

水风光多能互补发电调度问题研究现状及展望

申建建¹, 王月¹, 程春田¹, 李秀峰², 苗树敏³, 张一¹, 张俊涛¹

(1. 大连理工大学, 辽宁省大连市 116024; 2. 云南电力调度控制中心, 云南省昆明市 650200;
3. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川省成都市 610041)

Research Status and Prospect of Generation Scheduling for Hydropower-wind-solar Energy Complementary System

SHEN Jianjian¹, WANG Yue¹, CHENG Chuntian¹, LI Xiufeng², MIAO Shumin³, ZHANG Yi¹, ZHANG Juntao¹

(1. Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning Province, China;

2. Yunnan Power Dispatching Control Center, Kunming 650200, Yunnan Province, China;

3. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: Renewable energy dominated hydropower, wind and solar power has achieved unprecedented development in the past two decades. In the future, it will be the core component of China's clean and low-carbon energy system and the realistic choice to fulfill the carbon emission reduction commitment. This study analyzed the development of clean energy power generation in China and the typical practical projects of hydropower-wind-solar complementary system. Key problems of generation scheduling in complementary system were summarized, i.e., how to participate in the operation for large-scale wind and solar power plants, how to describe the intermittent spatial-temporal generation characteristics, and how to coordinate wind and solar power plants and hydropower plants on the long-term and short-term operations? In view of these problems, the coordination methods and characteristics of hydropower-wind-solar complementary research works were systematically reviewed. Moreover, the technical realization process were expounded in terms of the cluster of wind and solar power plants, the description of cluster generation, the modeling and solution of long-term and short-term coordination of hydropower-wind-solar complementary system. We hope that the developed methods can provide practical and available technical means for actual operations of China's multi-energy complementary projects, and help to achieve the goal of "carbon peak, carbon neutralization".

KEY WORDS: energy complementary; hydropower-wind-

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079014, 52039002); 大连高层次人才计划(2019RQ004)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52079014, 52039002); Dalian High-level Talent Plan (2019RQ004).

solar system; generation uncertainty; flexibility; coordination control

摘要:以水风光为主的可再生能源在过去二十年实现了前所未有的发展,未来也将是中国构建清洁低碳能源体系的核心组成部分,是兑现碳减排承诺的现实选择。该文简要分析了我国清洁能源发电的发展概况及典型水风光互补实际工程,提炼总结了互补系统发电调度面临的关键问题,包括大规模风光电站群以何种形式参与调度、间歇性时空发电规律如何描述、风光电站群与水电站群在长期、短期等时间尺度上如何协调运行;针对这些问题系统综述了国内外水风光互补协调研究方法及特点,并从风光电站集群汇聚、集群出力描述、及集群模式下水风光互补系统长期、短期协调建模与求解思路,阐述了技术实现过程,期望为我国多能互补工程实际运行提供切实可行的技术手段,助力“碳达峰、碳中和”目标。

关键词:多能互补;水风光系统;出力不确定性;灵活性;协调控制

0 引言

充分利用和大力开发风、光、水等可再生能源资源是我国在 2060 年前实现碳中和目标的重要途径^[1-3]。过去十多年,我国新能源发电实现了前所未有的发展^[4-7]。然而,受限于风电、光伏固有的间歇、不可控发电特性,以及其他综合因素,新能源消纳问题一直非常突出^[8-10],特别是伴随并网规模的快速扩大,巨大的灵活性需求带来的弃电风险、高比例清洁能源系统安稳运行等问题越来越突出^[11-14]。多能互补是国际上公认的破解新能源消纳难题的可行途径之一^[15-22],核心在于如何通过水、火、储等灵活性电源平抑风、光等新能源发电的间歇性和

随机性,以提高电网电能运行质量和可靠性,提升现有通道利用率,有效解决风电、光伏电大规模集中上网的运行难题。

然而,我国储能总体装机规模较小,仅0.36亿kW^[23],以抽水蓄能为主,与风光发电规模有数量级差异,难以支撑目前新能源几亿千瓦以及未来几十亿kW的集中消纳需求;常规水电技术成熟、具有优质的调节能力,是我国目前发电规模最大的清洁能源,达到3.91亿kW,与消纳风光发电的规模匹配性较好。因而,实施水风光互补运行将是我国目前及未来很长一段时间支撑新能源集中消纳的一种重要途径,但以水风光为主的清洁能源基地和高比例清洁能源电网等实际工程面临大规模风光电站群以何种形式参与调度、间歇性时空发电规律如何描述、风光电站群与水电站群在长期、短期等时间尺度上如何协调运行等一系列发电调度难点与痛点问题,亟待理论与技术突破。

为此,本文分析了我国清洁能源发电的发展概况和典型实际工程特点,提炼总结了水风光互补系统发电调度关键问题,并结合团队在电网、流域集控实际工程的多年研发经验,从风光电站集群汇聚、集群出力描述、及集群模式下水风光互补系统长期、短期协调等方面展望了水风光互补系统发电调度问题的研究思路,阐述了与之适应的技术实现方法,这样在实际应用中可以结合不同省份、不同基地的电源结构、规模及发电特性差异,进一步确定适合的风光电站集群数量及其包含的电站对象,并准确分析描述各集群的发电规律,建立适合的水风光互补系统发电调度模型与方法,切实服务于实际工程运行。

1 水风光清洁能源系统及实际工程

水电、风电、光伏电是我国并网装机规模最大的三类清洁能源,2021年底总装机容量超10亿kW^[4],占全国总装机约43%,占非化石能源发电装机约92%,见图1。在碳中和目标下,清洁能源特别是风、光发电将进入加速阶段,预计2050年水、风、光发电总装机容量将超过40亿kW,占比将从现的43%跨越到70%以上^[24],增长规模惊人。

本文重点关注水风光互补发电系统,大致分为两大类:一是围绕流域梯级建设的水风光清洁能源基地,如龙羊峡水光互补工程^[25-26]、雅砻江流域水风光互补工程^[27-28]等;二是电网层面的多能互补运

行系统,像云南、贵州、四川、湖北等,水、风、光电源均有较大规模装机。

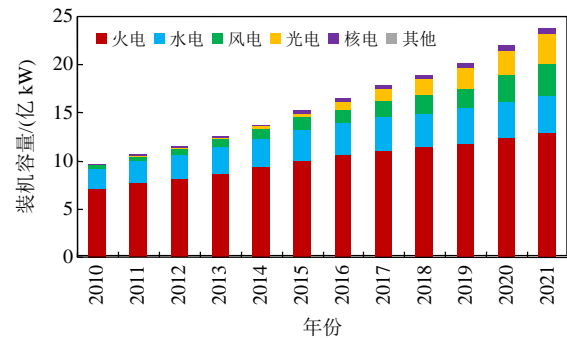


图1 2010—2021年我国发电装机情况

Fig. 1 Installed capacity in China from 2010 to 2021

以云南电网为例,水电、风电、光伏电装机容量分别为7556万kW、895万kW、351万kW,合计占全网总装机比重高达88%,发电量比重更是超过90%,是清洁能源居绝对主导地位的省级电网,且系统装机规模巨大,是全国第七大省级电网。云南近些年一直面临突出的可再生能源消纳问题,特别是随着风电与光伏电装机容量快速突破千万千瓦,其发电随机性、间歇性时常导致新能源电力偏差高达数百万千瓦,再加之水电的径流不确定性,以及复杂的长链状多电压等级互联网架结构,如何有效协调大规模水电系统可控电源与不可控风、光伏电站群发电调度和计划编制,满足省内用电和大规模外送需求、保障系统供电的可靠性,已成为云南电网水风光多能互补系统面临的主要理论和实践挑战,解决好这一课题对于提升千万千瓦乃至亿千瓦级新能源发电的并网质量与利用效率,促进清洁能源大规模消纳至关重要。

2 水风光互补系统发电调度关键问题

围绕多能互补实际工程,本文总结了水风光系统发电调度几个关键问题,其中前两个问题关注数十甚至数百座风光电站以何种方式参与发电调度、其发电规律如何描述,后两个问题关注大规模新能源电站与水电站群在长期调度和短期调度中如何协调运行,前者是后者的研究基础。

2.1 大规模风光电站集群调度问题

上文提及,水风光互补系统电站规模庞大,特别是新能源电站,如雅砻江流域清洁能源基地规划风光电站百余座,云南电网统调风光电站200余座,如此大规模电站群进行发电调度,既面临统一管理、海量运行信息维护等技术难题,也有大规模系统优化建模准确性与计算效率等基础理论问题。而

且，风光电站的可调度性较低，地理位置分散，气候和地域等自然特性的时空差异较大，使得各电站的入网节点、发电特性存在很大不同，面临“点多难控”局面，以单个电站作为控制点，进行直接的调度指令交互，会大幅影响发电调度建模与求解效率，而且难以准确掌控其发电规律，给电网发电计划编制和调度运行也带来很大不确定性。这种情况下，对风、光电站进行集群调度是一种减少直接调度电站数量的有效方式，但如何确定适合的集群数量及其包含的电站是这种方式面临的主要问题，具体的集群划分方式与实际工程特点如电源构成、装机规模、发电特性等密切相关，需要实用有效的方法。

2.2 风光发电不确定性描述问题

众所周知，风、光电站出力波动频繁，在不同季节和昼夜时序上呈现随机性、波动性、间歇性等特点^[29-34]，且不同地区受风速、光照等气象因素影响也存在较大差异，如何准确描述风光电站的时空出力规律是提高多类型电源互补协调运行水平、促进清洁能源消纳面临的核心问题之一，涉及发电影响因子识别和不确定性量化等主要难点。一方面，风光电站出力大小与众多因素相关，从运行角度来看，包括风速、风向、气压、气温、光照强度、光照时间、地形、机组参数、输电通道、电网调控需求等，需要辨识各类电源出力的主要影响因素，并构建与之对应的数学指标和取值方式，为风光发电不确定性描述、功率预测提供前提基础；另一方面是量化风、光发电过程的不确定性，可以直接分析发电功率特性，也可以研究预测出力的误差规律，关键均在于不确定性的量化表达，需要利用电站长系列发电数据，从随机优化如场景模拟(见式(1))、鲁棒优化如不确定性集合(见式(2))等思路探寻适合的表达方法。

$$\left\{ \begin{array}{l} [P_{1,1}, P_{1,2}, \dots, P_{1,k}, \dots, P_{1,K}], p_1 \\ [P_{2,1}, P_{2,2}, \dots, P_{2,k}, \dots, P_{2,K}], p_2 \\ \vdots \\ [P_{m,1}, P_{m,2}, \dots, P_{m,k}, \dots, P_{m,K}], p_m \\ \vdots \\ [P_{M,1}, P_{M,2}, \dots, P_{M,k}, \dots, P_{M,K}], p_M \end{array} \right\} \quad (1)$$

式中： $P_{m,k}$ 为场景 m 第 k 个采样点的数值； p_m 为场景 m 的概率。

$$U_2 = \{\xi : \|\xi\|_2 \leq \Omega\} = \{\xi : \sum \xi_i^2 \leq \Omega^2\} \quad (2)$$

式中： ξ 为不确定参数向量； Ω 为不确定度。

2.3 水风光互补长期协调优化问题

水风光互补运行关键在于水库具有调蓄能力，所以如何合理利用水库库容的长周期调蓄能力将直接关系到互补系统的运行效果和效率。一般而言，水电站群长期运行方式或调度规则是指导水库发电蓄放水、合理分配阶段蓄能的主要依据，但在水风光互补运行模式下，以往仅考虑径流不确定性^[35]的调度规则很难准确反映互补系统的运行要求，如何考虑风光电源短期灵活性调节需要、长期电量消纳需要，重构干流梯级控制型水库群长期运行方式和汛前、汛末、年末等关键节点水位控制规则是水风光互补运行的又一关键问题。该问题实质是长、中、短多时间尺度耦合、径流与风光发电多重不确定性条件下的大规模多类型电站群随机优化问题(见式(3))，与单一类型水电系统的调度规则优化相比，复杂性和难度更大，需要从模型构建与求解探索创新思路。

$$\max \sum_{s=1}^S P_{r-s} \cdot \left\{ \sum_{t=1}^T (d_t \sum_{n=1}^N P_{s,n,t} \cdot \Delta t - d_t E_{s,t}^{cut} - d_t E_{s,t}^{short}) \right\} \quad (3)$$

式中： P_{r-s} 为场景 s 的概率； d_t 为 t 时段的电价； $P_{s,n,t}$ 为场景 s 下 n 号电站 t 时段的平均出力； Δt 为时段长； $E_{s,t}^{cut}$ 为系统发电量相较于计划发电量的额外电量； $E_{s,t}^{short}$ 为系统发电量相较于计划发电量的缺额电量。

2.4 水风光互补短期协调优化问题

以风光为主的新能源规模化并网对电力系统短期运行产生极大影响，由于新能源发电的间歇性和波动性，其装机比重越大，在电网负荷低谷、高峰时段的功率波动影响越大，使得日前、实时调度的灵活性调节需求随之增大，从而加剧全周期电力平衡尤其是日内负荷高、低点的调峰与反调峰难度，容易引发系统安稳问题。从短期运行来看，水风光互补协调的问题难点突出表现在：一是需要考虑风光发电不确定性准确描述系统的灵活性调节需求，即平抑新能源出力波动需要匹配多少可调节容量，需要研究灵活性指标及其表征方法^[36](见式(4))；二是需要研究大规模新能源与可调节水电站群的日前联合调度模型、实时协调控制策略，如何有效考虑系统灵活性、新能源消纳等目标需求(见式(5))，如何实现高维、非线性模型的高效求解，是确定互补系统电站、机组日前和实时开停机方式

及出力计划的重点与难点。

$$\begin{cases} S_t^{UR} = \sum_{s=1}^S (D_{s,t}^{UR} - CA_{s,t}^{UR}) Pr_s \\ S_t^{DR} = \sum_{s=1}^S (D_{s,t}^{DR} - CA_{s,t}^{DR}) Pr_s \end{cases} \quad (4)$$

$$\min \sum_{t=1}^T (S_t^{UR} + S_t^{DR}) \quad (5)$$

式中： S_t^{UR} 为灵活性上调不足期望，指 t 时刻因上调能力不足而导致的灵活性上调需求与灵活性上调能力之间差值的期望； S_t^{DR} 为灵活性下调不足期

望，指 t 时刻因下调能力不足而导致的灵活性下调需求与灵活性下调能力之间差值的期望； $D_{s,t}^{UR}$ 、 $D_{s,t}^{DR}$ 分别为灵活性上调需求和下调需求； $CA_{s,t}^{UR}$ 、 $CA_{s,t}^{DR}$ 分别为灵活性上调能力和下调能力。

3 水风光互补系统发电调度研究现状

本文水风光互补系统发电调度重点针对上述4个方面问题进行综述分析，图2给出研究现状的总体概况。表1详细列出风光电站集群调度、风光发

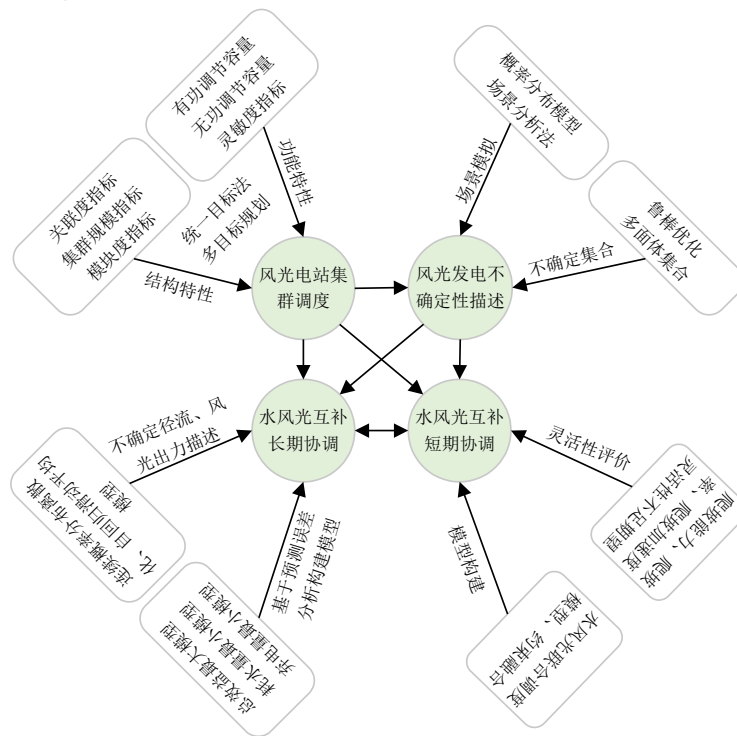


图2 研究现状总体概况

Fig. 2 General overview of research status

表1 水风光互补系统发电调度研究现状

Table 1 Research status of generation scheduling for hydropower-wind-solar energy complementary system

研究内容	重要方法/指标	
风光电站集群调度	集群结构强度	集群内部关联度指标、集群间关联度指标、集群内部连接性指标、集群规模指标、模块度指标
	集群自治能力	有功和无功调节容量、有功电压灵敏度和无功电压灵敏度、供需匹配指标
	综合评价	考虑集群结构与功能特性、耦合电压控制以及调节容量、考虑集群结构与可再生能源消纳能力
风光发电不确定性描述	分布特性	概率分布模型
	场景分析	场景生成：蒙特卡罗法抽样、自回归滑动平均模型、拉丁超立方法 场景缩减：后向消减法、快速前向选择法、场景数构建法、聚类算法
	不确定集合	鲁棒优化、多面体集合
水风光长期协调控制	场景模拟	连续概率分布离散化、自回归滑动平均模型
	预测误差分析	波动区间分析
水风光短期协调	灵活性评价	电源侧：爬坡能力、最短启停时间、开机时间、响应时间、最小稳定出力 负荷侧：净负荷爬坡率、爬坡加速度
	模型优化准则	电力系统：上调灵活性不足概率及期望、下调灵活性不足概率及期望 清洁能源消纳准则：弃电量最小、发电量最大 效益准则：系统运行成本最小、发电效益最大、环境效益最大或污染物排放最小、网损最小 系统稳定运行准则：电压偏差最小、系统出力波动最小、负荷跟踪

电不确定性描述、水风光长期协调控制、水风光短期协调等方面的主要研究方法。

3.1 风光电站集群调度研究现状

大规模新能源电站以集群或者虚拟电站方式参与发电调度是破解“点多难控”局面的一种有效思路，其目的是利用集群自身的调节能力，实现可再生能源灵活并网，促进清洁能源充分消纳。

对于整个电力系统而言，调度员更关注的是电网的稳定性与调度的简便性，因此集群划分的原则为集群内部节点之间联系紧密，集群间联系疏松。基于此准则，集群划分指标通常依据电气距离^[37-39]展开，描述节点间的耦合程度，关注集群的耦合性以及集群内部电源的利用情况。具体指标^[40]有反映集群结构强度的集群内部关联度指标、集群间关联度指标、集群内部连接性指标、集群规模指标、模块度指标，以及反映集群自治能力的有功和无功调节容量、有功电压灵敏度和无功电压灵敏度指标、供需匹配指标等。其中很多指标是针对自给自用的小型电力系统，当应用到大规模系统时需要进行适应性调整或探寻更适合的指标。此外，在考虑到电能质量的同时，经济性相关指标如间歇性能源的调节成本以及弃风弃光成本也是不可忽略的重要因素。以前述指标为基础，能够进一步构建集群划分准则，例如考虑集群结构与功能特性的综合性能指标、耦合电压控制以及有功和无功调节容量的评价准则、考虑集群结构与可再生能源消纳能力的综合评价模型等，这些准则在使用时通常需要采用权重法^[41]将多目标转换为单目标问题求解，或者建立多指标联合优化模型^[42-43]，并采用多目标方法直接求解。

3.2 风光发电不确定性描述研究现状

关于不确定性量化分析的方法，大致可分为场景模拟和不确定性集合，前者属于随机优化范畴，后者属于鲁棒优化范畴。

对于场景模拟，一方面可以直接对风光功率的分布特性进行研究，但要获得准确的概率分布，需要大量的原始数据做支撑；另一方面是采用场景分析法，通过把连续概率分布的随机向量离散成场景集合，将随机优化问题转换为确定性问题处理，一般步骤包括初始场景构造、场景缩减及缩减场景集评估。常见的场景生成方法有蒙特卡罗法抽样^[44]、自回归滑动平均模型^[45]、拉丁超立方方法^[46]等，场景缩减方法有后向消减法^[47]、快速前向选择法^[48]、场

景数构建法^[49]、聚类算法^[50]等。基于场景分析刻画新能源发电不确定性的关键在于如何提高场景集对原问题的逼近精度，以及生成高质量场景集的计算效率。

对于不确定性集合，是鲁棒优化理论中刻画不确定性因素的方法^[51]。一方面可以构建鲁棒优化模型，给出风光发电出力不确定集合的构造方法，通过调整不确定集合边界，可控制鲁棒优化模型的保守型，实现决策的经济性与安全平衡性；另一方面可以采用鲁棒优化方法中的多面体集合来描述风光发电出力的不确定性，并引入鲁棒保守调节因子，来降低问题求解的保守度。需要注意，构建出力不确定性集合的关键点在于如何选取鲁棒集合，保证决策结果的合理性。

3.3 水风光长期协调控制研究现状

风光水互补运行可以有效利用水电的灵活性补偿风光功率的波动性和间歇性，但这种方式可能在一定程度上会影响水电系统的长期运行效益，所以如何确定合理的水电站水库群运行方式即调度规则，为风光发电提供足够灵活性，同时尽可能保障水能利用效率，就显得尤为重要。

水风光互补长期协调可以从两个方面分析，一是长期尺度下多种类型电源的协调优化，二是长、短期多尺度耦合调度研究。

一方面，需要在水电调度基础上进一步考虑不可控风、光发电，模型输入由不确定性径流转变为不确定性径流、风能以及太阳能，实质是多重不确定性条件下的随机优化问题，如何建立适合的随机调度模型，如何构建高效的求解算法是研究重点与难点。许多研究采用场景模拟描述风光发电的出力情景，以长系列实际运行数据为基础，采用连续概率分布离散化^[52]、自回归滑动平均(autoressive moving average, ARMA)模型^[53]等场景生成方法，从季度或月度确定风光发电量的代表性场景，并作为互补系统中水电站水库群优化调度的边界条件，采用确定性或者随机优化技术重构电站调度运行规则。再者，部分研究直接构建水、风、光多重不确定性的描述方法，或者对新能源的出力进行预测并分析预测误差，将预测出力及波动区间作为系统输入建立总效益最大、弃电量最小、耗水量最小等模型^[54-56]，同时开展这种复杂模型的求解算法研究，提出多阶段、分模块求解方法^[57-58]。也有学者另辟蹊径，将智能算法进行结合，以互相弥补各自

不足,提高求解效率及精度。

事实上,对于水风光互补系统而言,水力联系使得中长期和短期存在多尺度耦合与影响,水电中长期电量协调结果通常是确定短期互补运行边界条件的重要依据,瑞典学者在顶级能源期刊《Nature Energy》论文研究^[59]指出“在高渗透率可再生能源并网条件下,净负荷(用电负荷减去新能源出力后得到的负荷)在月内波动性最为明显”。因此,开展水风光互补系统多尺度嵌套分析与研究也是非常重要的。这方面研究已经得到国内外学者关注,例如加拿大学者将水电为主的哥伦比亚省和化石能源为主的亚伯达电力系统作为工程背景,通过短期特征曲线统计出平抑日内风电、光伏电出力波动的爬坡与调节备用,并嵌套于长期能源规划模型,但模型局限于确定性优化^[60];再如,哥伦比亚学者将短期电力电量平衡以概率约束表示,优化确定了基于风险规避的长期运行计划,但该方法对水、风、光、负荷不确定性进行了大幅简化,以提高计算效率^[61];我国学者针对龙羊峡水光互补工程,也通过长短期嵌套协调研究制定系统的长期调度规则,以有效避免或减少光伏弃电^[57]。总的来说,这方面研究成果对于系统构建多能互补理论与方法体系是非常重要的,仍需要结合不同规模、不同构成的水风光互补系统工程特点和实际调度场景的应用需求,借鉴国内外已有成果,开展适应性研究并进行成果的不断提炼和总结。

3.4 水风光短期协调研究现状

针对水风光互补系统短期协调问题,国内外学者开展了两方面的研究:电力系统灵活性评价与水风光短期互补运行策略。

电力系统灵活性评价的对象可分为电源侧、负荷侧以及系统灵活性。电源侧灵活性评价指标有爬坡能力、最短启停时间、开机时间、响应时间、最小稳定出力等,主要用于比较不同资源的灵活性调节能力大小,常作为调度模型的输入参数;负荷侧灵活性评价指标有净负荷爬坡率、爬坡加速度,主要用于分析负荷曲线的特征,量化灵活性需求;系统灵活性评价指标有灵活性不足概率及期望,也可细分为上调灵活性不足概率及期望、下调灵活性不足概率及期望,主要用于评价系统整体的灵活性水平。

水风光互补短期调度模型主要分为两类,第一类是采用上文阐述的不确定性描述方法刻画风电、

光伏电出力,进而与水电等常规电源构建联合调度模型进行耦合求解,模型的优化准则通常包括三种:第一种是清洁能源消纳准则,例如弃电量最小^[62]、发电量最大^[26]等;第二种是效益准则,常用目标函数包括系统运行成本最小^[63]、发电效益最大^[58]、环境效益最大或污染物排放最小^[64]、网损最小^[65]等;第三种是系统稳定运行准则,例如电压偏差最小^[66]、系统出力波动最小^[67]、负荷跟踪^[68]等;前两种大多是从电源端出发,以寻求更高的发电量和发电效益,第三种倾向于系统的可靠性,以缓解新能源规模化并网给电力系统带来的冲击。

第二类是通过约束方式实现风光电站群与可调电源的联合调度,侧重对风光发电出力预测误差的分析^[69-70],主要思路是将其描述为合理的调度约束以优化水火电等互补调节性电源的运行计划,常用的方式是根据预测误差的波动配置合理的备用容量,以保障实时运行中的电力平衡,其实质是将不确定性问题边界化处理,也有研究通过可靠性或者风险指标约束考虑风光的功率预测误差,比如电力不足概率、电量不足概率、系统失负荷指标等,这类方式的重点在于如何确定约束边界,以保证优化调度结果的合理性和实用性。

4 水风光互补系统发电调度研究展望

针对上文提炼总结的水风光互补运行问题,结合团队的工程实践经验,提出研究展望。

4.1 大规模风光电站集群调度研究展望

针对互补系统电站数量庞大、难以集中调度的问题,可以引入风光电站群汇聚策略,探寻适合的汇聚准则将多个风电站、光伏电站进行汇聚整合,以利用空间平滑特性、时间互补规律等(见图3)提高汇聚电站群的可调度水平,并以风光电站集群为对象实现与水电系统的互补协调。

考虑到风光的汇聚效应与电站规模大小密切相关,如何划分风光电站集群至关重要。一种思路是根据多能互补工程的风、光电站的分布特点,综合考虑分区特性、出力相关性、入网节点、风速和光照的时变特性等,从单一电源群体到风光汇聚整体逐层递进,研究风光电站汇聚效应分析方法,建立电站群汇聚准则。一方面,需要确定集群划分的评价指标,可以分析各电站的日出力过程变化特点,构建电站间的出力互补性、波动性等指标(见式(6)),以反映集群对象的整体出力效果。

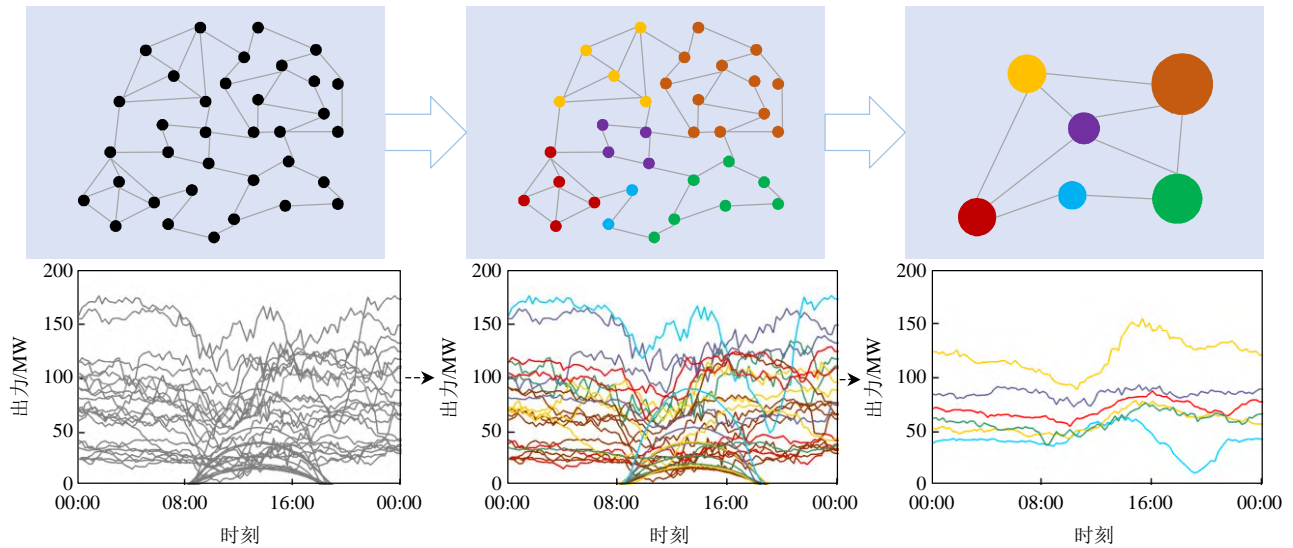


图 3 风光电站群汇聚效果示意图

Fig. 3 Schematic diagram of clustering wind and PV stations

$$\delta = \sum_{t=1}^T \left| \frac{P_{t+1} - P_t}{\Delta t} \right| / T \quad (6)$$

式中： δ 为研究时段内电站群出力变化率，反映了电站群内各电站出力的互补程度； P_t 、 P_{t+1} 分别为 t 时刻和 $t+1$ 时刻电站群出力，MW； Δt 为时段步长； T 为时段数量。

另一方面，需要确定风光电站集群的个数及划分方式，可耦合互补性、波动性等指标构建适合的评价准则，利用电站多年长系列实际出力数据，进行数据提炼与聚类分析，可以利用较高电压等级的子汇聚区、地理位置等确定初始的群体数量及包含的电站对象，并计算每一个集群互补后的出力指标值，引入 Z-Score 标准化理论，建立电站集群对象与各种指标的综合评价矩阵，以此得到特定集群划分状态的总体评价价值，从而识别不同集群个数下的最优电站汇聚方式。在此基础上，综合分析评价指标与集群数量的变化关系，以及集中调度的规模、效率等因素，确定最优集群个数及划分方式。

4.2 风光发电不确定性描述研究展望

在风、光电站群汇聚基础上，需要进一步分析其发电出力特性，细致研究电站集群不确定性出力的量化描述方法，可采用两种方法以满足不同互补运行方式需要。

第一种是考虑出力时变特性进行概率分布拟合。风光发电出力是一类非平稳随机过程，仅用单一概率分布函数和参数难以准确描述其时变特点，所以考虑时变特性建立概率分布可能更有利于找出发电规律，见图 4。在实施过程中，首先需要研究适合的时段划分方法，可以从电源自身发电特性、电

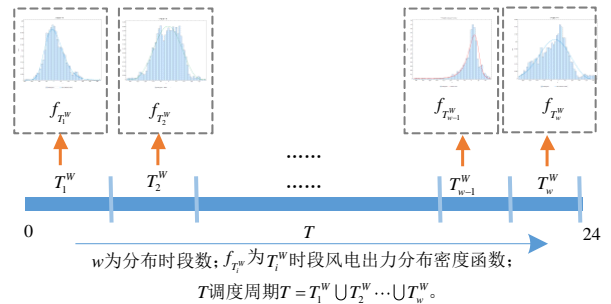


图 4 考虑时变特性的概率分布拟合过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of probability distribution fitting process considering time-varying characteristics

网负荷特性等角度，分析日内 24h 的变化特点，探寻适合的分段方法；其次，利用统计学理论，分析电站集群对象的出力时段分布规律，如 Gaussian 分布、Johnson SB 分布、或 Weibull 分布等，建立对应的概率分布拟合函数。采用这种思路时，需要针对不同规模、不同电站构成的电站集群，研究不同季节、月份的出力时变分布规律。对于同时包含风电站和光伏电站的集群对象，需要进一步研究多重不确定性下的风、光电站联合出力描述方法。可以采用 Kendall 秩相关系数分析风电站、光伏电站出力的相关性测度，采用多种 Copula 联合分布函数拟合风电与光伏出力的联合分布函数(见式(7))，并通过似然函数检验，赤池信息量准则与贝叶斯信息准则检验，确定拟合效果最佳的联合分布。

$$C(u, v) = H(F^{-1}(u), G^{-1}(v)) \quad (7)$$

式中： $C(u, v)$ 为风光电站出力联合分布函数； $F(u)$ 为风电站出力分布函数； $G(v)$ 为光伏电站出力分布函数。

第二种是电站集群不确定性出力的场景描述

方法。为避免装机容量变化对结果的影响,将基于长系列实际出力数据和对应装机容量,构建装机利用率数据样本;可以引入分位数回归理论研究构建非参数概率预测模型(见式(8)),采用适合的分布函数描述出力随机变量,得到分位数矩阵(见式(9)),并结合预测出力序列生成出力场景集。针对不同类型电站构成的集群,可利用笛卡尔乘积的思想,确定组合场景集,需要注意当场景数量过多导致计算量过大时,需要引入场景缩减等技术进行降维处理。

$$\{P_{\tau}^r | P_{\tau}^f = \hat{a}_{\tau} \times P^f + \hat{b}_{\tau}, \tau = \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m\} \quad (8)$$

$$P_{\tau} = \begin{bmatrix} P_{1,\tau_1}^r & P_{2,\tau_1}^r & \dots & P_{k,\tau_1}^r \\ P_{1,\tau_2}^r & P_{2,\tau_2}^r & \dots & P_{k,\tau_2}^r \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{1,\tau_m}^r & P_{2,\tau_m}^r & \dots & P_{k,\tau_m}^r \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: \hat{a}_{τ} 和 \hat{b}_{τ} 为参数估计值; τ 为分位数, $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m$ 为使用过程中的分位数取值; k 为出力的日采集次数; P^f 、 P_{τ}^r 分别为预测和实际出力。

4.3 水风光互补长期协调控制研究展望

从长时间运行角度分析,水风光短期电力互补能力实质上在很大程度上取决于水电站水库群的长期水位控制,通过合理的水位控制规则,可以针对风光不同时期的电量规模和功率波动,确定水电系统各阶段的合理蓄能,从而为每日水风光电力补偿提供准确的边界条件。为此,可以综合考虑风光发电和径流多重不确定性,从两种思路开展互补系统的水电站长期协调控制研究。

第一种是探寻耦合风光不确定性出力的水电随机优化调度方法,包括建模准则和高效求解方法。在流域集控层面,以梯级水电站群及同利益主体的风、光电站为对象,构建长、短期多时间尺度耦合的水风光互补系统综合效益期望最大模型(见式(10)),其中风、光新能源发电出力波动可采用日尺度不确定性概率分析方法建立向上、向下电力不足损失函数,进而融入水电月尺度随机调度模型。在电网调度层面,以全网水风光互补系统为对象,研究构建消纳电量期望最大模型、弃电量期望最小模型等,以充分响应清洁能源消纳、减少清洁能源弃电调度等实际需求;为描述模型中风光新能源短期出力波动与月尺度出力关系,可以利用各月典型日分析电网调峰需求,研究新能源从月初开始的某段日期波动电量在月均电量下的条件分布,以构建响应典型日调峰的弃电和缺电函数(见式(11));另外

对于弃电随机优化模型,可在消纳调度模型中引入弃电机会约束实现,并开展模型之间的对比分析。对于前述两个调度层面的优化调度模型,均需要考虑电站群汇聚点的多级嵌套断面限制约束,并结合不同电网运行方式下断面极限的动态变化,构建多种典型场景,探寻每种场景对应的优化调度规则,以适应电网不同运行方式下的实际需求。

$$\begin{aligned} & \max \sum_{s=1}^S P_r(s) \times [r_1 \times \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \text{PH}_n^s(m) \times \Delta t(m) + \\ & r_2 \times \sum_{n=1}^N \text{SE}_{M+1}^s(n) - r_3 \times \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \text{SPE}_n^s(m) \times \Delta t(m) - \\ & r_4 \times \sum_{m=1}^M g_m(V_m^s) - r_5 \sum_{m=1}^M h_m(V_m^s)] \end{aligned} \quad (10)$$

式中: S 为风光水组合场景数; M 为月份总数; N 为电站总数; $P_r(s)$ 为场景 s 的概率; $\text{PH}_n^s(m)$ 为场景 s 下 n 号电站 m 月的平均出力; $\Delta t(m)$ 为 m 月的小时数; $\text{SE}_{M+1}^s(n)$ 为场景 s 下 n 号电站的调度期末蓄能; $\text{SPE}_n^s(m)$ 为 n 号电站 m 月份的弃水能量, $g_m(V_m^s)$ 为 m 月的向上电力不足损失函数; $h_m(V_m^s)$ 为 m 月的向下电力不足损失函数; r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 为不同的效益系数。

$$\begin{cases} g_m(V_m^s) = (\max_d \{ [F_d^{\text{down}}(E^{\text{down}}(d) | E^{\text{down}}(D) = 0)]^{-1}(\gamma) \} - \frac{d/D(Q_m^{\text{in}} - Q_m^{\text{out}}) \cdot \Delta T_m + V_m - V_m^{\text{lower}}}{\bar{\varphi}_m}) \\ h_m(V_m^s) = (\frac{V_m^{\text{upper}} - V_m - \frac{d}{D}(Q_m^{\text{in}} - Q_m^{\text{out}}) \cdot \Delta T_m}{\bar{\varphi}_m} - \max_d \{ [F_d^{\text{cut}}(E^{\text{cut}}(d) | E^{\text{cut}}(D) = 0)]^{-1}(\gamma) \}) \end{cases} \quad (11)$$

式中: d 为月内从 1 日至面临日的天数; D 为月内总天数; $F_d^{\text{down}}[E^{\text{down}}(d) | E^{\text{down}}(D) = 0]$, $F_d^{\text{cut}}[E^{\text{cut}}(d) | E^{\text{cut}}(D) = 0]$ 分别为月平均新能源发电波动为 0 的条件下前 d 天向下、向上波动电量之和的分布; γ 为分布函数的概率点; Q_m^{in} 为 m 月的平均入库流量; Q_m^{out} 为 m 月的平均出库流量; ΔT_m 为 m 月的小时数; V_m 为 m 月初的水电站库容; V_m^{upper} , V_m^{lower} 分别为 m 月的库容上限与下限; $\bar{\varphi}_m$ 为平均耗水率。

第二种思路是研究水风光互补运行水电站水库群的关键水位控制规则。将从梯级、跨流域分阶段着手,重点聚焦水风光互补条件下汛前、汛末、年末等主要时间节点的水位控制。

第一阶段以单一流域调度层面为主,将基于长系列径流与风光电站的组合场景,以控制型水电站

关键时间节点水位为优化对象，构建考虑水风光互补系统综合发电效益最大、弃电量最小等多目标评价准则，采用多目标优化算法如 NSGA-II 进行长系列模拟优化调度，推求梯级水电站群非劣关键水位集，并分析确定汛前、汛末、年末的合理水位控制区间。其中，关键节点之间的水位过程确定需要综合考虑不同时期风光电站的日波动补偿电量、汛初消落深度、汛前梯级有序消落、日调节非汛期高水位运行、汛后蓄能调整等实际需求研究建立知识规则，以便根据关键时间节点的水位快速生成全周期水位变化过程；同时考虑到水库汛前消落的重要性，需要引入消落系数研究水风光互补条件下梯级水电站群的消落顺序和阶段消落目标，以合理确定各月补偿风光功率波动所需的水电电量，避免消落不到位导致补偿电量不足、后期弃电风险增加，或者过度消落导致后期蓄能不足、影响发电效率的问题。

根据主要水电站水库的水位控制规则，能够进一步分析梯级水电站的合理蓄能控制范围(如图 5)，研究确定效益增大蓄能线(表示在蓄能控制区内，越

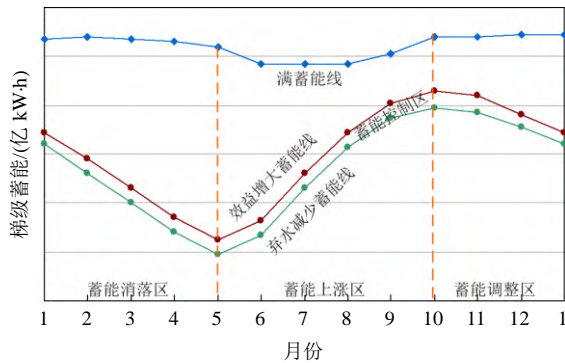


图 5 梯级蓄能控制示意图

Fig. 5 Schematic diagram of cascade energy control

靠近区间上限，互补系统的综合发电效益越大)、和弃电减少蓄能线(表示在蓄能控制区内，越靠近区间下限，互补系统的弃电越小)，以指导梯级水电站群与风光电站群联合运行。

4.4 水风光互补短期协调优化研究展望

水风光互补系统短期运行的核心任务之一就是利用水电日内灵活调节能力平抑新能源出力的间歇性和波动性，为此有必要开展消纳新能源所需的灵活性量化研究，可从两个方面出发：一是分析电站实际出力的概率分布，量化出力的极值大小或者日内波动区间，也可以比较分析预测功率与实际值，重点研究功率偏差的分布规律，以描述实时运行中的灵活性调节需求；二是构建适合的灵活性评价准则，需要结合灵活性需求和调节能力，建立量化灵活性上调与下调的裕量或不足指标，进而依据互补系统的实际工程特点建立适合的灵活性评价模型。

在灵活性需求量化基础上，可以从两个途径着手研究水风光互补运行短期联合建模方法。一方面，将风光电站集群对象的出力及其波动极值进行量化描述并通过约束融合创新水电确定性调度模型，重点解决负荷低谷、高峰、最大爬坡/降坡等关键时点风光出力波动导致的调峰困难。具体思路是：利用风光集群对象的长系列实际和预测出力数据，并通过装机归一化处理，构建统一的发电出力样本集(见图 6)；针对不同规模、不同电站构成的集群对象，利用 Copula 理论研究实际出力与预测值偏差的条件分布，构建多个汇聚对象的联合条件概率密度函数，并引入置信区间理论，研究极大

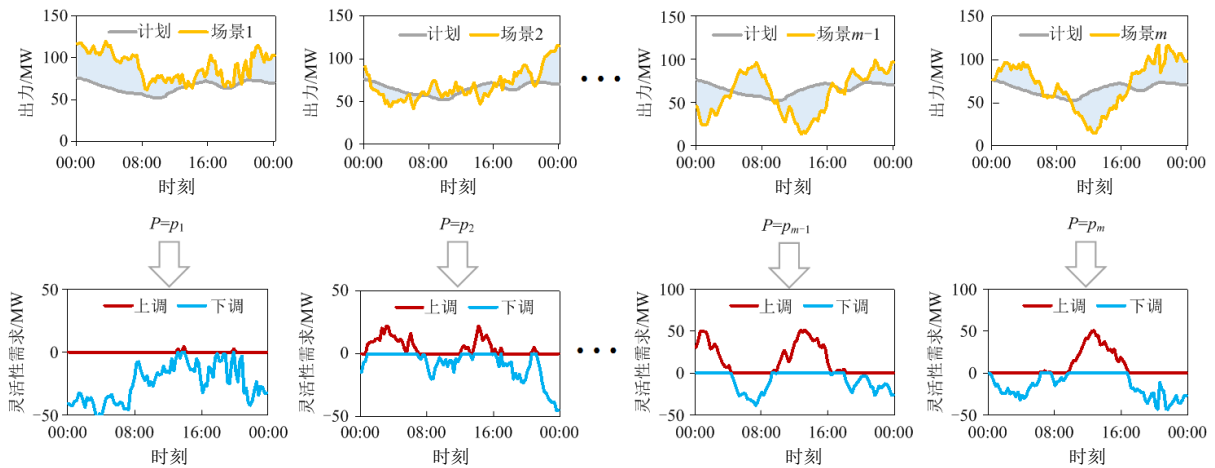


图 6 风光发电灵活性调节需求示意图

Fig. 6 Schematic diagram of flexibility regulation demand of wind and PV power generation

值、极小值、出力波动极值，或者最大正偏差、最大负偏差、偏差波动极值的合理置信边界，以确定水电调度模型中高峰时段上调容量、低谷时段下调容量、净负荷快速增/减阶段的跟踪能力等备用要求(见式(12))，使水电优化调度结果以一定的置信水平满足系统的运行实际。在此基础上，进一步开展不同风光电站集群对象的各种组合情况、不同置信水平对水电调度模型的影响分析，探寻调度约束边界的变化规律，构建具有较好适应性的调度约束生成规则。

$$\begin{cases} \sum_{n=1}^N (\text{Ph}_{n,t}^{\max} - \text{Ph}_{n,t}) \geq \overline{R}_\alpha \times P_t^{\max} \\ \sum_{n=1}^N (\text{Ph}_{n,t} - \text{Ph}_{n,t}^{\min}) \geq \overline{R}'_\alpha \times P_t^{\max} \\ \min_{1 \leq t \leq T} |\text{Ph}_{n,t} - \text{Ph}_{n,t+1}| \geq \overline{R}''_\alpha \times P_t^{\max} \end{cases} \quad (12)$$

其中 $\begin{cases} p(R_\alpha^c > X) = (1 - \alpha) / 2 \\ X = \overline{R}_\alpha, \overline{R}'_\alpha, \text{或} \overline{R}''_\alpha \end{cases}$

式中： R^c 为风光汇聚对象的实际功率或偏差； α 为置信系数； \overline{R}_α 、 \overline{R}'_α 、 \overline{R}''_α 分别为极大值、极小值、出力波动极值，或者最大正偏差、最大负偏差、偏差波动极值的置信区间边界； $\text{Ph}_{i,t}$ 为水电站*i*在时段*t*的出力； $\text{Ph}_{i,t}^{\max}$ 和 $\text{Ph}_{i,t}^{\min}$ 分别为水电站*i*在时段*t*的出力上限和下限； P_t^{\max} 为时段*t*风光汇聚对象的装机容量；*n*和*N*分别为水电站的编号和总数。

另一方面，可基于随机规划理论将风光出力与水电联合构建随机调度模型，以考虑新能源全周期发电波动研究互补系统的出力稳定性和可调节能力。具体思路是利用上文风光电站集群对象的联合出力分布或者场景描述方法构建组合出力场景集，并结合不同场景概率，通过拓展经典余荷均方差最小、调峰电量最大等目标构建水风光联合随机期望调度模型(见式(13))。在实施过程中，需要进一步研究不同模型对各种实际情景的应用效果，分析确定各自的适用条件，并探寻随机调度模型的参数取值规律。此外，电网侧风、光、水电站群多级嵌套断面控制约束是典型的多时空耦合约束，会直接影响上述模型的优化结果和求解效率，可采用拉格朗日松弛策略，引入一组拉格朗日乘子重构等效的优化模型。

$$M_{in} \sum_{s=1}^S \text{Pr}(s) \left[\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (C_{r,t}^s - \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T C_{r,t}^s)^2 \right]$$

$$C_{r,t}^s = C_t - \sum_{w \in \Omega_w} P_{w,t}^s - \sum_{y \in \Omega_y} P_{y,t}^s - \sum_{n=1}^N \text{Ph}_{n,t} \quad (13)$$

式中： $P_r(s)$ 为场景*s*的概率； $P_{w,t}^s$ 、 $P_{y,t}^s$ 分别为组合场景*s*中*t*时段的风电和光伏电出力； $\text{Ph}_{n,t}$ 为*n*号水电站*t*时段出力； C_t 为*t*时段系统负荷； $C_{r,t}^s$ 为场景*s*中*t*时段的余留负荷；*S*为风电、光伏组合出力场景总数；*s*为场景序号；*T*为调度时段数目；*t*为时段序号；*N*为水电站数目；*n*为电站编号。

5 结论

“双碳”目标开启了我国风光等新能源发展的新阶段，使能源体系向清洁低碳方向加速转变，以水火电为主的能源系统正逐步发展到新型电力系统，与此同时在发电预测、可再生能源消纳、多能源互补协调运行、系统安稳控制等方面会出现一系列极具挑战性的理论和技术难题。本文聚焦水风光互补系统发电调度问题，主要分析长期、短期协调运行，重点探讨了风、光电站集群方式和发电规律描述，以及水风光电站群联合调度建模求解等问题，综述分析了现阶段研究和发展情况，从不同角度逐一讨论了这些问题的研究思路，为水风光互补系统发电调度提供了可借鉴的技术方案，有助于攻克新型电力系统调度运行关键难题，为我国“双碳”目标实现贡献智慧。

参考文献

- [1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[EB/OL]. 2020(2020-09-22). <http://hb.people.com.cn/n2/2020/0923/c194063-34310438.html>.
XI Jinping. Speech at the general debate of the 75th UN General Assembly[EB/OL]. 2020(2020-09-22). [http://hb.people.com.cn/n2/2020/0923/c194063-34310438.html\(in-Chinese\)](http://hb.people.com.cn/n2/2020/0923/c194063-34310438.html(in-Chinese)).
- [2] 程春田. 碳中和下的水电角色重塑及其关键问题[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 29-36.
CHENG Chuntian. Function remolding of hydropower systems for carbon neutral and its key problems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 29-36(in Chinese).
- [3] 习近平. 十九大报告：加快生态文明体制改革，建设美丽中国[EB/OL]. 2017(2017-10-18). <https://www.chinanews.com.cn/gn/2017/10-18/8355230.shtml>.
XI Jinping. Report of the 19th National Congress of the Communist Party of China: Accelerate the reform of ecological civilization system and build a beautiful China[EB/OL]. 2017(2017-10-18). <https://www.chinanews.com.cn/gn/2017/10-18/8355230.shtml>.

- ews.com.cn/gn/2017/10-18/8355230.shtml(in Chinese).
- [4] 中国电力企业联合会. 2021 年全国电力工业统计快报一览表 [EB/OL].(2022-01-26). <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-306014>.
China Electricity Council. List of national power industry statistical express in 2021[EB/OL].(2022-01-26). <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-306014>(in Chinese).
- [5] 郑声安. 水电“十四五”发展思路, 2020 年中国水电发展论坛暨水力发电科学技术奖颁奖典礼[EB/OL]. 2020(2020-01-08). <https://www.nationalee.com/newsinfo/2048771.html>.
ZHENG Sheng'an. Development ideas of hydropower in the 14th five year plan, 2020 China Hydropower Development Forum and Hydropower Science and Technology Award Presentation Ceremony[EB/OL]. 2020(2020-01-08). <https://www.nationalee.com/newsinfo/2048771.html>(in Chinese).
- [6] 张俊涛, 程春田, 申建建, 等. 考虑风光不确定性的比例可再生能源电网短期联合优化调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5921-5932.
ZHANG Juntao, CHENG Chuntian, SHEN Jianjian, et al. Short-term Joint optimal operation method for high proportion renewable energy grid considering wind-solar uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5921-5932(in Chinese).
- [7] 肖白, 于龙泽, 刘洪波, 等. 基于生成虚拟净负荷的多能源电力系统日前优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(21): 7237-7249.
XIAO Bai, YU Longze, LIU Hongbo, et al. Day ahead optimal dispatch of multi-energy power system based on generating virtual net load [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(21): 7237-7249 (in Chinese).
- [8] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-8.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-8 (in Chinese).
- [9] 崔杨, 张家瑞, 王铮, 等. 计及价格型需求响应的风-光-光热联合发电系统日前调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3103-3114.
CUI Yang, ZHANG Jiarui, WANG Zheng, et al. Day-ahead scheduling strategy of wind-PV-CSP hybrid Power generation system by considering PDR [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3103-3114(in Chinese).
- [10] 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): 568-581.
LIU Bin, ZHANG Yuqiong, MA Linwei, et al. Design and optimization of technical schemes of supply-side base integrated energy systems in Northwest China [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 568-581(in Chinese).
- [11] 崔杨, 李崇钢, 赵钰婷, 等. 考虑风-光-光热联合直流外送的源-网-荷多时段优化调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 559-573.
CUI Yang, LI Chonggang, ZHAO Yuting, et al. Source-grid-load multi-time interval optimization scheduling method considering Wind-photovoltaic-photothermal combined DC transmission [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 559-573(in Chinese).
- [12] LUO Guoliang, DAN Erli, ZHANG Xiaochun, et al. Why the wind curtailment of northwest China remains high[J]. Sustainability, 2018, 10(2): 570.
- [13] CHENG Chuntian, YAN Lingzhi, MIRCHI A, et al. China's booming hydropower: systems modeling challenges and opportunities[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2017, 143(1): 02516002.
- [14] 马腾飞, 裴玮, 肖浩, 等. 基于纳什谈判理论的风-光-氢多主体能源系统合作运行方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 25-39.
MA Tengfei, PEI Wei, XIAO Hao, et al. Cooperative operation method for Wind-solar-hydrogen multi-agent energy system based on Nash bargaining theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 25-39(in Chinese).
- [15] HEMMATI R. Optimal cogeneration and scheduling of hybrid hydro-thermal-wind-solar system incorporating energy storage systems[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2018, 10(1): 014102.
- [16] SCHMIDT J, CANCELLA R, PEREIRA JR A O. An optimal mix of solar PV, wind and hydro power for a low-carbon electricity supply in Brazil[J]. Renewable Energy, 2016, 85: 137-147.
- [17] WANG Xianxun, MEI Yadong, KONG Yanjun, et al. Improved multi-objective model and analysis of the coordinated operation of a hydro-wind-photovoltaic system[J]. Energy, 2017, 134: 813-839.
- [18] ZHOU Jianzhong, LU Peng, LI Yuanzheng, et al. Short-term hydro-thermal-wind complementary scheduling considering uncertainty of wind power using an enhanced multi-objective bee colony optimization algorithm[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 123: 116-129.
- [19] 朱燕梅, 陈仕军, 马光文, 等. 计及发电量和出力波动的水光互补短期调度[J]. 电工技术学报, 2020, 35(13): 2769-2779.
ZHU Yanmei, CHEN Shijun, MA Guangwen, et al. Short-

- term complementary operation of hydro-photovoltaic integrated system considering power generation and output fluctuation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(13): 2769-2779(in Chinese).
- [20] 陈逍潇, 张粒子, 杨萌, 等. 考虑光伏发电功率波动性的 AGC 备用容量分析方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 16-22.
CHEN Xiaoxiao, ZHANG Lizi, YANG Meng, et al. A method for AGC reserve capacity analysis considering photovoltaic power fluctuation characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 16-22(in Chinese).
- [21] TALJEGARD M, GÖRANSSON L, ODENBERGER M, et al. Impacts of electric vehicles on the electricity generation portfolio - A Scandinavian-German case study[J]. Applied Energy, 2019, 235: 1637-1650.
- [22] SALEHIZADEH M R, RAHIMI-KIAN A, OLOOMI-BUYGI M. A multi-attribute congestion-driven approach for evaluation of power generation plans[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2015, 25(3): 482-497.
- [23] 吴智泉, 贾纯超, 陈磊, 等. 新型电力系统中储能创新方向研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(10): 444-451.
WU Zhiquan, JIA Chunchao, CHEN Lei, et al. Reserch on innovative direction of energy storage in new power system construction[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(10): 444-451(in Chinese).
- [24] 郭剑波. 高比例新能源电力系统的挑战及关键技术 [EB/OL]. [2020-09-02]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1678399066028288382&wfr=spider&for=pc>.
GUO Jianbo. Challenges and key technologies of high proportionnew energy power system [EB/OL]. [2020-09-02]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1678399066028288382&wfr=spider&for=pc>(in Chinese).
- [25] YANG Zhikai, LIU Pan, CHENG Lei, et al. Deriving operating rules for a large-scale hydro-photovoltaic power system using implicit stochastic optimization[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 195: 562-572.
- [26] MING Bo, LIU Pan, CHENG Lei, et al. Optimal daily generation scheduling of large hydro - photovoltaic hybrid power plants[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 171: 528-540.
- [27] 吴世勇, 周永, 王瑞, 等. 雅砻江流域建设风光水互补千万千瓦级清洁能源示范基地的探讨[J]. 四川水力发电, 2016, 35(3): 105-108.
WU Shiyong, ZHOU Yong, WANG Rui, et al. Discussion on the construction of clean energy demonstration base in Yalong River Basin[J]. Sichuan Water Power, 2016, 35(3): 105-108(in Chinese).
- [28] 陈云华. 西南水电开发的科技创新与展望——以雅砻江流域水电开发为例[J]. 水电与抽水蓄能, 2021, 7(1): 6-10, 15.
CHEN Yunhua. Technological innovations and future prospect of hydropower development in southwest China-a case study of Yalong river hydropower development[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2021, 7(1): 6-10, 15(in Chinese).
- [29] 薛禹胜, 雷兴, 薛峰, 等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5029-5040.
XUE Yusheng, LEI Xing, XUE Feng, et al. A review on impacts of wind power uncertainties on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5029-5040(in Chinese).
- [30] 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 Wenling, WANG Bo, WANG Ningbo, 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(in Chinese).
- [31] 李剑楠, 乔颖, 鲁宗相, 等. 多时空尺度风电统计特性评价指标体系及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 53-61.
LI Jiannan, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. An evaluation index system for wind power statistical characteristics in multiple spatial and temporal scales and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 53-61(in Chinese).
- [32] 叶林, 屈晓旭, 么艳香, 等. 风光水多能互补发电系统日内时间尺度运行特性分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 158-164.
YE Lin, QU Xiaoxu, YAO Yanxiang, et al. Analysis on intraday operation characteristics of hybrid wind-solar-hydro power generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 158-164(in Chinese).
- [33] CANTÃO M P, BESSA M R, BETTEGA R, et al. Evaluation of hydro-wind complementarity in the Brazilian territory by means of correlation maps[J]. Renewable Energy, 2017, 101: 1215-1225.
- [34] WANG Xuebin, CHANG Jianxia, MENG Xuejiao, et al. Short-term hydro-thermal-wind-photovoltaic complementary operation of interconnected power systems[J]. Applied Energy, 2018, 229: 945-962.
- [35] 纪昌明, 李荣波, 田开华, 等. 基于来水不确定性的梯级水电站负荷调整耦合模型——以锦官电源组梯级水电站为例[J]. 水利学报, 2017, 48(1): 1-12.
JI Changming, LI Rongbo, TIAN Kaihua, et al. A coupling model of load adjustment for cascade

- hydropower stations based on inflow uncertainty: a case study of Jinping-Guandi cascade hydropower stations[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(1): 1-12(in Chinese).
- [36] OREE V, HASSEN S Z S. A composite metric for assessing flexibility available in conventional generators of power systems[J]. *Applied Energy*, 2016, 177: 683-691.
- [37] VINOTHKUMAR K, SELVAN M P. Hierarchical agglomerative clustering algorithm method for distributed generation planning[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, 56: 259-269.
- [38] COTILLA-SANCHEZ E, HINES P D H, BARROWS C, et al. Multi-attribute partitioning of power networks based on electrical distance[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(4): 4979-4987.
- [39] WU Hongbin, LIU Zhongqian, CHEN Yu, et al. Equivalent modeling method for regional decentralized photovoltaic clusters based on cluster analysis[J]. *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, 2018, 3(2): 146-153.
- [40] 毕锐, 刘先放, 丁明, 等. 以提高消纳能力为目标的可再生能源发电集群划分方法[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(22): 6583-6591.
- BI Rui, LIU Xianfang, DING Ming, et al. Renewable energy generation cluster partition method aiming at improving accommodation capacity[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(22): 6583-6591(in Chinese).
- [41] KIRAN D, ABHYANKAR A R, PANIGRAHI B K. Hierarchical clustering based zone formation in power networks[C]//2016 National Power Systems Conference (NPSC). Bhubaneswar: IEEE, 2016: 1-6.
- [42] 李国武, 李艳琼, 刘娇扬, 等. 考虑集群划分的分布式储能容量规划方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2018, 30(12): 1-10.
- LI Guowu, LI Yanqiong, LIU Jiaoyang, et al. Planning method for capacity of distributed energy storage considering cluster partition[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2018, 30(12): 1-10(in Chinese).
- [43] 潘明夷, 刘念, 雷金勇. 含热电联产机组的分布式能源集群动态划分方法[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(1): 168-176.
- PAN Mingyi, LIU Nian, LEI Jinyong. Dynamic partition method for distributed energy cluster with combined heat and power unit[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(1): 168-176(in Chinese).
- [44] 王蓓蓓, 刘小聪, 李扬. 面向大容量风电接入考虑用户侧互动的系统日前调度和运行模拟研究[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(22): 35-44.
- WANG Beibei, LIU Xiacong, LI Yang. Day-ahead generation scheduling and operation simulation considering demand response in large-capacity wind power integrated systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(22): 35-44(in Chinese).
- [45] ZHANG Hongxuan, LU Zongxiang, HU Wei, et al. Coordinated optimal operation of hydro-wind-solar integrated systems[J]. *Applied Energy*, 2019, 242: 883-896.
- [46] 胡斌, 娄素华, 李海英, 等. 考虑大规模光伏电站接入的电力系统旋转备用需求评估[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(18): 15-19.
- HU Bin, LOU Suhua, LI Haiying, et al. Spinning reserve demand estimation in power systems integrated with large-scale photovoltaic power plants[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(18): 15-19(in Chinese).
- [47] HEITSCH H, RÖMISCH W. Scenario reduction algorithms in stochastic programming[J]. *Computational Optimization and Applications*, 2003, 24(2-3): 187-206.
- [48] WANG Yishen, LIU Yuzong, KIRSCHEN D S. Scenario reduction with submodular optimization[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(3): 2479-2480.
- [49] DUPAČOVÁ J, GRÖWE-KUSKA N, RÖMISCH W. Scenario reduction in stochastic programming[J]. *Mathematical Programming*, 2003, 95(2): 493-511.
- [50] 王群, 董文略, 杨莉. 基于 Wasserstein 距离和改进 K-medoids 聚类的风电/光伏经典场景生成算法[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(11): 2654-2661.
- WANG Qun, DONG Wenlue, YANG Li. A wind power/photovoltaic typical scenario set generation algorithm based on wasserstein distance metric and revised K-medoids cluster[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(11): 2654-2661(in Chinese).
- [51] BEN-TAL A, GHAOUI E, NEMIROVSKI A. *Robust optimization*[M]. Princeton: Princeton University Press, 2009: 542.
- [52] LI He, LIU Pan, GUO Shenglian, et al. Long-term complementary operation of a large-scale hydro-photovoltaic hybrid power plant using explicit stochastic optimization[J]. *Applied Energy*, 2019, 238: 863-875.
- [53] 董文略, 王群, 杨莉. 含风光水的虚拟电厂与配电公司协调调度模型[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(9): 75-81, 207.
- DONG Wenlue, WANG Qun, YANG Li. A coordinated dispatching model for a distribution utility and virtual power plants with wind/photovoltaic/hydro generators[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(9): 75-81, 207(in Chinese).
- [54] TEGEGNE G, KIM Y O. Representing inflow uncertainty for the development of monthly reservoir operations using genetic algorithms[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 586:

- 124876.
- [55] ZHANG Yi, CHENG Chuntian, CAO Rui, et al. Multivariate probabilistic forecasting and its performance's impacts on long-term dispatch of hydro-wind hybrid systems[J]. *Applied Energy*, 2021, 283: 116243.
- [56] LIU Weifeng, ZHU Feilin, ZHAO Tongtiegang, et al. Optimal stochastic scheduling of hydropower-based compensation for combined wind and photovoltaic power outputs[J]. *Applied Energy*, 2020, 276: 115501.
- [57] MING Bo, LIU Pan, GUO Shenglian, et al. Hydropower reservoir reoperation to adapt to large-scale photovoltaic power generation[J]. *Energy*, 2019, 179: 268-279.
- [58] MING Bo, LIU Pan, GUO Shenglian, et al. Optimizing utility-scale photovoltaic power generation for integration into a hydropower reservoir by incorporating long- and short-term operational decisions[J]. *Applied Energy*, 2017, 204: 432-445.
- [59] OLAUSON J, AYOB M N, BERGKVIST M, et al. Net load variability in Nordic countries with a highly or fully renewable power system[J]. *Nature Energy*, 2016, 1(12): 16175.
- [60] ENGLISH J, NIET T, LYSENG B, et al. Flexibility requirements and electricity system planning: assessing inter-regional coordination with large penetrations of variable renewable supplies[J]. *Renewable Energy*, 2020, 145: 2770-2782.
- [61] MORILLO J L, ZÉPHYR L, PÉREZ J F, et al. Risk-averse stochastic dual dynamic programming approach for the operation of a hydro-dominated power system in the presence of wind uncertainty[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 115: 105469.
- [62] 葛晓琳, 郝广东, 夏澍, 等. 高比例风电系统的优化调度方法[J]. *电网技术*, 2019, 43(2): 390-400.
- GE Xiaolin, HAO Guangdong, XIA Shu, et al. An optimal system scheduling method with high proportion of wind power[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(2): 390-400(in Chinese).
- [63] 徐帆, 涂孟夫, 李利利, 等. 促进清洁能源消纳的全网一体化发电计划模型及求解[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(19): 185-193.
- XU Fan, TU Mengfu, LI Lili, et al. Scheduling model and solution of integrated power generation in power grid for clean energy accommodation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(19): 185-193(in Chinese).
- [64] ZHANG Yong, GONG Dunwei, DING Zhonghai. A bare-bones multi-objective particle swarm optimization algorithm for environmental/economic dispatch[J]. *Information Sciences*, 2012, 192: 213-227.
- [65] 丁明, 方慧, 毕锐, 等. 基于集群划分的配电网分布式光伏与储能选址定容规划[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(8): 2187-2201.
- DING Ming, FANG Hui, BI Rui, et al. Optimal siting and sizing of distributed PV-storage in distribution network based on cluster partition[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(8): 2187-2201(in Chinese).
- [66] LIANG R H, CHEN Yukai, CHEN Y T. Volt/Var control in a distribution system by a fuzzy optimization approach [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2011, 33(2): 278-287.
- [67] LI Fangfang, QIU Jun. Multi-objective optimization for integrated hydro-photovoltaic power system[J]. *Applied Energy*, 2016, 167: 377-384.
- [68] FRANÇOIS B, BORGA M, CREUTIN J D, et al. Complementarity between solar and hydro power: sensitivity study to climate characteristics in Northern-Italy[J]. *Renewable Energy*, 2016, 86: 543-553.
- [69] ADEFARATI T, BANSAL R C. Reliability assessment of distribution system with the integration of renewable distributed generation[J]. *Applied Energy*, 2017, 185: 158-171.
- [70] HUANG Huazhang, CHUNG C Y, CHAN K W, et al. Quasi-Monte Carlo based probabilistic small signal stability analysis for power systems with plug-in electric vehicle and wind power integration[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(3): 3335-3343.



申建建

在线出版日期: 2021-12-27.

收稿日期: 2021-07-28.

作者简介:

申建建(1984), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为水电系统调度、多能互补、电力市场等, shenjj@dlut.edu.cn;

王月(1997), 女, 硕士研究生, 研究方向为水风光互补调度运行, 997600410@qq.com;

程春田(1965), 男, 博士生导师, 长江学者特聘教授, 研究方向为水电系统调度、清洁能源电力市场、水风光储多电源互补调度、云计算和大数据, ctcheng@dlut.edu.cn.

(责任编辑 邱丽萍)

Research Status and Prospect of Generation Scheduling for Hydropower-wind-solar Energy Complementary System

SHEN Jianjian¹, WANG Yue¹, CHENG Chuntian¹, LI Xiufeng², MIAO Shumin³, ZHANG Yi¹, ZHANG Juntao¹

(1. Dalian University of Technology; 2. Yunnan Power Dispatching Control Center; 3. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute)

KEY WORDS: energy complementary; hydropower-wind-solar system; generation uncertainty; flexibility; coordination control

In China, renewable energy dominated by hydropower, wind and solar power has achieved unprecedented development in the past two decades. The total installed capacity reached 1000 GW, which accounts for 43% of the national installed capacity. In the future, it will be the core component of China's clean and low-carbon energy system and the realistic choice to fulfill the carbon emission reduction commitment. Under the goal of carbon neutralization, clean energy especially wind and solar power generation will enter an acceleration stage. It is expected that the total installed capacity of hydropower, wind power, and solar power will exceed 4000 GW, respectively, in 2050. Correspondingly, the proportion of clean energy in China's total installed capacity will leap from 43% now to over 70% in 2050.

However, due to the intermittent and uncontrollable power generation characteristics of wind power and photovoltaic power, as well as other comprehensive factors, the problem of new energy consumption, especially with the rapid expansion of grid connection scale, the risk of power abandonment brought by huge flexibility demand, the safe and stable operation of high-proportion clean energy system and other problems have become more and more prominent.

This study analyzes the development of clean energy power generation in China and the typical practical projects of hydropower-wind-solar complementary system. Key problems facing operations of such complementary systems are summarized as follows:

- 1) Which type participating in the operation for large-scale wind and solar plants?
- 2) How the intermittent generation of wind and solar plants is described?
- 3) How the operations of wind and solar power plants as well as hydropower plants are coordinated?

In view of these problems, the coordination

methods and characteristics of hydropower-wind-solar complementary research works are systematically reviewed.

- 1) The cluster of wind and solar power plants.
- 2) The description of cluster generation.
- 3) The modeling and solution of long-term and short-term coordination of hydropower-wind-solar complementary system.

Taking the provincial power grid and basin clean energy base as the background, this study analyzes long-term and short-term coordinated operations, focuses on the cluster mode of wind and photovoltaic plants and the description of power generation law, as well as the modeling and solution of joint dispatching of hydropower-wind-solar system. Moreover, the research and development at the present stage are summarized. Fig. 1 shows the research framework. We hope that the developed methods can provide practical and available technical means for actual operations of China's multi-energy complementary projects, and help to achieve the goal of "carbon peak, carbon neutralization".

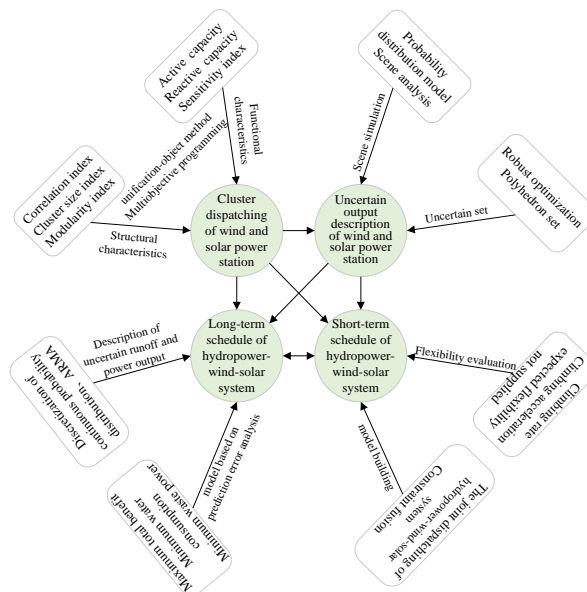


Fig. 1 General overview of research status