

大规模新能源并网系统电源规划方法

王建学, 李清涛, 王秀丽, 黄启航, 刘树桦, 钱涛, 曹晓宇

(陕西省智能电网重点实验室(西安交通大学电气工程学院), 陕西省 西安市 710049)

A Generation Expansion Planning Method for Power Systems With Large-scale New Energy

WANG Jianxue, LI Qingtao, WANG Xiuli, HUANG Qihang, LIU Shuhua, QIAN Tao, CAO Xiaoyu

(Shaanxi Key Laboratory of Smart Grid (School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University),

Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: As one of the significant measures to realize energy transition, the proportion of new energy in energy supply side becomes increasingly high. However, the fluctuation and randomness of new energy output bring great challenges to the conventional generation expansion planning (GEP). Under the framework of combining investment decision and operation analysis, a novel GEP method for integrating large-scale new energy generation was proposed, which mainly includes: adopting a monthly time resolution in investment decision-making stage to consider the seasonal fluctuation and rapid construction characteristic of new energy; adding an ultra-short-term operation model to operation analysis stage, which can be used to evaluate the system adjustment capacity during typical periods with sharp changes of net load (such as morning peak period and evening sunset period) and reflect the value of flexible resources in line with the operation of new energy; furthermore, through the coordinated iteration and rolling correction between investment decision and multi-time scale operation assessment, the optimized planning scheme with comprehensive benefits of economy, environment, reliability and flexibility was obtained. Finally, to provide a reference for future research, the key problems that can be further studied are discussed.

KEY WORDS: generation expansion planning; large-scale new energy; multi-time scale operation assessment; flexibility

摘要: 作为实现能源转型的重要举措之一, 新能源在能源供应结构中的比重愈来愈高, 其出力波动性和随机性给传统电源规划带来了巨大挑战。该文在投资决策和运行分析框架下提出了一种适应大规模新能源并网的电源规划新方法。主要包括: 考虑新能源的季节性波动特征和快速投建特性, 提出以月为投资时间单位的电源投资决策思路; 在运行分析层面

引入超短期运行模型, 针对系统净负荷急剧变化的典型时段(如早高峰时段、傍晚日落时段)的系统调节能力进行评估, 以体现配合新能源运行的灵活资源价值; 进一步通过电源投资决策和多时间尺度运行评估之间的协调迭代和滚动修正, 得到综合经济、环境、可靠和灵活多方效益的优化规划方案。最后, 对基于该文技术框架可进一步研究的关键问题进行了探讨, 以为未来研究提供参考。

关键词: 电源规划; 大规模新能源; 多时间尺度运行评估; 灵活性

0 引言

随着世界经济再电气化进程的不断推进, 全球能源消费需求越来越高。为了应对化石燃料匮乏、环境污染加剧和全球气候变化等重要问题, 大力使用和发展非化石能源, 尤其是以风能、太阳能为代表的新能源, 成为世界各国制定能源政策、推进能源清洁转型的普遍选择^[1]。根据中电联官网数据统计, 截止 2018 年底, 中国风电及光伏装机分别达到 184GW 和 174GW, 新能源装机占总装机容量的比例达到 18.9%, 风光装机规模已经超过国家十三五规划指标。

凭借清洁、低碳的优势, 新能源成为驱动能源转型的重要力量。然而新能源调节性能较差, 其出力具有波动性和随机性, 及可能的反调峰特性^[2]。大规模新能源并网使系统等效负荷峰谷差增大, 加大了电力系统的调峰调频压力, 迫使常规电源需要频繁调整出力甚至启机停机来应对系统的调峰和爬坡需求, 不仅影响灵活机组的经济寿命, 同时给电力平衡调节和电网安全运行带来了一系列新的挑战^[3]。未来我国风光等新能源仍将大规模高速发展, 新能源消纳问题在一段时间内将依然严峻。

合理的电源规划方案有助于从电源结构优化

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0902200)。

National Key R&D Program of China (2017YFB0902200)。

角度提高新能源的消纳能力,引导新能源均衡、有序、高效发展。如何从规划层面探究新能源运行特性对其并网消纳的影响,优化配置新能源电源与其他电源的装机比例,还有待于进一步研究。

本文首先总结国内外学者在含新能源电源规划方面的研究动态。在投资决策和运行分析框架下提出了适应大规模新能源消纳的电源规划新方法,该方法的创新性表现在:1)相比于常规电源规划以年为单位的投建思路,本文面向大规模新能源接入形势,提出以月为投资时间单位的电源投资决策思路,在规划设计阶段对新能源的季节性波动特性加以考量;2)在已有小时级运行模拟基础上引入超短期运行模型,针对系统净负荷剧烈变化典型时段的系统灵活性需求进行量化分析,充分评估此时系统的灵活性调节能力,同时体现配合新能源运行的灵活资源价值;3)协调电源投资决策和多时间尺度运行分析,构建综合考虑经济性、可靠性、环保性与灵活性分析的运行评估体系。然后给出了本文所提方法的框架设计,阐述了各组成部分的具体功能实现。文章最后探讨了在本文所提的规划框架下可以进一步研究的关键问题。

1 国内外研究现状

电源规划问题的主要任务是在满足一系列投资与运行约束的前提下,确定新增电源装机容量及其投产时间^[4]。传统电源规划以总成本最小为规划目标,主要考量指标是经济性和可靠性。这类规划思想在新能源占比较低时提出,以年为规划时间分辨率,主要基于电力电量平衡思想,以保证系统可靠性要求和电厂合理的利用小时数^[5-6]。

随着低碳经济战略和节能减排措施的推行,环保性逐渐成为电力系统规划者需要考虑的重要因素之一,同时新能源也迎来了稳步发展的势头。文献[7]按照分解协调的思想,建立了考虑环保性约束、以净收益最大化为目标的含风电双层电源规划模型;文献[8]基于负荷块建模思想,在多区域电源电网协调规划问题中考虑了可靠性和环保性约束;文献[9]从规划和运行角度阐述了低碳经济下的电源规划整体框架;文献[10]建立了考虑经济性和环保性的多目标规划模型,并在模型中考虑了新能源的季节特性;文献[11]在电源规划模型的目标函数中加入环境成本;文献[12]则在环境成本基础上,考虑了引入需求侧管理对电源规划结果的影响。

近年来,电力系统灵活性问题逐渐引起规划决

策者们的重视。在低比例新能源并网阶段,通常根据电源跟踪负荷的运行规则,配置充裕的备用容量来保证电力平衡^[13];在运行模拟中把新能源当作负的负荷处理或者将新能源机组等效成多状态发电机组^[14]。此时系统的灵活性需求不高,针对电源规划方案的运行模拟方法较为单一。而在含大规模新能源的电力系统中,系统净负荷曲线将在新能源出力波动时段发生急剧变化。若仍仅仅基于资源和经济环境因素,在电源规划模型中不考虑或者过于简化新能源具有的高随机性运行特性,可能会错误估计系统的灵活性调节能力。为此,文献[15]在电源投资决策模型中详细考虑机组组合模型,并指出在电源规划中灵活性约束考虑不够精细可能导致系统对新能源消纳能力的错误估计;文献[16]在电源投资决策模型的运行层面考虑全年8760h运行约束,分析了不同可再生能源配额场景下考虑灵活性约束和低碳政策的未来电力系统远景规划方案;文献[17]在电源规划模型的运行层面中采用典型周模拟方式,求得规划方案后进行运行灵活性指标概率评估;文献[18]则基于典型日运行模拟详细研究了系统短期动态特性对含新能源电源规划结果的影响。可以看出,此类研究均在电源投资决策模型中详细考虑了时序运行约束,在确定电源最优容量组合的同时考虑了新能源波动性对系统灵活性影响,但细化运行约束增加了模型求解负担。

以上研究均是在电源规划模型中尽可能详细考虑系统短期运行特性,而如何应对由于大规模新能源并网而日益凸显的系统灵活性需求仍需要进一步研究。文献[19]综述了一系列用于提升含大规模新能源电力系统灵活性的方法和技术,如需求侧响应、储能、辅助服务等。文献[20-21]则深入研究了各种灵活性措施以及各措施之间的组合对系统灵活性提升的影响。其中,文献[20]在多阶段电源规划问题中考虑了储能和快速爬坡机组的容量配置;文献[21]构建了考虑交流潮流约束的含储能和需求侧响应的源网协调规划模型,并提出系统灵活性指标用以衡量和表征采用不同灵活性措施时系统灵活性的提升效果。另一方面,在电力市场环境下,合理配置和调用灵活性资源和措施,可以充分发挥不同灵活性资源的效益,提高系统对新能源的消纳程度^[19]。文献[22]从投资风险角度,建立了市场环境含高比例新能源的电源优化规划双层模型,分析了电力市场下的新能源规划和消纳问题。文献[23]将灵活性资源的概念拓展,提出市场环境

下的灵活调节产品概念,建立相应的定价机制和出清模型,并应用于高比例可再生能源接入系统以应对净负荷波动,从而提高电力系统的运行灵活性。

综合来看,现有研究基本是在运行模拟阶段考虑新能源的运行特性,在规划设计阶段对新能源的波动特征鲜有虑及;运行模拟阶段以一小时为步长,对系统净负荷变化剧烈时段的灵活性需求刻画不足。应对未来大规模新能源接入形势,规划设计和运行模拟阶段均需要更加详细全面的时间尺度和模拟模型。针对上述问题,本文提出一种适应大规模新能源并网的电源规划方法,在投资决策和运行评估阶段考虑新能源不同时间尺度随机波动运行特征,将运行灵活性需求分析也纳入到系统规划当中,同时针对系统不同运行特性进行评估校验。

2 大规模新能源并网系统的电源规划框架

2.1 整体框架

大规模新能源并网对电力系统的规划设计和运行分析带来深刻影响。合理有效的新能源出力模拟是在规划设计阶段保证规划方案可靠性和优化配置新能源的首要环节^[24]。此外采用含新能源的随机生产模拟技术和短期(典型周/日)运行模拟技术是校验规划方案运行可行性的必要环节。相较于已有电源规划模型和框架,本文所做的改进如下文所述。

1) 采用以月为投资时间单位的电源投资决策。按年进行电源投资决策是工程建设项目和规划设计的传统习惯做法,然而对于负荷和新能源年时间尺度以内(如月度或季度)的波动特性却考虑不够精

细。大规模新能源接入场景下,电力系统对于资源季节性变化会更加敏感^[25]。为有效应对大规模新能源电源月度和季节性随机波动,本文面向含新能源的中短期电源规划问题,提出采用更精细的以月为时间尺度来进行电源投资决策的规划思路。由于细化规划时间尺度会带来问题规模的扩大,本文采用分解协调思想,将电源投资决策和运行模拟评估分开计算。

2) 提出规划方案典型时段运行灵活性评估方法。大规模新能源接入后系统规划需要考虑多个时间尺度的灵活性影响^[20],本文在小时级短期运行模拟基础上,提出要针对典型时段(如早高峰、傍晚日落)进行分钟级超短期运行模拟技术,针对系统短时爬坡能力进行校验,给出更细时间分辨率下系统运行灵活性量化评估结果,以反映配合新能源运行的灵活资源效益。

3) 协调系统多时间尺度运行分析。随机生产模拟、短期运行模拟和超短期运行模拟侧重于系统不同时间尺度的运行特性:随机生产模拟以月为时间尺度,关注系统的可靠性;小时级短期运行模拟校验系统的调峰能力;分钟级超短期运行模拟评估系统短时爬坡能力。三者构成综合考虑经济性、可靠性、环保性和灵活性分析的多层级运行评估技术体系。在一体化规划框架下,三者之间的协调串联可支撑多时间尺度、多层级运行分析的新能源电力系统规划决策。

综上所述,本文提出了一种应对大规模新能源并网的电源规划方法,整体研究框架如图1所示。

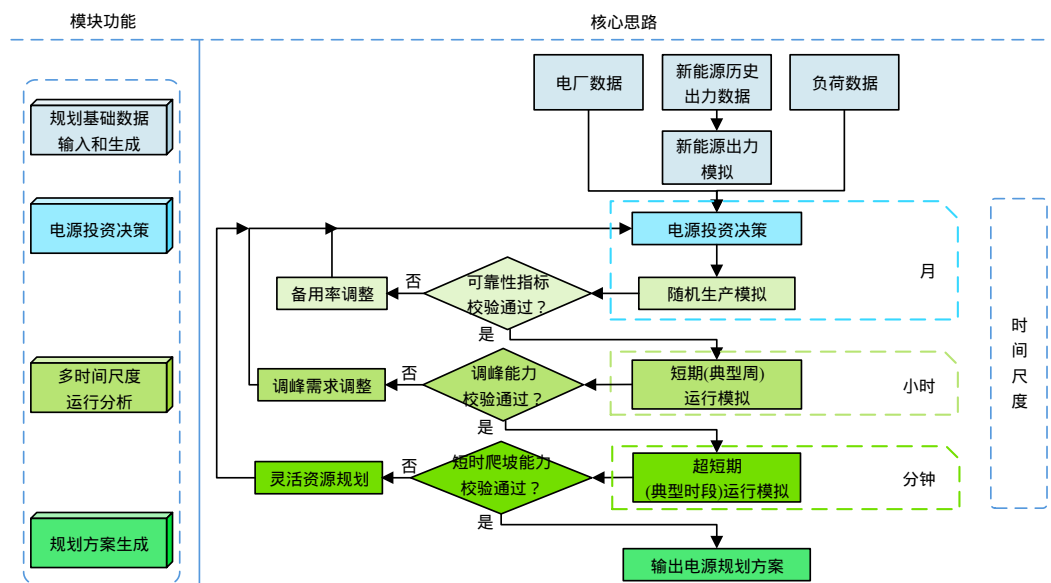


图1 大规模新能源并网系统的电源规划方法研究框架

Fig. 1 Research framework of the generation expansion planning method for power system with large-scale new energy

研究框架中的核心方法和技术包含：新能源出力模拟技术、电源投资决策、随机生产模拟、短期运行模拟和超短期运行模拟技术。该框架基于新能源出力模拟方法和电力系统运行模拟技术，将长期投资决策和短期运行分析相结合，并根据多时间尺度运行指标反馈对投资方案进行滚动修正。该框架的实现逻辑如下文所述。

- 1) 首先利用新能源出力模拟技术得到新能源“年-月-小时-分钟”多时间尺度出力曲线。
- 2) 电源投资决策模型以月为投资时间尺度，根据输入的规划基础数据，求解得到初步的月度电源投产方案。
- 3) 在安排机组检修后，利用随机生产模拟技术针对投产方案进行月度可靠性校验。
- 4) 然后采用短期运行模拟技术对满足可靠性指标的投产方案进行小时级调峰能力校验。
- 5) 进而由超短期运行模拟技术继续对投产方案进行分钟级短时爬坡能力校验。
- 6) 经过电源投资决策和多时间尺度运行评估技术之间的协调配合和循环修正，直到满足设定的规划要求。
- 7) 生成既兼顾经济和环境效益，又满足可靠性和一定灵活性要求的电源规划方案。

在本文所提框架中，新能源出力模拟与后续内容之间的联系见图 2。其中：短期运行模拟模型中的典型周/日出力片段由新能源全年出力曲线根据典型周/日选取原则截取得到；超短期运行模拟模型的典型时段分钟级出力数据由新能源逐小时出力及其趋势变化模拟生成。新能源出力模拟方法目前已有较多研究^[26-28]，本文不再赘述。下面主要针对电源投

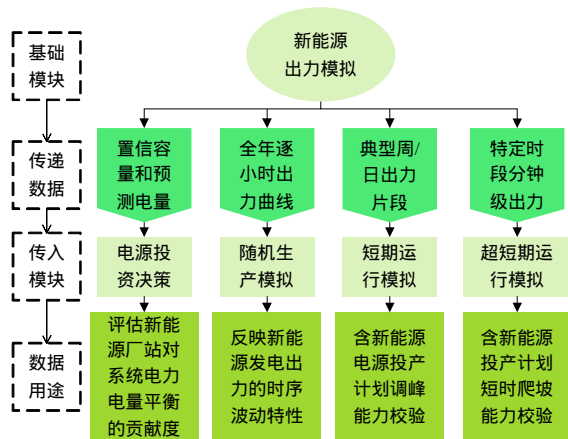


图 2 新能源出力模拟技术所得数据传递方向及用途

Fig. 2 Transfer direction and usage of data generated by new energy simulation technique

资决策和多时间尺度运行分析体系进行介绍。

2.2 电源投资决策

现有的电源投资决策过程大多数习惯于采用按年(或几年)的规划思路：电厂或机组的投运时间假设在年初或者年终；在电力电量平衡计算中考虑年最大负荷和新能源的全年资源可用性(如利用全年数据计算得到的置信容量^[29]或容量利用系数^[30])。大规模新能源并网电力系统对负荷和新能源的季节性波动将更为敏感，本文提出在电源投资决策中将投资规划时间尺度由年细化到月的研究思路，不仅可以计及新能源场站可以快速投建的特点，还能在规划设计阶段的电力电量平衡计算中考虑负荷和新能源的月度波动特性。相比于按年规划，按月规划可以确定电厂/机组实际投运时间，获得更为精细的规划成本和投资方案；在规划设计阶段保证投建资金有效配置的同时合理引导新能源投产，有助于减少大规模弃风弃光。

规划水平年投资成本通过各类待选电源厂站的投产方案与投资成本系数计算得到；运行成本包括在运厂站(包含现有厂站、已定计划投建厂站和确定投产待选厂站，除去退役厂站)的固定运维成本、燃料成本和环境成本等。该情况下构建的目标函数如下：

$$\min T_B = (C^{\text{inv}} - C^{\text{sal}}) + C^{\text{oper}} \quad (1)$$

式中： T_B 为规划方案总成本； C^{inv} 、 C^{sal} 和 C^{oper} 分别为投资成本、剩余使用价值和运行成本。

投资成本 C^{inv} 和剩余使用价值 C^{sal} 表达式如下：

$$C^{\text{inv}} - C^{\text{sal}} = \sum_{m=1}^{M_{\text{total}}} \sum_{i \in \Theta_{\text{CP}}} \pi_m C_i^{\text{unit}} P_{i,\text{max}} (X_{im} - X_{i(m-1)}) - \sum_{m=1}^{M_{\text{total}}} \sum_{i \in \Theta_{\text{CP}}} \zeta_{im} \cdot \pi_m C_i^{\text{unit}} P_{i,\text{max}} (X_{im} - X_{i(m-1)}) = \sum_{m=1}^{M_{\text{total}}} \sum_{i \in \Theta_{\text{CP}}} \pi_m C_i^{\text{unit}} P_{i,\text{max}} (X_{im} - X_{i(m-1)}) (1 - \zeta_{im}) \quad (2)$$

运行成本 C^{oper} 表达式如式(3)，等式右边第一项为固定运维成本，第二项分别计算燃料成本和环境成本：

$$C^{\text{oper}} = \sum_{m=1}^{M_{\text{total}}} \sum_{i \in \{\Theta_{\text{EP}}, \Theta_{\text{CP}}\}} \pi_m C_{im}^{\text{fix}} P_{i,\text{max}} X_{im} + \sum_{m=1}^{M_{\text{total}}} \sum_{i \in \{\Theta_{\text{T}}, \Theta_{\text{N}}, \Theta_{\text{H}}, \Theta_{\text{P}}, \Theta_{\text{W}}, \Theta_{\text{S}}\}} \pi_m F_{im} (C_{im}^{\text{fuel}} + C_{im}^{\text{pollution}}) \quad (3)$$

在式(2)和式(3)中： m 和 i 分别为月数和电厂类型； M_{total} 为规划期总月数； Θ_{CP} 、 Θ_{EP} 分别为所有待选电厂集合和所有已有电厂集合，主要类型包括 Θ_{T} 、 Θ_{N} 、 Θ_{H} 、 Θ_{P} 、 Θ_{W} 和 Θ_{S} ，分别为火电厂(含燃煤、

燃气、燃油和热电联产电厂)、核电厂、水电厂、储能电站、风电场和光伏电站集合; π_m 为月度资金折算系数,计算公式为 $\pi_m=(1+d/12)^{1-m}$,其中 d 为年贴现率; C_i^{unit} 为电厂机组单位造价; $P_{i,\max}$ 为电厂单台机组额定容量; X_{im} 表示电厂 i 在第 m 月的在运机组台数之和,对于待选电厂而言即为决策变量,对于已有电厂来说需要计及拟退役机组; ζ_{im} 为电厂剩余使用价值折算系数,与该电厂的经济寿命和投产时间有关; C_{im}^{fix} 为电厂每月固定运维成本; F_{im} 为燃料电厂(含火电厂和核电厂)每月的燃料消耗量; C_{im}^{fuel} 和 $C_{im}^{\text{pollution}}$ 分别为燃料电厂单位燃料价格和污染物排放惩罚系数,其中 $C_{im}^{\text{pollution}}$ 由单位质量或体积燃料产生污染物当量和单位质量污染物惩罚因子计算得到。

需要指出,当前电力系统向着清洁化、低碳化发展,环境因素成为电源规划问题中必须考虑的因素之一^[31-32]。一种较为方便的方法就是将燃料电厂的环境污染转化为环境成本,作为运行成本的一部分,同时设置 CO_2 、 SO_2 等污染物排放上限约束^[7]。

主要的投资约束条件有:决策变量非负整数约束,各待选电源厂站装机进度约束和装机规模约束,最早投建时间约束等,这些约束的表达形式已有大量文献介绍。这里仅给出电源投资决策过程中的几个主要运行约束。

1) 电力平衡约束:

$$\sum_{i \in \{\Theta_{EP}, \Theta_{CP}\}} X_{im} W_{im} \geq D_{m,\max} (1 + R_m^D), 1 \leq m \leq M_{\text{total}} \quad (4)$$

式中: W_{im} 表示电源厂站 i 在第 m 月的单机容量或预想出力,对于火电厂和核电厂来说,其取值为额定容量;对于水电厂而言,取其枯水年预想出力;对于新能源厂站而言,取该月的置信容量^[33];对于储能如抽水蓄能电站而言,取其额定发电功率。 $D_{m,\max}$ 为考虑联络线功率后的第 m 月最大负荷; R_m^D 表示该月的容量备用系数。

2) 电量平衡约束:

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in \Theta_T} X_{im} P_{T,im} H_m + \sum_{i \in \Theta_N} X_{im} P_{N,im} H_m + \\ & \sum_{i \in \Theta_H} X_{im} E_{H,im} + \sum_{i \in \Theta_P} X_{im} (E_{P,im}^g - E_{P,im}^p) + \\ & \sum_{i \in \Theta_W} X_{im} E_{W,im} + \sum_{i \in \Theta_S} X_{im} E_{S,im} \geq E_m (1 + R_m^E), \\ & 1 \leq m \leq M_{\text{total}} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $P_{T,im}$ 和 $P_{N,im}$ 分别为火电厂和核电厂每月平均出力; H_m 为每月小时数; $E_{H,im}$ 为水电厂每月电量,

其值不应超过水电厂枯水年预测电量; $E_{P,im}^g, E_{P,im}^p$ 分别为储能电站每月预定发电量和蓄电量,显然是存在电能损耗; $E_{W,im}, E_{S,im}$ 分别为风电场和光伏电站每月消纳电量,其值不应超过各新能源厂站每月预测发电量; E_m 为考虑与外区交换电量后的每月电量需求; R_m^E 表示该月电量备用系数。

3) 负备用约束:

$$\sum_{i \in \{\Theta_{EP}, \Theta_{CP}\}} \gamma_i^{\text{down}} X_{im} W_{im} \geq D_{m,\max} R_m^{\text{down}}, 1 \leq m \leq M_{\text{total}} \quad (6)$$

式中: γ_i^{down} 表示电厂机组提供负备用能力系数,显然,水电机组提供负备用能力比常规火电机组更好,储能电站由于具有发电和蓄电两种运行状态,因此储能电站提供负备用能力接近为2倍的额定容量; R_m^{down} 为该月负备用需求系数。

4) 爬坡能力约束:

向上爬坡能力的整体约束:

$$\begin{aligned} & (\sum_{i \in \Theta_T} r_{T,im}^u + \sum_{i \in \Theta_H} r_{H,im}^u + \sum_{i \in \Theta_P} r_{P,im}^u) \Delta M \geq \varepsilon_D^u \Delta D_m + \\ & \varepsilon_W^u \sum_{i \in \Theta_W} \Delta P_{W,im} + \varepsilon_S^u \sum_{i \in \Theta_S} \Delta P_{S,im}, 1 \leq m \leq M_{\text{total}} \end{aligned} \quad (7)$$

向下爬坡能力的整体约束:

$$\begin{aligned} & (\sum_{i \in \Theta_T} r_{T,im}^d + \sum_{i \in \Theta_H} r_{H,im}^d + \sum_{i \in \Theta_P} r_{P,im}^d) \Delta M \geq \varepsilon_D^d \Delta D_m + \\ & \varepsilon_W^d \sum_{i \in \Theta_W} \Delta P_{W,im} + \varepsilon_S^d \sum_{i \in \Theta_S} \Delta P_{S,im}, 1 \leq m \leq M_{\text{total}} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $r_{T,im}^u, r_{H,im}^u, r_{P,im}^u$ 和 $r_{T,im}^d, r_{H,im}^d, r_{P,im}^d$ 分别为火电厂、水电厂和储能类机组向上/下爬坡速率; ΔM 为间隔时间,一般取为5~15min; $\varepsilon_D^u, \varepsilon_W^u, \varepsilon_S^u$ 和 $\varepsilon_D^d, \varepsilon_W^d, \varepsilon_S^d$ 分别为对应向上/下爬坡能力约束的负荷、风电场和光伏电站出力预测误差系数; ΔD_m 为该月负荷最大峰谷差; $\Delta P_{W,im}, \Delta P_{S,im}$ 为该月风电场和光伏电站最大出力变化差值。需要指出:1)该约束是对系统整体爬坡能力做出初步要求,规划方案是否可行需要通过后续的运行模拟校验;2)各个系数取值比较困难,应该基于详细的理论和数据分析,实践中可以按照经验来取值。

5) 新能源消纳电量占比约束:

$$\sum_{i \in \Theta_W} X_{im} E_{W,im} + \sum_{i \in \Theta_S} X_{im} E_{S,im} \geq \rho_m E_m, 1 \leq m \leq M_{\text{total}} \quad (9)$$

式中: ρ_m 为设定的每月新能源消纳电量占每月用电量的最低比例,该系数可以依据本区域新能源配额等要求来设定。

6) 污染物排放量约束:

$$Q_{mq} \leq Q_{mq,\max}, 1 \leq m \leq M_{\text{total}} \quad (10)$$

式中： Q_{mq} 为第 m 月第 q 种污染物的排放量； $Q_{mq,\max}$ 为其上限，可根据不同季节环保要求将年排放限额分配到月^[12]。

2.3 多时间尺度运行分析

基于以上电源投资决策模型求得初步的电源规划方案后，按照图 1 所展示的本文框架实现逻辑，将采用本文提出的多时间尺度运行评估体系针对所得方案进行多角度校验和评估。

首先利用随机生产模拟方法针对该方案进行可靠性评估，若可靠性指标超出设定阈值，则将不满足信息反馈给电源投资决策，按照逐步长调整方式提高电力平衡约束中的容量备用系数，重新确定电源投产进度。关于随机生产模拟方法的研究较为成熟，具体可见文献[34-35]。下面主要阐释基于典型周的短期运行模拟和针对典型时段校验的超短期运行模拟思路。

2.3.1 基于典型周的短期运行模拟技术

在对电源投产方案进行可靠性评估后，本文框架还需要采用短期运行模拟技术校验电源投产方案的运行经济性和调峰能力等综合性能。与随机生产模拟一样，短期时序运行模拟也是生产优化模型的必要环节，其主要考虑机组组合和优化运行的问题，可以更为细致地刻画电力系统运行状况，便于规划设计人员直观判断电源结构的合理性，协助分析高渗透率新能源的加入所带来的系统调峰困难问题。

在本文提出的电源规划研究框架中，在获得各电源投产状态、运行参数和新能源出力预测数据后，短期运行模拟技术针对电源投资决策、检修计划和随机生产模拟技术三者迭代得到的满足可靠性要求并考虑检修安排后的电源投产方案进行周时间尺度逐小时电力电量平衡和调峰校验。

这里一个很重要的问题是典型周如何选取，既要考虑日常运行特点也要考虑规划方案应对极端情况的能力，因此本文采用“代表周+极端周”的思路，即选取表征四季正常变化的四季代表周和体现系统极端运行条件的多个极端周。极端周可选取为系统最大负荷所在周、新能源小时穿透率最大所在周和小时穿透率最小所在周、一些重大节假日如春节、国庆所在周等。相比于典型日运行模拟，采用典型周运行模拟既保留了电源日运行特征，又能反映周末与工作日之间负荷过渡时各电源运行方式变化和调峰问题。

典型周运行方式的安排原则是以机组运行费

用与弃风弃光等惩罚项之和最小为目标，考虑电力电量平衡约束、各机组运行约束、备用约束和水电厂周电量约束等条件^[36]。在求得各机组典型周逐小时机组开机方式后，同时统计运行经济性指标。如果某典型周存在调峰问题，则将此周最大调峰缺额反馈给电源投资决策模块，逐渐提高负备用需求系数，增加可调度机组的投产容量，重新修改电源投产方案。若均不存在调峰问题，则短期运行模拟校验通过。

显然，相比于典型日而采用典型周增加了运行模拟问题的校验时段数，扩大了问题求解规模。为减少求解时间，在具体实现中建议采用预求解^[37]和设置相邻时段机组状态一致^[38]等加速求解技术。

2.3.2 基于典型时段校验的超短期运行模拟技术

采用以小时为模拟时间步长的短期运行模拟来校验规划方案的运行可行性，这在常规电源规划中已然足够。然而随着接入电力系统的风电、光伏装机比例逐渐增加，灵活性问题成为系统面临的主要矛盾之一。灵活性的一般表述为：在一定时间尺度和经济成本条件下，电力系统优化调配可用资源应对源网荷随机变化和保证系统供电可靠性的能力^[39]。研究系统灵活资源和灵活需求之间的平衡与匹配，采用合理规划和运行措施来提升系统的灵活性，有助于系统适应大规模新能源的运行。因此，在规划决策和运行分析过程中，不仅需要校验规划方案的发电容量充裕度和调峰能力，还需要对系统的短时爬坡能力进行量化评估。

在一些典型特征的供电时段(如早高峰和晚高峰)，净负荷曲线常常会发生超短期时间的剧烈波动，系统功率爬坡速率增大，这对电力系统提出了更高的运行灵活性要求。与发电容量充裕度评估过程相比，灵活性评估需要更加详细的时间尺度和模拟模型^[40]。

本文所提电源规划研究框架考虑在随机生产模拟和短期运行模拟基础上引入超短期运行模拟技术。该技术在获取电源投产方案和典型周开机方式后，针对部分典型时段(如早高峰和晚高峰爬坡时段，一般为 2~4h)或者短期运行模拟中调节资源短缺时段，以分钟为时间步长进行超短期运行模拟，充分利用燃气机组、抽蓄机组、电池储能与负荷侧响应等灵活资源爬坡迅速和启停方便的特点，引入灵活机组爬坡约束、储能充放电速率约束和分钟级备用容量约束等，在保持经济性最优的基础上，增开短期运行模拟中因经济性而未能开机的灵活机

组或者调用灵活资源以充分挖掘系统灵活性调节能力,优化效果整体表现为用更灵活的资源去替代常规机组。

该技术的核心模型为超短期优化调度和灵活资源增调模型,由于篇幅有限将另文详细讨论,这里仅介绍主要思想。在超短期运行模拟计算中,首先进行一次超短期调度,计算系统在典型时段的上/下爬坡可用容量和上/下爬坡能力缺额等运行灵活性指标^[41]。若没有爬坡问题或者爬坡功率缺额小于设定阈值,则停止计算,该典型时段校验通过;若爬坡功率缺额大于设定阈值,需要进一步调用闲置的灵活调节资源,再做一次超短期经济调度,重复以上步骤继续判断;若爬坡功率缺额较大且没有可用的灵活资源参与调节,说明在该典型时段系统无法应对超短期功率爬坡需求,将此缺额反馈给电源投资决策模块,由其根据一定规则调整电源结构或提示规划设计人员增加合适的待选灵活资源。

2.4 规划方案主要结果

通过电源投资决策和随机生产模拟、短期运行模拟与超短期运行模拟等3个运行校验模块之间的协调迭代,最终可以得到兼顾经济性、环保性、可靠性和灵活性等综合效益的电源投产计划。所得规划方案能提供的主要计算结果可见表1。

表1 规划方案主要结果

Tab. 1 Main results of planning schemes

技术点名称	主要输出
新能源 出力模拟	新能源场站全年8760h出力曲线;月度置信容量和预测电量;典型时段新能源分钟级出力曲线
电源 投资决策	规划期电源优化投产方案,如新增电源尤其是新能源装机进度、新建电源容量,系统电源结构变化趋势;规划期总成本及构成(包含投资成本、运行成本和环保成本);环境污染物排放规模
随机 生产模拟	月度系统可靠性指标如电力不足概率和电量不足期望值等;内嵌机组检修模块输出各厂站机组月度检修计划
短期 运行模拟	系统典型周运行费用;各电厂机组出力情况;弃水、弃风、弃光规模;调峰能力缺额
超短期 运行模拟	典型时段系统短时爬坡能力指标如上/下爬坡可用容量和上/下爬坡能力缺额;新能源短时消纳情况;灵活机组增开和灵活资源调用情况

3 进一步可以研究的关键问题

在新能源大规模接入形势下,含新能源的电源规划问题一直是本领域的研究重点。面向新能源大规模并网的电源规划问题还需注意以下关键问题。

1) 多时间尺度不确定性因素的精细化考虑。

电力系统的规划与运行伴随着诸多不确定性因素,按时间尺度可分为长期和短期的不确定性,比如负荷增长的长期不确定性;元件性能/价格变化的不确定性;新能源政策变化的不确定性;电价改革推进对投资收益的不确定性;电动汽车和灵活负荷接入带来的不确定性等等。如何对上述多时间尺度和性质各异的不确定性恰当建模并采用有效方法处理,是电源规划进一步研究的关键问题之一。

2) 多能源系统协调规划。电-热、电-气等多能源之间的转化与存储,在很大程度上可以改善弃风弃光问题。多能源系统协调规划相比于单一的电力系统规划,可为新能源消纳提供更多空间和可能性。然而热力、燃气系统拥有异于电力系统的运行特性,而且各能源系统之间存在能量网络耦合。如何面向新能源消纳,建立合适的研究模型,从多时空协调优化角度合理规划多能源系统是进一步的研究方向。

3) 数学求解算法的定制开发。考虑不确定性因素、投资决策和运行模拟协同优化不可避免地会增加电源规划问题的求解负担,多能互补、区域互联、储能和需求侧管理(demand side management, DSM)技术等促进新能源消纳的方法在电力系统中的广泛应用,同样会增大电源规划问题的计算规模。如何结合模型自身特性,发展或开发适应于模型架构的定制型求解算法,还有待深入研究。

4) 考虑网架电力流约束的网源协调规划。本文所提研究框架聚焦于新能源和其他电源的容量配置,然而随着新能源大规模发展,在更大区域范围优化配置能源资源日显重要,但可能会发生发电功率倒送而导致输电通道阻塞的情况。未来可考虑在本文研究基础上,建立计及网架电力流约束的电网和电源协调规划模型,将容量配置和布局优化相结合,促进新能源的规模化开发和消纳能力提升。

4 结论

新能源并网与消纳问题一直是存在于我国新能源规划和发展过程中的显著问题。合理有效的电源规划可以引导新能源协调有序发展。本文面向新能源大规模并网趋势,提出了一种大规模新能源并网系统的电源规划框架。为应对新能源不同时间尺度的波动性和建设周期短的特点,该方法以月为时间尺度进行电源投资决策;在传统随机生产模拟和短期运行校核基础上,引入针对典型时段系统灵活性量化评估的超短期运行模拟进行校核,并构建电

源投资决策和多时间尺度运行模拟校验协调配合的整体框架；最终获得兼顾经济性、环保性、可靠性和灵活性等综合效益最优的电源投产方案。进一步工作中，可以考虑从多类型不确定性、协调多能源规划、网源协调规划等角度入手，并定制高效求解算法，从而对本文框架进行拓展研究。

参考文献

- [1] Abdmouleh Z, Alammari R A M, Gastli A. Review of policies encouraging renewable energy integration & best practices[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 45: 249-262.
- [2] 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).
- [3] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1905.
Zhou Xiaoxin, Chen Shuyong, Lu Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1905(in Chinese).
- [4] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
Wang Xifan. Power system optimization planning[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1990(in Chinese).
- [5] 吴耀武, 侯云鹤, 熊信良, 等. 基于遗传算法的电力系统电源规划模型[J]. 电网技术, 1999, 23(3): 10-14.
Wu Yaowu, Hou Yunhe, Xiong Xinyin, et al. A model for generation expansion planning of power system based on genetic algorithm[J]. Power System Technology, 1999, 23(3): 10-14(in Chinese).
- [6] Park J B, Park Y M, Won J R, et al. An improved genetic algorithm for generation expansion planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(3): 916-922.
- [7] 张节潭, 苗淼, 范宏, 等. 含风电场的双层电源规划[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 43-49.
Zhang Jietan, Miao Miao, Fan Hong, et al. Bi-level generation expansion planning with large-scale wind farms[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 43-49(in Chinese).
- [8] Khodaei A, Shahidehpour M, Wu Lei, et al. Coordination of short-term operation constraints in multi-area expansion planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2242-2250.
- [9] 姜素华, 卢斯煜, 吴耀武, 等. 低碳电力系统规划与运行优化研究综述[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1483-1490.
Lou Suhua, Lu Siyu, Wu Yaowu, et al. An overview on low-carbon power system planning and operation optimization[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1483-1490(in Chinese).
- [10] Pereira S, Ferreira P, Vaz A I F. Optimization modeling to support renewables integration in power systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 55: 316-325.
- [11] 王建学, 高卫恒, 王锡凡, 等. 考虑环境成本的电源规划 JASP 模型[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(8): 1015-1020.
Wang Jianxue, Gao Weiheng, Wang Xifan, et al. Improved JASP model of generation planning with environment cost[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(8): 1015-1020(in Chinese).
- [12] 张晓辉, 闫鹏达, 钟嘉庆, 等. 考虑环境成本和需求侧管理项目的电源规划模型[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2809-2814.
Zhang Xiaohui, Yan Pengda, Zhong Jiaqing, et al. Generation expansion planning model incorporating environment cost and demand side management programs [J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2809-2814(in Chinese).
- [13] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 9-19.
Lu Zongxiang, Li Haibo, Qiao Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 9-19(in Chinese).
- [14] 张节潭, 程浩忠, 黄微, 等. 含风电场的电源规划综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(2): 35-41.
Zhang Jietan, Cheng Haozhong, Huang Wei, et al. Review of generation expansion planning for power system with wind farms[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2009, 21(2): 35-41(in Chinese).
- [15] Palmintier B S, Webster M D. Impact of operational flexibility on electricity generation planning with renewable and carbon targets[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(2): 672-684.
- [16] Chen Xinyu, Lv Jiajun, McElroy M B, et al. Power system capacity expansion under higher penetration of renewables considering flexibility constraints and low carbon policies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6240-6253.
- [17] Abidin I S, Zio E. An integrated framework for operational flexibility assessment in multi-period power system

- planning with renewable energy production[J]. Applied Energy, 2018, 222: 898-914.
- [18] Koltsaklis N E, Georgiadis M C. A multi-period, multi-regional generation expansion planning model incorporating unit commitment constraints[J]. Applied Energy, 2015, 158: 310-331.
- [19] Lund P D, Lindgren J, Mikkola J, et al. Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 45: 785-807.
- [20] Kargarian A, Hug G, Mohammadi J. A multi-time scale co-optimization method for sizing of energy storage and fast-ramping generation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4): 1351-1361.
- [21] Hamidpour H, Aghaei J, Pirouzi S, et al. Flexible, reliable, and renewable power system resource expansion planning considering energy storage systems and demand response programs[J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(11): 1862-1872.
- [22] 姜素华, 吕梦璇, 王永灿, 等. 考虑投资风险的含风电系统电源投资扩展规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(7): 1944-1955.
- Lou Suhua, Lü Mengxuan, Wang Yongcan, et al. Generation investment expansion planning for wind power accommodation considering investment risk[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(7): 1944-1955(in Chinese).
- [23] 胡嘉骅. 电力系统灵活性提升方法及灵活调节产品获取机制[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- Hu Jiahua. Methods to enhance power system flexibility and acquisition mechanism for flexible ramping products[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018(in Chinese).
- [24] Oree V, Hassen S Z S, Fleming P J. Generation expansion planning optimisation with renewable energy integration: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 69: 790-803.
- [25] Pereira S, Ferreira P, Vaz A I F. Generation expansion planning with high share of renewables of variable output[J]. Applied Energy, 2017, 190: 1275-1288.
- [26] Zhang Ning, Kang Chongqing, Duan Changgang, et al. Simulation methodology of multiple wind farms operation considering wind speed correlation[J]. International Journal of Power and Energy Systems, 2010, 30(4): 264-273.
- [27] Graham V A, Hollands K G T. A method to generate synthetic hourly solar radiation globally[J]. Solar Energy, 1990, 44(6): 333-341.
- [28] Santos J M, Pinazo J M, Cañada J. Methodology for generating daily clearness index values K_t starting from the monthly average daily value \bar{K}_t . Determining the daily sequence using stochastic models[J]. Renewable Energy, 2003, 28(10): 1523-1544.
- [29] 季震, 陈启鑫, 张宁, 等. 含碳捕集电厂的低碳电源规划模型[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2689-2696.
- Ji Zhen, Chen Qixin, Zhang Ning, et al. Low-carbon generation expansion planning model incorporating carbon capture power plant[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2689-2696(in Chinese).
- [30] Mejía-Giraldo D, McCalley J D. Maximizing future flexibility in electric generation portfolios[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 279-288.
- [31] 段建民, 王志新, 王承民, 等. 考虑碳减排效益的可再生能源规划[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 11-15.
- Duan Jianmin, Wang Zhixin, Wang Chengmin, et al. Renewable power planning considering carbon emission reduction benefits[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 11-15(in Chinese).
- [32] 罗金山, 路畅, 孟繁骏. 碳排放及燃煤约束下的电源规划及其效益评价[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 47-52.
- Luo Jinshan, Lu Chang, Meng Fanjun. Generation expansion planning and its benefit evaluation considering carbon emission and coal supply constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 47-52(in Chinese).
- [33] 张宁, 康重庆, 肖晋宇, 等. 风电容量可信度研究综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 82-94.
- Zhang Ning, Kang Chongqing, Xiao Jinyu, et al. Review and prospect of wind power capacity credit[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 82-94(in Chinese).
- [34] 丁明, 林玉娟, 潘浩. 考虑负荷与新能源时序特性的随机生产模拟[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(23): 6305-6314.
- Ding Ming, Lin Yujuan, Pan Hao. Probabilistic production simulation considering time sequence characteristics of load and new energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(23): 6305-6314(in Chinese).
- [35] 王锡凡, 王秀丽. 随机生产模拟及其应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 10-15, 31.
- Wang Xifan, Wang Xiuli. Probabilistic production simulation method and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 10-15, 31(in Chinese).
- [36] Liu Guodong, Tomsovic K. Quantifying spinning reserve in systems with significant wind power penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2385-2393.
- [37] 汪洋, 夏清, 康重庆. 机组组合算法中起作用整数变量的辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 46-52.

Wang Yang ,Xia Qing ,Kang Chongqing .Identification of the active integer variables in security constrained unit commitment[J] .Proceedings of the CSEE ,2010 ,30(13) : 46-52(in Chinese) .

- [38] 张谦,黄俊辉.“十二五”期间江苏电源规划与优化[J].江苏电机工程,2007,26(6):3-7.

Zhang Qian , Huang Junhui . Programming and optimization of Jiangsu power supply in the period of “the Twelfth Five”[J] . Jiangsu Electrical Engineering , 2007 , 26(6) : 3-7(in Chinese) .

- [39] 鲁宗相,李海波,乔颖.含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J].电力系统自动化,2016,40(13):147-158.

Lu Zongxiang , Li Haibo , Qiao Ying . Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy[J] .Automation of Electric Power Systems , 2016 , 40(13) : 147-158(in Chinese) .

- [40] Lannoye E , Flynn D , O'Malley M . Evaluation of power system flexibility[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 2012 , 27(2) : 922-931 .

- [41] 李海波,鲁宗相,乔颖,等.大规模风电并网的电力系统运行灵活性评估[J].电网技术,2015,39(6):1672-1678.

Li Haibo , Lu Zongxiang , Qiao Ying , et al . Assessment on operational flexibility of power grid with grid-connected large-scale wind farms[J] . Power System Technology , 2015 , 39(6) : 1672-1678(in Chinese) .



王建学

在线出版日期:2020-03-27。

收稿日期:2019-01-07。

作者简介:

王建学(1976),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统规划、电力市场, jxwang@mail.xjtu.edu.cn;

李清涛(1994),男,博士研究生,研究方向为电力系统运行、规划与评估, liqingtao0228@stu.xjtu.edu.cn;

王秀丽(1961),女,教授,博士生导师,研究方向为电力系统规划、电力市场, xiuliw@mail.xjtu.edu.cn;

黄启航(1993),男,硕士,助理工程师,研究方向为电力系统优化规划与调度, qihang_huang@163.com;

刘树桦(1995),男,硕士研究生,研究方向为电力系统规划与运行、新能源出力模拟技术, lsh1091953558@stu.xjtu.edu.cn;

钱涛(1995),男,博士研究生,研究方向为电力系统优化运行, taylorqian@stu.xjtu.edu.cn;

曹晓宇(1990),男,博士,讲师,研究方向为新能源电力系统规划与调度、信息物理融合能源系统, cxykeven2019@xjtu.edu.cn。

(责任编辑 乔宝榆)

A Generation Expansion Planning Method for Power Systems With Large-Scale New Energy

WANG Jianxue, LI Qingtao, WANG Xiuli, HUANG Qihang, LIU Shuhua, QIAN Tao, CAO Xiaoyu
(Xi'an Jiaotong University)

KEY WORDS: generation expansion planning; large-scale new energy; multi-time scale operation assessment; flexibility

As one of the significant measures to realize energy transition, the deployment of new energy increased significantly in the past decade. Considering the great challenges stemming from the fluctuation and randomness of new energy output, it is of practical significance to propose a comprehensive generation expansion planning (GEP) method, aiming at integrating large-scale new energy generation.

After analyzing recent studies on GEP models, this paper proposes a novel GEP method combining the investment decision-making and multi-time scale operation analysis together. Firstly, this method adopts a monthly time resolution instead of a yearly time resolution in investment decision-making stage to consider the seasonal fluctuation and rapid construction characteristic of new energy. Secondly, an ultra-short-term operation model with a higher time resolution (e.g., 5 minutes time step) is introduced to evaluate the real time flexibility requirements during typical periods with sharp changes of net load (such as morning peak period and evening peak period). Thirdly, a coordinated iteration mechanism integrating the investment decision-making with multi-time scale operation assessment is presented to obtain the optimized planning scheme.

The paper then introduces the core research framework of the proposed method, the function of each module as well as

their relationships in detail, as depicted in Fig. 1. The framework mainly includes new energy output simulation, generation investment decision, probabilistic production simulation, short-term operational simulation and ultra-short-term operational simulation. Specifically, new energy output with different time scales (i.e., yearly, monthly, hourly, minutely scales) is firstly simulated based on historical data. After that, the initial monthly planning scheme is obtained by solving the generation investment decision model with a monthly time resolution. Then reliability indexes, down-regulation capability and real-time ramping capability of the planning scheme are evaluated by using the probability production simulation, the short-term operational simulation with typical weeks and the ultra-short-term operational simulation with typical periods, respectively. When these operation assessments are done successfully, the optimized planning scheme is obtained.

Finally, the key problems that can be further studied are discussed, including effective representation of long- and short-term uncertainties in GEP models, co-planning of multi-energy systems for accommodating renewable energy, customized optimization algorithm for solving models efficiently, as well as interconnected electric system planning considering network power flow.

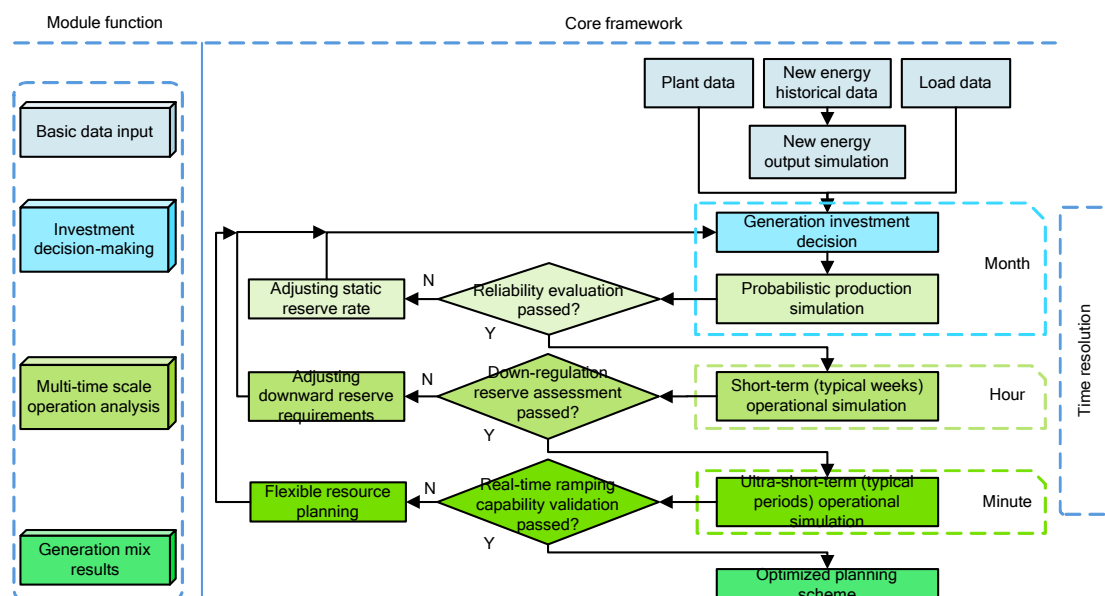


Fig. 1 Research framework of the generation expansion planning method for power system with large-scale new energy