

兼顾碳减排和新能源消纳的火电机组深度调峰与复合储能协调规划

朱健宇¹, 潘学萍¹, 王正风², 王吉文², 孙晓荣¹, 史雯¹, 秦景辉¹

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230061)

摘要:火电机组深度调峰、化学储能以及抽水蓄能是电网灵活性资源的重要组成部分,对三者进行协调规划能在保障电网安全低碳运行的同时,提升新能源的接纳能力。从经济性、碳减排量、弃风弃光量3个方面,构建了火电机组深度调峰和复合储能协调的多目标规划模型;提出了基于熵权的改进非支配排序遗传算法(NSGA-Ⅱ)求解多目标规划模型,获得Pareto最优解集,并进一步根据模糊隶属度得到综合最优解。以某省级电网2025年、2030年的预测数据为例进行仿真验证,结果表明:采用改进NSGA-Ⅱ可提升多目标优化的求解速度与精度;火电机组深度调峰协同储能配置可显著减小弃风弃光率,有利于电力系统的低碳经济运行。

关键词:火电机组;深度调峰;复合储能;碳减排;新能源消纳;多目标优化;协调规划;改进NSGA-Ⅱ

中图分类号:TM715

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202303003

0 引言

大力发展新能源是实现能源转型、落实“双碳”目标的必然选择。由于新能源发电功率具有波动性、间歇性、不确定性^[1],大规模新能源并网会降低电网供电充裕性^[2],给电力系统调峰带来极大的压力。近年来大停电/限电事故(如2021年美国德州极寒天气导致的停电事件等)的发生^[3-4],都是由于新能源并网增加导致发电侧出力的不确定性增大、系统的灵活性不足,而极端条件下常规机组无法满足负荷需求,严重危及了系统安全。

目前,我国的电源结构仍以火电为主,火电机组深度调峰以及灵活性改造是促进新能源消纳的主要手段。文献[5]构建了考虑火电机组灵活性改造的电力系统长期调度模型,并采用Benders分解法实现了模型的高效求解。文献[6]以火电机组灵活性改造费用和多场景运行费用的年综合费用区间作为优化目标,并采用全场景优化方法得到了综合经济性最优的火电机组灵活性改造方案。然而随着新能源发电的持续并网,上述仅考虑火电机组灵活性改造的手段难以满足电力系统的调峰需求。

储能具备调节速度快、功率与能量的迁移能力强等优点,是支撑高比例新能源接入和消纳的关键设备。文献[7]以提升新能源消纳和满足负荷供应能力为原则,从全社会角度提出了储能配置规模的优化模型。文献[8]提出了一种考虑机会约束及N-1安全约束的风光联合储能协同规划方法,以获得风

光联合储能的安装位置、额定功率与额定容量。抽水蓄能也是储能的一种,文献[9]基于双层规划理论,构建了光伏-小水电-抽水蓄能的容量配置模型。文献[10]从抽水蓄能容量配置与火电机组协调运行的角度出发,构建了抽水蓄能电站最佳容量配置的双层规划模型。此外,还有研究对多类型储能进行协调规划。文献[11]针对由全钒液流电池和先进绝热压缩空气储能组成的混合储能系统,建立了考虑大规模风电接入的系统容量优化配置模型。文献[12]以系统受阻风光电最小为目标,建立了光热发电-火电联合调峰的优化模型。文献[13]从火电机组深度调峰阶梯式补偿、储能峰谷套利两方面入手,提出了储能与火电机组灵活性改造协调规划方法。然而,上述研究或侧重于不同类型储能之间的协同规划,或侧重于单类型储能与火电机组灵活性改造的协同规划,对于多类型储能与火电机组灵活性改造的协同规划研究仍较少。

在进行灵活性资源优化规划时,常以经济最优或新能源消纳最大为目标。然而,火电机组深度调峰会导致其运行效率降低、锅炉燃烧不充分^[14]等问题,进而带来新的环保压力。为此,本文在现有经济性目标函数的基础上,提出兼顾碳减排能力,通过协调火电机组灵活性改造与碳减排能力间的矛盾,建立多目标规划模型以求取灵活性资源的最优配置方案。

多目标优化求解方法分为2类。一类是将多目标问题转化为单目标问题进行求解,如文献[15]采用epsilon约束法求解多目标优化问题。但这类方法的优化结果受权重系数等参数影响很大,参数优选的难度较大。另一类是直接求解多目标问题以获得非劣解集,目前常采用粒子群优化算法^[16-17]、遗传算法求解最优解集。非支配排序遗传算法(non-domi-

收稿日期:2022-10-20;修回日期:2022-12-27

在线出版日期:2023-03-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077061)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52077061)

nated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II) 因具有鲁棒性好、计算效率高等优点而得到了广泛应用。文献[18]对 NSGA-II 进行了改进,通过引入正态分布交叉算子增强算法的空间搜索能力以避免陷入局部最优,并通过自适应调整变异方式加快种群的寻优速度。为此,本文采用改进 NSGA-II 求解多目标优化问题。同时为了进一步减少数据处理量,采用熵权法^[19]得到影响目标函数的关键变量,通过对关键变量赋予优先权,加快算法的求解速度。

综上所述,虽然已有较多关于电力系统灵活性资源的规划与运行研究,但大多未能同时从火电机组灵活性改造、化学储能、抽水蓄能3类灵活性资源的协同规划角度出发,未对3类灵活性资源的耦合关系进行协同;同时火电机组深度调峰会带来碳排放压力,目标函数中需计及其影响。为此,本文以高比例新能源省级电网为例,综合考虑经济最优、弃风弃光最少、碳减排量最大三方面,建立火电机组深度调峰与复合储能协调的多目标规划模型,并采用基于熵权法进行数据预处理的改进 NSGA-II 进行求解。最后基于某省级电网的实际数据进行算例分析。

1 高比例新能源电网的供需平衡分析

以某省电网2022年的实际运行数据为例,典型日负荷、新能源出力、净负荷(实际负荷减去新能源出力)、火电机组出力下限曲线如图1所示。

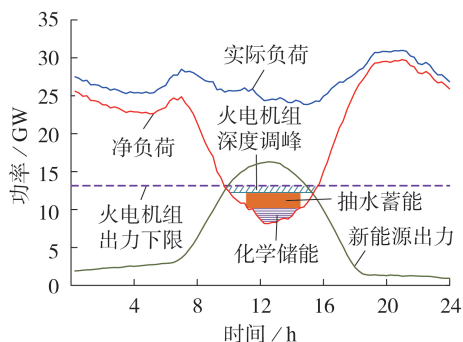


图1 某省级电网的典型日负荷、新能源出力曲线

Fig.1 Typical daily load and new energy output curves of a provincial power grid

由图1可以看出,系统实际负荷曲线较为平坦,但净负荷曲线的峰谷差较大。当净负荷小于火电机组出力下限时,系统会出现新能源消纳困难的问题;当净负荷大于火电机组出力上限时,系统会因出力不足而发生限电等。为了减小系统弃风弃光的风险,保证系统安全运行,常用手段包括增加火电机组调峰深度、配置储能储存剩余电能。

1.1 火电机组深度调峰

火电机组深度调峰虽然可以促进新能源消纳,但也会增加火电机组的单位煤耗。不同类型火电

机组在不同负荷率下供电煤耗的现场测试结果见附录A表A1。由表可知:①随着火电机组负荷率降低,其单位供电煤耗显著增大;②不同类型火电机组的供电煤耗不同,技术越先进、容量越大的机组,其单位供电煤耗越小;③当负荷率低于50%时,火电机组会进入深度调峰,此时单位供电煤耗增加较多,碳排放量增大。

新能源并网容量的增加会导致该省部分火电机组停役,此外部分火电机组因设备陈旧无法进行灵活性改造,故该省参与深度调峰的灵活性资源有限。随着新能源发电占比的逐步增加,仅依靠火电机组深度调峰将无法满足不同电网调峰需求。

1.2 储能的灵活性供给特性

储能设备包括化学储能、抽水蓄能。由于化学储能设备成本高,该电网目前还未进行大规模化学储能建设。但随着新能源发电占比逐渐增加,电网消纳新能源的压力日益加重,化学储能设备建设势在必行。同时,根据该省电网的“十四五”规划,至2025年可新建抽水蓄能最大容量约为2500 MW。

化学储能和抽水蓄能作为电网的重要灵活性资源,两者的时间尺度、电力电量特性皆不同。为了保证远景年该省级电网的灵活性需求,有必要协调规划火电机组深度调峰容量和复合储能配置,以保证系统安全清洁前提下的经济运行。

2 火电机组深度调峰与复合储能协调规划模型

本章从经济性、碳减排量、弃风弃光量三方面,构建火电机组深度调峰与复合储能协调的多目标规划模型,基于电网规划年的运行模拟数据进行计算。

2.1 目标1:最大化年收益

在高比例新能源电力系统中,系统年收益包括火电机组年发电收益、新能源年发电收益,成本包括复合储能的年化成本、年弃风弃光成本。以最大化系统年收益 F_1 为目标,可表示为:

$$\max F_1 = R_t + R_n - C_H - C_s \quad (1)$$

式中: R_t 、 R_n 分别为火电机组、新能源的年发电收益; C_H 、 C_s 分别为抽水蓄能、化学储能的年化成本。

1) 火电机组的年发电收益。

火电机组的年发电收益包括电网公司对火电的售电收益以及电网对参与深度调峰火电机组的补偿费用,可表示为:

$$R_t = \sum_{i=1}^n [P_{t,i}(k_{s,i} - k_b) - P_{td,i}k_{td}] \quad (2)$$

式中: n 为年总采样时刻数,本文以15 min为采样间隔,则 $n=365 \times 96=35\,040$; $P_{t,i}$ 、 $P_{td,i}$ 分别为 i 时刻火电机组的实际出力、参与深度调峰的功率(即相较于出力下限少发的功率); $k_{s,i}$ 、 k_b 分别为 i 时刻电网的售电

电价、火电上网标杆电价; k_{td} 为火电机组深度调峰的电价补偿系数。

2) 新能源的年发电收益。

新能源的年发电收益为其售电收益扣除弃风弃光成本,可表示为:

$$R_n = \sum_{i=1}^n [(P_{n,i} - P_{d,i})(k_{s,i} - k_b) - P_{d,i}k_d] \quad (3)$$

式中: $P_{n,i}$ 、 $P_{d,i}$ 分别为*i*时刻并网新能源的总出力、弃风弃光功率; k_d 为弃风弃光成本系数。我国推动新能源平价上网,故新能源售电电价与火电相同。

3) 抽水蓄能的年化成本。

抽水蓄能的年化成本包括新增抽水蓄能机组的年化建设成本以及所有抽水蓄能机组的年运维成本,可表示为:

$$C_H = P_H k_H + P_{nH} k_{nH} / m_H \quad (4)$$

式中: P_H 、 k_H 分别为抽水蓄能机组的总装机容量、年运维成本系数; P_{nH} 、 k_{nH} 分别为新增抽水蓄能机组功率、建设成本系数; m_H 为抽水蓄能机组的使用年限。

4) 化学储能的年化成本。

假设所有化学储能均是新建的,其年化成本包括年化投资成本、年运维成本。化学储能投资成本主体为电池成本,一般按照其额定容量计算。化学储能的年化成本 C_s 可表示为:

$$C_s = E_{es} k_{es} (m_s / n_s + v) \quad (5)$$

式中: E_{es} 为新增化学储能容量; k_{es} 为化学储能的建设成本系数; m_s 、 n_s 分别为化学储能的年充放电次数、全生命周期内可充放电总次数; v 为化学储能的年运维成本系数。

2.2 目标2:最大化年碳减排量

系统碳减排量为复合储能碳减排量与火电机组深度调峰的碳排放增量之差。复合储能的运行原则如下:①当新能源消纳困难时,复合储能充电,此时存储的电来自新能源;②当负荷达到峰值或新能源出力较少时,复合储能放电,一部分放电功率用于满足负荷需求,另一部分放电功率则用于减小火电机组出力(但火电机组的总出力始终高于最小开机方式下的出力),从而减少碳排放。因此,在计算复合储能碳减排量时,将复合储能的发电功率乘以折算到火电发电减少量的系数,得到火电发电减少量,再将其与碳排放系数相乘,获得复合储能碳减排量。碳排系数按火电机组常规运行时的碳排放系数计算。

以最大化年碳减排量 F_2 为目标,可表示为:

$$\max F_2 = T_p + T_s - T_t \quad (6)$$

$$\begin{cases} T_p = k_{nf} \sum_{i=1}^n k_{pt,i} \mu^{gen} P_{p,i}, T_s = k_{nf} \sum_{i=1}^n k_{st,i} \mu_n^d P_{s,i} \\ T_t = \sum_{i=1}^n (P_{t,i} - P_{nf,i}) k_{df} \end{cases} \quad (7)$$

式中: T_p 、 T_s 分别为抽水蓄能机组、化学储能运行折

算的碳减排量; T_t 为火电机组深度调峰产生的碳排放增量; $P_{p,i}$ 、 $P_{s,i}$ 分别为*i*时刻抽水蓄能机组、化学储能的实时功率; $P_{nf,i}$ 为*i*时刻未进入深度调峰的火电机组的出力; $k_{pt,i}$ 、 $k_{st,i}$ 分别为*i*时刻抽水蓄能发电、化学储能放电带来的火电减小系数; k_{df} 为火电机组深度调峰下的单位碳排放增量系数; k_{nf} 为火电机组常规运行下的单位碳排放系数; μ^{gen} 为表征抽水蓄能机组运行状态的0-1变量,若机组处于发电状态则值为1,否则值为0; μ_n^d 为表征化学储能运行状态的0-1变量,若处于放电状态则值为1,否则值为0。

2.3 目标3:最小化年弃风弃光量

以年弃风弃光量 F_3 最小为目标,可表示为:

$$\min F_3 = \sum_{i=1}^n P_{d,i} \quad (8)$$

2.4 约束条件

约束条件包括系统功率平衡约束、化学储能出力与电量平衡约束、抽水蓄能机组出力与库容约束、储能日清约束等,具体表达式见附录A式(A1)—(A9)。

3 基于改进 NSGA- II 的多目标优化模型求解流程

3.1 模型求解步骤

火电机组深度调峰和复合储能协调多目标规划模型的求解流程见图2,具体步骤见附录B。

3.2 基于熵权-逼近理想解排序法的数据预处理

首先,采用熵权法^[19]对待优化变量进行归一化处理,计算待优化变量的信息熵 e_j 、效用价值 d_j 、熵权 w_j ;然后,采用逼近理想解排序法^[19]确定最优方案,计算综合加权指标并进行矩阵规范化;最后,根据最优理想解与最劣理想解,计算各优化变量的综合得分。数据预处理过程见附录C。

3.3 基于模糊隶属度确定最优解

为了获得各目标函数的最优折中解,文献[20]将各目标函数值转化为综合满意度,通过模糊隶属度函数分析各最优解在每个目标函数中的满意度。

当求解目标函数的最大化值问题时,用式(9)所示最大值型模糊隶属度函数表示;当求解目标函数的最小化值问题时,用式(10)所示最小值型模糊隶属度函数表示。

$$h_j = \begin{cases} 0 & f_j \leq f_j^{\min} \\ (f_j - f_j^{\min}) / (f_j^{\max} - f_j^{\min}) & f_j^{\min} < f_j < f_j^{\max} \\ 1 & f_j \geq f_j^{\max} \end{cases} \quad (9)$$

$$h_j = \begin{cases} 1 & f_j \leq f_j^{\min} \\ (f_j^{\max} - f_j) / (f_j^{\max} - f_j^{\min}) & f_j^{\min} < f_j < f_j^{\max} \\ 0 & f_j \geq f_j^{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: f_j 为第*j*个目标函数值; $f_j^{\max}$ 、 $f_j^{\min}$ 分别为第*j*个目标函数的最大值、最小值; h_j 为第*j*个目标函数

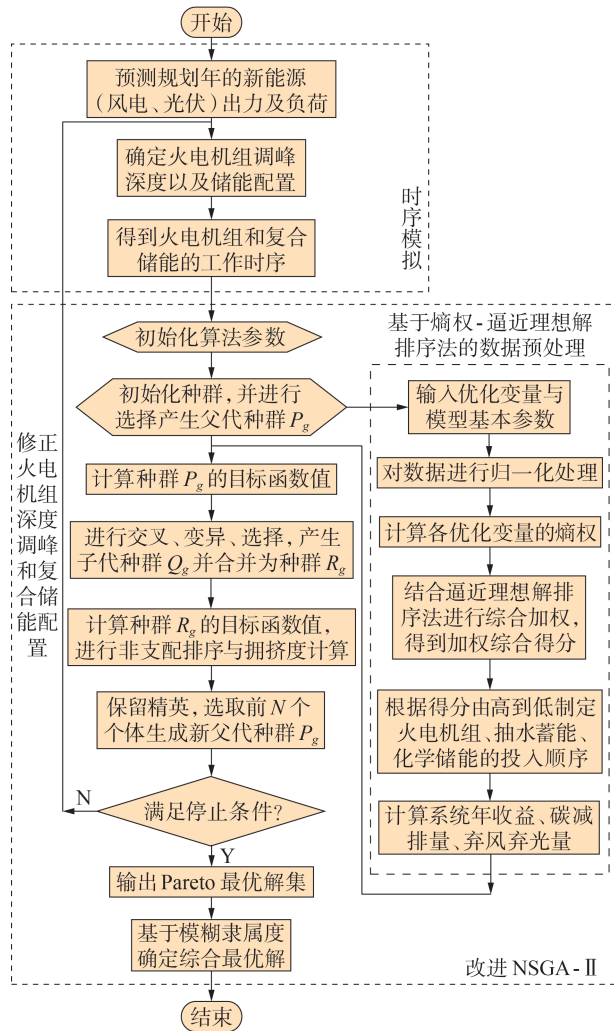


图2 基于改进NSGA-II的多目标规划模型的求解流程图

Fig.2 Flowchart of solving multi-objective planning model based on improved NSGA-II

的满意度。对于本文所提多目标优化问题:目标函数式(1)、(6)分别为系统年收益最大化、年碳排放量最大化,应选择最大值型隶属度函数;目标函数式(8)为弃风弃光量最小化,应选择最小值型隶属度函数。

Pareto最优解集中所有染色体的综合满意度 h 的计算式为:

$$h = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m h_j \quad (11)$$

式中: m 为目标函数的数量。 h 的值越大,表示满意

度越高。

4 算例分析

4.1 电网算例及参数

以上述省级电网2025年的数据为例进行火电机组深度调峰与复合储能协调规划。根据该省的“十四五”规划方案,2022年已建抽水蓄能机组的容量为3500 MW,至2025年该省可新建抽水蓄能的最大容量为2500 MW。新能源并网装机容量为38000 MW,其中风电装机容量为9000 MW,光伏装机容量为29000 MW,新能源装机占比约为40%。根据该电网2020、2021年的负荷、新能源实际出力数据,可预测得到2025年的负荷、新能源出力数据。

电源、储能、分时电价、火电机组改造等参数见附录D表D1和表D2。目前常用的化学储能有1 h储能以及2 h储能,由于该电网的新能源中光伏占比很高,午间出现消纳困难的时长大多为2~4 h,且2 h储能的单位造价更低,因此本文选用2 h储能,即设定化学储能的最大充放电时间 $\alpha_s=2$ h。抽水蓄能机组以额定功率运行时,下上水库从死水位到满水位(或从满水位到死水位)的抽/蓄时间 $\alpha_H=8$ h。

4.2 火电机组深度调峰与复合储能协调规划结果

采用改进NSGA-II进行多目标优化,算法参数设置如下:遗传算法的交叉概率为0.9,交叉分布指数为20,变异概率为0.1,变异分布指数为20,种群数量为100,最大迭代代数数为50。采用熵权法和逼近理想解排序法可以得到各灵活性资源的最优投入顺序为抽水蓄能→火电机组深度调峰→化学储能。火电机组深度调峰与复合储能协调规划的Pareto最优解集结果如附录D图D1和表1所示。

由图D1和表1可以得到如下结论。

1)多目标优化下最优解的综合满意度最高,为0.802。火电机组改造容量及调峰深度都达到上限,分别为20000 MW和30%;新建抽水蓄能机组容量为1964 MW,新建化学储能容量为403 MW·h,系统弃风弃光率为0.090%。

2)当以年收益最大化为目标进行单目标优化时,火电机组改造容量及调峰深度都达到上限,新建抽水蓄能机组容量为64 MW,系统弃风弃光率为0.273%,此时系统的弃风弃光量较大。这是因为火

表1 单目标优化和多目标优化的最优解

Table 1 Optimal solutions of single-objective optimization and multi-objective optimization

优化目标	火电机组 调峰深度/ %	火电机组 改造容量/ MW	新建抽水 蓄能机组 容量/MW	新建化学 储能容量/ (MW·h)	系统收益/ 亿元	碳减排量/ t	弃风弃光量/ (MW·h)	弃风弃光 率/%	综合 满意度
年收益最大化	30	20000	64	0	1158	228500	129049	0.273	0.333
年碳减排量最大化	—	0	2500	7000	1145	388000	128665	0.272	0.363
年弃风弃光量最小化	30	20000	2500	7000	1144	340500	9979	0.021	0.655
多目标优化	30	20000	1964	403	1156	319200	42770	0.090	0.802

电机组深度调峰改造的代价最小,故优先选择改造火电机组。新建抽水蓄能机组容量与系统年收益之间的关系曲线见图3。可以看出,当新建抽水蓄能机组容量为64 MW时,系统的经济性最优。

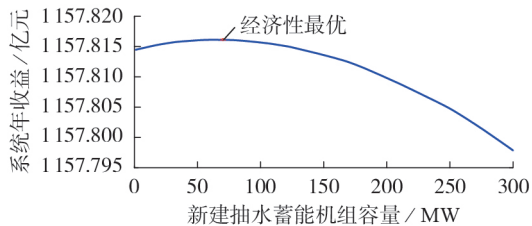


图3 新建抽水蓄能机组容量与系统年收益之间的关系曲线

Fig.3 Relationship curve between capacity of newly built pumped storage unit and system annual revenue

3)当以年碳减排量最大化为目标进行单目标优化时,不对火电机组进行灵活性改造,新建化学储能、抽水蓄能机组容量分别为70 000 MW·h、2 000 MW,均达到最大值。这是因为火电机组深度调峰会使得单位发电燃煤增加从而导致碳排放量增加,而抽水蓄能与化学储能可以带来碳减排收益。

4)当以年弃风弃光量最小化为目标进行单目标优化时,所有调峰手段均达到上限值,此时系统的弃风弃光量最小。

4.3 基于熵权法改进NSGA-II的优势

为了验证本文基于熵权法改进NSGA-II的优势,仍以上述电网2025年的数据为场景,采用传统NSGA-II与改进NSGA-II进行多目标优化迭代,结果见图4。2种算法的Pareto最优解集见附录D

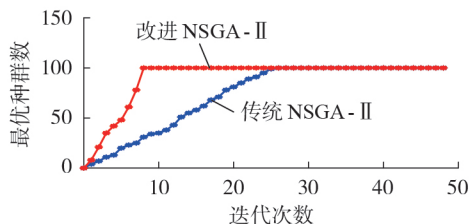


图4 传统NSGA-II与改进NSGA-II的迭代结果对比

Fig.4 Comparison of iteration process between traditional NSGA-II and improved NSGA-II

图D2。

由图4和图D2可以看出:①改进NSGA-II迭代

8次后即可收敛至最优解,而传统NSGA-II需要迭代25次才能收敛到最优解,因为达到收敛时的最优种群数是一致的,说明改进NSGA-II能加快算法的收敛速度,提高计算效率;②与传统NSGA-II相比,改进NSGA-II的Pareto最优解集分布更集中,说明最优解集的有效性更高。

采用改进NSGA-II和粒子群优化算法进行多目标优化迭代对比,Pareto最优解集如附录D图D3所示,最优解如表2所示。可以看出:改进NSGA-II的Pareto最优解集分布更集中,表明改进NSGA-II的有效性更高;与改进NSGA-II相比,粒子群优化算法所得优化方案中仅碳减排量较高,但系统收益偏低,且弃风弃光量明显偏高;且改进NSGA-II的综合满意度更高,表明改进NSGA-II所得结果更优。

表2 改进NSGA-II和粒子群优化算法所得最优解

Table 2 Optimal solutions obtained by improved NSGA-II and particle swarm optimization algorithm

算法	系统收益 / 亿元	碳减排量 / t	弃风弃光量 / (MW·h)	综合满意度
改进NSGA-II	1156	319 200	42 770	0.802
粒子群优化算法	1148	332 100	75 943	0.693

4.4 远景年多目标协调规划结果

进一步研究该省远景年(2030年)的火电机组深度调峰改造与复合储能协调规划方案。根据该省2022年的实际新能源装机以及“十四五”规划,假设新能源按照该速度匀速增长,则2030年该电网的新能源装机为总装机的51%,其中风电装机容量约为13 800 MW,光伏装机容量约为44 000 MW。

该省能源局发布的《抽水蓄能中长期发展规划报告》中指出:到2030年需新增抽水蓄能装机容量约9 500 MW。受建设速度、投资成本、自然资源等因素的影响,假设至2030年新建抽水蓄能机组规模上限约为7 500 MW。同时假设2030年该省的化学储能配置规模上限为10 GW,火电机组可参与改造的容量和调峰深度上限分别为20 GW和30%。基于上述数据,可得2030年火电机组深度调峰改造与复合储能协调规划结果,见附录D图D4和表3。

由图D4和表3可得如下结论。

1)2030年该省协调规划最优解为:火电机组深度调峰容量和深度均达到上限,新建抽水蓄能机组

表3 远景年的单目标优化和多目标优化的最优解

Table 3 Optimal solutions of single-objective optimization and multi-objective optimization for forward level year

优化目标	火电机组调峰深度 / %	火电机组改造容量 / MW	新建抽水蓄能机组容量 / MW	新建化学储能容量 / (MW·h)	系统收益 / 亿元	碳减排量 / t	弃风弃光率 / %	综合满意度
年收益最大化	30	20 000	7 500	0	1 446	1 360 000	0.579	0.910
年碳减排量最大化	—	0	7 500	10 000	1 433	1 560 000	0.671	0.827
年弃风弃光量最小化	30	20 000	7 500	10 000	1 429	1 460 000	0.225	0.825
多目标优化	30	20 000	7 500	1 224	1 443	1 430 000	0.406	0.950

容量也达到上限,同时需配置1224 MW·h的化学储能。这体现了在化学储能成本下行之前,火电机组深度调峰与建设抽水蓄能仍是首选措施。

2)当以年收益最大化为目标进行单目标优化时,火电机组深度调峰容量和深度均达到上限,同时新建抽水蓄能机组容量也达到上限,但新建化学储能容量为0。这是因为新建化学储能的代价较大,一般最后使用该手段。

3)当以年碳减排量最大化为目标进行单目标优化时,火电机组深度调峰改造容量为0,储能配置均达到上限。而当以年弃风弃光量最小化为目标进行单目标优化时,所有调峰手段都达到上限,系统的弃风弃光量最小。

4)与2025年的协调规划方案相比,2030年各目标下的抽水蓄能机组容量、化学储能配置容量均明显增大,这是因为新能源占比显著提高,电网的调峰压力越来越大,火电机组深度调峰达到上限时,需要配置更多的储能设备来辅助调峰。

5 结论

本文从电网经济性、碳减排、弃风弃光量3个方面,构建了火电机组深度调峰与复合储能协调的多目标规划模型。提出了基于熵权法对原始数据进行预处理的改进NSGA-II对模型进行求解,并基于模糊隶属度函数获得Pareto最优解集中的最优解。相较于传统NSGA-II,所提改进NSGA-II的迭代次数少,求解速度快,且所得Pareto最优解集分布更集中,有效性更高。相较于粒子群优化算法,所提改进NSGA-II的有效性更好,且结果更优。以某省级电网2025年以及2030年的预测数据为例,进行火电机组调峰深度与复合储能协调规划,所得结论如下。

1)由于火电机组深度调峰、化学储能、抽水蓄能这3类灵活性资源在时空上的能量转移特性不同,对三者进行协调规划有利于满足系统不同时间尺度的调峰需求。

2)本文建立的多目标优化模型在满足调峰需求的同时,提高了系统的碳减排能力和新能源接纳能力,对未来电网的低碳经济运行具有显著的推动作用。当以经济最优进行单目标优化时,系统的弃风弃光率较高。

3)由2025年及2030年的规划方案可知,火电机组深度调峰改造容量和调峰深度都达到上限,说明火电机组深度调峰是抽水蓄能机组建设过程中,电池储能成本进一步下降前首选的灵活性资源。

4)对比“十四五”规划方案发现:2025年化学储能的建设速度基本能满足调峰需求,抽水蓄能新建容量仍有裕度;但至2030年,抽水蓄能规划容量已达到上限,当受自然资源的影响而无法进一步新建

抽水蓄能机组时,大力发展化学储能并进一步挖掘其他灵活性资源是未来该电网的必然选择。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 李运龙,李志刚,郑杰辉. 考虑风电不确定性和相关性的多区域电网分布鲁棒经济调度[J]. 电力自动化设备,2021,41(8): 97-104.
LI Yunlong, LI Zhigang, ZHENG Jiehui. Distributionally robust economic dispatch of multi-regional power grid considering uncertainty and correlation of wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8): 97-104.
- [2] 马静洁,张少华,李雪,等. 发电系统充裕度与灵活性的随机评估[J]. 电网技术,2019,43(11):3867-3874.
MA Jingjie, ZHANG Shaohua, LI Xue, et al. Stochastic assessment of adequacy and flexibility of power generation systems[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3867-3874.
- [3] BILL M. Review of February 2021 extreme cold weather event-ERCOT presentation[R]. [S.l.]: ERCOT Public, 2021.
- [4] 曾辉,孙峰,李铁,等. 澳大利亚“9·28”大停电事故分析及对中国启示[J]. 电力系统自动化,2017,41(13):1-6.
ZENG Hui, SUN Feng, LI Tie, et al. Analysis of “9·28” blackout in South Australia and its enlightenment to China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 1-6.
- [5] 李星梅,钟志鸣,阎洁. 大规模风电接入下的火电机组灵活性改造规划[J]. 电力系统自动化,2019,43(3):51-57.
LI Xingmei, ZHONG Zhiming, YAN Jie. Flexibility reformation planning of thermal power units with large-scale integration of wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 51-57.
- [6] 杨寅平,曾沅,秦超,等. 面向深度调峰的火电机组灵活性改造规划模型[J]. 电力系统自动化,2021,45(17):79-88.
YANG Yinping, ZENG Yuan, QIN Chao, et al. Planning model for flexibility reformation of thermal power units for deep peak regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(17): 79-88.
- [7] 张东辉,康重庆,卢洵,等. 高比例新能源系统中储能配置规模论证[J]. 南方电网技术,2022,16(4):3-11.
ZHANG Donghui, KANG Chongqing, LU Xun, et al. Demonstration on the scale of energy storage deployment in high-proportion new energy power system[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(4): 3-11.
- [8] 孟源,樊小朝,史瑞静,等. 基于机会约束及N-1安全约束的风光联合储能系统选址定容优化[J]. 电网技术,2021,45(5): 1886-1893.
MENG Yuan, FAN Xiaochao, SHI Ruijing, et al. Optimization of location and capacity for wind-solar-energy storage combined system based on chance constraints and N-1 security constraints[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1886-1893.
- [9] 罗仕华,胡维昊,黄琦,等. 市场机制下光伏/小水电/抽水蓄能电站系统容量优化配置[J]. 电工技术学报,2020,35(13): 2792-2804.
LUO Shihua, HU Weihao, HUANG Qi, et al. Optimization of photovoltaic / small hydropower / pumped storage power station system sizing under the market mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(13): 2792-2804.
- [10] 程孟增,唐一金,商文颖,等. 风-光-火-抽蓄联合系统中抽水蓄能电站最佳容量配置[J]. 电力建设,2021,42(11):72-81.

- CHENG Mengzeng, TANG Yijin, SHANG Wenying, et al. Optimal capacity configuration of pumped-storage power station in wind-PV-fire-pump storage system[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(11): 72-81.
- [11] 齐晓光, 姚福星, 朱天瞳, 等. 考虑大规模风电接入的电力系统混合储能容量优化配置[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 11-19.
- QI Xiaoguang, YAO Fuxing, ZHU Tiantong, et al. Capacity optimization configuration of hybrid energy storage in power system considering large-scale wind power integration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 11-19.
- [12] 朱晓荣, 山雨琦. 考虑灵活性的储能容量多阶段分布鲁棒规划[J/OL]. 电力自动化设备. [2022-10-20]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202206007>.
- [13] 张尧翔, 刘文颖, 李潇, 等. 高比例新能源接入电网光热发电-火电联合调峰优化控制方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 1-7, 32.
- ZHANG Yaoliang, LIU Wenying, LI Xiao, et al. Optimal control method of peak load regulation combined concentrating solar power and thermal power for power grid accessed with high proportion of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 1-7, 32.
- [14] 鲁鹏飞, 薛宁. 超临界锅炉超低负荷调峰运行稳燃改造方案研究[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 87-92.
- LU Pengfei, XUE Ning. Flame stability upgrading scheme of supercritical boilers for ultra-low load peak regulation operation[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 87-92.
- [15] 吕思, 卫志农, 马骏超, 等. 基于多目标优化的电力-交通系统协同运行分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12): 98-106.
- LÜ Si, WEI Zhinong, MA Junchao, et al. Analysis on coordinated power-transportation system operation based on multi-objective optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 98-106.
- [16] 黄伟, 熊伟鹏, 华亮亮, 等. 基于动态调度优先级的主动配电网多目标优化调度[J]. 电工技术学报, 2018, 33(15): 3486-3498.
- HUANG Wei, XIONG Weipeng, HUA Liangliang, et al. Multi-objective optimization dispatch of active distribution network based on dynamic schedule priority[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(15): 3486-3498.
- [17] 韩笑, 周明, 李庚银. 计及储能和空调负荷的主动配电网多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 14-23.
- HAN Xiao, ZHOU Ming, LI Gengyin. Multi-objective optimal dispatching of active distribution networks considering energy storage systems and air-conditioning loads[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 14-23.
- [18] 路艳雪, 赵超凡, 吴晓峰, 等. 基于改进的NSGA-II多目标优化方法研究[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(6): 1733-1737.
- LU Yanxue, ZHAO Chaofan, WU Xiaofeng, et al. Multi-objective optimization method research based on improved NSGA-II[J]. Application Research of Computers, 2018, 35(6): 1733-1737.
- [19] 陈雷, 王延章. 基于熵权系数与TOPSIS集成评价决策方法的研究[J]. 控制与决策, 2003, 18(4): 456-459.
- CHEN Lei, WANG Yanzhang. Research on TOPSIS integrated evaluation and decision method based on entropy coefficient[J]. Control and Decision, 2003, 18(4): 456-459.
- [20] 韩利, 梅强, 陆玉梅, 等. AHP-模糊综合评价方法的分析与研究[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(7): 86-89.
- HAN Li, MEI Qiang, LU Yumei, et al. Analysis and study on AHP-fuzzy comprehensive evaluation[J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(7): 86-89.

作者简介:

朱健宇(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为电网规划、新能源并网及消纳分析(E-mail: 849912758@qq.com);
潘学萍(1972—),女,教授,博士研究生导师,主要研究方向为新能源电力系统建模与分析(E-mail: xueping_pan@hhu.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Coordinated planning of thermal generator deep peak regulation and composite energy storage considering carbon emission reduction and new energy consumption

ZHU Jianyu¹, PAN Xueping¹, WANG Zhengfeng², WANG Jiwen², SUN Xiaorong¹, SHI Wen¹, QIN Jinghui¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230061, China)

Abstract: Thermal generator deep peak regulation, chemical energy storage and pumped storage are important components of the flexibility resources in power grid. The coordinated planning of these three flexibility resources can ensure the safe and low-carbon operation of power grid and improve the acceptance capacity of new energy. From three aspects of economy, carbon emission reduction and wind and photovoltaic curtailment, a multi-objective coordinated planning model of thermal generator deep peak regulation and composite energy storage is constructed. An improved non-dominated sorting genetic algorithm-II (NSGA-II) based on entropy weight is proposed to solve the multi-objective planning model. The Pareto optimal solution set is obtained, and the comprehensive optimal solution is obtained according to fuzzy membership degree. Taking the predicted data of a provincial power grid in 2025 and 2030 as the example, the simulative results show that the improved NSGA-II can improve the solving speed and accuracy of the multi-objective optimization. The coordination of thermal generator deep peak regulation and composite energy storage configuration can significantly reduce the wind and photovoltaic curtailment rate, which is conducive to low-carbon and economic operation of power system.

Key words: thermal generators; deep peak regulation; composite energy storage; carbon emission reduction; new energy consumption; multi-objective optimization; coordinated planning; improved NSGA-II

附录 A

表 A1 不同类型机组在不同负荷率峰值下的供电煤耗

Table A1 Coal consumption of power supply under different load rate with different types of generators

机组类型	容量/MW	供电煤耗/[g·(kW·h) ⁻¹]			
		负荷率为 100%	负荷率为 75%	负荷率为 50%	负荷率为 40%
300MW 亚临界	350	304.32	309.74	323.34	330.60
600MW 超临界	630	292.69	296.41	305.66	310.80
600MW 超超临界	660	286.48	292.65	306.27	313.73
1000MW 超超临界	1000	176.93	279.71	292.28	300.22

约束条件包括系统的功率平衡约束、电池储能出力约束与电量平衡约束、抽水蓄能出力约束与库容约束以及储能日清约束。

1) 系统功率平衡约束。

$$P_{t,i} + P_{n,i} + (\mu^{\text{gen}} P_{p,i} - \mu^{\text{pum}} P_{p,i}) + (\mu_n^c P_{s,i} - \mu_n^d P_{s,i}) - P_{d,i} = P_{L,i} + P_{\text{tie},i} \quad (\text{A1})$$

式中： μ^{pum} 为 0-1 变量，且满足 $\mu^{\text{pum}} \mu^{\text{gen}} = 0$ ， μ^{pum} 为抽水标志，抽水时值为 1，不抽水时值为 0； μ_n^c 为 0-1 变量，且满足 $\mu_n^c \mu_n^d = 0$ ， μ_n^c 为化学储能充电标志，充电时值为 1，不充电时值为 0； $P_{L,i}$ 为 i 时刻系统负荷； $P_{\text{tie},i}$ 为 i 时刻省际交换功率，以流出为正。

2) 电池储能电量平衡约束与日清约束^[17]。

$$E_{s,i} = E_{s,i-1} + T_s \left(\mu_n^c P_{s,i} \eta_c + \frac{\mu_n^d P_{s,i}}{\eta_d} \right) \quad (\text{A2})$$

$$\begin{cases} E_{s,\min} \leq E_{s,i} \leq E_{s,\max} \\ E_{s,96(x)} = E_{s,96(x-1)} \quad x = 1, 2, \dots, 365 \end{cases} \quad (\text{A3})$$

式中： $E_{s,i}$ 为 i 时刻电池储存的电量值； T_s 为单位时间； η_c 和 η_d 分别为电池储能的充、放电效率；由于过充与过放都会影响化学储能的使用寿命，故 $E_{s,\min}$ 与 $E_{s,\max}$ 分别为电池储能存储电量下限值与上限值；电池储能采用日平衡约束， x 表示第 x 天。

3) 电池储能出力约束^[17]。

$$\max \left\{ -P_{\text{sn}}, \frac{E_{s,i} - E_{s,\max}}{T_s} \eta_d \right\} \leq P_{s,i} \leq \min \left\{ P_{\text{sn}}, \frac{E_{s,i} - E_{s,\min}}{T_s \eta_c} \right\} \quad (\text{A4})$$

$$E_{\text{cs}} = \alpha_s P_{\text{sn}} \quad (\text{A5})$$

式中： P_{sn} 为电池储能额定功率，电池储能吸收与放电功率都需小于其额定功率，且满足电池中剩余电量的约束； α_s 为电池储能最大充/放电时间。

4) 抽水蓄能库容约束与日清约束^[15]。

$$\begin{cases} E_{H,\min} \leq E_{H,i} \leq E_{H,\max} \\ E_{H,96(x)} = E_{H,96(x-1)} \quad x = 1, 2, \dots, 365 \end{cases} \quad (\text{A6})$$

$$E_{H,i} = E_{H,i-1} + T_s \left(\mu^{\text{pum}} P_{p,i} \eta^{\text{pum}} - \frac{\mu^{\text{gen}} P_{p,i}}{\eta^{\text{gen}}} \right) \quad (\text{A7})$$

式中： $E_{H,i}$ 为 i 时刻抽水蓄能电站的蓄水量； $E_{H,\min}$ 和 $E_{H,\max}$ 分别为抽水蓄能电站上水库最小蓄水量与最大蓄水量； η^{pum} 和 η^{gen} 分别为抽水和发电效率。

5) 抽水蓄能机组出力约束^[15]。

$$\max \left\{ -P_H, \frac{E_{H,i} - E_{H,\max}}{T_s} \eta^{\text{pum}} \right\} \leq P_{p,i} \leq \min \left\{ P_H, \frac{E_{H,i} - E_{H,\min}}{T_s \eta^{\text{gen}}} \right\} \quad (\text{A8})$$

$$E_{\text{cH}} = \alpha_H P_H \quad (\text{A9})$$

式中： α_{H} 为抽蓄机组在额定功率下上水库从死水位到满水位（或者从满水位到死水位）的抽/蓄时间； E_{CH} 为抽蓄上水库额定蓄水量。

附录 B

火电机组深度调峰和复合储能协调多目标规划模型的求解步骤如下：

- 1) 根据风电出力、光伏出力以及负荷历史数据，预测规划年的风电出力、光伏出力以及负荷时间序列；
- 2) 配置火电机组调峰深度和复合储能容量，并进行时序模拟，得到火电机组以及复合储能的工作时序；
- 3) 采用改进 NSGA-II 进行多目标优化求解，获得优化结果；
- 4) 若满足优化停止条件，则输出优化结果；若不满足优化停止条件，则返回步骤 2)，修正火电机组调峰深度和复合储能配置，重新优化。

NSGA-II 采用快速非支配排序技术、拥挤度比较算子和精英策略获得分布均匀、多样性良好的 Pareto 最优解集。该算法具有鲁棒性好、计算效率高等优点，能够处理非线性多目标优化问题。为了提升对待优化变量的处理速度和效率，本文采用熵权法结合逼近理想解排序法对数据进行预处理，用于提升算法效率。改进 NSGA-II 的求解流程如下：

- 1) 初始化种群产生父代；
- 2) 基于熵权法和逼近理想解排序法对输入数据进行预处理，得到各决策变量的加权综合得分，根据得分制定火电深度调峰、抽蓄、化学储能的投入顺序；
- 3) 采用改进 NSGA-II 求解多目标优化模型，得到 Pareto 最优解集；
- 4) 采用模糊隶属度法确定综合最优解。

附录 C

基于熵权法和逼近理想解排序法的数据预处理过程如下。

- 1) 数据归一化。

为了消除因量纲不同对评价结果的影响，需要对各指标进行归一化或者标准化处理，具体如下：

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (\text{C1})$$

式中： x_{ij} 为第 i 个待优化变量的第 j 个目标函数值； p_{ij} 为 x_{ij} 的归一化结果； m 和 n 分别为目标函数个数以及待优化变量数。

- 2) 计算待优化变量的信息熵 e_j 、效用价值 d_j 与熵权 w_j [1]，具体如下：

$$\begin{cases} e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \\ d_j = 1 - e_j \\ w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \end{cases} \quad (\text{C2})$$

- 3) 采用逼近理想解排序法 [19] 确定最优方案。

采用逼近理想解排序法求解多目标决策问题时，需要在目标空间中定义一个测度，以度量某个解靠

近正理想解和远离负理想解的程度。其中心思想是先选定一个理想解和一个负理想解，然后找出与理想解距离最近且与负理想解距离最远的方案作为最优方案。

对于目标函数值越大越好的正理想目标，其正理想解为：

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_j\}}{\max\{x_j\} - \min\{x_j\}} \quad (C3)$$

对于目标函数值越小越好的负理想目标，其负理想解为：

$$x'_{ij} = \frac{\max\{x_j\} - x_{ij}}{\max\{x_j\} - \min\{x_j\}} \quad (C4)$$

式中： x'_{ij} 为所有理想解，包括正理想解和负理想解； x_j 为所有待优化变量的第 j 个目标函数值的集合。

4) 规范化矩阵。

$$z_{ij} = x'_{ij} w_j \quad (C5)$$

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1m} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{nm} \end{bmatrix} \quad (C6)$$

式中： z_{ij} 为加权后的 x'_{ij} ； $\mathbf{Z}$ 为综合加权指标矩阵。

5) 计算最优最劣解与最优最劣解的距离。

$$\begin{cases} z^+ = \{\max\{z_{i1}\}, \cdots, \max\{z_{im}\}\} = (z_{ij}^+) \\ z^- = \{\min\{z_{i1}\}, \cdots, \min\{z_{im}\}\} = (z_{ij}^-) \\ D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_{ij} - z_{ij}^+)^2} \\ D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_{ij} - z_{ij}^-)^2} \end{cases} \quad (C7)$$

式中： z^+ 为最优解； z^- 为最劣解； D_i^+ 为最优距离； D_i^- 为最劣距离。

6) 计算加权综合得分。

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (C8)$$

式中： C_i 表示第 i 个变量的综合得分，取值区间为(0,1)，越接近 1，评价对象越接近最优水平，综合得分越高。

附录 D

截至 2022 年该省级电网火电发电装机容量约为 57000MW，由于新能源并网装机越来越多导致火电机组逐步关停，且部分火电机组设备老旧无法进行灵活性改造，故预计至多有 20000MW 的火电机组可进行不同程度的灵活性改造。设至 2025 年该省级电网化学储能配置规模上限为 7000 MW·h，抽蓄机组新建规模上限为 2500MW，至多 20000MW 火电机组可参与深度调峰，深度调峰负荷率最低可至 30%。

燃煤发电机组标杆上网电价（含脱硫、脱硝、除尘）为 0.3844 元/(kW·h)。根据国家发展改革委发布《关于 2022 年新建风电、光伏发电项目延续平价上网政策的函》，2022 年对新核准陆上风电项目、新备案集中式光伏电站和工商业分布式光伏项目，延续平价上网政策，上网电价按当地燃煤发电基准价执行。火电深度调峰时补偿费用，按照负荷在 40%~50%基本负荷时按照 0.3 元/(kW·h)的补偿标准计算，负荷在 30%~40%基本负荷按照 0.7 元/(kW·h)补偿标准计算。

表 D1 调峰设备参数
Table D1 Parameters of peak regulating equipment

调峰设备	变量	数值	变量	数值
抽蓄	k_H	6 万元/MW	η^{gen}	0.9
	k_{nH}	600 万元/MW	$E_{H,\min}$	$0.1E_{eH}$
	m_H	30 年	$E_{H,\max}$	$0.9E_{eH}$
	η^{pum}	0.85	E_{eH}	$8P_H$
化学储能	v	0.04	η_d	95%
	k_{es}	150 万元/(MW·h)	$E_{s,\min}$	$0.1E_{es}$
	n_s	4500	$E_{s,\max}$	$0.9E_{es}$
	η_c	95%	P_{sn}	$0.5 E_{es}$
火电机组	k_{nf}	0.3kg/(kW·h)	k_{td}	0.4 元/(kW·h)
	k_{df}	0.035kg/(kW·h)	k_b	0.386 元/(kW·h)
	k_{df}	0.020kg/(kW·h)	k_d	1 元/(kW·h)
	k_{td}	0.7 元/(kW·h)	a	365

表 D2 分时电价
Table D2 Time-of-use electricity price

	时段	电价/（元/(kW·h)）
低谷	00:00—08:00, 23:00—24:00	0.4536
平段	08:00—09:00, 12:00—17:00, 22:00—23:00	0.7303
高峰	09:00—12:00, 17:00—22:00	1.088

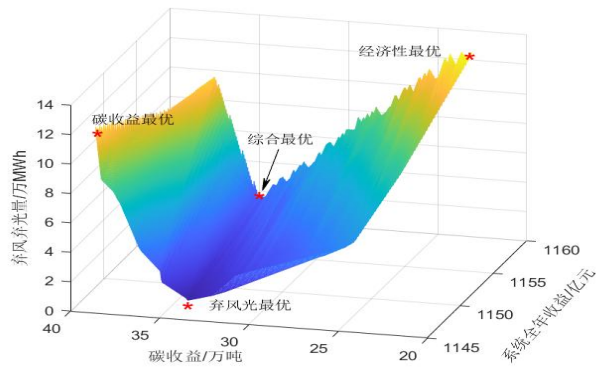


图 D1 2025 年多目标协调规划的 Pareto 最优解集

Fig.D1 Pareto optimal solution set under multi-objective coordinated planning for year 2025

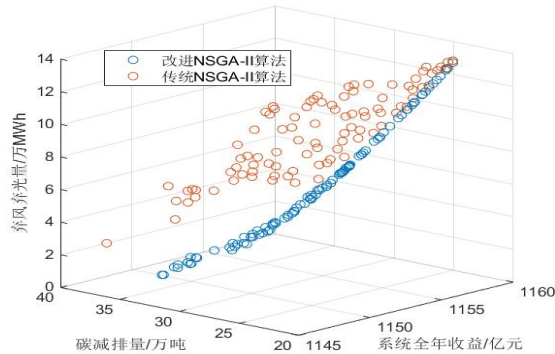


图 D2 传统 NSGA- II 与改进 NSGA- II 的 Pareto 前沿

Fig.D2 Pareto frontier of traditional NSGA- II and improved NSGA- II

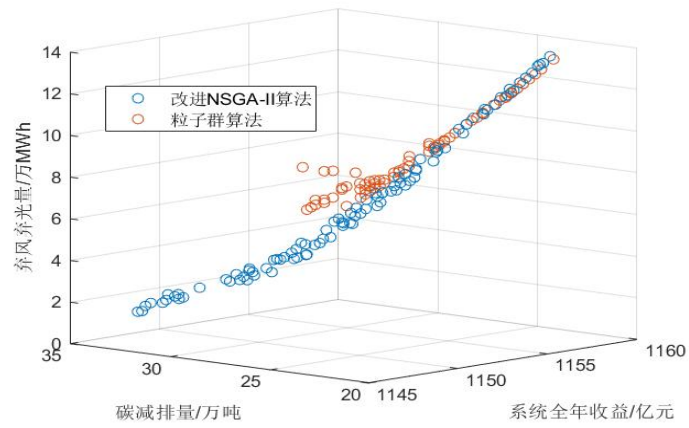


图 D3 改进 NSGA- II 与粒子群优化算法的 Pareto 前沿

Fig.D3 Pareto frontier of improved NSGA- II and particle swarm optimization algorithm

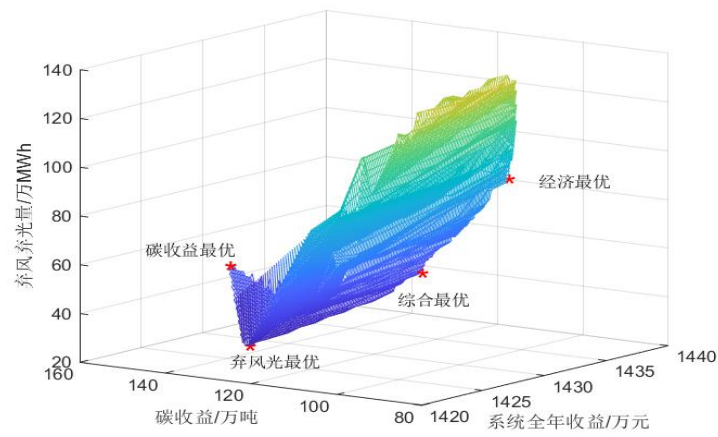


图 D4 远景年多目标协调规划的 Pareto 最优解集

Fig.D4 Pareto optimal solution set under multi-objective coordinated planning for forward level year