

“风光火一体化”多能互补项目优化配置研究

周保中¹, 刘敦楠^{2*}, 张继广¹, 李忆¹, 徐尔丰^{2,3}, 毕圣¹

(1. 华电电力科学研究院有限公司, 浙江省 杭州市 310030; 2. 华北电力大学经济与管理学院, 北京市 昌平区 102206; 3. 浙江浙能能源服务有限公司, 浙江省 杭州市 310002)

Research on Optimal Allocation of Multi-Energy Complementary Project of Wind-Solar-Thermal Integration

ZHOU Baozhong¹, LIU Dunnan^{2*}, ZHANG Jiguang¹, LI Yi¹, XU Erfeng^{2,3}, BI Sheng¹

(1. Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310030, Zhejiang Province, China;
2. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China;
3. Zhejiang Zheneng Energy Service Co., Ltd., Hangzhou 310002, Zhejiang Province, China)

摘要:“风光火一体化”多能互补项目能够发挥不同类型电源之间协调互济能力,是安全高效利用新能源及实现碳中和、碳达峰目标的实施路径之一。如何合理配比火电、风电、光伏装机容量以及输电容量,保障风电、光伏全额消纳和高效利用,是“风光火一体化”多能互补项目的核心问题。在分析不同类型电源出力特性和多能互补特性基础上,以总成本最小化,外送曲线和受端地区负荷曲线匹配程度最大化为目标,构建“风光火一体化”多能互补项目优化配置模型,在规划层面优化风电、光伏装机容量以及输电容量,在运行层面优化火电运行方式、出力曲线以及外送曲线。根据案例分析可知,优化配置模型能够优化确定风电、光伏装机容量以及输电容量,使不同类型电源在月、日等时间尺度上协调互济,外送曲线对受端地区电网更加友好,实现横向多能互补、纵向源荷协调。

关键词: 新能源; 碳中和; 碳达峰; 风光火一体化; 多能互补; 优化配置; 混合整数规划

ABSTRACT: Multi-energy complementary project of wind-solar-thermal integration can play a coordinating and mutually beneficial role among different generations, and is one of the implementation paths for safe and efficient use of renewable energy, and achieving carbon neutrality and carbon peak. How to reasonably match the installed capacity of thermal power, wind power, photovoltaic power and the transmission capacity, to ensure the full consumption and

efficient utilization of wind power and photovoltaic power, is the core issue of the multi-energy complementary project of wind-solar-thermal integration. Based on the analysis of the output characteristics and multi-energy complementary characteristics of different generations, an optimal allocation model of multi-energy complementary project of wind-solar-thermal integration was constructed with the objective of minimizing the total cost and maximizing the matching degree between the sending curve and the receiving load curve. The installed capacity of wind power, photovoltaic power and the transmission capacity were optimized at the planning level, and the thermal power operation mode, output curve and transmission curve were optimized at the operation level. According to the case analysis, the optimal allocation model can optimize and determine the installed capacity of wind power, photovoltaic power and the transmission capacity, so that different generations can coordinate with each other on monthly and daily time scales. The transmission curve is more friendly to the receiving-end grid, and the horizontal multi-energy complementary and longitudinal generation-load coordination are realized.

KEY WORDS: new energy; carbon neutrality; carbon peak; wind-solar-thermal integration; multi-energy complementary; optimal allocation; mixed integer programming

0 引言

为实现碳中和、碳达峰目标,需要控制化石能源总量,大力发展新能源,提升能源清洁利用水平,构建以新能源为主体的新型电力系统^[1-2]。多能互补项目立足于系统观念,能够充分发挥不

基金项目: 国家社科基金重大项目(19ZDA081); 中国华电集团有限公司科技项目(CHDKJ19-01-40)。

Project Supported by National Social Science Foundation of China (19ZDA081); Science and Technology Project of China Huadian Corporation Ltd. (CHDKJ19-01-40).

同类型电源之间协调互济能力,是安全高效利用新能源、推进电力系统转型升级的实施路径之一,包括供给侧“风光水火储”多能互补系统和需求侧综合能源系统2种模式^[3-5]。“风光火一体化”多能互补项目是其重要技术方案之一,也是碳中和、碳达峰背景下火电的转型发展路线之一。在“风光火一体化”多能互补项目中,风电和光伏等新能源将成为主力电源,火电将向提供灵活调节能力为主的支撑电源转变^[6]。如何合理配比火电、风电和光伏装机容量以及输电容量,利用火电调节能力实现不同类型电源协调互济和优化运行,促进风电和光伏全额消纳和高效利用,是“风光火一体化”多能互补项目的核心问题。

目前,已有学者^[7-15]对多能互补开展一定研究。文献[11]以风电送出最大化为目标,提出一种特高压直流风火联合外送电源容量优化方法,确定解配套电源规模。文献[12]在既定风电和光伏装机容量条件下,根据特高压直流工程核定利用时间和电量,提出配套火电装机容量优化计算方法。文献[13]在传统安全约束经济调度模型基础上,以外送风光最大化消纳为目标,构建特高压直流外送风光火电力一体化调度计划模型。文献[14]基于变分自编码器生成多种新能源出力场景,建立风光水互补短期优化运行模型,采用分段线性化方法实现模型快速求解。文献[15]综合考虑经济效益和环境效益,增加可再生能源消纳权重、节能减排等约束条件,构建风光火联合调度多目标优化模型。多能互补项目优化配置是涉及不同类型电源装机容量和输电容量配比规划,以及不同时间尺度调度运行的综合问题,而以上研究主要以弃风弃光、总成本最小化等为目标,未综合考虑规划和运行层面的优化配置,以及外送曲线对受端地区电网调峰影响。

因此,本文在分析不同类型电源出力特性和多能互补特性的基础上,构建“风光火一体化”多能互补项目优化配置模型,在规划层面优化风电、光伏装机容量以及输电容量,在运行层面优化火电运行方式、出力曲线以及外送曲线,保障风电、光伏全额消纳和高效利用,使外送曲线对受端地区电网更加友好,实现横向多能互补、纵向源荷协调。

1 电源出力特性和多能互补特性

1.1 电源出力特性

1.1.1 风电出力特性

风电出力主要受风速等因素影响,其出力模型^[16-17]表示如下:

$$L_{w,t} = \begin{cases} 0, & 0 \leq V_t \leq V_I \\ \frac{V_t^3 - V_I^3}{V_R^3 - V_I^3} L_{w,R}, & V_I < V_t \leq V_R \\ L_{w,R}, & V_R < V_t \leq V_O \\ 0, & V_O < V_t \end{cases} \quad (1)$$

式中: $L_{w,t}$ 为时段 t 风电出力; V_t 为时段 t 风速; V_I 为切入风速; V_R 为额定风速; V_O 为切出风速; $L_{w,R}$ 为风电额定出力。

根据风速变化特性,风电出力在月、日等时间尺度上具有以下特性:

1) 月出力特性。受季风气候等因素影响,不同月份风速不同,春季和冬季风电出力高,夏季风电出力低,具有一定季节性^[18]。系统负荷夏季和冬季处于高峰,与风电出力之间存在一定电力供需不匹配矛盾^[19]。

2) 日出力特性。受天气、地形等因素影响,风电出力预测偏差大,极端情况下波动幅度可达装机容量的80%,具有强随机性和波动性。一般情况下,夜间系统负荷低谷时段风电出力高,白天系统负荷高峰时段风电出力低,系统净负荷峰谷差进一步拉大,具有一定反调峰特性^[20-21]。

1.1.2 光伏出力特性

光伏出力主要受光照强度、温度等因素影响,其出力模型^[16,22]表示如下:

$$L_{p,t} = L_{p,R} \frac{I_t}{I_R} [1 - \epsilon(T_t - T_R)] \quad (2)$$

式中: $L_{p,t}$ 为时段 t 光伏出力; $L_{p,R}$ 为标准条件下(光照强度 $I_R=1\,000\text{ W/m}^2$, 温度 $T_R=25\text{ }^\circ\text{C}$)光伏额定出力; I_t 为时段 t 光照强度; T_t 为时段 t 温度; ϵ 为功率温度系数,一般为 $0.003\,9\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。

根据光照强度、温度等变化特性,光伏出力在月、日等时间尺度上具有以下特性:

1) 月出力特性。受季风气候等因素影响,不同月份光照强度和温度不同,春季和夏季光伏出力高,秋季和冬季光伏出力低,具有一定的季节

性^[23]。系统负荷夏季和冬季处于高峰，与光伏出力之间存在一定电力供需不匹配矛盾。

2) 日出力特性。受天气、云层遮挡等因素影响，光伏出力具有一定随机性和波动性。中午时段光伏出力高，系统净负荷呈现“鸭型曲线”，随着光伏装机容量不断增加，系统净负荷最小值将从夜间转至中午；晚上时段光伏无出力，与系统负荷晚高峰时段之间具有一定反调峰特性^[24]。

1.1.3 火电出力特性

火电以煤炭、天然气等化石能源作为燃料。化石能源具有可存储性，火电出力在一定范围内能够灵活调节，不受天气等条件影响，具有良好可调、可控特性^[25]。通过灵活性改造，火电最小技术出力可以达到装机容量的30%以下，部分火电热电联产甚至可以100%参与调峰^[26]。随着以新能源为主体的新型电力系统建设逐步推进，风电和光伏接入电力系统的规模不断增大，这将对火电调节范围、调节速率等调节能力提出更高的要求。

1.2 多能互补特性

多能互补特性是指火电、风电和光伏等不同类型电源出力能够相互补充、协调互济。根据时间尺度不同，多能互补特性包括中长期月互补特性和短期日互补特性。

1) 月互补特性。优化燃料采购和库存，发挥火电调节能力，对不同月份风电、光伏出力以及受端地区负荷不平衡电量进行互补互济，缓解送端地区和受端地区电力供需不匹配矛盾，提高输电通道利用水平。

2) 日互补特性。调整燃料消耗量和出力，发挥火电调节能力，降低风电、光伏出力的随机性、波动性和反调峰特性，跟踪风电、光伏出力曲线以及受端地区负荷曲线之间不平衡部分，使外送曲线和受端地区负荷曲线更加匹配，对受端地区电网更加友好。

2 “风光火一体化”多能互补项目优化配置模型

2.1 整体框架

“风光火一体化”多能互补项目主要依托存量

火电建设，充分利用火电调节能力，优化配比风电、光伏装机容量以及输电容量，最大程度地提高风电和光伏消纳利用水平。因此，“风光火一体化”多能互补项目优化配置就是在既定火电装机容量基础上，根据送端地区资源禀赋条件和受端地区负荷需求，基于优化配置模型，在规划层面优化确定风电、光伏装机容量和输电容量，在运行层面优化确定四季典型日火电运行方式、出力曲线以及外送曲线。

“风光火一体化”多能互补项目优化配置模型整体框架如图1所示。其中，模型输入包括四季典型日送端地区风电、光伏出力曲线，受端地区负荷曲线，以及不同类型电源成本、输电成本等。模型优化变量包括规划层面风电、光伏装机容量以及输电容量，运行层面四季典型日火电开机状态、出力曲线以及外送曲线。基于求解算法，求解输出模型优化变量，形成“风光火一体化”多能互补项目优化配置方案。

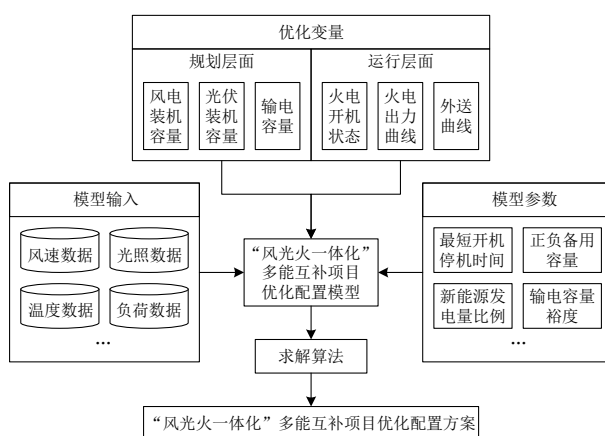


图1 “风光火一体化”多能互补项目优化配置模型整体框架图

Fig. 1 Overall framework of optimal allocation model for multi-energy complementary project of wind-solar-thermal integration

2.2 目标函数

2.2.1 优化目标

优化目标包括总成本最小，以及外送曲线、受端地区负荷曲线匹配程度最大2个目标，其为多目标优化问题。不同“风光火一体化”多能互补项目边界条件不同，2个目标权重需根据目标优先级、量纲和数量级综合平衡确定：

$$\min F = \alpha C - \beta D \quad (3)$$

式中： F 为目标函数； C 为总成本； α 为总成本权重； D 为外送曲线和受端地区负荷曲线匹配程度； β 为外送曲线和受端地区负荷曲线匹配程度权重。

2.2.2 总成本

总成本包括火电成本、风电成本、光伏成本和输电成本。其中，风电成本、光伏成本和输电成本主要为固定成本，其变动成本占比小，可忽略不计。为更利于构建和求解优化配置模型，将投资成本、运维成本等全寿命周期成本折算为年度单位容量成本^[27]。火电成本包括电能成本和开机成本。总成本可表示如下：

$$C = \sum_i C_{C,i} + C_W + C_P + C_T \quad (4)$$

$$C_{C,i} = \sum_t N_t [U_{C,i,t} C_{E,i,t} + U_{C,i,t} (1 - U_{C,i,t}) C_{S,i}] \quad (5)$$

$$C_{E,i,t} = a_i (L_{C,i,t})^2 + b_i L_{C,i,t} + c_i \quad (6)$$

$$C_W = A_W G_W \quad (7)$$

$$C_P = A_P G_P \quad (8)$$

$$C_T = A_T G_T \quad (9)$$

式中： $C_{C,i}$ 为火电 i 成本； C_W 为风电成本； C_P 为光伏成本； C_T 为输电成本； N_t 为时段 t 相应天数； $U_{C,i,t}$ 为时段 t 火电 i 开机状态，取值1表示开机，取值0表示停机； $C_{E,i,t}$ 为时段 t 火电 i 电能成本； $C_{S,i}$ 为火电 i 开机成本； $L_{C,i,t}$ 为时段 t 火电 i 出力； a_i 、 b_i 、 c_i 为火电 i 电能成本二次项、一次项、常数项系数； A_W 为风电年度单位容量成本； G_W 为风电装机容量； A_P 为光伏年度单位容量成本； G_P 为光伏装机容量； A_T 为输电年度单位容量成本； G_T 为输电容量。

2.2.3 曲线匹配程度

“风光火一体化”多能互补项目的主要定位为大规模新能源大范围、高效配置和利用，在此基础上，兼顾外送曲线和受端地区负荷曲线匹配程度，外送曲线对受端地区电网更加友好，尽可能不增加额外调峰压力。曲线匹配程度以欧式距离 D 表示，欧氏距离越小，曲线匹配程度越好。

$$D = \sum_t (L_{S,t} - L_{R,t})^2 \quad (10)$$

$$L_{S,t} = L_{W,t} + L_{P,t} + \sum_i L_{C,i,t} \quad (11)$$

式中： $L_{S,t}$ 为时段 t 外送出力； $L_{R,t}$ 为时段 t 受端地区负荷。

2.3 约束条件

2.3.1 火电技术出力约束

火电出力应在最大、最小技术出力之间，即

$$L_{C,i}^{\min} \leq L_{C,i,t} \leq L_{C,i}^{\max} \quad (12)$$

式中 $L_{C,i}^{\max}$ 、 $L_{C,i}^{\min}$ 分别为火电 i 最大、最小技术出力。

2.3.2 火电爬坡速率约束

火电相邻时段出力应满足调节速率要求，即

$$-\Delta P_{C,i}^D \leq L_{C,i,t} - L_{C,i,t-1} \leq \Delta P_{C,i}^U \quad (13)$$

式中： $\Delta P_{C,i}^D$ 为火电 i 下调节速率； $\Delta P_{C,i}^U$ 为火电 i 上调节速率。

2.3.3 火电最小开停时间约束

为保障电力生产平稳、避免频繁开停，火电开机时间和停机时间应小于最短时间，即

$$\sum_{t=T_{C,i}^O}^{t-1} [U_{C,i,t} + (U_{C,i,t} - U_{C,i,t-1}) T_{C,i}^O] \geq 0 \quad (14)$$

$$\sum_{t=T_{C,i}^S}^{t-1} [(1 - U_{C,i,t}) - (U_{C,i,t} - U_{C,i,t-1}) T_{C,i}^S] \geq 0 \quad (15)$$

式中： $T_{C,i}^O$ 为火电 i 最短开机时间； $T_{C,i}^S$ 为火电 i 最短停机时间。

2.3.4 新能源电量约束

为提高新能源消纳利用水平和消费比重，外送电量中新能源电量应高于一定比例，即

$$\sum_t (L_{W,t} + L_{P,t}) \geq \omega \sum_t L_{S,t} \quad (16)$$

式中 ω 为新能源电量比例下限。

2.3.5 备用容量约束

为应对风电和光伏的间歇性和波动性，保障电网安全稳定运行，应提供一定备用容量。备用容量由火电提供，约束条件为：

$$\min(L_{C,i}^{\max} - L_{C,i,t}, \Delta P_{C,i}^U) \geq G_R^P \quad (17)$$

$$\min(L_{C,i,t} - L_{C,i}^{\min}, \Delta P_{C,i}^D) \geq G_R^N \quad (18)$$

式中： G_R^P 为正备用容量； G_R^N 为负备用容量。

2.3.6 输电容量裕度约束

为保障电网安全稳定运行，输电通道应预留一定容量裕度，即

$$\max(L_{S,t}) \leq (1 - \eta) G_T \quad (19)$$

式中 η 为输电容量裕度。

2.4 求解算法

优化配置模型优化变量包含连续型变量和0-1

整数型变量(火电开机状态), 目标函数和约束条件包含欧氏距离、二次函数、最大值、最小值等非线性函数, 因此优化配置模型为非线性混合整数优化模型。基于分支定界法(branch and bound, BB)、广义 Benders 分解法、扩展割平面法等算法, 对可行解空间进行迭代搜索, 实现优化配置模型求解^[28]。

3 案例分析

3.1 基础参数

送端地区 A 大型能源基地包含 8 台 600 MW 存量火电, 通过火电灵活性改造, 以及新能源和输电通道配套, 建设“风光火一体化”多能互补项目, 向受端地区 B 送电。根据送端地区 A 历史风速、光照强度和温度等数据, 四季典型日风电和光伏出力曲线如图 2 所示。

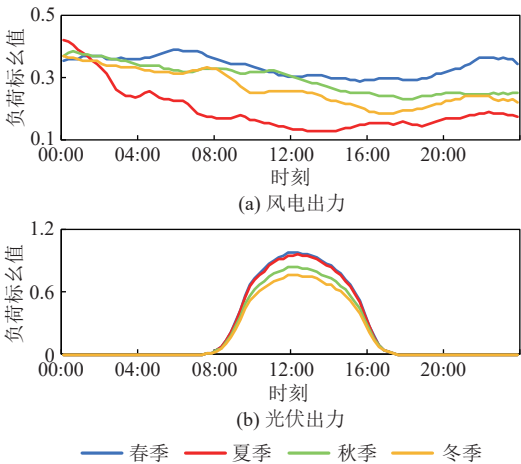


图2 送端地区 A 四季典型日风电和光伏出力曲线
Fig. 2 Typical daily wind power and photovoltaic output curves of four seasons in sending end area A

参照目前国内电力行业相关数据和电力市场运行参数等, 火电电能成本和开机成本(冷态启动)如表 1 所示。火电上下调节速率为每分钟装机容量的 1.5%, 火电最短开机时间和最短停机时间均为 48 h。风电和光伏年度单位容量成本分别为 0.5、0.3 元/W, 输电年度单位容量成本为 0.4 元/W, 新能源电量比例下限为 50%。正、负备用容量均为 200 MW, 输电容量裕度为 15%。基于上述基础参数, 综合平衡目标优先级、量纲和数量级后, 确定目标权重为 $\alpha = 1$, $\beta = 10$ 。

表1 火电电能成本和开机成本
Tab. 1 Thermal power cost and start-up cost

序号 i	电能成本/(元/MW)			开机成本/ (10^6 元/次)
	$a_i/10^{-5}$	b_i	c_i	
1 和 5	0.644	0.224	11.71	6
2 和 6	0.935	0.219	13.21	6
3 和 7	0.944	0.218	8.80	6
4 和 8	0.631	0.222	12.68	6

3.2 结果分析

根据优化配置模型计算结果, 在 6 台 600 MW 存量火电基础上, “风光火一体化”多能互补项目需配套建设风电 7 889 MW、光伏 2 096 MW、输电通道 7 894 MW。不同类型电源装机容量、年发电量和利用时间如表 2 所示。

表2 不同类型电源装机容量、年发电量和利用时间
Tab. 2 Install capacity, annual power and utilization time of different generations

电源类型	装机容量/ MW	装机容量/ 占比/%	年发电量/ (亿 kW·h)	年发电量/ 占比/%	年利用 时间/h
风电	7 889	53.3	190	41.3	2 405
光伏	2 096	14.2	40	8.7	1 894
火电	4 800	32.5	229	50.0	4 779

根据计算结果可知, 基于优化配置模型, 火电、风电和光伏出力在月、日等时间尺度能够实现协调互济和多能互补。

1) 月多能互补。根据送端地区 A 风电、光伏电量以及受端地区 B 负荷, 火电调整不同月份开机状态和运行方式, 如表 3 所示。其中, 春季送端地区 A 风电和光伏出力高, 受端地区 B 负荷低, 火电减少开机、降低出力, 为风电和光伏“让路”, 保障风电、光伏全额消纳和高效利用; 夏季送端地区 A 风电和光伏出力低, 受端地区 B 负荷高, 火电增加开机、提高出力, 保障电力安全稳定供应。

表3 不同季节外送电量及其占比和火电运行方式
Tab. 3 Sending power and its proportion and operation mode of thermal power

季节	外送电量/ (亿 kW·h)	风电电量 占比/%	光伏电量 占比/%	火电电量 占比/%	火电运行 方式
春季	104	56.7	10.7	32.6	开 4 停 4
夏季	126	27.2	8.6	64.2	开 8 停 0
秋季	123	41.5	7.6	50.9	开 8 停 0
冬季	106	43.1	8.0	49.0	开 6 停 2

2) 日多能互补。兼顾风电、光伏消纳以及受端地区 B 电网调峰, 火电跟踪受端地区 B 负荷曲线, 以及送端地区 A 风电、光伏出力曲线之间不平衡部分, 如图 3 所示。其中: 冬季夜间至中午送端地区 A 风电和光伏出力高, 火电降低出力, 实现全额消纳和高效利用; 下午至晚上送端地区 A 风电和光伏出力低, 火电增加出力, 满足受端地区 B 用电需求。

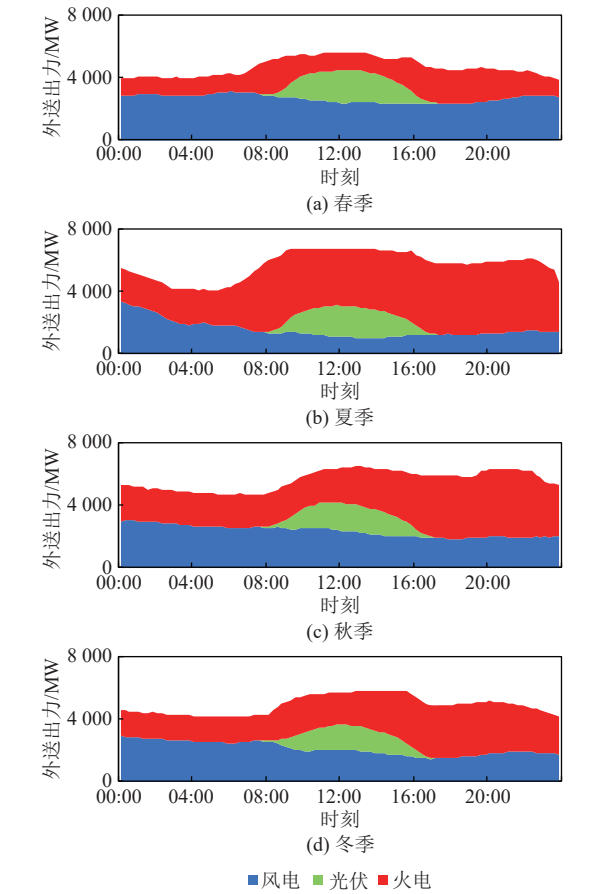


图 3 四季典型日“风光火一体化”多能互补项目出力曲线

Fig. 3 Output curves of multi-energy complementary project of wind-solar-thermal integration on typical days of four seasons

优化配置模型目标函数中已考虑外送曲线和受端地区负荷曲线匹配程度最大化, 春、夏、秋、冬季典型日送端地区 A 外送曲线和受端地区 B 负荷曲线之间相关系数分别为 0.86、0.86、0.99 和 0.92, 具有高相关性, 如图 4 所示。可见, 送端地区 A 外送曲线对受端地区 B 电网更加友好, 尽可能不增加额外调峰压力, 能够进一步提高运行效

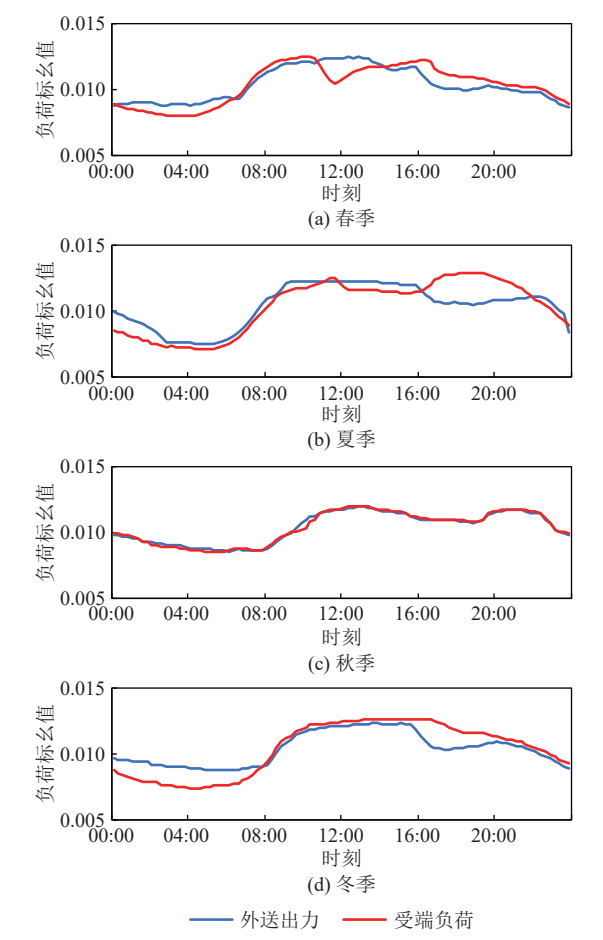


图 4 四季典型日送端地区 A 外送曲线和受端地区 B 负荷曲线

Fig. 4 Sending curves in sending area A and load curves in receiving area B on typical days of four seasons

率, 实现源荷储协调互动和电力资源优化配置。若未以“风光火一体化”多能互补项目的形式建设和运行, 即 7 889 MW 风电、2 096 MW 光伏分别独立建设和运行, 火电以历史典型出力曲线独立运行, 在保证新能源全额消纳的前提下, 对比分析 2 种场景下配套建设输电通道容量、总成本和曲线匹配程度, 结果如表 4 所示。

表 4 2 种场景对比分析

Tab. 4 Comparative analysis of two scenarios

场景	配套建设输电通道容量/MW	年总成本/(10^{12} 元)	曲线匹配程度/(10^9MW^2)
多能互补	7 894	2.83	7.73
独立运行	8 540	2.92	443.00

通过对比分析可知, 相比于“风光火一体化”多能互补项目, 风电、光伏、火电独立运行, 需配套建设输电通道 8 540 MW, 输电通道年利用时

间减少 440 h, 外送单价提高 20.5 元/(MW·h), 且外送曲线和受端地区负荷曲线匹配程度降低, 受端地区电网调峰压力进一步增大。

4 结论

“风光火一体化”多能互补项目是安全高效利用新能源及实现碳中和、碳达峰目标的实施路径之一。在分析不同类型电源出力特性和多能互补特性基础上, 构建了“风光火一体化”多能互补项目优化配置模型, 并进行了案例分析, 得到以下结论:

1) 基于优化配置模型, 在规划层面能够优化风电、光伏装机容量和输电容量, 在运行层面能够优化火电运行方式和出力曲线, 充分利用火电的调节能力, 使火电和风电、光伏在月、日等时间尺度上协调互济, 保障新能源全额消纳和高效利用, 更好实现横向多能互补。

2) 在总成本基础上, 优化配置模型的目标函数考虑了“风光火一体化”多能互补项目外送曲线和受端地区负荷曲线匹配程度, 利用火电的调节能力, 使外送曲线对受端地区电网更加友好, 尽可能不增加额外调峰压力, 进一步提高综合利用效率, 更好实现纵向源荷协调。

“风光火一体化”多能互补项目中, 风电和光伏承担发电职责, 但是不承担调节职责; 火电不仅承担发电职责, 而且承担调节职责。因此, 在多能互补优化配置基础上, 下一步需研究“风光火一体化”多能互补项目内部责任分摊和利益分配机制, 实现不同类型电源互利共赢和“风光火一体化”多能互补项目可持续发展。

参考文献

- [1] 新华社. 习近平在气候雄心峰会上的讲话(全文)[EB/OL]. (2020-12-13) [2021-08-01]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-12/13/content_5569138.htm.
Xinhua News Agency. Full text: President Xi's speech at climate ambition summit[EB/OL]. (2020-12-13) [2021-08-01]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-12/13/content_5569138.htm.
- [2] 新华社. 习近平主持召开中央财经委员会第九次会议[EB/OL]. (2021-03-15)[2021-08-01]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content_5593154.htm.
Xinhua News Agency. A meeting of the Central Committee for Financial and Economic Affairs presided over by President Xi[EB/OL]. (2021-03-15) [2021-08-01]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content_5593154.htm.
- [3] 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[EB/OL]. (2021-02-25) [2021-08-01]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202103/t20210305_1269046.html?code=&state=123.
NDRC, NEA. Guidance on promoting the development of Generation-grid-load-storage integration and multi-energy complementary[EB/OL]. (2021-02-25) [2021-08-01]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202103/t20210305_1269046.html?code=&state=123.
- [4] 曾鸣, 杨雍琦, 刘敦楠, 等. 能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 114-124.
ZENG M, YANG Y Q, LIU D N, et al. “Generation-grid-load-storage” coordinative optimal operation mode of energy internet and key technologies[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 114-124.
- [5] 刘敦楠, 徐尔丰, 许小峰. 面向园区微网的“源-网-荷-储”一体化运营模式[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 681-689.
LIU D N, XU E F, XU X F. “Source-network-load-storage” integrated operation model for microgrid in park [J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 681-689.
- [6] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
ZHUO Z Y, ZHANG N, XIE X R, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [7] 周兵兵, 林宏宇, 杨莘博, 等. 可再生能源多能互补系统多主体效益均衡模型[J]. 智慧电力, 2020, 48(1): 74-79.
ZHOU B B, LIN H Y, YANG S B, et al. Multi-agent benefit equilibrium model for renewable energy in multi-energy complementary system[J]. Smart Power, 2020, 48(1): 74-79.
- [8] 欧阳斌, 袁志昌, 陆超, 等. 考虑源-荷-储多能互补的冷-热-电综合能源系统优化运行研究[J]. 发电技术, 2020, 41(1): 19-29.

- OYANG B, YUAN Z C, LU C, et al. Research on optimal operation of cold-thermal-electric integrated energy system considering source-load-storage multi-energy complementarity[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(1): 19-29.
- [9] 华丽云, 孙坚栋, 王振, 等. 基于多能互补的综合能源控制系统研究及应用[J]. 浙江电力, 2020, 39(7): 108-114.
- HUA L Y, SUN J D, WANG Z, et al. Research and application of an integrated energy control system based on multi-energy complement[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(7): 108-114.
- [10] 李高潮, 卢怀宇, 孙启德, 等. 基于可再生能源的冷热电联供系统集成配置与运行优化研究进展[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(3): 106-119.
- LI G C, LU H Y, SUN Q D, et al. Research progress in configuration and operation optimization of combined cooling, heating and power (CCHP) systems based on renewable energy[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(3): 106-119.
- [11] 王智冬. 特高压直流风电火电联合外送电源规模优化方法[J]. 电力建设, 2015, 36(10): 60-66.
- WANG Z D. Optimization method of UHVDC combined wind-thermal power transmission scale[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(10): 60-66.
- [12] 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 Z Y, ZHANG Q P, DONG C, 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.
- [13] 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 D, WANG B, ZHANG J L, 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.
- [14] 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.
- HU W, QI Y C, ZHANG H X, et al. Complementary intelligent optimization operation strategy of wind-solar-hydro multi-energy power system[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(1): 9-18.
- [15] 檀勤良, 丁毅宏, 李渝, 等. 考虑经济环境平衡的风光火联合外送调度策略多目标优化[J]. 电力建设, 2020, 41(8): 129-136.
- TAN Q L, DING Y H, LI Y, et al. Multi-objective optimization of combined wind-solar-thermal power dispatching strategy considering economic-environmental equilibrium[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(8): 129-136.
- [16] 刘敦楠, 徐尔丰, 刘明光, 等. 面向分布式电源就地消纳的园区分时电价定价方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 19-28.
- LIU D N, XU E F, LIU M G, et al. TOU pricing method for park considering local consumption of distributed generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 19-28.
- [17] 周玮, 孙辉, 顾宏, 等. 计及风险备用约束的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 47-55.
- ZHOU W, SUN H, GU H, et al. Dynamic economic dispatch of wind integrated power systems based on risk reserve constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 47-55.
- [18] 姜文玲, 王勃, 汪宁渤, 等. 多时空尺度下大型风电基地出力特性研究[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 493-499.
- JIANG W L, WANG B, WANG N B, et al. Research on power output characteristics of large-scale wind power base in multiple temporal and spatial scales[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 493-499.
- [19] 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 H Y, DU E S, ZHU G P, 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.
- [20] 张宁, 周天睿, 段长刚, 等. 大规模风电场接入对电力系统调峰的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 152-158.
- ZHANG N, ZHOU T R, DUAN C G, et al. Impact of large-scale wind farm connecting with power grid on peak load regulation demand[J]. Power System Technology,

- 2010, 34(1): 152-158.
- [21] BUTTLER A, DINKEL F, FRANZ S, et al. Variability of wind and solar power: an assessment of the current situation in the European Union based on the year 2014[J]. Energy, 2016, 106: 147-161.
- [22] 时琨, 周海, 韩雨彤, 等. 一种考虑季节特性的光伏电站多模型功率预测方法[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(7): 75-82.
- SHI M, ZHOU H, HAN Y T, et al. A multi-model power forecasting approach of photovoltaic plant based on seasonal characteristics[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(7): 75-82.
- [23] 张曦, 康重庆, 张宁, 等. 太阳能光伏发电的中长期随机特性分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 6-13.
- ZHANG X, KANG C Q, Z N, et al. Analysis of mid/long term random characteristics of photovoltaic power generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 6-13.
- [24] HAMID S, HAMIDREZA Z, DAVID W. Impacts of largescale wind and solar power integration on California's net electrical load[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 58: 761-774.
- [25] 刘吉臻. 新能源电力系统建模与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- LIU J Z. Modeling and controlling of alternate electrical power systems[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [26] 徐浩, 李华强. 火电机组灵活性改造规划及运行综合随机优化模型[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4626-4635.
- XU H, LI H Q. Planning and operation stochastic optimization model of power systems considering the flexibility reformation[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4626-4635.
- [27] 刘斌, 张玉琼, 麻林巍, 等. 西北地区源端基地综合能源系统的技术方案设计及优化研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 568-580.
- LIU B, ZHANG Y Q, MA L W, et al. Design and optimization of technical schemes of supply-side base integrated energy systems in northwest China[J]. Proceeding of the CSEE, 2021, 41(2): 568-580.
- [28] 刘明明, 崔春风, 童小娇, 等. 混合整数非线性规划的算法软件及最新进展[J]. 中国科学: 数学, 2016, 46(1): 1-20.
- LIU M M, CUI C F, TONG X J, et al. Algorithms,

softwares and recent developments of mixed integer nonlinear programming[J]. Scientia Sinica Mathematication, 2016, 46(1): 1-20.

收稿日期: 2021-08-06.

作者简介:



周保中

周保中(1984), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为综合能源, baozhongzhou@chder.com;



刘敦楠

刘敦楠(1979), 男, 博士, 教授, 研究方向为综合能源和电力市场, 本文通信作者, liudun@163.com;



张继广

张继广(1986), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为综合能源, Jiguangzhang1@chder.com;



李忆

李忆(1986), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为综合能源, yi-li@chder.com;



徐尔丰

徐尔丰(1993), 男, 硕士, 经济师, 研究方向为综合能源和电力市场, 18810905481@163.com;



毕圣

毕圣(1987), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为综合能源系统, shengbi@chder.com.

(责任编辑 尚彩娟)