

基于时序模拟的风火打捆送出消纳规划优化方法

刘新苗¹, 刘俊磊¹, 娄源媛¹, 卢洵¹, 刘正超¹, 张东辉², 徐芸霞², 陈一夫²

(1. 广东电网有限责任公司, 广州 510620; 2. 清华四川能源互联网研究院, 成都 610000)

摘要: 风火打捆是提升风电送出通道效益的有效方式, 风火配比和外送通道容量是影响打捆整体高效经济运行的重要因素。因此提出了一种风火打捆送出消纳规划优化方法, 首先分析典型风火打捆送出消纳场景的规划目标需求; 其次从满足系统整体供需平衡出发, 考虑系统安全稳定运行约束, 建立以风火打捆整体规划综合成本最小为目标函数的优化模型; 然后提出基于时序模拟的规划优化方法求解模型, 比选出目标函数最小的最优方案; 最后以实际案例验证所提模型和方法的有效性。

关键词: 风火打捆; 外送通道; 送出消纳; 规划优化; 时序模拟

Planning Optimization Method for Transmission and Consumption of Wind-Thermal Bundled Based on Time Series Simulation

LIU Xinmiao¹, LIU Junlei¹, LOU Yuanyuan¹, LU Xun¹, LIU Zhengchao¹, ZHANG Donghui²,
XU Yunxia², CHEN Yifu²

(1. Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China; 2. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610000, China)

Abstract: Wind-thermal bundled transmission is an effective way to improve the efficiency of wind power transmission channels. The ratio of wind-thermal bundled and the capacity of external transmission lines are important factors that affect the overall efficient and economic operation. A planning optimization method for transmission and consumption of wind-thermal bundled is proposed. Firstly, the planning target requirements for typical transmission and consumption of wind-thermal bundled are analyzed. Secondly, starting from meeting the overall supply and demand balance of the system, an optimization model with the objective function of minimizing the overall planning cost of wind-thermal bundled is established, which takes into account the constraints of safe and stable operation of the system. Then, a planning optimization method based on time series simulation is proposed to solve the model to compare and select the optimal solution with the smallest objective function. Finally, the effectiveness of the proposed model and method are verified through practical cases.

Key words: wind-thermal bundled; transmission channel; transmission and consumption; planning optimization; time series simulation

0 引言

近期, 最新提出的《关于推动能耗双控逐步转向碳排放双控的意见》指出, 新能源是我国新型电力系统建设的主力军, 其中, 风电的大规模开发利

用是实现“双碳”目标的重要途径之一^[1-3]。截至 2022 年底, 我国风电装机规模为 370 GW, 占总装机容量的 18.9%, 发电量占比为 11.7%, 已成为新能源新增装机、发电主体^[4]。

目前, 我国许多地区的风电集群并网容量远超本地消纳上限, 弃风现象严重, 通道利用率低^[5-7]。根据已有的大规模集群风电项目开发经验, 通过与火电打捆, 发挥火电灵活调节能力, 可实现送端电源调峰并抑制风电波动性, 是提升大规模风电外送消纳水平的有效手段^[8-9]。但也常常因为在风火打

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U22B6008); 广东电网有限责任公司规划项目(030000QQ00220001)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (U22B6008); the Planning Project of Guangdong Power Grid Co., Ltd.(030000QQ00220001)。

捆送出项目规划阶段对风火装机容量配比和送出通道容量的规划不合理,以及对系统接纳送出电力的能力评估不准确,同样存在风电消纳水平、火电利用小时数及通道利用率偏低、整体送出经济性差等问题^[10-13]。

近年来,国内外学者或机构对风火打捆送出消纳的规划运行优化开展了相关研究并取得一定成果。文献[14]总结了风火打捆外送的几个关键技术,包括风火配置、系统优化规划、系统稳定性和风火调控策略。风火配置和规划优化方面,文献[15]论述了特高压交流外送通道打捆输送风火的主要原则、关键因素和风火打捆容量计算理论。文献[16]通过建立反映特高压风火打捆送电特性的生产模拟模型来降低受端电网的运行能耗与成本。文献[17]通过建立风、火发电商之间采取合作与不合作策略下的古诺博弈模型模拟二者的决策行为,进而规划各自容量。文献[18]构建了基于量子粒子群优化算法的风火容量优化分配模型,解决直流外送落点及风火容量配置问题。文献[19]提出了考虑风速和负荷特性的风火打捆分段波动输送功率规划优化模型和方法,并采用模拟退火算法求解^[20]。文献[21]建立考虑受端电网稳定性和经济性的指标体系和多目标优化模型,采用非支配排序遗传算法和多目标决策方法求解风火打捆输电的最优方案。系统稳定性和运行调控方面,静态下,文献[22]考虑风电不确定性,建立计及直流功率调整约束的日前机组组合模型来支撑风火打捆直流外送系统的日前计划制定。文献[23]以风火出力计划为优化控制变量,构建了考虑弃风限电风险的风火打捆外送多目标优化调度模型和方法。文献[24]推导了风火打捆系统区间振荡模态与外送功率和系统等效惯量的关系,建立了考虑小干扰稳定性的风火配比优化模型。暂态下,文献[25]根据某特定地区弱风火打捆外送系统的功角和频率稳定问题提出安全稳定校核与控制方案来提升整体外送能力。文献[26-27]提出基于时序运行模拟法的最优风火容量配比整定方法,并利用通道暂稳极限校核与调整模拟结果来避免暂稳风险。通道输电能力提升方面,文献[28]提出风火打捆、多元耦合的系统建设运行模式来提高送出通道利用率,保障负荷中心能源供给和大规模海上风电送出消纳。文献[29]建立风火打捆经交直流通道送往受端系统的通道最大输电能力计算模

型,采用非序贯蒙特卡洛法对区域间输电能力进行概率评估。综上,已有研究主要侧重于解决风火打捆送出的风火配比、通道容量及风火联合调控的某一问题的优化,对该规划场景的关键影响因素分析尚不清晰,对各影响因素的综合考虑较少。因此,如何兼顾通道建设和风、火发电商各方的目标需求和经济性,量化提出具体的整体规划方案均须进一步开展相关研究。

为解决以上问题,本文首先对典型风火打捆送出消纳场景的规划目标需求进行梳理分析;其次从满足系统整体供需平衡出发,兼顾风电消纳水平提升、火电和外送通道的高效经济运行,考虑系统安全稳定运行约束,建立以风火打捆整体规划综合成本最小为目标的优化模型;然后提出基于时序模拟的综合规划优化方法求解模型,综合比选出最优规划方案;最后以实际案例验证所提模型和方法的有效性。

1 风火打捆送出规划目标需求

图1所示为目前我国大规模集中式风火打捆送出的典型场景,一定规划区域内分散建设的风电集群在集控站汇集后,经短距离输电线路与近区火电厂打捆,然后通过大容量远距离外送通道将电力送至负荷中心消纳。

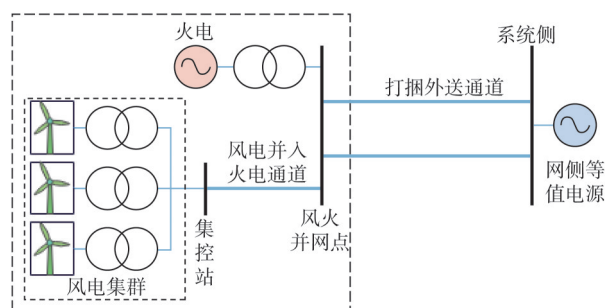


图1 典型风火打捆送出场景架构图

Fig. 1 Architecture diagram of typical wind-thermal bundled and delivery scenario

该场景下,风火送出能力主要受两方面因素影响。一是送出通道热稳定能力的限制。大规模风火打捆外送基地一般都远离负荷中心,需经过长距离线路输送,若关键线路检修或线路本身传输容量过小,受制于热稳定能力的限制,容易出现网络阻塞,增加限电损失,是目前大容量海上风电与火电打捆送出消纳的主要限制因素。二是系统调峰平衡

限制。由于风电出力具备波动性、随机性和反调峰等特性,对于负荷密集区的大规模海上风电并网消纳,负荷峰谷差本就较大,风电出力特性进一步加剧了系统调峰难度^[30-32],必要时需采取弃风措施参与调峰。故因系统调峰能力不足而导致的弃风是限制其消纳的原因之一。

对于通道热稳限制,需要合理规划通道容量来解决,遵循成本最优的规划准则,在此基础上寻求提升风火打捆外送空间的优化方案。对于系统调峰平衡限制,需从系统整体供需平衡角度出发,考虑系统对风火打捆的需求,结合风电出力特性,规划合适的风火装机配比,准确评估系统接纳外送电力的能力,尽量减少弃电。

因此,综合考虑以上多种影响因素,在规划阶段建立合理的规划优化模型,采用合适仿真模拟方法准确评估系统风电消纳能力,研究提升风电消纳水平和风火打捆送出整体经济性的综合规划方法显得尤为重要。

2 风火打捆送出规划优化模型

2.1 目标函数

基于前文分析,风火打捆送出规划须从满足系统整体供需平衡出发,优化提升风电消纳水平和通道高效利用空间的同时兼顾火电运行经济性,并体现促进风电消纳产生的绿色低碳效益。

为统一时间尺度,本文以1a为统计期限,以风火打捆送出整体的年综合成本最小为优化目标。其中,年综合成本包括:风电弃电成本、通道规划成本、火电电量损失成本,并扣除风电低碳收益。建立规划优化综合成本最小的目标函数 f 如式(1)所示。

$$\min_X f = C_w^{\text{aban}}(X) + C_{\text{line}}^{\text{inv}}(X) + C_{\text{th}}^{\text{loss}}(X) - I_w^{\text{carb}}(X) \quad (1)$$

式中: $C_w^{\text{aban}}(X)$ 为风电弃电成本; $C_{\text{line}}^{\text{inv}}(X)$ 为通道规划成本; $C_{\text{th}}^{\text{loss}}(X)$ 为火电电量损失成本; $I_w^{\text{carb}}(X)$ 为风电低碳收益; X 为优化模型的决策变量。

各成本具体计算如下所述。

1) 风电弃电成本 $C_w^{\text{aban}}(X)$

考虑到实际运行中系统对新能源弃电率有要求,为体现新能源消纳水平的优劣,本文对风电弃电量作以下两种假设:(1)风电弃电率在限值以内(含限值)时,弃电量取实际值;(2)风电弃电率超

过限值时,对于超过限值部分的弃电量附加大于1的惩罚系数。

因此,风电年弃电成本 $C_w^{\text{aban}}(X)$ 由风电弃电率在限值以内的弃电成本 $C_w^{\text{aban1}}(X)$ 和超过目标限值的弃电成本 $C_w^{\text{aban2}}(X)$ 两部分组成。

$$C_w^{\text{aban}}(X) = C_w^{\text{aban1}}(X) + C_w^{\text{aban2}}(X) \quad (2)$$

$$C_w^{\text{aban1}}(X) = E_w^{\text{aban}}(X) \times c_w^{\text{aban}}, \quad 0 \leq k_w^{\text{aban}} \leq k_w^{\text{lim}} \quad (3)$$

$$C_w^{\text{aban2}}(X) = [E_w^{\text{aban}}(X) - E_w^{\text{gen}}(X) \times k_w^{\text{lim}}] \times \alpha_w^{\text{psh}} \times c_w^{\text{aban}}, \quad k_w^{\text{aban}} > k_w^{\text{lim}} \quad (4)$$

$$E_w^{\text{aban}}(X) = E_w^{\text{gen}}(X) - E_w^{\text{out}}(X) \quad (5)$$

$$k_w^{\text{aban}} = \frac{E_w^{\text{aban}}(X)}{E_w^{\text{gen}}(X)} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $E_w^{\text{aban}}(X)$ 为风电年弃电量; $E_w^{\text{gen}}(X)$ 为风电年理论发电量; $E_w^{\text{out}}(X)$ 为风电年送出量; c_w^{aban} 为风电单位弃电成本; α_w^{psh} 为超弃电率限值部分的惩罚系数; k_w^{aban} 、 k_w^{lim} 分别为风电弃电率和弃电率限值。

2) 通道规划运行成本 $C_{\text{line}}^{\text{inv}}(X)$

通道年规划运行成本 $C_{\text{line}}^{\text{inv}}(X)$ 含初始投资成本 $C_{\text{line}}^{\text{inv,ini}}(X)$ 和运维成本 $C_{\text{line}}^{\text{ma}}(X)$,并进行等年值折算。

$$C_{\text{line}}^{\text{inv}}(X) = C_{\text{line}}^{\text{inv,ini}}(X) \times \frac{I}{1 - (1 + I)^{-T_{\text{line}}}} + C_{\text{line}}^{\text{ma}}(X) \quad (7)$$

$$C_{\text{line}}^{\text{inv,ini}}(X) = n_{\text{line}} \times L_{\text{line}}(X) \times P_{\text{line}}(X) \times c_{\text{line}}^{\text{inv}} \quad (8)$$

$$C_{\text{line}}^{\text{ma}}(X) = C_{\text{line}}^{\text{inv,ini}}(X) \times k_{\text{line}}^{\text{ma}} \quad (9)$$

式中: I 为贷款年利率; T_{line} 为通道运行周期,以年为单位; n_{line} 为通道建设回路数量; $P_{\text{line}}(X)$ 为通道容量; $L_{\text{line}}(X)$ 为通道长度; $c_{\text{line}}^{\text{inv}}$ 为通道单位长度单位容量投资建设成本; $k_{\text{line}}^{\text{ma}}$ 为通道每年的运行维护成本系数,即占初始投资成本的比例。

3) 火电电量损失成本 $C_{\text{th}}^{\text{loss}}(X)$

若风电规模过大导致火电正常开机受到影响,在其他时期若无法对火电进行电量补发补偿,会对火电的利用小时数产生较大影响。故本文假设先拟定火电年目标利用小时数,计算相应目标电量作为基准,再根据打捆后火电实际开机情况计算实际发电量,与基准电量比较并计算相应的损失电量成本。

$$C_{\text{th}}^{\text{loss}}(X) = E_{\text{th}}^{\text{loss}}(X) \times c_{\text{th}} \quad (10)$$

$$E_{\text{th}}^{\text{loss}}(X) = E_{\text{th}}^{\text{tar}}(X) - E_{\text{th}}^{\text{act}}(X) \quad (11)$$

$$\begin{cases} E_{\text{th}}^{\text{tar}}(X) = P_{\text{th,N}}^{\text{bal}} \times T_{\text{th}}^{\text{tar}} \\ E_{\text{th}}^{\text{act}}(X) = \sum_{t=1}^{T_{\text{year}}} (P_{\text{th,t}}^{\text{act}} \times t) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $E_{th}^{act}(X)$ 、 $E_{th}^{tar}(X)$ 、 $E_{th}^{loss}(X)$ 分别为打捆火电的实际发电量、目标电量、损失电量; c_{th} 为火电上网电价; $P_{th,N}^{bal}$ 为打捆火电的额定装机容量; T_{th}^{tar} 为打捆火电的目标利用小时数; $P_{th,t}^{act}$ 为 t 时刻打捆火电实际出力; T_{year} 为年统计周期。

4) 风电低碳收益 $I_w^{carb}(X)$

风电绿色低碳的环境效益可通过量化的低碳收益体现。

$$I_w^{carb}(X) = E_w^{out}(X) \times c_{carb} \quad (13)$$

式中 c_{carb} 为单位电量碳收益。

2.2 约束条件

风火打捆送出规划优化模型须满足系统运行的等式及不等式约束条件, 包括: 系统功率平衡约束、线路热稳约束、暂态稳定约束、常规机组运行约束、新能源出力约束等。

1) 系统功率平衡约束

优化模型须实时满足系统功率平衡约束。

$$P_{load,t} = \sum_{g=1}^{N_G} P_{g,t} + \sum_{w=1}^{N_W} P_{w,t} + \sum_{n_{pv}=1}^{N_{PV}} P_{n_{pv},t} + \sum_{n_{tr}=1}^{N_{TR}} P_{n_{tr},t} + \sum_{n_{es}=1}^{N_{ES}} (P_{n_{es},t}^{dis} - P_{n_{es},t}^{ch}) \quad (14)$$

式中: $P_{load,t}$ 为 t 时刻的总负荷水平; $P_{g,t}$ 为 t 时刻常规机组 g 的有功功率出力; $P_{w,t}$ 为 t 时刻风电机组 w 的有功功率出力; $P_{n_{pv},t}$ 为 t 时刻光伏发电单元 n_{pv} 的有功功率出力; $P_{n_{tr},t}$ 为 t 时刻系统与外区联络传输线 n_{tr} 的传输功率, 送入为正数, 送出为负数; $P_{n_{es},t}^{dis}$ 、 $P_{n_{es},t}^{ch}$ 分别为 t 时刻储能系统 n_{es} 的放电功率和充电功率; g 、 w 、 n_{pv} 、 n_{tr} 、 n_{es} 分别为常规机组、风电机组、光伏发电单元、联络线、储能系统的编号; N_G 、 N_W 、 N_{PV} 、 N_{TR} 、 N_{ES} 分别为系统中常规机组数量、风电机组数量、光伏发电单元数量、联络线数量、储能系统数量。

2) 线路热稳约束

系统中所有线路的输送功率须满足线路自身热稳约束。

$$-P_{line,m}^{lim} \leq P_{line,m,t} \leq P_{line,m}^{lim}, m \in \Omega_{line} \quad (15)$$

式中: m 为线路编号; $P_{line,m,t}$ 为 t 时刻的线路 m 的传输功率; $P_{line,m}^{lim}$ 为线路 m 的热稳极限功率; Ω_{line} 为系统所有线路集合。

3) 暂态稳定约束

暂态稳定约束主要包括频率、电压和功角稳定

约束, 具体指系统发生诸如短路、直流闭锁、新能源集群脱网等故障后, 系统频率、电压和区域常规机组功角发生振荡波动, 在几秒内经系统自发抗扰动或采取系列稳控措施后, 振荡减弱收敛, 系统不失稳, 恢复稳定运行。

$$\left| \frac{df_t}{dt} \right| \leq f_{change_max} \quad (16)$$

$$f_{min} \leq f_{nadir} \leq f_{max} \quad (17)$$

$$U_{i,min} \leq U_{i,t} \leq U_{i,max} \quad (18)$$

$$H_{sys} \frac{d^2 \delta_{G,t}}{dt^2} = P_{Gm,t} - P_{Ge,t} \quad (19)$$

式中: f_t 为 t 时刻系统频率; f_{change_max} 为系统频率变化率上限; f_{nadir} 、 f_{min} 、 f_{max} 分别为系统频率极值、频率下限、频率上限; $U_{i,t}$ 、 $U_{i,min}$ 、 $U_{i,max}$ 分别为 t 时刻节点 i 的节点电压、电压下限、电压上限; H_{sys} 为系统等效转动惯量; $\delta_{G,t}$ 为 t 时刻系统旋转机组的等效功角; $P_{Gm,t}$ 、 $P_{Ge,t}$ 分别为 t 时刻系统旋转机组的等效机械功率、等效电磁功率。

4) 常规机组运行约束

常规机组运行须满足出力、爬坡、备用等约束。

$$\begin{cases} -\Delta R_{g,max}^D \leq P_{g,t} - P_{g,t-1} \leq \Delta R_{g,max}^U \\ P_{g,t} - R_{g,t}^D \geq P_{g,min} \\ P_{g,t} + R_{g,t}^U \leq P_{g,max} \\ 0 \leq R_{g,t}^D \leq R_{g,max}^D \\ 0 \leq R_{g,t}^U \leq R_{g,max}^U \end{cases} \quad (20)$$

式中: $P_{g,t-1}$ 为 $t-1$ 时刻常规机组 g 的有功功率出力; $\Delta R_{g,max}^U$ 、 $\Delta R_{g,max}^D$ 分别为常规机组 g 的爬坡、爬坡限值; $P_{g,max}$ 、 $P_{g,min}$ 分别为常规机组 g 的有功功率出力上、下限; $R_{g,t}^U$ 、 $R_{g,t}^D$ 分别为 t 时刻常规机组 g 提供的向上、向下备用容量; $R_{g,max}^U$ 、 $R_{g,max}^D$ 分别为常规机组 g 提供的向上、向下备用容量限值。

5) 新能源出力约束

风电、光伏等新能源须满足运行出力约束。

$$0 \leq P_{w,t} \leq P_{w,t}^{pr} + \Delta P_{w,t}^{pr} \quad (21)$$

$$0 \leq P_{pv,t} \leq P_{pv,t}^{pr} + \Delta P_{pv,t}^{pr} \quad (22)$$

式中: $P_{w,t}^{pr}$ 、 $\Delta P_{w,t}^{pr}$ 分别为 t 时刻风电机组 w 的有功功率预测值、预测误差值; $P_{pv,t}^{pr}$ 、 $\Delta P_{pv,t}^{pr}$ 分别为 t 时刻光伏发电单元 pv 的有功功率预测值、预测误差值。

3 风火打捆送出规划优化方法

3.1 优化方法

风电消纳能力评估须基于系统电力电量平衡生产运行模拟。评估方法中, 典型日法忽略了新能源出力的时序特性, 难以客观反映系统实际运行情况; 随机生产模拟法虽计算速度快, 但无法反映机组组合情况和调峰能力等, 对系统的电力和调峰平衡评估有一定局限性; 时序生产模拟法则是采用负荷、新能源及其他电源的时序数据, 考虑机组的开机、启停备用和爬坡、断面输送能力、系统调峰能力等约束, 根据研究需要, 可对负荷时序需求特性、新能源时序出力特性和系统整体供需平衡进行不同时间尺度的逐时段精细化模拟, 该方法可详细评估不同电源类型和开机组合等对新能源消纳的影响, 其结果能准确地反映系统新能源消纳情况^[33-34]。因此, 本文主要采用时序生产模拟法开展相关研究, 提出基于时序模拟的风火打捆送出规划优化方法如图2所示, 主要包括以下内容。

1) 方案参数输入: 主要包括本地风火打捆规划数据和系统负荷、电源、安全约束等运行数据, 基于以上参数, 一方面可进行规划优化的需求分析和确立目标, 另一方面可进行方案设置并对时序模拟计算形成数据支撑。

2) 优化模型建立: 以满足系统供需平衡为前提, 以风火打捆送出整体规划经济最优为目标, 考虑系统运行边界约束, 建立以风火打捆送出综合成本最小为目标函数的优化模型。

3) 时序模拟求解模型: 采用时序生产模拟法对系统负荷、新能源出力和系统供需平衡进行分钟级(如 15 min 级)的全年 8 760 h 逐时段时序模拟, 得到的模拟结果可支撑后续优化模型中各个指标的计算。其中, 为满足系统整体供需平衡和本地风电尽量消纳, 优化过程中需采取合适的风火联合调控策略作为调节手段, 本文提出了具体策略, 即在保证一定的火电利用小时数水平且风火出力满足通道热稳约束的前提下, 优先通过调节本地火电出力来尽量匹配目标电力需求, 若调节火电后仍不满足, 则继续通过风电合理弃电, 以寻求风火打捆送出综合成本最小目标。

4) 优化结果计算分析和输出: 根据模拟运行结果计算规划运行指标(包括风电弃电率、火电利用小时数、通道利用率等)和构成目标函数的各成本指标, 进而计算目标函数综合成本。设置不同规划方案, 模拟计算各方案目标函数结果, 综合比选出经济最优方案, 明确风火配比和通道规划方案。

3.2 求解流程

基于优化方法, 本文采用时序模拟方法对优化

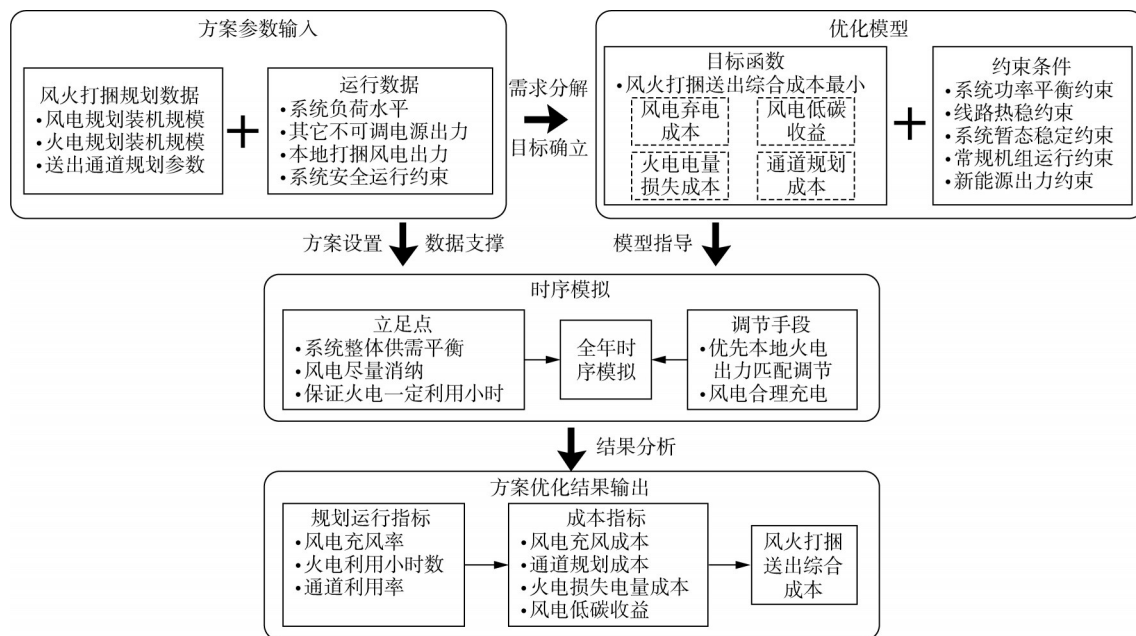


图2 风火打捆送出规划优化方法

Fig. 2 Optimization method for wind-thermal bundled and delivery planning

模型进行求解,如图3所示,具体流程步骤如下。

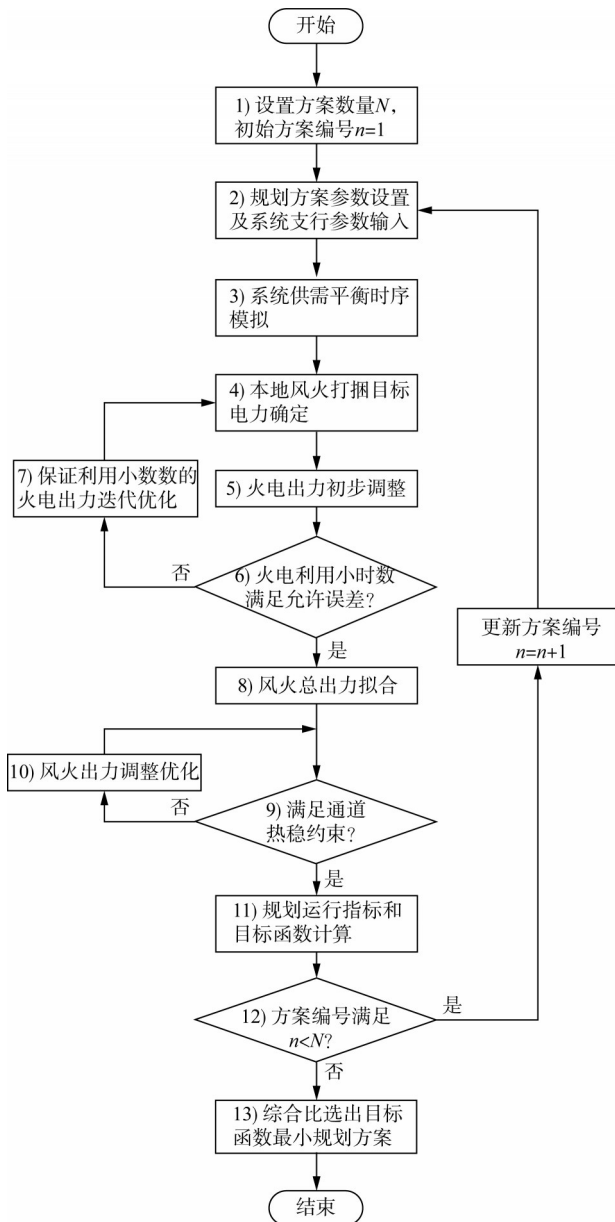


图3 时序模拟求解模型流程

Fig. 3 Flowchat of time series simulation method for solving model process

步骤1), 方案初始化。设置拟选风火打捆规划方案数量为 N , 并初始化方案编号 $n=1$ 。

步骤2), 规划方案参数设置及系统运行参数输入。设置设定当前方案的规划参数, 包括打捆风电、火电的装机规模、通道型号及规划长度等; 输入系统负荷水平、各类电源出力的全年时序曲线以及系统安全运行相关约束限值等数据。

步骤3), 系统供需平衡时序模拟。对系统整体

供需平衡进行全年时序模拟, 系统负荷 $P_{w-th,t}^{sys}$ 扣除其他不可调电源出力 $P_{non-adj,t}^{sys}$ 后(不含风电、火电, 主要包括光伏、核电、联络线和不具备调节能力的小水电等)得到系统整体的风火电力需求 $P_{w-th,t}^{sys}$, 对其进行时序积分得到系统风火电量需求 E_{w-th}^{sys} 。

步骤4), 本地风火打捆目标电力确定。根据已知的本地打捆风电初始出力 $P_{w,t}^{bal}$ 、火电机规模 $P_{th,N}^{bal}$ 和火电利用小时数初始值 $T_{th,ini}^{bal}$ 可计算本地风火打捆目标电量 E_{w-th}^{bal} 。进而计算本地风火目标电量 E_{w-th}^{bal} 与系统风火电量 E_{w-th}^{sys} 的比例, 将系统风火电力需求按该比例进行折算, 确定本地风火打捆目标出力 $P_{w-th,t}^{bal}$ 。

步骤5), 火电出力初步调整。风火打捆目标出力 $P_{w-th,t}^{bal}$ 扣除打捆风电初始出力 $P_{w,t}^{bal}$ 后得到打捆火电目标出力 $P_{th,t}^{bal}$ 。考虑火电出力上、下限约束 $P_{th,max}^{bal}$ 、 $P_{th,min}^{bal}$ 对火电出力作初步调整, 得到满足出力约束的火电出力 $P_{th-cons,t}^{bal}$, 并计算相应的利用小时数 $T_{th-cons}^{bal}$ 。

步骤6), 校核火电利用小时数 $T_{th-cons}^{bal}$ 是否满足允许误差。若超出允许误差, 则进入步骤7); 若在允许误差范围内, 则进入步骤8)。

步骤7), 保证利用小时的火电出力迭代优化。若 $T_{th-cons}^{bal} - T_{th}^{tar} < 0$, 则以一定合适步长增加利用小时数初始值 $T_{th,ini}^{bal}$; 若 $T_{th-cons}^{bal} - T_{th}^{tar} > 0$, 则减小 $T_{th,ini}^{bal}$ 。返回步骤4), 重复步骤4)~步骤6)。

步骤8), 风火总出力拟合。将初步调整的火电出力 $P_{th-cons,t}^{bal}$ 和风电初始出力 $P_{w,t}^{bal}$ 求和, 得到风火总出力 $P_{w-th-cons,t}^{bal}$ 。

步骤9), 校核风火总出力 $P_{w-th-cons,t}^{bal}$ 是否满足通道热稳约束 P_{line}^{lim} 。若不满足, 进入步骤10); 若满足, 则风、火出力无需再调整, 进入步骤11)。

步骤10), 风火出力调整优化。优先减少火电出力来满足热稳约束, 若火电降出力降低至出力下限, 风火总出力仍超过通道热稳限值, 则采取弃风措施, 返回步骤9)。

步骤11), 规划运行指标和目标函数计算。根据调整后满足热稳约束的风电、火电和风火打捆总的实际出力 $P_{w-act,t}^{bal}$ 、 $P_{th-act,t}^{bal}$ 、 $P_{w-th-act,t}^{bal}$ 计算当前方案的规划运行指标(含风电弃电率、火电利用小时数、通道利用率等)和目标函数。

步骤12), 校核方案编号是否满足 $n < N$ 。若满足, 则更新方案编号 $n = n + 1$, 返回步骤2); 若

不满足,则结束所有方案计算,进入步骤13)。

步骤13),比选出目标函数最小的规划方案,输出相应的风火配比、外送通道选型和建设长度等。

4 案例分析

本文选择实际省网某典型海上风火打捆案例,通过设置不同的规划场景验证所提规划优化模型和方法的有效性。

4.1 计算边界

风火打捆并网架构如图4所示,大规模海上风电集群经海缆在陆上集控站汇集后,经短距离500 kV单回线路接入火电厂,然后与火电打捆后经远距离500 kV双回线路送出。

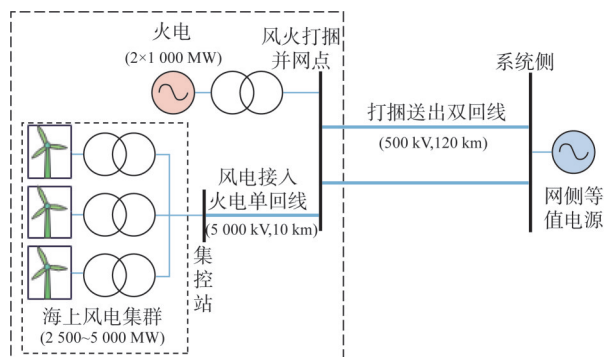


图4 海上风电经风火打捆送出并网架构图

Fig. 4 Architecture diagram of offshore wind power transmission through wind-thermal bundled and grid connection

相关计算边界如下。

1)海上风电:初始规模为2 500 MW,通过不断增加规模至5 000 MW,得到不同的风火装机配比;风电出力曲线参考已有历史数据并进行放大等值;风电单位电量弃电成本按当地标杆上网电价(现阶段取0.43元/kWh)和现货市场较低电价(取0.1元/kWh)两种情况考虑;风电清洁能源替代火电发电,单位电量低碳收益现阶段按0.05元/kWh考虑。

2)火电:装机容量为2×1 000 MW;考虑到冬季1—2月海风大发、负荷水平低、系统调峰压力更大的典型情况,假设在此期间火电安排1台机组检修;年目标利用小时数按4 000 h考虑;火电最低出力率按组额定容量的30%考虑。

3)风电接入火电500 kV单回线:选取实际系统中典型的线路型号截面为4×630 mm²,长度为10

km,热稳定能力极限为3 512 MW,单位造价为350万元/km,维护成本比例按初始投资成本的2.5%考虑,运行周期为25 a,年利率为6.15%。

4)打捆送出500 kV双回线:选取实际系统中典型的线路型号截面为4×630 mm²和4×720 mm²作为待选方案, $N-1$ 线路热稳定能力极限分别为3 512 MW和3 826 MW,单位造价分别为350万元/km和400万元/km,长度为120 km,维护成本比例按初始投资成本的2.5%考虑,运行周期为25 a,年利率为6.15%。

5)基于以上边界参数拟设置3种规划场景,分析各关键变量对规划的影响,具体如下。

场景一:火电装机规模、风电弃单位电成本、打捆送出通道容量、打捆送出通道热稳约束下的风火出力调节比例一定,改变风电装机规模,设置不同风火装机配比方案,并作为基础场景。值得注意的是,风火出力调节比例指:在“优先火电调节,其次弃风”的准则下,在优先火电调节阶段,通过适当调整二者降出力比例,风电也适当提前参与。

场景二:基于场景一,考虑随着电力市场建设的不断发展,新能源将逐步参与现货市场,风电单位弃电成本将随之降低,对比其取标杆上网电价和现货市场较低电价下对规划的影响。

场景三:基于场景一,改变打捆送出通道容量,对比分析不同线路容量选型对规划的影响。

4.2 场景一:不同风火装机配比

场景一设定火电装机规模为2 000 MW、打捆送出线路型号为4×720 mm²、风电单位弃电成本取现阶段当地标杆上网电价0.43元/kWh、风火出力调节比例为“100%火电降出力+0%弃风”(即在优先火电调节阶段,风电不提前参与弃风,直到火电降至最小出力限值,风火总出力仍然超过通道热稳,才采取弃风措施)。改变风电装机规模,设置不同风火装机配比方案,仿真模拟打捆送出500 kV双回线路满足 $N-1$ 热稳约束下的规划运行指标结果如表1所示,式(1)的综合成本计算结果如表2所示。

结果表明:随着风电打捆规模上升,一是逐渐出现弃风现象,风电规模在4 500 MW以内,弃电率仍在5%以下;二是火电利用小时逐渐下降,可见风电规模提升总体对火电利用小时有影响,但影响不大,当风/火装机配比为2.5:1时,火电利用

表 1 场景一的规划运行指标结果

Tab. 1 Planning and operation indicator results of scenario 1

方案	风电装机规模/MW	风/火装机配比	风电弃电率/%	火电利用小时数/h	通道利用率/%
1	2 500	1.25	0	4 000.00	42.91
2	2 750	1.38	0	3 999.88	44.81
3	3 000	1.50	0	3 995.13	46.68
4	3 250	1.63	0	3 975.35	48.47
5	3 500	1.75	0.12	3 936.33	50.11
6	3 750	1.88	0.81	3 903.01	51.62
7	4 000	2.00	1.85	3 873.64	53.01
8	4 250	2.13	3.09	3 846.48	54.32
9	4 500	2.25	4.47	3 820.83	55.54
10	4 750	2.38	5.94	3 797.29	56.68
11	5 000	2.50	7.45	3 774.81	57.76

表 2 场景一的综合成本结果

Tab. 2 Comprehensive cost results of scenario 1

方案	风/火装机配比/万元	风电弃电成本/万元	火电电量损失成本/万元	通道规划成本/万元	风电低碳收益/万元	综合成本/万元
1	1.25	0	0	10 382	31 902	-21 520
2	1.38	0	1	10 382	35 093	-24 709
3	1.50	0	42	10 382	38 283	-27 859
4	1.63	0	212	10 382	41 473	-30 879
5	1.75	457	548	10 382	44 610	-33 223
6	1.88	3 329	834	10 382	47 466	-32 921
7	2.00	8 113	1 087	10 382	50 100	-30 519
8	2.13	14 421	1 320	10 382	52 557	-26 434
9	2.25	22 063	1 541	10 382	54 859	-20 873
10	2.38	30 946	1 743	10 382	57 016	-13 945
11	2.50	40 876	1 937	10 382	59 052	-5 857

小时仍有 3 775 h 左右；三是通道利用率与风电规模呈正比例增长关系；四是由于本文的目标函数考虑了风电消纳的低碳收益，综合成本刚开始呈逐渐下降趋势，若继续增加风电规模，综合成本边际效应体现，呈逐渐上升趋势，最小综合成本为-33 223 万元，出现在方案 5，即火电装机为 2 000 MW，风电装机为 3 500 MW，风火配比为 1.75：1，为该场景下的推荐方案。

4.3 场景二：不同风电弃电成本

场景二下风电单位电量弃电成本取现阶段当地现货市场较低电价 0.1 元/kWh，计算规划运行指标和综合成本结果，并与场景一的弃电成本为 0.43 元/kWh 相比较结果如表 3 和图 5 所示。

表 3 场景一和场景二的综合成本结果对比

Tab. 3 Comparison of comprehensive cost results between scenario 1 and scenario 2

方案	风/火装机配比	场景一		场景二	
		风电弃电成本/万元	综合成本/万元	风电弃电成本/万元	综合成本/万元
1	1.25	0	-21 520	0	-21 520
2	1.38	0	-24 709	0	-24 709
3	1.50	0	-27 859	0	-27 859
4	1.63	0	-30 879	0	-30 879
5	1.75	457	-33 223	106	-33 574
6	1.88	3 329	-32 921	774	-35 476
7	2.00	8 113	-30 519	1 887	-36 745
8	2.13	14 421	-26 434	3 354	-37 501
9	2.25	22 063	-20 873	5 131	-37 805
10	2.38	30 946	-13 945	7 197	-37 694
11	2.50	40 876	-5 857	9 506	-37 227

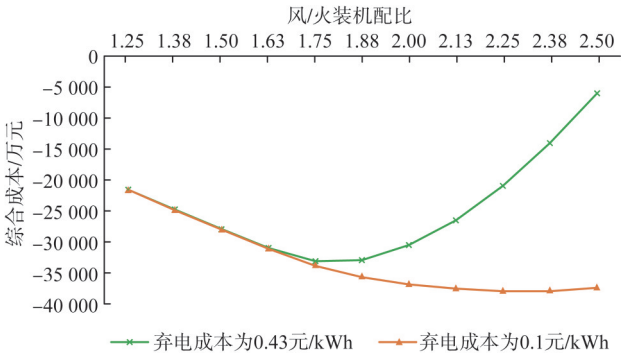


图 5 场景一和场景二的综合成本结果对比

Fig. 5 Comparison of comprehensive cost results between scenario 1 and scenario 2

结果表明：单位弃电成本为 0.1 元/kWh 时，最小综合成本为-37 805 万元，火电装机为 2 000 MW，风电装机提升至 4 500 MW，风火配比提升至 2.25：1。尤其随着风电打捆规模提升至 3 750 MW、风火配比提升至 1.88 以上，其降本效果越明显。可见，随着未来风电并网规模的不断扩大以及现货市场建设的逐步完善，风电势必将逐渐深入现货市场交易，其消纳成本和单位弃电成本将快速下降，进而降低风火打捆的综合成本，风火打捆中风电比例将得到进一步提升。

4.4 场景三：不同线路容量选型

场景三改变打捆送出通道导线选型为 4×630 mm²，计算规划运行指标和综合成本结果，并与场景一的 4×720 mm² 比较结果如表 4 和图 6 所示。

表 4 场景一和场景三的规划运行指标结果对比
Tab. 4 Comparison of planning and operation indicator results between scenario 1 and scenario 3

方案	风/火装机配比	场景一			场景三		
		风电弃电率/%	火电利用小时数/h	通道利用率/%	风电弃电率/%	火电利用小时数/h	通道利用率/%
1	1.25	0	4 000.00	42.91	0.00	3 999.34	46.74
2	1.38	0	3 999.88	44.81	0.00	3 990.22	48.75
3	1.50	0	3 995.13	46.68	0.00	3 961.58	50.64
4	1.63	0	3 975.35	48.47	0.33	3 918.63	52.35
5	1.75	0.12	3 936.33	50.11	1.29	3 885.08	53.92
6	1.88	0.81	3 903.01	51.62	2.56	3 854.01	55.37
7	2.00	1.85	3 873.64	53.01	4.04	3 825.17	56.71
8	2.13	3.09	3 846.48	54.32	5.64	3 798.67	57.96
9	2.25	4.47	3 820.83	55.54	7.30	3 773.80	59.14
10	2.38	5.94	3 797.29	56.68	8.99	3 749.40	60.24
11	2.50	7.45	3 774.81	57.76	10.68	3 725.88	61.27

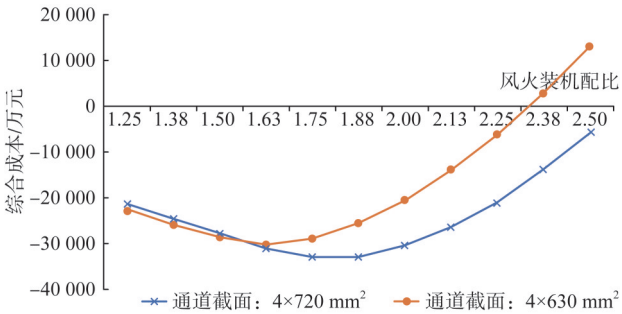


图 6 场景一和场景三的综合成本对比
Fig. 6 Comparison of comprehensive cost results between scenario 1 and scenario 3

结果表明: 整体上, 外送通道导线截面下降, 通道利用率有一定提升, 但同时也会导致送电能力下降, 在风电规模较小时, 如场景三风电装机为 3 250 MW、风/火配比为 1.63 : 1 以下, 风电基本不弃电, 此时, 采用较小截面导线可节省送电成本; 当风电规模较大时, 弃风率的快速提升会导致倾向于采用较大截面导线。此外, 外送导线截面下降, 会导致火电利用小时下降更快, 对于场景三, 当风火配比为 2.5 : 1 时, 火电利用小时降至 3 725 h 左右, 但同样地, 若安排火电增加出力, 亦能补偿回到 4 000 h。与场景一比较, 场景三的最优风/火装机配比由 1.75 : 1 降至 1.63 : 1。

5 结论

为解决风火打捆送出的风电消纳水平和整体经

济性较低的规划问题, 本文在典型场景规划需求分析基础上建立了以综合成本最小为目标的优化模型, 采用时序模拟法求解模型, 经实际案例验证, 通过不断优化影响整体经济性的“风火配比”、“外送通道容量”等关键因素, 所提模型和方法可综合考虑外送通道、风电场和火电厂的目标需求和整体运行经济性, 为风火打捆项目的规划优化提供了决思路, 并得出以下结论。

1) 随着风电打捆规模的上升, 弃风率逐渐增加、火电利用小时逐渐下降、通道利用率逐渐增加, 但综合成本呈现先降后升的边际效应, 因此, 风火打捆配比不能只满足单一需求, 而应兼顾风火打捆整体的运行经济性, 综合比选出成本最小方案。

2) 目前, 风电弃电成本还较高, 随着未来风电规模的不断扩大, 单位弃电成本将快速下降, 其降本效果越明显, 风电打捆规模将得到进一步提升。

3) 外送通道导线截面下降会导致送电能力下降, 风电规模较小时, 基本不弃风或弃电较少, 采用较小截面导线可节省送电成本; 当风电规模较大时, 弃风率快速提升, 致倾向于采用较大截面导线。

总体来说, 整体风火打捆项目规划需遵循以下原则: 一是尽量减小风电、火电和外送通道的整体规划运行成本; 二是需从风火并网后的系统整体供需平衡角度出发, 并满足送出通道 $N-1$ 静态热稳约束; 三是在系统调峰约束和通道热稳约束下, 优先消纳绝大部分风电, 弃风电量占比很小, 故应优先调整火电出力满足约束, 其次才是弃风; 四是建议尽量采用时序模拟法进行精确计算分析, 且考虑到在实际项目规划过程中, 规划需求可能发生变化, 进而影响相关的规划、运行输入参数及边界条件, 故建议可根据变化滚动开展供需平衡时序模拟分析, 实时更新迭代优化方案。

参考文献

[1] 谭显东, 刘俊, 徐志成, 等. “双碳”目标下“十四五”电力供需形势[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 1-6.
TAN Xiandong, LIU Jun, XU Zhicheng, et al. Power supply and demand balance during the 14th Five-Year Plan period under the goal of carbon emission peak and carbon neutrality [J]. Electric Power, 2021, 54(5): 1-6.
[2] 王彦红, 刘浩, 李洪伟. 碳交易机制下旁路补偿供热消纳风电的电热经济调度[J]. 南方电网技术, 2024, 18(4): 50-

58.
WANG Yanhong, LIU Hao, LI Hongwei. Economic dispatch of electricity and heat under the carbon trading mechanism for bypassing compensation heating to consume wind power [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(4): 50 – 58.
- [3] 李若琼, 司宇杰, 杨承辰, 等. 考虑柔性负荷的新型电力系统源荷日前-日内低碳优化调度[J]. 南方电网技术, 2025, 19(3): 116 – 129.
LI Ruoqiong, SI Yujie, YANG Chengchen, et al. New power system source-load day-ahead and intraday low-carbon optimization dispatch considering flexible loads [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(3): 116 – 129.
- [4] 白雪. 2022 年中国可再生能源发展成绩斐然[N]. 中国经济导报, 2023 – 07 – 08(3).
- [5] 王程, 汪松, 毕天姝. 含燃气发电综合能源系统风电消纳能力评估[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2192 – 2201, 2398.
WANG Cheng, WANG Song, BI Tianshu. Wind power accommodation capability assessment of integrated energy systems with gas-fired units [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2192 – 2201, 2398.
- [6] 古宸嘉, 王建学, 李清涛, 等. 新能源集中并网下大规模集中式储能规划研究述评[J]. 中国电力, 2022, 55(1): 2 – 12, 83.
GU Chenjia, WANG Jianxue, LI Qingtao, et al. Review on large-scale centralized energy storage planning under centralized grid integration of renewable energy [J]. Electric Power, 2022, 55(1): 2 – 12, 83.
- [7] 王楠, 张辰, 何旭道, 等. 基于弃风消纳的热网主动储热优化[J]. 中国电力, 2023, 56(2): 114 – 122.
WANG Nan, ZHANG Chen, HE Xudao, et al. Optimization of active heat storage in heat-supply network considering curtailed wind power consumption [J]. Electric Power, 2023, 56(2): 114 – 122.
- [8] 赵越, 严干贵, 王振洋, 等. 风火打捆经 LCC-HVDC 送出系统的次同步扭振分析[J]. 中国电力, 2023, 56(6): 18 – 30.
ZHAO Yue, YAN Gangui, WANG Zhenyang, et al. Analysis of sub-synchronous torsional vibration of wind-Thermal bundling transmission system via LCC-HVDC [J]. Electric Power, 2023, 56(6): 18 – 30.
- [9] 杨尉薇, 朱玲, 李威, 等. 风火打捆直流送出系统次同步振荡及传播特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 58 – 64.
YANG Weiwei, ZHU Ling, LI Wei, et al. Study on subsynchronous oscillation and propagation characteristics of wind-fire bundled sending system [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 58 – 64.
- [10] 项颂, 苏鹏, 吴坚, 等. 基于多源储能协同的交直流送端系统惯量优化控制模型[J]. 中国电力, 2023, 56(4): 68 – 76.
XIANG Song, SU Peng, WU Jian, et al. Inertia optimization control model of AC/DC sending-end system based on multi-source energy storage coordination [J]. Electric Power, 2023, 56(4): 68 – 76.
- [11] 王树东, 王阔, 高翔, 等. 风电比例对风火打捆系统暂态稳定性影响[J]. 工业仪表与自动化装置, 2016(3): 10 – 13, 63.
WANG Shudong, WANG Kuo, GAO Xiang, et al. Influence of proportion of wind power to wind-thermal bundled system transient stability [J]. Industrial Instrumentation and Automation, 2016(3): 10 – 13, 63.
- [12] 孙勇, 魏敏, 王磊, 等. 基于系统调峰约束的电网风电消纳水平研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 107 – 112.
SUN Yong, WEI Min, WANG Lei, et al. Study on wind power consumption based on system peak regulation capability constrain [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 107 – 112.
- [13] 彭元, 娄素华, 范越, 等. 考虑火电机组储热改造的电力系统低碳经济调度[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3339 – 3345.
PENG Yuan, LOU Suhua, FAN Yue, et al. Low-carbon economical dispatch of power system considering thermal energy storage in thermal power units [J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3339 – 3345.
- [14] 张澎, 党东升, 冯雪, 等. 风火打捆外送几个关键技术的研究进展[J]. 智能电网, 2016, 4(12): 1219 – 1224.
ZHANG Peng, DANG Dongsheng, FENG Xue, et al. Research progress of several key techniques for wind-thermal-bundled power transmission [J]. Smart Grid, 2016, 4(12): 1219 – 1224.
- [15] 张强, 冯艳虹, 王绍德. 特高压交流通道风火联合送电问题研究[J]. 中国电力, 2012, 45(6): 1 – 4.
ZHANG Qiang, FENG Yanhong, WANG Shaode. Research on UHV AC transmission of combined electricity generated from wind and thermal [J]. Electric Power, 2012, 45(6): 1 – 4.
- [16] 徐逸清, 葛毅, 吕翔, 等. 特高压风火打捆送电与江苏电网协调运行研究[J]. 中国电力, 2018, 51(11): 81 – 87.
XU Yiqing, GE Yi, LÜ Xiang, et al. Coordination of wind power transmitted through UHV transmission corridors bundled with thermal power and jiangsu power grid [J]. Electric Power, 2018, 51(11): 81 – 87.
- [17] 刘连光, 刘鸿熹, 刘自发, 等. 基于古诺模型的风火电合作容量优化[J]. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(5): 467 – 474.
LIU Lianguang, LIU Hongxi, LIU Zifa, et al. Cooperation capacity optimization of wind power and thermal power based on Cournot model [J]. Scientia Sinica Technologica, 2016, 46(5): 467 – 474.
- [18] 王智冬, 刘连光, 刘自发, 等. 基于量子粒子群算法的风火打捆容量及直流落点优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2055 – 2062.
WANG Zhidong, LIU Lianguang, LIU Zifa, et al. Optimal configuration of wind & coal power capacity and DC placement based on quantum PSO algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2055 – 2062.
- [19] 董吉哲, 谢开贵, 马冲, 等. 计及风速和负荷特性的风火打捆发电系统规划[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 59 – 66.
DONG Jizhe, XIE Kaigui, MA Chong, et al. Optimal planning of bundled wind-thermal generation power systems considering wind speed and load characteristics [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 59 – 66.
- [20] NAHMAN J M, PERIC D M. Optimal planning of radial distribution networks by simulated annealing technique [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2008, 23(2): 790 – 795.
- [21] 金维刚, 李勇, 印永华, 等. 特高压输电通道风火打捆配置方案及其概率灵敏度分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(6): 126 – 133.
JIN Weigang, LI Yong, YIN Yonghua, et al. Optimum scheme and its probabilistic sensitivity analysis for wind power transmitted through UHV transmission corridors bundled with

- thermal power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(6): 126 – 133.
- [22] 李文莉,付聪聪,张海波.考虑风电不确定性的风火打捆直流外送系统的日前机组组合模型[J].电力系统及其自动化学报, 2018, 30(8): 38 – 43.
- LI Wenli, FU Congcong, ZHANG Haibo. Day-ahead unit commitment models considering uncertainties in wind power for wind power bundled with thermal power transmitted by DC[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(8): 38 – 43.
- [23] 朱子琪,张文松,李洛,等.考虑弃风限电风险的风火打捆外送多目标优化调度方法[J].可再生能源, 2019, 37(7): 1034 – 1041.
- ZHU Ziqi, ZHANG Wensong, LI Luo, et al. Multi-objective optimization scheduling method for wind-thermal-bundled transmitted system considering wind curtailment and power shortage risk[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(7): 1034 – 1041.
- [24] 王艺舒,蔡国伟,杨德友,等.考虑小干扰稳定性的风火打捆配比优化[J].电力系统及其自动化学报, 2021, 33(10): 131 – 137.
- WANG Yishu, CAI Guowei, YANG Deyou, et al. Optimization of wind-thermal bundled capacity ratio with small signal stability constraints[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(10): 131 – 137.
- [25] 窦宇宇,陈肖璐,任正,等.风火打捆弱外送系统功角和频率特性研究[J].东北电力技术, 2022, 43(6): 7 – 14, 28.
- DOU Yuyu, CHEN Xiaolu, REN Zheng, et al. Research on power angle and frequency characteristics of wind thermal bundled weak outgoing delivery system[J]. Northeast Electric Power Technology, 2022, 43(6): 7 – 14, 28.
- [26] 刘新苗,卢洵,娄源媛,等.基于时序运行模拟的风火打捆最优容量配比整定[J].电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 53 – 62.
- LIU Xinmiao, LU Xun, LOU Yuanyuan, et al. Optimal setting of wind-thermal-bundled capacity ratio based on chronological operation simulation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 53 – 62.
- [27] LIAO S, YAO W, HAN X, et al. Chronological operation simulation framework for regional power system under high penetration of renewable energy using meteorological data[J]. Applied Energy, 2017(203): 816 – 828.
- [28] 钟依庐,刘为雄,郑赞,等.风火储氢碳多能耦合打捆送出模式研究[J].南方能源建设, 2023, 10(4): 122 – 130.
- ZHONG Yilu, LIU Weixiong, ZHENG Yun, et al. Electricity transmission strategy research based on wind-coal-batteryhydrogen-CCUS multi energy coupling and bundling system[J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(4): 122 – 130.
- [29] 毛峰,桂前进,王磊,等.风火打捆交直流外送系统区域间输电能力评估[J].中国电力, 2019, 52(1): 69 – 75.
- MAO Feng, GUI Qianjin, WANG Lei, et al. Assessment on the total transfer capability of AC/DC system for integrated wind-thermal power[J]. Electric Power, 2019, 52(1): 69 – 75.
- [30] 李明节,陈国平,董存,等.新能源电力系统电力电量平衡问题研究[J].电网技术, 2019, 43(11): 3979 – 3986.
- LI Mingjie, CHEN Guoping, DONG Cun, et al. Research on power balance of high proportion renewable energy system[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3979 – 3986.
- [31] 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 – 3125.
- 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 – 3125.
- [32] 刘俊磊,刘新苗,卢洵,等.高比例新能源系统供需平衡分析方法和对策[J].高电压技术, 2023, 49(7): 2711 – 2724.
- LIU Junlei, LIU Xinmiao, LU Xun, et al. Analysis methods and countermeasures of supply and demand balance of high proportion of new energy system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2711 – 2724.
- [33] 卢洵,张东辉,周姝灿,等.复杂交直流电网系统级新型储能协调规划布局方法[J].南方电网技术, 2023, 17(8): 85 – 95.
- LU Xun, ZHANG Donghui, ZHOU Shucan, et al. A novel method for coordinated planning and layout of energy storage systems in complex AC/DC grids[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(8): 85 – 95.
- [34] 金梦,朱鑫要,周前.新能源对电网调峰特性影响定量评估及应用[J].高压电器, 2023, 59(4): 70 – 76.
- JIN Meng, ZHU Xinyao, ZHOU Qian. Quantitative assessment of influence of renewable energy on peak regulation characteristics of power grid and its application[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 70 – 76.

收稿日期: 2023-12-20;网络首发日期:2024-06-20

作者简介:

刘新苗(1986),男,高级工程师,硕士,从事电力系统规划研究, liuxinmiao.csg@139.com;

刘俊磊(1985),男,高级工程师,博士,从事电力系统规划运行与稳定分析研究, 18802000394@163.com;

徐芸霞(1992),女,通信作者,工程师,硕士,从事电力系统规划运行与稳定分析研究, 862348034@qq.com。