全国"碳达峰、碳中和"背景下,受端 省份的新能源也将进一步迅猛发展,为电网消 纳带来显著压力。选择受端地区四季典型日的 负荷及新能源出力曲线,如图7所示。以江苏 省为例,受端电网负荷高峰主要集中在夏冬两 季,春秋季负荷较低。负荷高峰场景下,夏季 风电出力较低、冬季出力较高,光伏则呈现相 反的变化趋势;在反调峰场景下,春秋季风光 大发的概率较高,同时风电的出力变率较高, 对于送端直流的调峰深度提出要求。



图7 受端地区负荷及新能源出力场景

基于受端地区新能源出力统计结果及典型 风光出力曲线开展调峰平衡时序计算,生成调 峰平衡序列,各季节典型调峰时序曲线如图8、 图9所示。





图9 四季典型日送电曲线

由图9可知,夏季负荷高峰,受端地区调 峰存在较大裕度,日送电曲线应以保障电力需 求为主;冬季高峰风电出力较高,在风电大发 时段日送电负荷应积极参与调峰;春季调峰压 力最大,,应尽量压低送电曲线减轻受端压力。

取 *ε*^{*l*}_o=0.1、*ε*^{*m*}_o=0.25、*ε*^{*b*}_o=0.5、*ε*_c=0.1,生成调 峰时序序列的模式匹配序列。兼顾调峰时序模 式匹配与受端负荷曲线拟合,对受端地区各典 型时刻下的日送电曲线进行优化,以白鹤滩~江 苏的低方案为例,其四季典型日的日送电曲线 优化过程如图 9 所示。从图中可以看出,在夏 季高峰时刻,受端系统调峰裕度大,直流可以 满容量送电,受制于送端水风光资源量,利用 送电权重系数加权,保障负荷高峰时期的电力 电量;在春秋低谷时刻,直流应充分考虑风电 光伏出力影响,在风电易大发的夜间与光伏大 发的正午时刻参与调峰,限制直流出力。

5 结论

以金沙江为代表的西南水电流域内水能、 风能以及光能蕴藏丰富,梯级大型水电站具备 良好的日调节能力。一方面,以水电站为调节 电源,水风光的年内、日内出力特性均具有良 好的互补特性;另一方面,以水电站配套直流 为依托,随着直流送端省份的用电需求进一步 增长,对增量风电光伏有充足的电力电量消纳 空间。因此,西南水电具备建设大规模水风光

(下转第20页)

来保供压力、一次能源供应波动和机组非计划 停运进一步引致不确定性等。有关部门在制定 电力保供预案时,也应充分考虑敏感因素影响, 做好有关预测和应急准备,不断提升电力保障 能力,支撑电力行业安全高质量发展。

参考文献

- 周业荣,毛玉鑫,胡杨,等. 2022年夏季极端天气 对四川电力影响与启示[J].水力发电学报,2023, 42(6): 23-29.
- [2] 别芳玫,方仍存,万靖,等.2022年夏季高温干旱 天气对区域电力系统影响分析研究[J].湖南电力,

2023, 43(4): 108-113.

- [3] 任永建,熊守权,洪国平,等.气象因子对夏季最 大电力负荷的敏感性分析[J]. 气象,2020,46(9): 1245-1253.
- [4] 方鸽飞,胡长洪,郑奕辉,等.考虑夏季气象因素的短期负荷预测方法研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(22):100-104.
- [5] 刘文娇,沈春明,郭军红,等.夏季气象电力负荷 相关性分析模型修正方法——以北京为例[J/OL].电 力科学与技术学报.[2023-06-19]. https://kns.cnki. net/kcms2/detail/43.1475.TM.20230619.1349.002.html

(编辑 刘旭)

(上接第8页)

多能互补发电系统的良好基础。

大规模水风光多能互补发电系统的定位 主要是借助直流外送至送端省份。直流日送 电曲线的优化成为重点。本文提出基于调峰 模式匹配与受端负荷拟合的直流日送电曲线 优化方法,该方法引入清洁能源弃电率与受 端负荷匹配度以优化年曲线分布,进而引入 送电权重与调峰时序上限以约束日曲线,在 负荷大方式下充分保障受端电力需求,在小 方式风光大发场景下积极参与调峰。

随着新型电力系统的持续构建,电网面 临新能源渗透率不断提升的压力。本文提出 的基于模式匹配的直流日曲线优化方法能够 助力多能互补基地持续稳定外送运行,可以 为日后大型清洁能源发电基地的电源配置开 发、直流外送与本地消纳提供设计建议。

参考文献

- [1] 国家发展改革委,国家能源局.关于推进电力 源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见(发 改能源规(2021)280号)[Z].2021-02-25.
- [2] 程海花,寇宇,周琳,等.面向清洁能源消纳的 流域型风光水多能互补基地协同优化调度模式与 机制[J].电力自动化设备,2019,39(10):61-70.
- [3] 胡伟,戚宇辰,张鸿轩,等.风光水多能源电力系统互补智能优化运行策略[J].发电技术,2020,41(1):9-18.
- [4] LI PENG, DOND RAN, WANG LILI, et al. Multi-Energy Coordinated Operation Optimization Model for Wind-Solar-Hydro-Thermal-Energy Storage System Considering the Complementary Characteristics of Different Power

Resources[C]. 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration, 2018: 1-6.

- [5] 朱燕梅,黄炜斌,陈仕军,等.水光互补日内优 化运行策略[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(3): 142-149.
- [6] 文杰,刘继春,温正楠,等. 计入负荷时空转 移特性的风-光-水-蓄互补系统容量配置方法[J]. 中国电力,2021,54(2):66-77.
- [7] AN YUAN, ZHAO ZEHAOHAN, WANG SONGKAI, et al, Coordinative Optimization of Hydro-Photovoltaic-Wind-Battery Complementary Power Stations[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(2): 410-418.
- [8] S. WAIWONG, P. DAMRONGKULKAMJORN. Optimal Sizing for Stand Alone Power Generating System with Wind-PV-Hydro Storage by Mixed-Integer Linear Programming[C]. 2016 IEEE International Conference on New Energy Research and Applications, 2016: 437-441.
- [9] SHI ZHAODI, WANG WEISHENG, HUANG YUEHUI, et al. The Capacity Joint Optimization of Energy Storage and New Generation Based on Simulation[C]. 2018 International Conference on Power System Technology, 2018: 1-4.
- [10] WANG SONGKAI, JIA RONG, SHI XIAOYU, et al. Hybrid Time-Scale Optimal Scheduling Considering Multi-Energy Complementary Characteristic[J]. IEEE Access, 2021, 9: 94087-94098.
- [11] 戚永志,黄越辉,王伟胜,等.高比例清洁能 源下水风光消纳能力分析方法研究[J].电网与 清洁能源,2020,36(1):55-63.
- [12] 潘尔生,李晖,肖晋宇,等.考虑大范围多种类 能源互补的中国西部清洁能源开发外送研究[J]. 中国电力,2018,51(9):158-164.

(编辑 刘旭)