

文章编号:1672-3961(2024)06-0156-11

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2023.259

基于精细化运行模拟的源-网-储协同短期扩展规划

陈吟枫¹, 肖晋宇², 侯金鸣², 江涵², 赵小令², 施啸寒^{1*}

(1.山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2.全球能源互联网集团有限公司, 北京 100031)

摘要:针对高比例新能源电力系统运行方式复杂多变特征,提出一种基于精细化运行模拟的短期扩展规划方法,实现源-网-储协同优化配置,通过运行过程精细化模拟支撑运行关联指标准确计算,保证规划方案性能指标与规划目标的一致性。构建综合初始投资与运行性能的电力系统源-网-储协同扩展模型;基于模型特征分析将扩展规划问题分解为规划-运行双层优化问题,在运行层面嵌入精细化运行模拟,保证运行指标准确计算;结合双层规划问题特征,融合第二代非支配排序遗传算法(nondominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)架构设计求解算法,实现兼顾初始投资与运行性能的方案优选。基于IEEE-30节点系统的算例分析表明,所提扩展规划方法可避免基于典型场景规划方法偏离规划目标的问题,将系统投资与运行总费用降低约2%。

关键词:精细化运行模拟;源-网-储协同扩展规划;高比例新能源;遗传算法;双层规划模型

中图分类号:TM715

文献标志码:A

引用格式:陈吟枫,肖晋宇,侯金鸣,等.基于精细化运行模拟的源-网-储协同短期扩展规划[J].山东大学学报(工学版),2024,54(6):156-166.

CHEN Yinfeng, XIAO Jinyu, HOU Jinming, et al. Coordinated short-term source-grid-storage expansion planning based on refined operation simulation[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(6):156-166.

Coordinated short-term source-grid-storage expansion planning based on refined operation simulation

CHEN Yinfeng¹, XIAO Jinyu², HOU Jinming², JIANG Han², ZHAO Xiaoling², SHI Xiaohan^{1*}

(1.School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 2. Global Energy Interconnection Group Co., Ltd., Beijing 100031, China)

Abstract: Aiming at the complication and variability of the operation mode in power systems with high proportion of renewable energy, a short-term expansion planning method based on refined operation simulation was proposed to realize the synergistic optimal configuration of source-grid-storage. The method supported the accurate calculation of operation indexes through the refined simulation of operation process, so as to ensure the consistency of the operation indexes of planning solutions with objective functions. A synergistic source-grid-storage expansion model of power system that integrated initial investment and operational performance was constructed. The expansion planning problem was decomposed into a two-layer planning-operation optimization problem depending on model characterization, and refined operation simulation was embedded at the operation layer to ensure accurate calculation of operation indexes. The solution algorithm was designed by integrating the nondominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) considering the characteristics of the two-layer planning model to realize optimal selection of solutions that considered both the initial investment and the operational performance. Case study based on the IEEE-30 system showed that the proposed expansion planning method could avoid the deviation problem of planning method based on typical scenarios from the planning objectives and reduce the total cost of investment and operation by about 2%.

Keywords: refined operation simulation; coordinated source-grid-storage expansion planning; high proportion of renewable energy; genetic algorithm; two-layer planning model

收稿日期:2023-10-30

基金项目:全球能源互联网集团有限公司科技资助项目(SGGEG00JYS2200050)

第一作者简介:陈吟枫(1998—),男,江苏常熟人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统规划。E-mail:202114541@mail.sdu.edu.cn

*通信作者简介:施啸寒(1986—),男,山东滕州人,副教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为基于新型灵活资源的电力系统稳定控制。

E-mail:shixh@sdu.edu.cn

0 引言

“双碳”战略目标提出以来,以风电、光伏为代表的新能源迅速发展,新能源替代传统化石能源电源作为电能供应的主体是未来发展趋势^[1]。然而,风光电源出力与气候环境深度耦合,表现出显著的随机性、波动性与间歇性,这一特性给高比例新能源电力系统规划设计、运行调度和稳定控制等多个方面带来严峻挑战^[2]。

合理的系统规划是保证高比例新能源电力系统安全、可靠、经济、高效运行的基础^[3]。电力系统规划是根据一定的目标和约束,通过全面分析电力系统性能指标,确定未来一定时间的电力供给布局、发电及储能设备容量和网络结构等内容的统筹设计。电力系统规划主要包括电源规划、电网规划及协同规划等。文献[4]提出基于学习理论的输电网双层规划模型,可处理考虑光伏出力不确定性的光-储联合系统的线路规划问题。文献[5]提出考虑月投资单位时间和典型时段超短期运行的电源规划模型,实现电源优化布局。文献[6]将输电线路负载率标准差作为均匀性指标嵌入目标函数,建立网-源扩展规划模型。风光电源出力的波动性和随机性给电力系统源侧引入不确定性,高比例新能源环境下的电力系统规划一方面需考虑大规模风光电源及储能等支撑设备特性,另一方面需考虑电源强随机性场景下电网侧的平衡约束。如何充分考虑风光电源出力波动性与随机性特征,进行源-网-荷-储多环节协同规划,特别是如何基于已有系统结构基础上的协同扩展规划逐步成为研究热点。

在传统规划模型基础上引入源、储新元件,实现风电、光伏、储能、电网协同规划是重要的规划研究思路,适应于未来电力系统的发展形态。文献[7]构建一种考虑灵活性与低碳政策约束的高比例新能源系统源-储容量规划模型,以适应储能配置需求;文献[8]提出一种考虑市场交易的电网侧储能优化配置模型;文献[9]基于新能源消纳系数与新能源承载系数提出地区新能源装机容量规划方法。同时,部分学者采用不确定性建模思想,将随机优化引入高比例新能源电力系统规划,提升对风光特性的适应性。文献[10]建立风储容量与电价耦合模型,提出一种考虑电价分布不确定性的海上风电及储能规划多目标优化模型;文献[11]基于集群划分方法建立可再生能源规划模型;在协同规划方面,文献[12]对风电和负荷不确定性采用区

间建模,基于鲁棒优化原理提出电力系统传统机组、风电和线路3层鲁棒协同扩展规划模型;文献[13]考虑目标年的最大负荷时刻最优潮流求解源-网协同规划模型,将风电的不确定性建模和能效电厂的建模纳入模型;文献[14]基于传统主动配电网规划,将分布式电源及需求侧响应纳入模型,建立源-网-荷3层协调规划模型,通过并行遗传算法提高求解效率;文献[15]在源-储协同规划基础上,增加对火电机组退役的建模,通过多阶段模型描述火电退役对新能源和储能规划的影响。

基于生成场景评价系统运行性能是将随机规划问题转化为确定性问题的关键:文献[16]基于典型场景时序模拟构建考虑灵活性供需平衡关系的源-网一体化规划模型;文献[17]利用基于模糊聚类的多场景方法建模风电及负荷不确定性,提出源-网双层随机规划模型;文献[18]针对新能源随机抽样场景生成难以准确反映波动性的缺陷,基于深度信念网络方法生成新能源时序出力场景,并基于生成场景建立风-光-储协同规划模型;文献[19]采用S_Dbw方法确定典型日数量,基于WGAN-GP方法生成风电出力典型日场景规划储能最优容量。基于场景的电力系统扩展规划通过减少性能评价计算量而减小求解时间,但可能影响运行指标计算准确性,导致规划方案性能指标偏离规划目标。特别是随着新能源占比提高,系统运行方式更加多样化^[20],极端场景出现更为频繁且运行状态更加恶劣,场景生成方法典型性降低,导致基于运行场景的规划方案合理性降低。

针对高比例新能源电力系统运行方式复杂多变特征,提出一种基于精细化运行模拟的短期扩展规划方法,实现源-网-储协同优化配置,通过运行过程精细化模拟支撑运行关联指标准确计算,可保证规划方案性能指标与规划目标的一致性。构建综合初始投资与运行性能的电力系统源-网-储协同扩展模型;分析扩展规划模型含义及特征,将规划模型分解为规划-运行双层优化模型,并将精细化运行模拟嵌入运行层,实现运行指标准确评估;结合规划问题分层优化特征,设计基于第二代非支配排序遗传算法(nondominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)的双层规划模型步骤,在IEEE-30节点系统中验证所构建模型及求解方法的有效性。

1 高比例新能源电网源-网-储协同扩展规划模型

电力系统规划根据预测的电力需求,以保障

电力安全可靠供需为总目标,合理配置系统中发电、输电、用电及调控各环节设备,同时应满足国家发展战略的环境约束、各类设备经济技术约束,尽量降低系统总成本。高比例新能源场景下的规划应满足国家“双碳”战略目标与电力可靠供给需求,尽量降低设备投资与运行费用构成的总成本,因此采用源-网-储协同规划思路,综合考虑投资类指标和运行类指标建模总成本,将“双碳”战略要求的环境约束转化为新能源电源装机规模及渗透率要求,将设备经济技术特性建模为等式及不等式约束,形成源-网-储协同扩展规划模型。

1.1 规划模型目标函数

1.1.1 投资类指标

降低投资成本通常是规划需考虑的重要因素,主要考虑火电机组、风电、光伏、储能及输电线路的建设成本,规划投资总成本目标函数

$$\min F_1 = I_{\text{source}} + I_{\text{ESS}} + I_{\text{line}}, \quad (1)$$

式中, I_{source} 、 I_{ESS} 、 I_{line} 分别为规划周期内电源机组、储能、线路的投资成本年化现值。不同类型投资对象的投资成本

$$I_k = \frac{r_0(1+r_0)^{N_k}}{(1+r_0)^{N_k}-1} \times \sum_{i \in \Omega_k} S_{k,i} C_k, \quad (2)$$

式中: k 为需要投资的对象类型, $k \in \{\text{cg}, \text{wg}, \text{sg}, \text{line}\}$,其中cg表示火电机组,wg表示风电机组,sg表示光伏电站,line表示输电线路; Ω_k 为投资对象的可投建位置集合; $S_{k,i}$ 为投资对象第*i*个位置的投建容量; C_k 为投资对象的单位容量造价; r_0 为规划期内的贴现率; N_k 为投资对象的使用寿命。

规划投资模型中储能主要考虑蓄电池储能类型。由于蓄电池储能需要同时配置一定功率的逆变器,其投资成本

$$I_{\text{ESS}} = \frac{r_0(1+r_0)^{N_k}}{(1+r_0)^{N_k}-1} \times \sum_{i \in \Omega_{\text{ESS}}} P_{\text{ESS},i}(K_p + K_{\text{inv}} + K_{\text{main}}) + E_{\text{ESS},i} K_E, \quad (3)$$

式中, Ω_{ESS} 为储能可选投建位置, $P_{\text{ESS},i}$ 为节点*i*安装储能的额定功率, $E_{\text{ESS},i}$ 为节点*i*安装储能的额定电量, K_p 、 K_{inv} 、 K_{main} 分别为储能的单位功率投资成本、逆变器配置成本和维护成本, K_E 为单位电量投资成本。

1.1.2 运行类指标

运行成本是影响系统经济性的另一关键因素,主要考虑发电燃料成本、切负荷罚金及新能源弃电罚金,运行类目标函数

$$\min F_2 = F_{\text{op}} + F_{\text{dc}} + F_{\text{REdrop}}, \quad (4)$$

式中, F_{op} 为电力系统规划周期内的运行成本, F_{dc} 为系统规划周期内发生切负荷的罚金, F_{REdrop} 为规划周期内风光弃电的罚金。

1.2 规划模型约束条件

扩展规划在追求成本最小的同时,需满足国家制定的环境约束(主要为碳排放约束)及各类设备技术约束。

(1) 环境约束

高比例新能源电力系统发展的根本动力在于能源转型,因此其扩展规划必须满足环保政策和碳排放要求。碳排放主要取决于新能源电源规模及电量占比,故此处采用系统新能源渗透率描述环保要求。规划目标年的新能源电量渗透率

$$\eta_{\text{RE}} = \sum_{i \in \Omega_{\text{RE}}} S_i / S_e \geq \eta_{\text{RE}}^{\min}, \quad (5)$$

式中, η_{RE}^{\min} 为最低计划新能源渗透率, Ω_{RE} 为规划方案投建的新能源厂站位置, S_i 为现有及计划投建的新能源厂站*i*规划周期内的预计总发电量, S_e 为规划周期内所有电源的总发电量。

(2) 设备技术约束

设备技术约束主要指电力系统需满足负荷供电要求及供电过程中各设备物理特性约束,包括任意时刻电力平衡约束、电网潮流约束、线路传输容量约束、火电机组出力上下限约束、火电机组爬坡率约束、火电机组备用容量约束、火电机组最小启停时间约束、新能源电源最大出力约束、储能充放电功率和存储容量约束等。此类约束条件通常需要在运行指标计算中予以考虑。

2 精细化运行模拟嵌入

运行指标计算需要运行数据支持,基于典型场景计算运行相关指标是目前普遍做法^[21-22],从完整运行周期中选取场景,基于选定场景计算运行指标。高比例新能源环境下,系统运行方式复杂多样,导致场景选择日益困难,基于选定场景计算的运行指标可能与实际值差异过大,导致规划结果偏离预期。为准确计算运行指标,采用精细化运行模拟生成系统运行状态数据,实现运行场景全覆盖。

2.1 精细化运行模拟模型

从电力生产实际经验出发设计精细化运行模拟模型,即依次模拟月检修计划,以日为周期进行日前调度,主要流程如图1所示。

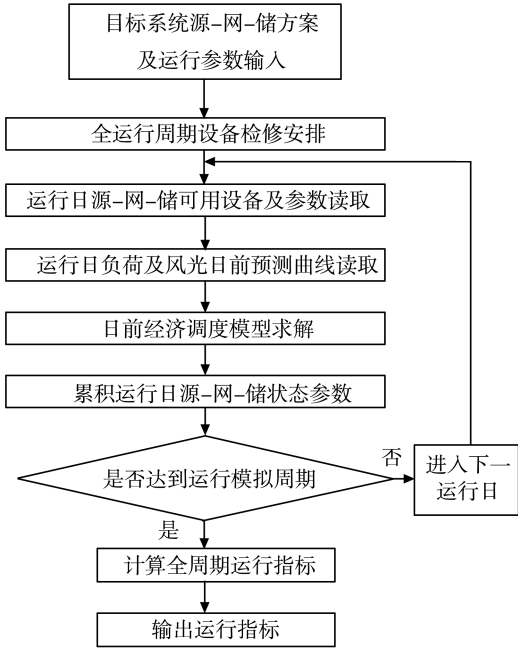


图1 精细化运行模拟过程

Fig.1 Process of refined operation simulation

基于上述流程的精细化运行模拟优化模型如下。

2.1.1 运行模拟目标函数

日前调度优化的主要目标为最小化运行成本,即式(4),其中各部分计算过程如下。

(1) 规划周期内运行成本

$$F_{op} = f_{coal} + f_{reserve} + f_{switch} = (\lambda_{coal} + \lambda_{CO_2}) \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega_{cg}} [a_i (P_{g,i}^t)^2 + b_i P_{g,i}^t + c_i] + \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega_{cg}} [C_{R,i}^+ R_{i+}^t + C_{R,i}^- R_{i-}^t] + \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega_{cg}} (C_{ON} v_{g,i}^t + C_{OFF} w_{g,i}^t), \quad (6)$$

式中: f_{coal} 为火电机组燃煤及碳排放成本; $f_{reserve}$ 为火电机组备用成本; f_{switch} 为机组启停成本; Ω_{cg} 为火电机组的安装位置集合; λ_{coal} 为火电机组单位燃煤成本; λ_{CO_2} 为单位碳排放成本; $P_{g,i}^t$ 为 t 时刻节点 i 的火电机组实际有功出力; a_i 、 b_i 、 c_i 为火电机组煤耗系数; T 为系统规划运行时间; $C_{R,i}^+$ 、 $C_{R,i}^-$ 分别为单位正、负备用成本; R_{i+}^t 、 R_{i-}^t 分别为 t 时刻节点 i 正、负备用功率; $v_{g,i}^t$ 、 $w_{g,i}^t$ 分别为某时刻火电机组的启、停指示,机组投运时 $v_{g,i}^t = 1$,停机时 $w_{g,i}^t = 1$,其余时刻均取0; C_{ON} 、 C_{OFF} 分别为火电机组启动、停机成本。

(2) 规划周期内切负荷罚金

为保证电力系统的供电可靠性,同时允许少量切负荷以满足极端情况下的电能供需平衡,在运行模拟过程中考虑切负荷的场景并设置对应的惩罚

成本,产生的切负荷罚金

$$F_{dc} = C_{dc}^t \times \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega_{load}} P_{dc,i}^t, \quad (7)$$

式中, $P_{dc,i}^t$ 为负荷节点 i 在 t 时刻的切负荷功率, C_{dc}^t 为 t 时刻的单位切负荷罚金, Ω_{load} 为负荷节点集合。

(3) 规划周期内风光弃电罚金

为提高新能源消纳水平,目标函数也考虑了对新能源弃电量的优化,风电和光伏电源弃电时设置对应的罚金

$$F_{REdrop} = C_{drop} \times \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega_{RE}} P_{drop,i}^t, \quad (8)$$

式中, C_{drop} 为单位弃电量罚金, Ω_{RE} 为新能源电源安装节点集合, $P_{drop,i}^t$ 为 t 时刻新能源电源安装节点 i 的弃电功率。

2.1.2 运行模拟约束条件

日前调度中主要约束为1.2节中的设备技术经济约束,具体包括以下方面。

(1) 电力平衡约束

$$\sum_{i \in \Omega_{cg}} P_{g,i}^t + \sum_{i \in \Omega_{RE}} P_{w,i}^t + \sum_{i \in \Omega_{RE}} P_{v,i}^t + \sum_{i \in \Omega_{ESS}} (P_{ESSout,i}^t - P_{ESSin,i}^t) - \sum_{i \in \Omega_{RE}} P_{drop,i}^t = \sum_{i \in \Omega_{load}} P_{L,i}^t - \sum_{i \in \Omega_{load}} P_{dc,i}^t, \quad (9)$$

式中, $P_{g,i}^t$ 、 $P_{w,i}^t$ 、 $P_{v,i}^t$ 分别为 t 时刻节点 i 火电、风电、光伏电源实际有功出力, $P_{ESSout,i}^t$ 、 $P_{ESSin,i}^t$ 分别为 t 时刻节点 i 储能的放电、充电功率, $P_{L,i}^t$ 为 t 时刻节点 i 的负荷有功功率。

(2) 潮流约束

$$f_{L,i}^t = b_{L,i} (\theta_{L,i,m}^t - \theta_{L,i,n}^t), \quad (10)$$

式中: $f_{L,i}^t$ 为 t 时刻线路 i 上输送的有功功率,与规定功率方向相同时为正,相反时为负; $b_{L,i}$ 为线路 i 的导纳; $\theta_{L,i,m}^t$ 为 t 时刻线路 i 首端节点的电压相角; $\theta_{L,i,n}^t$ 为线路 i 末端节点的电压相角。为方便经济调度问题求解,本研究采用直流潮流建模潮流约束,保证经济调度问题的线性特征。

(3) 线路容量约束

$$F_{L,min} \leq f_{L,i}^t \leq F_{L,max}, \quad (11)$$

式中, $F_{L,max}$ 和 $F_{L,min}$ 分别为线路正向、反向传输有功功率容量。

(4) 常规机组出力上下限约束

$$\delta_{g,i}^t P_{g,i}^{min} \leq P_{g,i}^t \leq \delta_{g,i}^t P_{g,i}^{max}, \quad (12)$$

式中: $\delta_{g,i}^t$ 为 t 时刻节点 i 火电机组启停状态,投运时取1,反之取0; $P_{g,i}^{min}$ 、 $P_{g,i}^{max}$ 为节点 i 火电机组的额定最小、最大有功出力。

(5) 火电机组备用约束

$$\begin{cases} \delta_{g,i}^t P_{g,i}^{\min} \leq P_{g,i}^t - R_-^t \\ 0 \leq P_{g,i}^t + R_+^t \leq \delta_{g,i}^t P_{g,i}^{\max} \end{cases}, \quad (13)$$

式中, R_+^t 、 R_-^t 为 t 时刻设定的上、下备用功率, 取决于火电机组备用比的大小。

(6) 火电机组爬坡约束

$$-D_{g,i}^- \leq P_{g,i}^t - P_{g,i}^{t-1} \leq D_{g,i}^+, \quad (14)$$

式中, $D_{g,i}^+$ 、 $D_{g,i}^-$ 分别为火电机组模拟时间间隔内的最大上、下爬坡速率。

(7) 火电机组最小启停时间约束

$$\begin{cases} \sum_{\xi=t-T_{ON}}^t v_{g,i}^{\xi} \leq \delta_{g,i}^t \\ \sum_{\xi=t-T_{OFF}}^t w_{g,i}^{\xi} \leq 1 - \delta_{g,i}^t \end{cases}, \quad (15)$$

式中, T_{ON} 、 T_{OFF} 分别为机组最小启、停时长。

(8) 新能源机组出力约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{w,i}^t \leq P_{w,i}^{\max} \\ 0 \leq P_{v,i}^t \leq P_{v,i}^{\max} \end{cases}, \quad (16)$$

式中, $P_{w,i}^{\max}$ 为风电安装位置 i 的最大有功出力, $P_{v,i}^{\max}$ 为光伏安装位置 i 的最大有功出力。

(9) 储能电力和电量约束

$$\begin{cases} -P_{ESSout}^{\max} \leq P_{ESS}^t \leq P_{ESSin}^{\max} \\ E_{ESS}^{\min} \leq E_{ESS}^t \leq E_{ESS}^{\max} \end{cases}, \quad (17)$$

式中, P_{ESS}^t 为蓄电池储能 t 时刻的传输功率, P_{ESSin}^{\max} 、 P_{ESSout}^{\max} 分别为储能最大充电、放电功率, E_{ESS}^t 为储能 t 时刻的存储电量, E_{ESS}^{\min} 、 E_{ESS}^{\max} 分别为储能允许的最小、最大存储电量。

(10) 储能荷电状态日清约束^[23]

规定储能每日末荷电状态 S_{ocESS}^t ($t=24$) 与日初荷电状态 S_{ocESS}^t ($t=0$) 相同。

2.2 精细化运行模拟与规划模型融合

将精细化运行模拟模型直接嵌入源-网-储协同扩展规划模型, 同时求解精细化运行模拟模型与规划模型将显著增大优化问题规模, 面临大规模混合整数规划问题求解。为降低求解难度, 采用双层迭代方式, 将原问题分解为双层子问题: 上层规划以最小投资为目标, 优化电源、线路和储能的建设方案; 下层精细化模拟以运行成本最小为目标, 确定系统建设后的最佳运行方案。上层规划为下层运行提供静态的设计方案作为仿真场景, 实现方案评价校验和指标计算; 下层运行优化的结果给上层规划提供决策参考。双层分解模型的基本结构如图2所示。

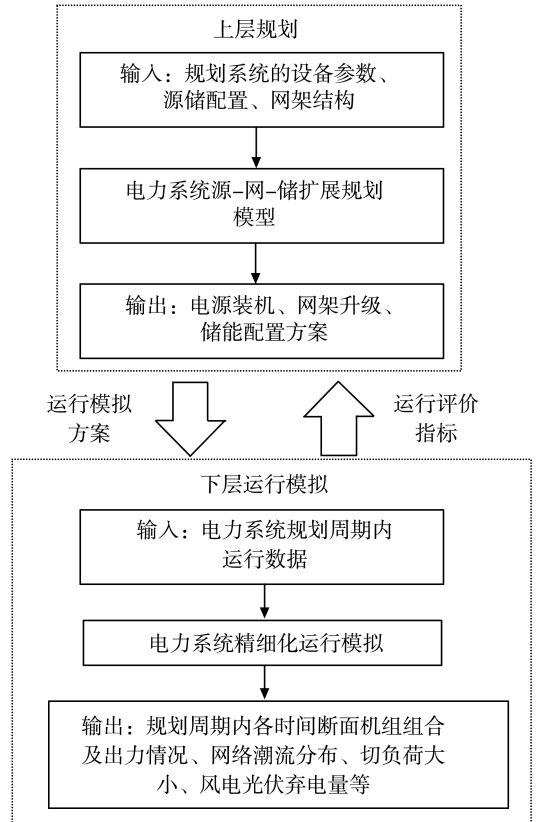


图2 双层规划模型流程

Fig.2 Flowchart of the double-layer planning model

3 基于 NSGA-II 算法的模型求解

源-网-储协同规划问题本质上是一个多目标非线性寻优问题, 可采用全局搜索能力与适应性强的随机优化算法求解^[24-25]。遗传算法通过模拟生物进化的迭代过程进行优化求解, 改进的 NSGA-II 算法可有效避免大规模问题求解中复杂度过高、求解效率低及容易过早收敛的缺陷^[26], 故基于 NSGA-II 算法设计的求解流程如图3所示, 详述如下。

(1) 初始化。基于电源、储能容量边界和线路连接约束随机生成若干初始规划方案, 通过精细化运行模拟计算每个方案对应的建设成本、运行成本等目标值, 形成初始方案集合。

(2) 非支配排序。根据投资指标与运行指标, 按照 Pareto 支配定义, 对方案集合中的所有方案进行非支配排序。

(3) 交叉与变异。基于锦标赛选择策略随机选择父代, 采用模拟二进制交叉生成子代, 随机进行多项式变异生成新规划方案集。

(4) 拥挤度计算。将父代与子代方案集合合并, 计算合并集合中各方案的建设成本及运行成

本,对总方案集合进行非支配排序。在非支配排序得到的每一 Pareto 前沿层内,将目标函数(建设成本、运行成本)最大及最小方案的拥挤度设置为 ∞ ,其余方案的初始拥挤度设为0,根据各规划方案的目标函数,按式(18)更新同一层内的拥挤度,将同一层中的方案按拥挤度大小进行排序。

$$n'_d(i) = n_d(i) + \frac{(f_m(i+1) - f_m(i-1))}{f_m^{\max} - f_m^{\min}}, \quad (18)$$

式中, $n_d(i)$ 为第*i*个方案的初始拥挤度, $n'_d(I)$ 为第*I*个方案更新后的拥挤度, $f_m(i+1)$ 、 $f_m(i-1)$ 分别为第*i+1*、第*i-1*个方案的第*m*个目标函数, f_m^{\max} 、 f_m^{\min} 分别为第*m*个目标函数的最大、最小值。

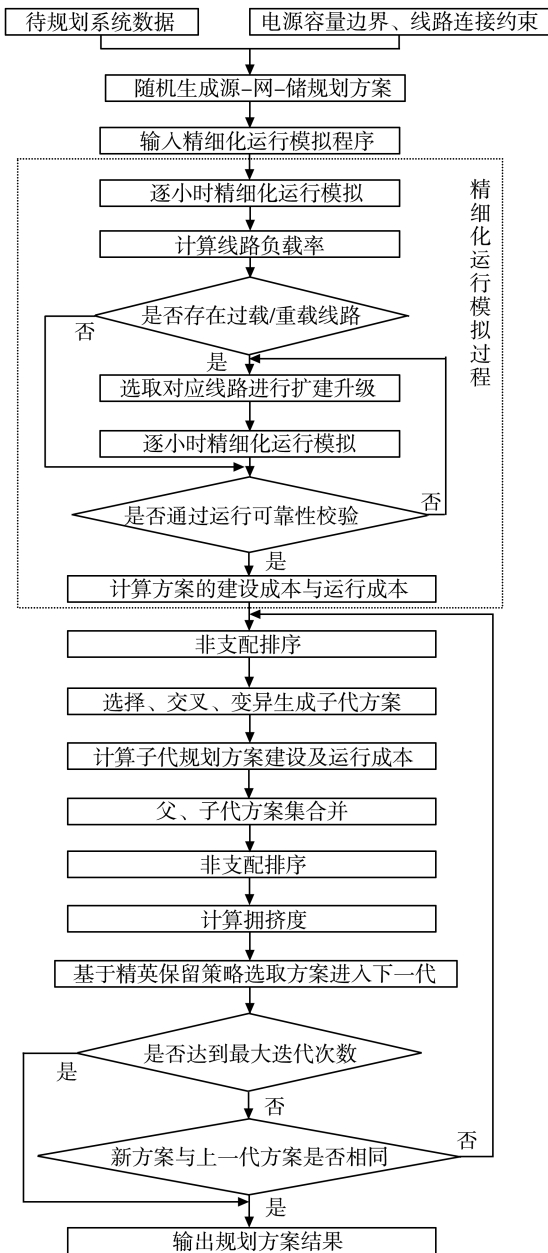


图3 NSGA-II 求解规划模型流程图
Fig.3 Flow chart for solving planning models with NSGA-II

(5) 子代优选。根据拥挤度排序结果,以精英保留策略从合并规划方案集合中选择与初始方案集合数量相同的规划方案,作为下一代规划方案集合。

(6) 收敛性判断。对比下一代方案集合是否与上一代一致,若一致,则求解结束,此时生成的方案即为求解最终结果;否则,返回步骤(3)进行下一代计算。

4 算例分析

以 IEEE-30 节点系统扩展规划验证所提方法应用效果。起始系统拓扑结构如图 4 所示,包含 6 处火电机组、2 处风电和 1 处储能,各电源及储能参数见表 1,负荷曲线及新能源出力曲线如图 5 所示,峰值负荷为 425.1 MW。假设因人口增长及经济发展等因素,系统峰值负荷增加 1.85 倍,由原本 425.1 MW 增长至 788 MW。基于国家“双碳”战略目标相关要求,增长后系统的新能源电量占比需要达到 50% 以上。

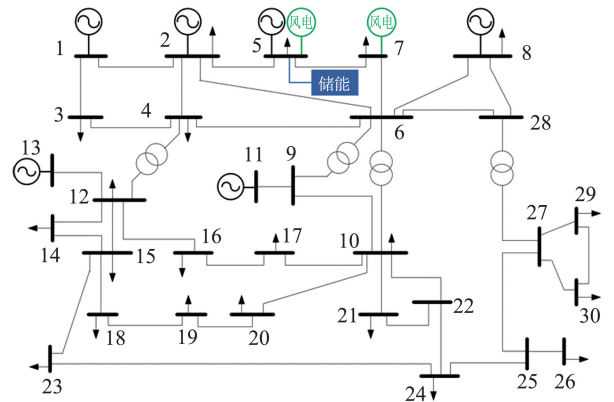


图4 算例仿真系统拓扑结构图
Fig.4 Topology diagram of the simulation system

表1 算例系统电源参数
Table 1 Power source parameters in the simulation system

设备类型	安装节点	额定容量/ MW	总容量/ MW
火电	1	100	260
	2	50	
	5	30	
	8	40	
	11	20	
	13	20	
风电	5	20	70
	7	50	
储能	5	20	20

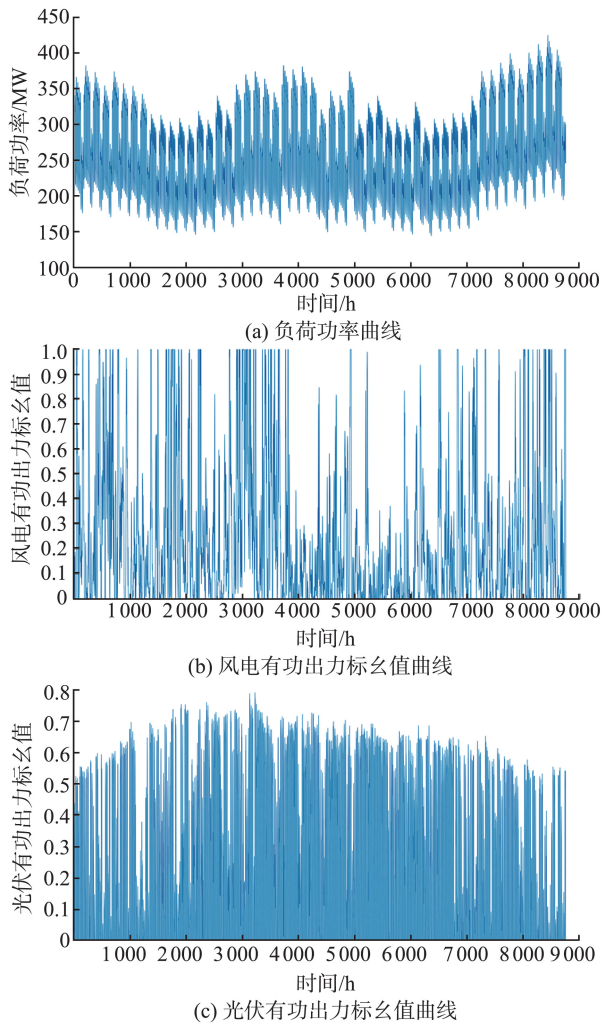


图5 负荷及新能源曲线

Fig.5 Load and renewable energy curves

使用源-储规划程序(例如 GOPT^[27])得到不考

虑网架时的全系统源-储配置规模边界条件,满足设计目标时风-光-储新增安装最低容量为火电 120 MW、风电 390 MW、光伏 620 MW、储能 100 MW,规划时允许±10 MW 的可调范围。采用协同扩展规划进行各类电源选址定容及最优适应网架设计,协同规划中新建火电机组、风电及储能最小单位容量分别为 60、30、50 MW(其中储能最大充放电时长假定为 6 h),容量优化步长为 10 MW,各类设备规划运行参数见表 2。精细化运行模拟步长 1 h,规划周期 1 a(8 760 h)。NSGA-II 求解参数为每代 10 种方案,最大迭代次数设为 10。分别采用基于典型场景运行指标计算的规划(即方法一)与本研究方法(即方法二)进行扩展规划,典型场景根据净负荷曲线(年负荷曲线与风光出力曲线之差)选择为冬夏两季上下峰值日。

4.1 规划结果

2 种规划方法的扩展规划优选结果如表 3 可见,方法一优选结果投建火电、风电、光伏、储能总容量分别为 120、380、620、100 MW,方法二优选结果投建火电、风电、光伏、储能总容量分别为 120、400、630、100 MW,2 种方法规划优选结果均基本满足规划目标的容量要求。2 种方法规划结果对应的系统拓扑如图 6 所示。由图 6 可见,2 种方法新建的源-储位置及容量布局基本相同,但方法一规划结果中新建新能源电源 1 000 MW,低于方法二新建新能源电源 1 030 MW,方法一扩建输电线路共 11 条,也低于方法二拟新建的 16 条。

表 2 设备规划运行参数

Table 2 Planning and operation parameters of devices

火电建设成本/(万元·MW ⁻¹)	风电建设成本/(万元·MW ⁻¹)	光伏建设成本/(万元·MW ⁻¹)	储能建设成本/(万元·(MW·h) ⁻¹)	储能功率变流器成本/(万元·MW ⁻¹)	新能源弃电惩罚成本/(万元·(MW·h) ⁻¹)	最大储能荷电状态/%	最小储能荷电状态/%	贴现率
434.5	727.3	459.9	200.5	246.5	0.1	95	10	0.05

表 3 2 种规划方法优选结果

Table 3 Selected solution of two different planning methods

规划方法	火电		风电		光伏		储能		线路	
	安装节点	安装容量/MW	安装节点	安装容量/MW	安装节点	安装容量/MW	安装节点	安装容量/MW	安装位置	安装回路数
方法一			2	50	2	70			7—8	3
			8	60	8	100			13—31	2
			13	50	10	120			9—10	1
	7	60	20	40	12	50	10	50	16—25	1
	15	60	23	40	13	70	27	50	16—23	1
			24	50	25	130			7—30	2
			26	50	27	50			1—2	1
			27	40	30	30				

表3(续)

规划方法	火电		风电		光伏		储能		线路	
	安装节点	安装容量/MW	安装节点	安装容量/MW	安装节点	安装容量/MW	安装节点	安装容量/MW	安装位置	安装回路数
方法二			2	70	2	120			7—8	3
			8	40	8	140			13—31	2
			13	40	10	100			9—10	2
	7	60	20	70	12	30	10	50	16—25	3
	15	60	23	30	13	80	24	50	10—21	1
			24	40	25	50			12—15	1
		26	50	27	80			15—18	1	
		27	60	30	30			7—27	3	

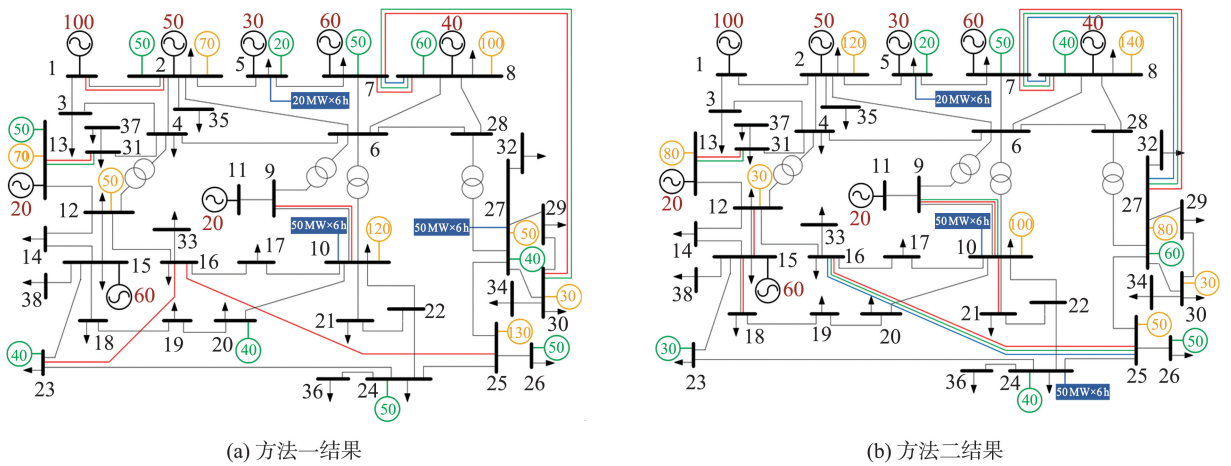


图6 规划后系统拓扑图

Fig.6 Topology diagram of the planned system

4.2 结果分析

2种规划方法的目标函数与相关运行指标计算值如表4所示,其中方法一校验是指将方法一规划结果采用精细化运行模拟方式进行8760h运行仿真,根据仿真结果计算出实际运行指标。由表4可

知:方法一优选方案在电源投资及输电线路投资额上均低于方法二,与建设较少的电源及线路相符合;方法一优选方案运行成本估计值明显低于方法二,方法一运行成本降低空间较小,优选方案中仅新增较少量的电源及线路设备。

表4 2种规划方法代表方案投资和运行指标

Table 4 Investment and operation indicators of planning solutions with two different methods

规划方法	投资成本/万元			运行成本/万元			切负荷率/%		新能源占比/%			
	源储	线路	总计	燃料	机组启停	切负荷	总计	最大	平均	弃风	弃光	渗透率
方法一	39 265	2 623	41 888	35 559	707	307	36 573	0.57	0.020 9	17.49	16.75	63.82
方法二	40 339	3 479	43 818	54 143	1 294	71	55 508	1.82	0.003 9	8.31	3.49	50.30
方法一校验	39 265	2 623	41 888	57 315	1 124	608	59 047	4.97	0.037 9	9.71	5.29	47.70

对比切负荷率、弃风弃光率和新能源电量占比可见:方法一基于典型场景的运行指标计算说明优选方案已具备充足的新能源出力,能够满足大部分负荷需求,电量占比约64%,较高弃风弃光率(17%左右)也能满足新能源电量占比和负荷要求(平均切负荷率仅为约0.02%),高新能源占比导致火电利用率低,相关运行成本低。方法一对运行指标的乐

观估计使计算运行成本显著低于方法二,且优选的弃风弃光率及切负荷率均高于方法二优选结果。基于上述运行指标估计,方法一规划模型认为系统在运行期间的新能源配置比较充足,消纳水平能够满足负荷需求,相比方法二的规划结果,方法一对新能源电源和线路的投资比例分别降低了2.66%和24.60%。

方法一优选方案的校验结果给出该方案实际的运行指标,由表4可知,方法一所得方案在完整运行周期中的运行成本显著高于规划时的估计值,根据各项运行指标分析原因为:实际新能源出力无法保持较高的出力水平,新能源配置不足使切负荷率上升,造成实际切负荷成本提高;新能源配置不足及电网加强不够,导致弃风弃光率较高,火电出力更大,有更高的燃料费,最终使方案实际运行费用高于方法二优选方案。此外,由于新能源电源总量不足及配套的输电线路升级较少,系统中新能源电量供应不足,消纳情况不佳,实际系统的新能源电量占比仅为47.7%,未能达到预期的50%以上,明显未达到规划目标。综合来看,与方法二优选方案相比,方法一优选方案虽然投资成本降低2.6%,实际运行成本却增加6.1%,导致总费用增加2%左右。

以上结果表明:相比传统典型日规划方法,本研究提基于精细化运行模拟的规划方法能够在保证一定新能源渗透率要求下,对投资成本与运行成本进行合理计算和权衡,得到更好的规划效果,总成本降低约2%。

5 结论

高比例新能源系统扩展规划中,基于典型场景的规划方法可以提高计算效率,但存在因准确度不足导致结果与规划目标偏离的可能性。针对这一问题,建立基于精细化运行模拟的高比例新能源系统源-网-储协同规划模型,设计采用NSGA-II思想的求解算法,所提模型可兼顾投资成本与运行成本最优,通过规划-调度问题解耦兼顾计算量与规划方案准确性。算例分析表明,本研究提模型能够基于系统当前状态,在保证一定的新能源渗透率前提下得到更好的规划效果,所得最终方案的总花费相比典型场景规划方法降低约2%。

当前嵌入精细化运行模拟的短期扩展规划模型需多次求解优化调度问题,用于大规模电力系统规划问题时求解时长增加较为明显,可能会限制所提方法的应用范围,因此进一步提高运行模拟计算效率是下一步研究重点。后续将探索在现有模型基础上融入规划规则引导,通过规则与优化算法融合减少求解时间,为后续进一步用于多阶段研究规划奠定基础。

参考文献:

- [1] 李晖,刘栋,姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6259.
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6259.
- [2] 黎博,陈民铀,钟海旺,等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 555-581.
LI Bo, CHEN Minyou, ZHONG Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 555-581.
- [3] 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.
- [4] 孙东磊,赵龙. 基于学习理论的含光储联合系统的输电网络双层规划[J]. 山东大学学报(工学版), 2020, 50(4): 90-97.
SUN Donglei, ZHAO Long. Bi-level planning of transmission network with solar-storage combination system based on learning theory[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2020, 50(4): 90-97.
- [5] 王建学,李清涛,王秀丽,等. 大规模新能源并网系统电源规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3114-3124.
WANG Jianxue, LI Qingtao, WANG Xiuli, et al. A generation expansion planning method for power systems with large-scale new energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3114-3124.
- [6] 孙东磊,鉴庆之,李智琦,等. 源网协调的电力系统均匀性规划[J]. 山东大学学报(工学版), 2022, 52(5): 92-101.
SUN Donglei, JIAN Qingzhi, LI Zhiqi, et al. Power system uniformity planning based on source network coordination[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2022, 52(5): 92-101.
- [7] CHEN X, LÜ J, 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.
- [8] 王良缘, 江岳文, 王杰. 考虑参与多市场交易的电网侧储能优化配置[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(11): 30-38.
WANG Liangyuan, JIANG Yuewen, WANG Jie. Optimization of grid-side energy storage considering multi-market transaction[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(11): 30-38.
- [9] 张振宇, 王文倬, 张小奇, 等. 基于电力系统承载力指标的新能源装机规划方法[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 632-639.
ZHANG Zhenyu, WANG Wenzhuo, ZHANG Xiaoqi, et al. Renewable energy capacity planning based on carrying capacity indicators of power system[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 632-639.
- [10] 葛晓琳, 徐轶胜, 符杨, 等. 考虑多重不确定性影响的海上风储多属性联合规划[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4140-4153.
GE Xiaolin, XU Yisheng, FU Yang, et al. Multi-attribute joint planning of offshore wind and storage considering influence of multiple uncertainties[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4140-4153.
- [11] 胡迪, 丁明, 毕锐, 等. 光伏和风电互补性对高渗透率可再生能源集群接入规划影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(3): 821-836.
HU Di, DING Ming, BI Rui, et al. Impact analysis of PV and WT complementarity on access planning of high penetrated renewable energy cluster[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 821-836.
- [12] DEHGHAN S, AMJADY N, CONEJO A J. Reliability-constrained robust power system expansion planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 2383-2392.
- [13] 张宁, 胡兆光, 周渝慧, 等. 计及随机模糊双重不确定性的源网荷协同规划模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 39-44.
ZHANG Ning, HU Zhaoguang, ZHOU Yuhui, et al. Source-grid-load coordinated planning model considering randomness and fuzziness[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 39-44.
- [14] 李逐云, 雷霞, 邱少引, 等. 考虑“源-网-荷”三方利益的主动配电网协调规划[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 378-387.
LI Zhuyun, LEI Xia, QIU Shaoyin, et al. Coordinated planning of active distribution network considering “source-grid-load” benefits[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 378-387.
- [15] 原一方, 尚策. 减碳中多阶段的煤电机组退役与新能源、储能规划协同[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 140-147.
YUAN Yifang, SHANG Ce. Coordination of multi-stage renewable energy, energy storage planning and coal-fired unit retirement under carbon reduction goal[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 140-147.
- [16] 杨修宇, 穆钢, 柴国峰, 等. 考虑灵活性供需平衡的源-储-网一体化规划方法[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3238-3246.
YANG Xiuyu, MU Gang, CHAI Guofeng, et al. Source-storage-grid integrated planning considering flexible supply-demand balance[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3238-3246.
- [17] 张衡, 程浩忠, 张建平, 等. 高比例风电背景下计及N-1安全网络约束的发输电优化规划[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(20): 5929-5936.
ZHANG Heng, CHENG Haozhong, ZHANG Jianping, et al. Generation and transmission expansion planning considering N-1 security constraints with high penetration of wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(20): 5929-5936.
- [18] 史昭娣, 黄越辉, 李湃, 等. 计及深度信念网络场景生成的风/光/储协同优化规划方法[J/OL]. 电网技术. (2022-08-18) [2023-10-30]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.tm.20220817.0939.001.html>.
- [19] 付文龙, 卓庆澳, 吴月超, 等. 多能互补提供频率支撑的储能容量分布鲁棒规划方法[J/OL]. 电网技术. (2023-08-16) [2023-10-30]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0804>.
- [20] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.
- [21] 刘自发, 于寒霄, 王帅, 等. 综合考虑运行效率和弃风损失的输电网规划[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 827-834.
LIU Zifa, YU Hanxiao, WANG Shuai, et al. Transmission grid planning considering operation efficiency and wind curtailment loss[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 827-834.
- [22] 杨修宇. 提升高风电渗透率电力系统灵活性的源-储-

网协调规划方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.

YANG Xiuyu. Source-storage-grid coordinated planning method for improving flexibility of power system with high wind power penetration[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.

- [23] 谢鹏, 蔡泽祥, 刘平, 等. 考虑多时间尺度不确定性耦合影响的风光储微电网系统储能容量协同优化[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24): 7126-7136.

XIE Peng, CAI Zexiang, LIU Ping, et al. Cooperative optimization of energy storage capacity for renewable and storage involved microgrids considering multi time scale uncertainty coupling influence[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24): 7126-7136.

- [24] 姜惠兰, 安星, 王亚微, 等. 基于改进 NSGA2 算法的考虑风机接入电能质量的多目标电网规划[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5405-5411.

JIANG Huilan, AN Xing, WANG Yawei, et al. Im-

proved NSGA2 algorithm based multi-objective planning of power grid with wind farm considering power quality[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5405-5411.

- [25] GOMES P V, SARAIVA J T. Hybrid genetic algorithm for multi-objective transmission expansion planning[C]//2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON). Leuven, Belgium: IEEE, 2016: 7514131.

- [26] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

- [27] ZHUO Z Y, DU E S, ZHANG N, et al. Cost increase in the electricity supply to achieve carbon neutrality in China[J]. Nature Communications, 2022, 13: 3172.

(编辑:孙亚彤)

(上接第155页)

- [17] GENG J Q, SUN X M, WANG, H H, et al. A modified adaptive sparrow search algorithm based on chaotic reverse learning and spiral search for global optimization[J]. Neural Computing and Applications, 2023, 35: 24603-24620.

- [18] ZHAO R Q, TANG W S. Monkeyalgorithm for global numerical optimization[J]. Journal of Uncertain Systems, 2008, 2(3): 165-176.

- [19] ABOLFZLI A, BRECHMANN A, WOLFF S, et al. Machine learning identifies the dynamics and influencing

factors in an auditory category learning experiment[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 6548.

- [20] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]//Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks. Perth, Australia: IEEE, 1995: 1942-1948.

- [21] TIAN D P, SHI Z Z. MPSO: modified particle swarm optimization and its applications[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2018, 41: 49-68.

(编辑:孙亚彤)