

6-23-2021

Deep Peak-shaving Transformation Planning of Thermal Power Units Based on Approximate Dynamic Programming

Weiqing Sun

1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; ;

Song He

1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; ;

Han Dong

1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; ;

Kunpeng Tian

2. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Deep Peak-shaving Transformation Planning of Thermal Power Units Based on Approximate Dynamic Programming

Abstract

Abstract: The generation of renewable energy has great randomness. The lack of flexibility of thermal power unit leads to the problem of peak adjustment. Three reformation schemes for thermal power units, including the thermal power unit internal transformation, configuring energy storage, and joint transformation of the two are proposed. *Taking into account the additional cost of thermal powerunit in the deep peak regulation, the planning model of thermal power units depth peak-shaving transformation considering the unit combination is proposed, and the strategy iteration approximate dynamic programming algorithm to decouple the model is presented. The "curses of dimensionality" can be avoided effectively by replacing the exact value function in DP method with the approximate value function.* Case study on improved 9-bus test system shows that the proposed model and method are effective. The results show that using SI-ADP to solve the model can obtain the economic optimal transformation strategy under different transformation schemes.

Keywords

flexibility of thermal power units, deep peak-shaving transformation, approximate dynamic programming, renewable energy consumption, energy storage, unit commitment

Recommended Citation

Sun Weiqing, Song He, Han Dong, Tian Kunpeng. Deep Peak-shaving Transformation Planning of Thermal Power Units Based on Approximate Dynamic Programming[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(6): 1415-1426.

火电深度调峰改造近似动态规划方法

孙伟卿¹, 宋赫¹, 韩冬¹, 田坤鹏²

(1. 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093; 2. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 可再生能源发电具有较强的随机性, 针对火电机组灵活性不足而导致的调峰问题, 提出对火电机组内部改造、配置储能和两者共同改造 3 种改造方案, 计及火电深度调峰运行的附加成本, 建立考虑机组组合问题的火电深度调峰改造规划模型, 提出策略迭代近似动态规划法(Strategy Iteration Approximate Dynamic Programming, SI-ADP)对模型进行解耦求解, 采用近似值函数替代传统动态规划法中精确值函数, 有效避免“维数灾”发生。以改进的 case9 节点系统验证模型和方法的有效性, 结果表明: 利用 SI-ADP 方法求解该模型可以得到不同改造方案下经济性最优的改造策略。

关键词: 火电机组灵活性; 深度调峰改造; 近似动态规划; 可再生能源消纳; 储能; 机组组合

中图分类号: TM743; TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2021) 06-1415-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0127

Deep Peak-shaving Transformation Planning of Thermal Power Units Based on Approximate Dynamic Programming

Sun Weiqing¹, Song He¹, Han Dong¹, Tian Kunpeng²

(1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The generation of renewable energy has great randomness. The lack of flexibility of thermal power unit leads to the problem of peak adjustment. Three reformation schemes for thermal power units, including the thermal power unit internal transformation, configurating energy storage, and joint transformation of the two are proposed. Taking into account the additional cost of thermal powerunit in the deep peak regulation, the planning model of thermal power units depth peak-shaving transformation considering the unit combination is proposed, and the strategy iteration approximate dynamic programming algorithm to decouple the model is presented. The “curses of dimensionality” can be avoided effectively by replacing the exact value function in DP method with the approximate value function. Case study on improved 9-bus test system shows that the proposed model and method are effective. The results show that using SI-ADP to solve the model can obtain the economic optimal transformation strategy under different transformation schemes.

Keywords: flexibility of thermal power units; deep peak-shaving transformation; approximate dynamic programming; renewable energy consumption; energy storage; unit commitment

引言

高比例可再生能源并网给电力系统带来巨大的调峰压力, 为缓解调峰困境, 我国《电力发展“十

三五”规划》中明确指出要全面推动煤电机组灵活性改造, 基于不同改造技术水平, 改造后机组不投油稳燃时最小技术出力达到 20%~45%额定容量。另一方面, 储能逐渐成为一种重要的调峰手段^[1]。

收稿日期: 2020-03-18 修回日期: 2020-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(51777126)

第一作者: 孙伟卿(1985-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统规划、智能电网、储能技术等。E-mail: sidswq@163.com

现阶段, 对于火电机组灵活性改造方面的研究, 文献[2]提出燃煤机组灵活性改造的技术主要包括提高低负荷稳燃能力、实现机组热电解耦等。文献[3]建立火电机组灵活性改造后提供的灵活性潜力模型。文献[4]利用 Benders 分解算法求解考虑火电机组灵活性改造的长期调度模型。对于火电机组深度调峰运行的经济性方面的研究, 文献[5]从火电企业、风电企业和社会角度分析大规模风电并网条件下, 不同调峰深度的经济性指标变化。文献[6]在全消纳的基础上, 以调度周期内火电机组总发电成本最小为目标, 建立基于分级深度调峰的电力系统经济调度模型。对于储能辅助调峰方面的研究, 主要从储能容量优化配置方面^[7-8]与储能运行优化控制方面^[9-10]解决储能辅助调峰问题。文献[11]以经济性最优及储能削峰填谷效果最优为目标, 提出储能辅助火电机组深度调峰的分层优化调度方案。

上述文献主要从技术和经济角度, 优化改造后火电机组出力^[12]、储能辅助调峰容量及储能充放电功率, 但鲜有从电源规划角度, 考虑火电灵活性改造对电源规划的影响。且为简化模型, 大多不计火电机组深度调峰运行(Deep Peak Regulation, DPR)的附加煤耗成本及机组寿命损耗成本, 忽略了关键因素对火电机组改造效果的影响。

目前 ADP 方法^[13]已成功应用于动态经济调度问题^[14-15]等, 但用于考虑机组组合的火电机组深度调峰改造规划问题鲜有研究。本文从电源规划的角度, 提出对火电机组内部改造、对火电机组配置储能和两者共同改造的 3 种改造方案, 分别建立含投资决策和调度运行决策的双层优化模型, 结合 SI-ADP 方法与混合整数二次规划法求解该模型, 分别得到 3 种改造方案下经济性最优的改造策略, 解决高比例可再生能源系统中, 何时、何地、投资何种类型及容量的机组对现有火电机组进行改造的经济性最优问题。

1 机组内部改造规划模型

为了促进可再生能源消纳, 缓解调峰压力, 考

虑发电成本、DPR 附加成本、启停成本、弃风弃光惩罚成本、投资改造费用, 建立火电机组内部深度调峰改造规划模型。假设机组内部改造方案下, 每台机组的改造一次性完成, 已完成改造的机组不再继续改造, 其收益来源于火电深度调峰改造后减少的机组启停费用和减少的弃风弃光惩罚费用。

1.1 目标函数

$$\min(f_p^{\text{DPR}} + f_{uc} + f_{wv} + f_{\text{internal}}) \quad (1)$$

$$f_p^{\text{DPR}} = \sum_{r=1}^n \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [f_i(P_{r,i,t}) + f_i^{\text{DPR}}(P_{r,i,t})] \quad (2)$$

$$f_i^{\text{DPR}}(P_{r,i,t}) = u_{r,i,t}^{\text{DPR}} (b_{r,i}^{\text{DPR}} - b_{r,\min,i}) f_i(P_{r,i,t}) \quad (3)$$

$$f_{uc} = \sum_{r=1}^n \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [u_{r,i,t}(1 - u_{r,i,t-1})c_{i,\text{up}} + u_{r,i,t-1}(1 - u_{r,i,t})c_{i,\text{down}}] = \sum_{r=1}^n \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [z_{r,i,t} \cdot c_{i,\text{up}} + y_{r,i,t} \cdot c_{i,\text{down}}] \quad (4)$$

$$f_{wv} = \sum_{r=1}^n \sum_{t=1}^T [c_{\text{wind}}(P_{\text{wind},r,t}^* - P_{\text{wind},r,t}) + c_{\text{pv}}(P_{\text{pv},r,t}^* - P_{\text{pv},r,t})] \quad (5)$$

$$f_{\text{internal}} = \sum_{r=1}^n \sum_{i=1}^N c_d \cdot x_{\text{ccap},r,i} \quad (6)$$

式(1)~(6)中: f_p^{DPR} 为考虑 DPR 运行状态的火电机组发电成本; f_{uc} , f_{wv} , f_{internal} 分别为火电机组的启停费用、弃风和弃光惩罚费用、投资改造费用; n 为规划年限; T 为调度时段数; N 为火电机组台数; f_i 为火电机组 i 发电成本函数; f_i^{DPR} 为火电机组 i 在 DPR 状态下的附加成本; $u_{r,i,t}^{\text{DPR}}$ 为第 r 年机组 i 在第 t 时段是否处于深度调峰运行状态的 0~1 决策变量; $b_{r,i}^{\text{DPR}}$, $b_{r,\min,i}$ 分别为第 r 年火电机组 i 改造后在 DPR 状态下和未改造在常规最小技术出力状态下的发电成本系数; $u_{r,i,t}$ 为第 r 年机组 i 在第 t 时段的运行状态变量, 为 0~1 决策变量; $z_{r,i,t}$, $y_{r,i,t}$ 为第 r 年机组 i 在第 t 时段的启停变量, 为 0~1 决策变量; $c_{i,\text{up}}$, $c_{i,\text{down}}$ 为机组 i 的单位启停费用; c_{wind} , c_{pv} 分别为单位弃风、弃光惩罚系数; $P_{r,i,t}$ 为第 r 年火电机组 i 在第 t 时段的出力, 为连续决策变量; $P_{\text{wind},r,t}$ 和 $P_{\text{pv},r,t}$ 分别为第 r 年风电、光伏机组在第 t

时段的实际出力值, 为连续决策变量; $P^*_{pv,r,t}$ 和 $P^*_{wind,r,t}$ 分别为第 r 年风电、光伏机组在第 t 时段的理论预测出力值; c_d 为单位容量的改造成本; $x_{ccap,r,i}$ 为第 r 年对火电机组 i 内部改造的容量, 为连续决策变量。

1.2 约束条件

式(7)~(11)分别为启停成本约束^[16]、最小启停时间约束、机组出力约束、爬坡约束、功率平衡约束:

$$\begin{cases} u_{r,i,t} - u_{r,i,t-1} \leq z_{r,i,t} \\ u_{r,i,t-1} - u_{r,i,t} \leq y_{r,i,t} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \sum_{\tau=\max(0,t-T_{i,off}+1)}^t z_{r,i,t} \leq u_{r,i,t} \\ \sum_{\tau=\max(0,t-T_{i,on}+1)}^t y_{r,i,t} \leq 1 - u_{r,i,t} \end{cases} \quad (8)$$

$$u_{r,i,t} (P_{i,\min} - \sum_{m=1}^{r-1} x_{ccap,m,i}) \leq P_{r,i,t} \leq u_{r,i,t} \cdot P_{i,\max} \quad (9)$$

$$\begin{cases} P_{r,i,t} - P_{r,i,t-1} \leq R_{U,i} \cdot \Delta t \cdot u_{r,i,t-1} + P_{i,\min} \cdot z_{r,i,t} \\ P_{r,i,t-1} - P_{r,i,t} \leq R_{D,i} \cdot \Delta t \cdot u_{r,i,t} + P_{i,\min} \cdot y_{r,i,t-1} \end{cases} \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^N P_{r,i,t} + P_{wind,r,t} + P_{pv,r,t} = L_{r,t} \quad (11)$$

式中: $T_{i,on}$, $T_{i,off}$ 为机组 i 的最小持续运行、停机时间; $P_{i,\min}$, $P_{i,\max}$ 为机组 i 不投油稳燃时最小技术出力、最大技术出力; $R_{U,i}$, $R_{D,i}$ 为机组 i 的上爬坡率、下爬坡率。

式(12)~(14)为投资改造决策变量约束:

$$0 \leq x_{ccap,r,i} \leq u_{ccap,r,i} \cdot P_{i,\min} \cdot c^0 \quad (12)$$

$$0 \leq \sum_{i=1}^N u_{ccap,r,i} \leq 1 \quad (13)$$

$$0 \leq \sum_{r=1}^n u_{ccap,r,i} \leq 1 \quad (14)$$

$$\begin{cases} 0 \leq u_{r,i,t}^{DPR} \leq \sum_{m=1}^{r-1} u_{ccap,m,i} \\ u_{r,i,t}^{DPR} (P_{i,\min} - P_{r,i,t}) \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $u_{ccap,r,i}$ 为第 r 年对第 i 台火电机组是否进行改造的 0~1 决策变量; $c^0 P_{i,\min}$ 表示火电机组 i 最

大可改造的容量。式(13)表示一年只对一台火电机组进行内部改造式(14)表示一台火电机组在规划年限 n 年内只能改造一次; 式(15)表示改造后的深度调峰运行状态约束。

需要说明的是, 考虑机组组合的深度调峰改造规划问题中存在年内多次短期调度问题, 且日调度运行子问题为混合整数非线性规划问题, 模型复杂, 计算量大。为简化计算, 每年选取多个典型日近似求解当年的系统总运行费用。为分析规划问题的经济性, 从价值评估的角度, 将投资改造成本转化为等年值, 利用贴现率将每年的投资改造费用与系统总运行费用折算至同一时间尺度下, 对比规划期内的总费用。

2 机组配置储能的改造规划模型

考虑储能的运行特性, 以系统发电成本、启停成本、弃风弃光惩罚成本、储能投资改造费用、运行维护费用、峰谷差价套利的总费用最小为优化目标, 建立考虑储能配置的火电机组改造规划模型。火电机组配置储能方案下, 火电机组不存在深度调峰运行状态, 假设每台火电机组的改造可根据年负荷增长、年电源装机情况分阶段性配置不同容量的储能装置, 其收益来源于火电深度调峰改造后减少的火电机组启停费用、减少的弃风弃光惩罚费用、峰谷差价套利。

2.1 目标函数

$$\min(f_p + f_{uc} + f_{wv} + f_{ess}) \quad (16)$$

$$f_p = \sum_{r=1}^n \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N f_i(P_{r,i,t}) \quad (17)$$

$$f_{ess} = f_{ess1} - f_{ess2} \quad (18)$$

$$f_{ess1} = \sum_{r=1}^n (f_{invest,r} + f_{om,r}) =$$

$$\sum_{r=1}^n \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_{ess}} \left[(c_p \cdot P_{essN,r,j}^i + c_e \cdot E_{essN,r,j}^i) + (c_o + c_m) \cdot \sum_{m=1}^r (c_p \cdot P_{essN,m,j}^i + c_e \cdot E_{essN,m,j}^i) \right] \right] \quad (19)$$

$$f_{ess2} = \sum_{r=1}^n f_{ess2,r} = \sum_{r=1}^n \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_{ess}} \sum_{t=1}^T c_t (P_{dis_ess,r,j,t}^i - P_{ch_ess,r,j,t}^i) \quad (20)$$

式中： f_p , f_{uc} , f_{wv} , f_{ess1} , f_{ess2} 分别为火电机组的发电成本、启停费用、弃风弃光惩罚费用、储能投资改造费用和运行维护费用、储能峰谷套利收益； $f_{invest,r}$, $f_{om,r}$ 分别为第 r 年储能的总投资费用和运行维护费用； c_p , c_e , c_o , c_m 分别为储能的单位功率成本、单位容量成本、运行和维护成本系数； $P_{essN,r,j}^i$, $E_{essN,r,j}^i$ 分别为第 r 年配置在机组 i 的第 j 台储能的额定功率、额定容量； $f_{ess2,r}$ 为第 r 年的储能收益； c_t 为实时峰谷电价； $P_{i\ ch_ess,r,j,t}$, $P_{i\ dis_ess,r,j,t}$ 为第 r 年配置在机组 i 的第 j 台储能第 t 时段的充放电功率。

2.2 约束条件

$$u_{r,i,t} P_{i,\min} \leq P_{r,i,t} \leq u_{r,i,t} P_{i,\max} \quad (21)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N P_{r,i,t} + P_{wind,r,t} + P_{pv,r,t} - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_{ess}} P_{ess,r,j,t}^i = L_{r,t} \\ P_{ess,r,j,t}^i = u_{E,r,j,t}^i P_{ch_ess,r,j,t}^i - (1 - u_{E,r,j,t}^i) P_{dis_ess,r,j,t}^i \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} -P_{essN,r,j}^i \leq P_{ess,r,j,t}^i \leq P_{essN,r,j}^i \\ 0 \leq E_{ess,r,j,t}^i \leq E_{essN,r,j}^i \\ E_{ess,r,j,t}^i = E_{ess,r,j,t-1}^i + P_{ess,r,j,t}^i \end{cases} \quad (23)$$

$$0 \leq \sum_{i=1}^N u_{ess,r,i} \leq 1 \quad (24)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{essN,r,j}^i \leq u_{ess,r,i} P_{essN}^{\max} \\ 0 \leq E_{essN,r,j}^i \leq u_{ess,r,i} E_{essN}^{\max} \end{cases} \quad (25)$$

式中： $u_{i\ E,r,j,t}$ 为储能充放电状态的 0~1 变量；式(21), (22)分别为机组出力约束、功率平衡约束；启停成本约束、最小启停时间约束、爬坡约束同式(7), (8), (10), 不再赘述；式(23)为储能运行约束；式(24), (25)为投资改造决策变量约束，式(24)表示一年只对一台火电机组进行配置储能； $u_{ess,r,i}$ 为第 r 年对第 i 台火电机组是否进行配置储能的 0~1 决策变量； P_{essN}^{\max} , E_{essN}^{\max} 表示每次储能可配置的最大额定功率、最大额定容量。

3 共同改造规划模型

综合考虑火电机组 DPR 的运行特性和储能的运行特性，建立火电机组内部改造和配置储能共同改造的火电机组深度调峰改造规划模型。假设火电机组内部改造和配置储能共同改造方案下，每台机组既可以通过内部改造，也可以通过配置储能实现深度调峰改造，已完成内部改造的机组可继续分阶段性配置不同容量的储能装置，已完成配置储能的机组可继续进行内部改造或者配置储能。其收益来源于火电机组深度调峰改造后减少的机组启停费用、减少的弃风弃光惩罚费用、峰谷差价套利。

3.1 目标函数

$$\min(f_p^{\text{DPR}} + f_{uc} + f_{wv} + f_{ess} + f_{\text{internal}}) \quad (26)$$

式中： f_p^{DPR} 为考虑 DPR 运行状态的火电机组发电成本，同式(2), (3)； f_{uc} , f_{wv} , f_{internal} 分别为火电机组的启停、弃风弃光惩罚、内部改造投资费用，同式(4)~(6)； f_{ess} 为包含储能投资改造费用、运行维护费用、峰谷套利收益的储能总费用，同式(18)。

3.2 约束条件

$$0 \leq x_{ccap,r,i} \leq u_{ccap,r,i} \cdot P_{i,\min} \cdot c\% \quad (27)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{essN,r,j}^i \leq u_{ess,r,i} P_{essN}^{\max} \\ 0 \leq E_{essN,r,j}^i \leq u_{ess,r,i} E_{essN}^{\max} \end{cases} \quad (28)$$

$$0 \leq \sum_{i=1}^N (u_{ccap,r,i} + u_{ess,r,i}) \leq 1 \quad (29)$$

$$0 \leq \sum_{r=1}^n u_{ccap,r,i} \leq 1 \quad (30)$$

式中：启停成本约束、最小启停时间约束、机组出力约束、爬坡约束同式(7)~(10)；改造后深度调峰运行状态约束同式(15)；功率平衡约束同式(22)；储能运行约束同式(23)；式(27)~(30)为投资改造决策变量约束；式(29)表示一年只对一台火电机组进行内部改造或配置储能；式(30)表示已完成内部改造的机组不能继续进行内部改造，一台火电机组在规划年限 n 年内最多只能进行一次内部改造。

4 基于 SI-ADP 方法的模型求解

本文建立含投资决策主问题和经济调度运行子问题的双层优化模型, 外层投资决策变量包括 $u_{r,i,t}^{\text{DPR}}$, $u_{r,i,t}$, $x_{\text{ccap},r,i}$, $u_{\text{ess},r,i}$, $P_{\text{ess},r,j}^i$, $E_{\text{ess},r,j}^i$ 等, 内层决策变量包括 $P_{r,i,t}$, $P_{\text{wind},r,t}$, $P_{\text{pv},r,t}$, $P_{\text{ess},r,j,t}^i$, $E_{\text{ess},r,j,t}^i$ 等, 模型为高维数、非凸的、离散的、非线性的多阶段动态优化模型, 其求解方法主要有启发式算法、非线性规划法、动态规划法等。启发式算法易导致求解过程陷入局部最优解; 应用非线性规划, 通常使得函数及约束条件的线性化难度较大且存在误差; 动态规划对目标函数和约束没有线性或凸性等的严格限制, 且可直接处理模型中的离散变量^[17], 理论上能获得全局最优解, 但在大规模电力系统规划问题中存在“维数灾”的弊端。因此本文在动态规划理论的基础上, 采用 ADP 方法对模型进行求解, 有效解决维数灾问题。

利用 ADP 方法将本文的火电机组深度调峰改造规划问题转化为以近似值函数为变量的贝尔曼方程求解问题, 其本质上是一个解耦过程。采用策略迭代(Strategy Iteration, SI)方法对最优值函数近似, 在迭代次数上收敛快于值迭代, 每次迭代包括策略估计和策略改善, 从而各时段只有少量状态而非全部可行状态参与近似值函数的计算。因此, 本文采用 SI-ADP 方法对 3 种改造方案的火电机组深度调峰改造规划模型进行求解。

4.1 模型处理

为了便于应用 SI-ADP 方法对火电机组深度调峰改造问题进行求解, 需要对 3 种方案的火电机组深度调峰改造规划模型进行处理。SI-ADP 模型包括预决策状态 \mathbf{S}_k^r 、决策后状态 $\mathbf{S}_{x,k}^r$ 、决策函数 $xr k$ 、近似值函数 \tilde{V}_k^r , \hat{v}_k^r 等。SI-ADP 更新决策后状态的近似值函数的过程如图 1 所示, 其中圆圈表示预决策状态, 方块表示决策后状态, 两者之间的虚线表示相邻时段的转移。

结合 ADP 思想, 对机组内部改造规划模型进

行如下定义与处理:

(1) 目标函数:

$$\begin{aligned} & \min(f_p^{\text{DPR}} + f_{\text{uc}} + f_{\text{wv}} + f_{\text{internal}}) = \\ & \min \sum_{r=1}^n (C_1^r + C_2^r) = \min \sum_{r=1}^n C^r(\mathbf{S}_k^r, \mathbf{x}^r) \end{aligned} \quad (31)$$

式中: C_1^r , C_2^r 分别为第 r 年系统的总运行费用和改造费用; C^r 为第 r 年的总费用。

(2) 决策变量:

$$\mathbf{x}^r = x_{\text{ccap},r,i} \quad (32)$$

式中: $x_{\text{ccap},r,i}$ 为第 r 年对机组 i 内部改造的容量, 使状态变量高维, 采用疏密格子点法离散化降维;

(3) 预决策状态: 确定最优投资决策前, 第 k 次迭代时第 r 年系统电源结构的状态构成的向量。

$$\mathbf{S}_k^r = \left\{ \sum_{m=1}^{r-1} x_{\text{ccap},m,i}, P_{r,i}^N, P_{\text{wind},r}^N, P_{\text{pv},r}^N, L_{r,t} \right\} \quad (33)$$

式中: $P_{r,i}^N$, $P_{\text{wind},r}^N$, $P_{\text{pv},r}^N$ 分别为第 r 年火电机组 i 、风电、光伏的装机容量; $L_{r,t}$ 为第 r 年的时序负荷。

(4) 下一年的预决策状态:

$$\begin{aligned} & \mathbf{S}_k^{r+1} = \\ & \left\{ \sum_{m=1}^{r-1} x_{\text{ccap},m,i} + x_{\text{ccap},r,i}, P_{r+1,i}^N, P_{\text{wind},r+1}^N, P_{\text{pv},r+1}^N, L_{r+1,t} \right\} = \\ & \mathbf{S}_k^r + \mathbf{x}^r \end{aligned} \quad (34)$$

(5) 决策后状态: 确定第 k 次迭代时第 r 年的最优投资决策 \mathbf{x}_k^r 后, 系统电源结构的状态构成的向量。

$$\mathbf{S}_{x,k}^r = \mathbf{S}_k^r + \mathbf{x}_k^r \quad (35)$$

(6) 决策函数: 使 $F_S(\mathbf{S}_k^r, \mathbf{x}^r)$ 最小的决策为给定预决策状态 \mathbf{S}_k^r 的最优决策 \mathbf{x}_k^r 。

$$\begin{aligned} & \mathbf{x}_k^r = \arg \min F_S(\mathbf{S}_k^r, \mathbf{x}^r) = \\ & \arg \min \left[C^r(\mathbf{S}_k^r, \mathbf{x}^r) + \alpha \tilde{V}_{k-1}^r(\mathbf{S}_{x,k}^r) \right] \end{aligned} \quad (36)$$

式中: \tilde{V}_{k-1}^r 为决策后状态 $\mathbf{S}_{x,k}^r$ 在上一次迭代时第 r 年至第 n 年火电深度调峰改造总费用最小的近似值。 α 为贴现率, 将费用折算至同一时间尺度下。

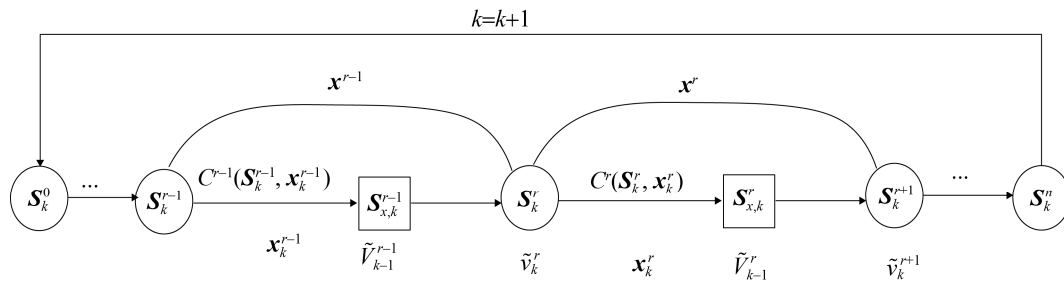


图1 SI-ADP更新决策后状态的近似值函数的过程示意图

Fig. 1 Process diagram of SI-ADP updating the approximation function of the post-decision state

(7) 近似值函数:

$$\hat{v}_k^r = F_S(\mathbf{S}_k^r, \mathbf{x}_k^r) = \min [C^r(\mathbf{S}_k^r, \mathbf{x}_k^r) + \alpha \tilde{V}_{k-1}^r(\mathbf{S}_{x,k}^r)] \quad (37)$$

$$\tilde{V}_k^{r-1} = (1 - \beta)\tilde{V}_{k-1}^{r-1} + \beta \hat{v}_k^r \quad (38)$$

式中: \hat{v}_k^r 为预决策状态 \mathbf{S}_k^r 的近似值函数; \tilde{V}_k^{r-1} 为第 k 次迭代决策后状态 $\mathbf{S}_{x,k}^{r-1}$ 的近似值函数; $\beta \in [0,1]$ 为平滑步长, 控制收敛速度。

(8) 深度调峰改造总净收益:

$$W_n = \tilde{V}^1 - \min \sum_{r=1}^n \alpha^{r-1} C_1^r(\mathbf{S}^0) \quad (39)$$

式中: \tilde{V}^1 表示第 1 年至第 n 年火电机组深度调峰改造后总费用最小的近似值, 为目标函数最优解; C_1^r 表示第 r 年的总运行费用; \mathbf{S}^0 表示机组未进行改造的初始状态; n 为规划年限; α 为贴现率。

同理, 结合 ADP 思想, 对机组配置储能的改造规划模型进行如下定义与处理:

(1) 目标函数:

$$\min(f_p + f_{uc} + f_{wv} + f_{ess}) = \min \sum_{r=1}^n C^r(\mathbf{S}_k^r, \mathbf{x}^r) \quad (40)$$

(2) 决策变量:

$$\mathbf{x}^r = P_{essN,r,j}^i \quad (41)$$

式中: $P_{essN,r,j}^i$ 表示第 r 年配置在机组 i 的第 j 台储能的额定功率。

(3) 预决策状态:

$$\mathbf{S}_k^r = \left\{ \sum_{m=1}^{r-1} P_{essN,m,j}^i, P_{r,i}^N, P_{wind,r}^N, P_{pv,r}^N, L_{r,t} \right\} \quad (42)$$

(4) 下一年的预决策状态:

$$\mathbf{S}_k^{r+1} = \left\{ \sum_{m=1}^{r-1} P_{essN,m,j}^i + P_{essN,r,j}^i, \dots \right\} = \mathbf{S}_k^r + \mathbf{x}^r \quad (43)$$

同理, 结合 ADP 思想, 对机组内部改造和配置储能共同改造规划模型进行如下定义与处理:

(1) 目标函数:

$$\min(f_p^{\text{DPR}} + f_{uc} + f_{wv} + f_{ess} + f_{\text{internal}}) = \min \sum_{r=1}^n C^r(\mathbf{S}_k^r, \mathbf{x}^r) \quad (44)$$

(2) 决策变量: 第 r 年对机组 i 内部改造容量为 $x_{\text{ccap},r,i}$ 或配置第 j 台额定功率为 $P_{essN,r,j}^i$ 的储能。

$$\mathbf{x}^r = x_{\text{ccap},r,i} + P_{essN,r,j}^i \quad (45)$$

(3) 预决策状态:

$$\mathbf{S}_k^r = \left\{ \sum_{m=1}^{r-1} x_{\text{ccap},m,i} + \sum_{m=1}^{r-1} P_{essN,m,j}^i, \dots \right\} \quad (46)$$

(4) 下一年的预决策状态:

$$\mathbf{S}_k^{r+1} = \left\{ \sum_{m=1}^{r-1} x_{\text{ccap},m,i} + x_{\text{ccap},r,i} + \sum_{m=1}^{r-1} P_{essN,m,j}^i + P_{essN,r,j}^i, \dots \right\} = \mathbf{S}_k^r + \mathbf{x}^r \quad (47)$$

其他公式与式(35)~(39)相似, 不再赘述。

4.2 求解步骤

本文建立含投资决策主问题和经济调度运行子问题的双层优化模型, 通过内外层交替优化寻找火电机组改造方案的最优实施策略。考虑到模型具有大规模、非线性、多时间尺度耦合的特征, 外层通过构建决策后状态变量的近似值函数, 采用策略迭代方法对最优值函数求近似, 通过 SI-ADP 方法

对投资决策主问题进行解耦处理。在此基础上, 投资决策变量 $x_{\text{ccap},r,i}$, $P_{i \text{ ess}N,r,j}$ 视为已知量, 每年的经济调度子问题转化为混合整数二次规划问题, 内层通过混合整数二次规划算法^[18]求解, 求解流程如图 2 所示。

收敛条件:

$$\left| \frac{\tilde{V}_k^r - \tilde{V}_{k-1}^r}{\tilde{V}_k^r} \right| \leq \eta \quad (48)$$

式中: η 为收敛阈值。

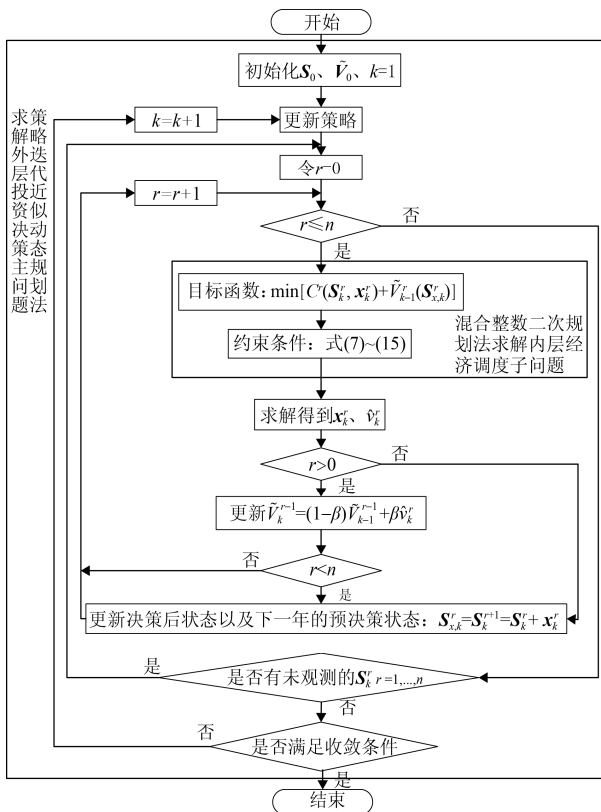


图 2 求解流程图

Fig. 2 Flow chart of solution

根据可行状态空间产生预决策状态, 给定初始策略, 求第 1~n 年的初始状态 S_0 , 进而求决策后状态及决策后状态的近似值函数 \tilde{V}_0 。根据决策后状态的近似值函数更新下一次迭代的新策略, 使决策逐渐逼近最优决策。在迭代过程中只更新决策后状态的值函数, 令 $S_k^{r+1} = S_{x,k}^r$ 转移到下一个时段, 并不计算状态空间中所有状态的值函数。投资决策优化模型由从外到内的三层嵌套循环构成, 分别为更

新策略、选择不同预决策更新状态空间、相邻时段状态的转移。

5 算例分析

以改进的 case9 节点系统为初始状态, 根据《盐城市“十三五”清洁能源发展规划》要求和历年用电情况, 相关数据见附录 A, 基于趋势分析法预计 2020—2024 年负荷前 3 年的年增长率为 1.6%, 第 4 年开始年增长率为 2%, 风电光伏装机容量年增长率为 10%, 火电机组 DPR 状态下运行损耗系数取 1.2^[19]。研究不同规划年限下, 3 种改造方案的最优改造策略, 在 MATLAB R2018a 平台上通过 YALMIP 工具箱调用 GUROBI 7.0.2 进行求解。

5.1 不同改造方案下的经济性分析

为验证模型和方法的有效性, 基于不同规划年限求解该模型, 全面分析火电机组深度调峰改造对电源规划的影响, 通过对比分析 3 种改造方案的经济性, 解决规划中的工程实际问题。规划年限分别为 2 年、3 年、4 年、5 年时, 3 种改造方案的最优改造策略及总净收益如表 1~3 所示。

由表 1~3 可知, 机组深度调峰改造在提高新能源消纳能力的同时, 能够带来一定的净收益。

表 1 中数据为火电机组改造的位置/内部改造的容量(MW), 其中, 机组改造位置 1, 2, 3 分别表示火电机组 1, 2, 3; 表 2 中数据为火电机组改造的位置/配置储能的容量(MW); 表 3 中数据为火电机组改造的方式/改造的位置/改造的容量(MW), 其中, 机组改造方式 1, 2 分别表示机组内部改造、配置储能。

(1) 规划年限小于 2 年时, 由于储能成本较高, 不建议配置储能对火电机组进行深度调峰改造, 建议对火电机组内部改造。

(2) 规划期为 3 年时, 方案二开始产生净收益, 通过配置储能实现深度调峰改造的经济性逐渐凸显, 但总净收益仍小于方案一。此时方案三的净收益较规划期为两年时有较大增加, 且高于方案一。

表1 机组内部进行深度调峰改造

Tab. 1 Internal depth peak-shaving transformation

| 规划年数 | 2年 | 3年 | 4年 | 5年 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 第1年 | 2/30 | 2/30 | 2/30 | 2/30 |
| 第2年 | 0/0 | 1/10 | 1/20 | 1/25 |
| 第3年 | | 0/0 | 3/5 | 3/10 |
| 第4年 | | | 0/0 | 0/0 |
| 第5年 | | | | 0/0 |
| 总费用/百万\$ | 110.64 | 157.11 | 198.41 | 244.92 |
| 总净收益/百万\$ | 1.94 | 8.07 | 17.23 | 19.75 |

表2 配置储能的热电机组深度调峰改造

Tab. 2 Deep peak-shaving transformation of thermal power units with energy storages

| 规划年数 | 2年 | 3年 | 4年 | 5年 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 第1年 | 0/0 | 2/15 | 2/15 | 2/15 |
| 第2年 | 0/0 | 1/10 | 1/15 | 1/15 |
| 第3年 | | 0/0 | 3/5 | 3/10 |
| 第4年 | | | 0/0 | 2/5 |
| 第5年 | | | | 0/0 |
| 总费用/百万\$ | 112.58 | 161.12 | 198.95 | 243.05 |
| 总净收益/百万\$ | 0 | 4.06 | 16.69 | 21.62 |

表3 内部改造和配置储能共同实现火电深度调峰改造

Tab. 3 Internal transformation and the configuration of energy storage

| 规划年数 | 2年 | 3年 | 4年 | 5年 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 第1年 | 1/2/30 | 1/2/30 | 1/2/30 | 1/2/30 |
| 第2年 | 0/0/0 | 2/1/10 | 2/1/15 | 2/1/15 |
| 第3年 | | 0/0 | 1/3/30 | 1/3/30 |
| 第4年 | | | 0/0 | 2/2/10 |
| 第5年 | | | | 0/0/0 |
| 总费用/百万\$ | 110.64 | 154.87 | 195.21 | 235.42 |
| 总净收益/百万\$ | 1.94 | 10.31 | 20.43 | 29.25 |

(3) 随着规划期的增加, 方案三在规划期内的总净收益大幅度增加, 方案二次之, 方案一在规划期为5年时的总净收益较规划期为4年时增加幅度较小。第4年开始, 系统总负荷大幅度增加, 方案一在第4年之前已完成对机组的改造, 无法继续对机组改造以适应当前负荷需求, 方案二、方案三可以根据当前负荷需求和装机容量变化灵活配置储能容量及位置, 在较长的规划期内, 方案二的经济性高于方案一。

(4) 方案三综合考虑方案一方案二的优缺点,

在规划期内的最优改造策略具有交替选择内部改造和配置储能的特点。在任意规划期内, 方案三的经济性均高于方案一、方案二。

以规划期五年为例, 3种改造方案的各项成本及收益如表4所示。

由表4可知, 方案一、方案三改造后的机组可以在DPR状态下运行, 计及DPR附加成本后的总发电成本高于改造前的发电成本, 方案二不改变火电机组的运行特性, 在降低机组发电成本上具有一定优势。方案一的收益主要来源于减少的启停费用, 方案二的收益主要来源于储能收益, 内部改造有利于避免机组的频繁启停, 配置储能有利于提高风电光伏接纳量。方案三减少的启停费用和减少的弃风弃光惩罚费用均高于方案一、方案二, 有效降低系统的运行成本。

5.2 不同改造方案下的调峰效果分析

基于某一典型日的算例结果, 如图3~6所示, 对不同改造方案下火电深度调峰改造前后的调峰效果进行分析, 火电机组等效深度调峰运行曲线对比如图7所示, 得到如下结论:

由图3与图4可以看出, 改造前火电机组总出力下限为50 MW, 内部改造后火电机组总出力下限为45 MW, 方案一可提高火电机组的出力调节范围。改造后的火电机组1、2在01:00—16:00不存在启停动作, 此时弃风弃光惩罚费用较低, 优化结果倾向通过减少启停费用增加系统运行的经济性, 因此这一时段方案一对弃风弃光问题的改善效果微弱。在22:00—24:00机组改造前后启停状态不变, 改造后弃风弃光容量明显减少, 故方案一在减少机组启停次数的同时, 可利用火电低发以提高风电光伏的接纳量。

本文利用净负荷曲线对比配置储能改造前后的调峰效果, 由图3, 5可知, 储能可以较好的对净负荷曲线进行削峰填谷, 平滑出力。改造前最大、最小净负荷为280 MW, 19.42 MW, 配置储能后最

大、最小净负荷为 254.7 MW, 44.97 MW。图 5 中储能功率曲线正值表示储能放电, 负值表示充电,

储能充放电时段与改造前的弃风弃光时段对应, 方案二改造后几乎不存在弃风弃光现象。

表 4 不同方案下的成本及收益构成

Tab. 4 Cost and benefit components under different schemes

| 方案 | 成本/百万\$ | | | | | | 收益/百万\$ | | | | 总费用/ 百万\$ | 净收益/ 百万\$ |
|-----|---------|--------|-------|---------|--------|----------|---------|---------|----------|--------|--------------|--------------|
| | 发电成本 | DPR 成本 | 启停成本 | 弃风光惩罚成本 | 投资改造成本 | 储能运行维护成本 | 储能收益 | 减少的启停成本 | 减少的弃风光成本 | | | |
| 改造前 | 207.76 | 0 | 40.05 | 16.86 | 0 | 0 | 0 | | | 264.67 | | |
| 方案一 | 198.38 | 12.47 | 17.95 | 7.02 | 9.10 | 0 | 0 | 22.09 | 9.85 | 244.92 | 19.75 | |
| 方案二 | 204.99 | 0 | 37.90 | 4.98 | 13.98 | 1.26 | 20.06 | 2.14 | 11.89 | 243.05 | 21.62 | |
| 方案三 | 199.70 | 10.05 | 16.63 | 1.14 | 15.77 | 0.82 | 8.69 | 23.41 | 15.73 | 235.42 | 29.25 | |

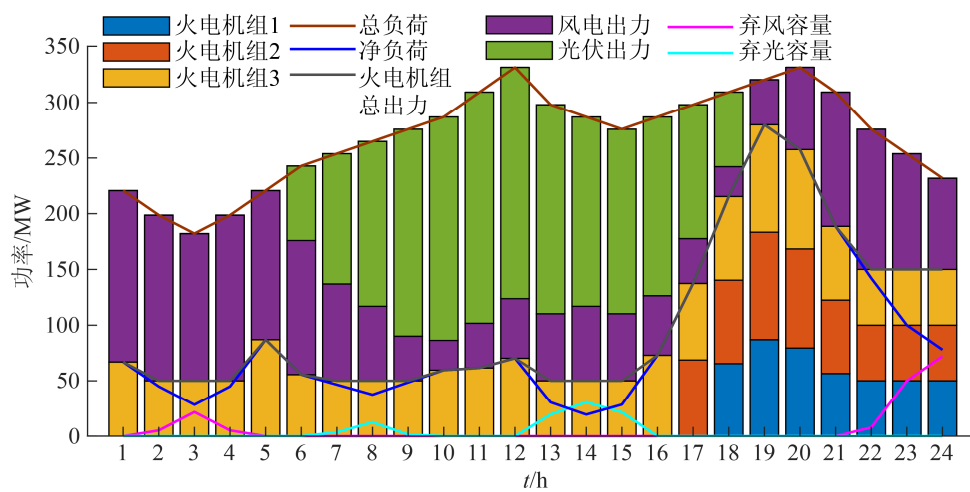


图 3 规划期内不改造的仿真结果

Fig. 3 Simulation results of no transformation

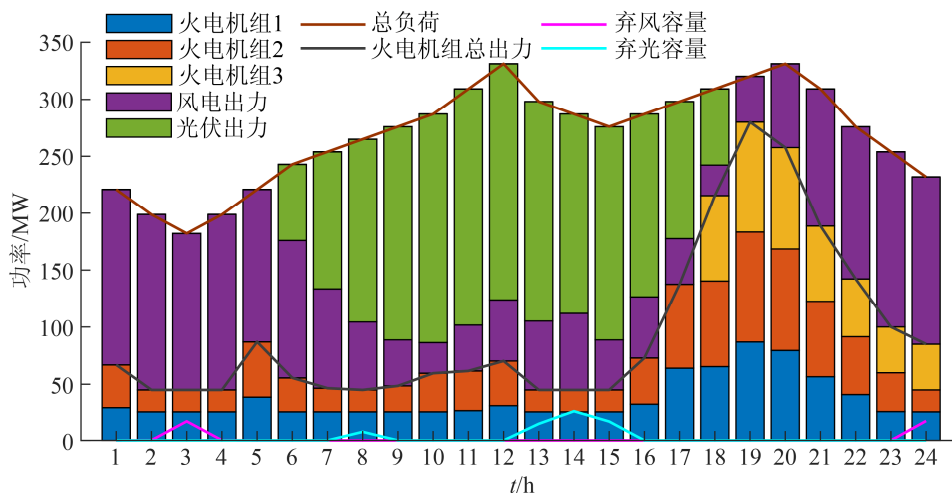


图 4 方案一机组内部改造后的仿真结果

Fig. 4 Simulation results of internal transformation

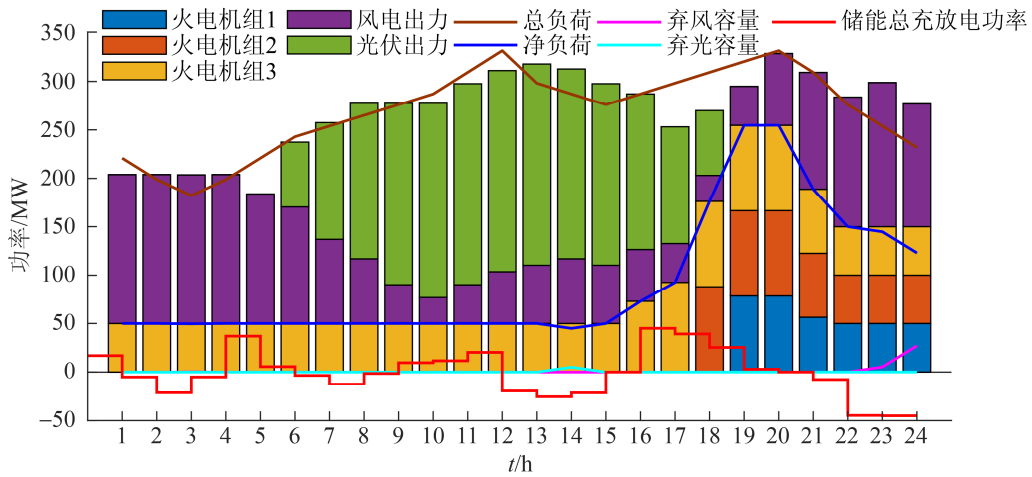


图5 方案二配置储能改造后的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of configuration energy storage

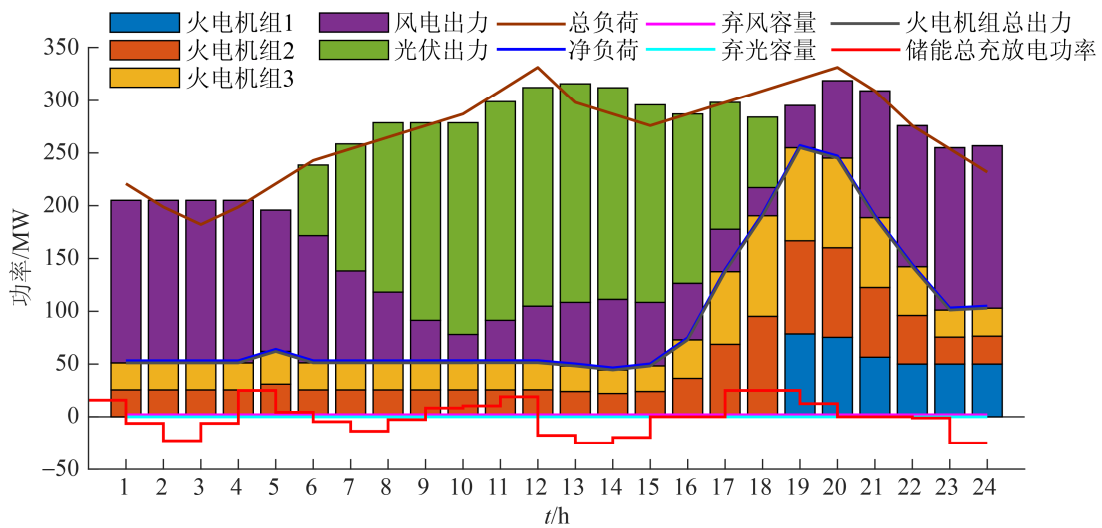


图6 方案三内部改造和配置储能共同改造后的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of internal transformation and configuration energy storage transformation

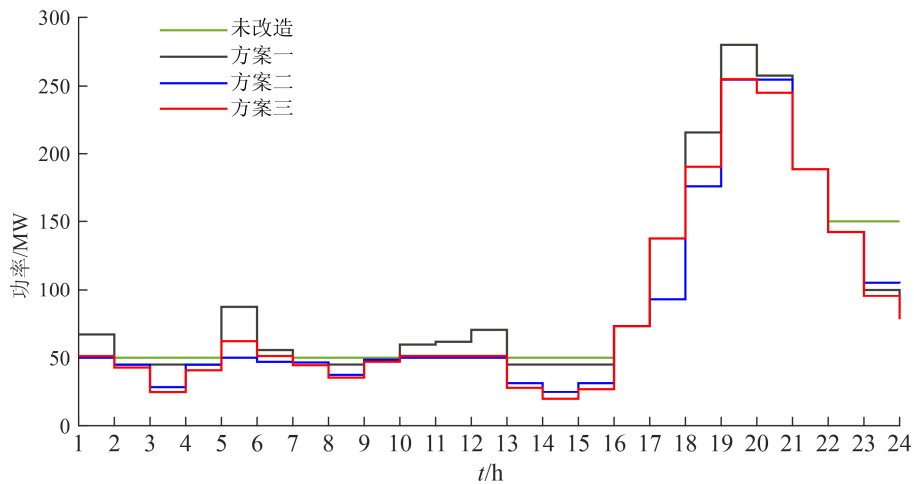


图7 不同方案的火电机组等效深度调峰运行曲线对比图

Fig. 7 Comparison diagram of equivalent depth peak-shaving of thermal power units under different cases

由图 3 与图 6 可以看出, 方案三改造后最大净负荷为 255 MW, 最小净负荷为 44.42 MW, 火电机组总出力下限为 44.42 MW, 且不存在弃风弃光现象。方案三综合方案一和方案二的优越性, 在有效促进可再生能源消纳的同时, 提高火电机组的出力调节范围, 且有效避免火电机组频繁启停。

图 7 从火电机组的运行特性角度分析, 机组内部改造改变火电机组的最小技术出力, 使火电机组可以在 DPR 状态下运行, 深度调峰运行曲线为火电机组总出力曲线。机组配置储能不改变火电机组的运行特性, 火电机组只能在常规调峰状态下运行, 为了基于同一指标对不同改造方案的改造效果进行对比, 含储能系统的等效深度调峰运行曲线为火电机组实际总出力减去储能充电功率。由图 7 可知, 未改造时火电机组最小总出力为 50 MW, 采用方案一改造后火电机组深度调峰运行下最小总出力为 45 MW, 采用方案二、方案三改造后火电机组实际最小总出力分别为 50 MW, 44.42 MW, 但在等效深度调峰运行下, 火电机组的等效最小总出力分别为 24.45 MW, 19.42 MW, 故方案三的等效深度调峰运行特性较好, 方案二、方案一次之。

火电深度调峰改造在带来较高调峰收益的同时, 提高电源结构灵活性、促进可再生能源消纳。方案一在避免火电机组频繁启停、提高机组出力调节范围方面具有一定的优越性。方案二随着负荷需求实时地做出决策多次对火电机组进行改造, 具有较强的灵活性, 在改善负荷峰谷差、提高新能源消纳能力方面具有一定的优越性。方案三综合方案一和方案二的优越性, 有较好的调峰效果。

6 结论

为了提高电源结构的灵活性, 缓解高比例可再生能源并网带来的调峰压力, 分别提出计及 DPR 附加成本的火电机组内部改造方案、配置储能的改造方案和两者共同实现的改造方案, 建立考虑机组组合的火电机组深度调峰改造规划模型, 研究规划期内的最优改造策略, 主要结论如下:

(1) 基于火电机组 DPR 运行的技术经济特征和储能的削峰填谷作用, 本文建立了包含附加煤耗成本的双层优化模型, 提出了一种有效求解该模型的策略迭代近似动态规划法, 最终优化出经济性最优的改造策略, 结果表明火电深度调峰改造在提高电源结构灵活性的同时, 可以带来一定的净收益。

(2) 机组内部改造在避免火电机组的频繁启停、提高机组的可调节出力范围方面具有一定的优越性。配置储能能够改善负荷峰谷差、平滑出力。内部改造和配置储能共同改造方案综合两者的优越性, 在促进可再生能源消纳的同时, 有效降低系统的运行成本, 在任意规划期内其经济性和调峰效果的优越性明显。

未来随着储能技术的发展和成本的降低, 储能辅助火电深度调峰具有较大的发展空间, 下一步将考虑可再生能源出力及负荷的不确定性, 研究火电灵活性改造对电源规划的影响。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张广才, 周科, 鲁芬, 等. 燃煤机组深度调峰技术探讨[J]. 热力发电, 2017, 46(9): 17-23.
- Zhang Guangcai, Zhou Ke, Lu Fen, et al. Discussion on Deep Peaking Technology of Coal-fired Power Plants[J]. Thermal Power Generation, 2017, 49(9): 17-23.
- [3] 纳春宁. 促进可再生能源消纳的燃煤机组灵活性改造评价研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- Na Chunying. Research on Assessment of Coal Power Unit Flexibility Retrofitting for Promoting Renewables Integration[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [4] 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): 69-76.
- 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): 69-76.
- [5] 林俐, 邹兰青, 周鹏, 等. 规模风电并网条件下火电机组深度调峰的多角度经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 21-27.
Lin Li, Zou Lanqing, Zhou Peng, et al. Multi-angle Economic Analysis on Deep Peak Regulation of Thermal Power Units with Large-scale Wind Power Integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 21-27.
- [6] 林俐, 田欣雨. 基于火电机组分级深度调峰的电力系统经济调度及效益分析[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2255-2262.
Lin Li, Tian Xinyu. Analysis of Deep Peak Regulation and Its Benefit of Thermal Units in Power System With Large Scale Wind Power Integrated[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2255-2262.
- [7] 孙伟卿, 李臻. 基于灵活性提升的电力系统储能装置定容方法[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(1): 235-241.
Sun Weiqing, Li Zhen. Method of Power System Energy Storage Configuration Based on Flexibility Promotion[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(1): 235-241.
- [8] Park C, Knazkins V, Sevilla F R S, et al. On the Estimation of an Optimum Size of Energy Storage System for Local Load Shifting[C]// IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 2015, Denver, Colorado, USA.
- [9] 鲍冠南, 陆超, 袁志昌, 等. 基于动态规划的电池储能系统削峰填谷实时优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(12): 11-16.
Bao Guannan, Lu Chao, Yuan Zhichang, et al. Load Shift Real-time Optimization Strategy of Battery Energy Storage System Based on Dynamic Programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(12): 11-16.
- [10] 李军徽, 朱星旭, 严干贵, 等. 抑制风电并网影响的储能系统调峰控制策略设计[J]. 中国电力, 2014, 47(7): 91-95.
Li Junhui, Zhu Xingxu, Yan Gangui, et al. Design of Control Strategies of Energy Storage for Peak Shaving to Restrain Wind Power's Influence on Power Grid[J]. Electric Power, 2014, 47(7): 91-95.
- [11] 李军徽, 张嘉辉. 储能辅助火电机组深度调峰的分层优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3962-3969.
Li Junhui, Zhang Jiahui. Hierarchical Optimization Scheduling of Deep Peak Shaving for Energy-storage Auxiliary Thermal Power Generating Units[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3962-3969.
- [12] 刘文颖, 李亚龙, 郭鹏, 等. 日前荷源联合调峰主从博弈决策[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(8): 3066-3073.
Liu Wenying, Li Yalong, Guo Peng, et al. Stackelberg Game Decision for Load-source Associated Day-ahead Peak Load Regulation[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(8): 3066-3073.
- [13] Powell W B. Approximate Dynamic Programming: Solving the Curses of Dimensionality, Second Edition[M]. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2011.
- [14] 刘翠平, 林舜江, 刘明波, 等. 应用近似动态规划算法求解安全约束随机动态经济调度问题[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 34-42.
Liu Cuiping, Lin Shunjiang, Liu Mingbo, et al. Solution of Security-constrained Stochastic Dynamic Economic Dispatch Problem Based on Approximate Dynamic Programming Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 34-42.
- [15] Hang S. Stochastic Optimization of Economic Dispatch for Microgrid Based on Approximate Dynamic Programming[J]. IEEE Transactions on Smart Grid (S1949-3053), 2019, 10(3): 2440-2452.
- [16] Shao C, Wang X, Shahidehpour M, et al. Security-constrained Unit Commitment with Flexible Uncertainty Set for Variable Wind Power[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy (S1949-3029), 2017, 8(3): 1237-1246.
- [17] 邓涛, 余浩源. 基于 DP 算法的复合电源混合动力系统控制优化[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(9): 1860-1867.
Deng Tao, Yu Haoyuan. Control Optimization of Hybrid System with Hybrid Power Based on DP Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(9): 1860-1867.
- [18] 王楠, 张粒子, 谢国辉. 求解机组组合问题的改进混合整数二次规划算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15): 28-32.
Wang Nan, Zhang Lizi, Xie Guohui. An Improved Mixed Integer Quadratic Programming Algorithm for Unit Commitment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15): 28-32.
- [19] 王淑云, 娄素华, 吴耀武, 等. 计及火电机组深度调峰成本的规模风电并网鲁棒优化调度[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 118-125.
Wang Shuyun, Lou Suhua, Wu Yaowu, et al. Robust Optimal Scheduling of Large-scale Wind Power Connected to the Grid Considering the Depth Peak Shaving Cost of Thermal Power Units[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 118-125.