

储能辅助火电深度调峰的双层优化调度方法

仇兴华

南京工程学院, 江苏 南京 211167

摘要:针对高比例风电并网引发的电力系统调峰容量不足问题, 本研究创新性地构建了储能集群协同火电机组参与深度调峰的双层优化调度体系。通过建立经济调度层与实时修正层的分级控制模型, 实现了储能系统与火电机组的多维度动态配合。该策略在传统调峰模式基础上引入多目标优化机制, 通过储能集群的快速功率响应特性平抑火电机组调节迟滞, 同时采用源储协同的削峰填谷策略提升系统运行灵活性, 能够使得储能系统与火电机组有效协同配合, 进而缓解电力系统中的调峰压力, 同时能够在一定程度上提高新能源消纳, 降低系统总运行成本。

关键词: 储能; 深度调峰; 双层优化

DOI:10.63887/jeti.2025.1.3.22

21 世纪, 全球各国处于能源转型阶段。预计到 2030 年, 我国努力达到“碳达峰”, 预计到 2060 年, 争取实现碳中和的“双碳”目标^[1]。以风、光为代表的新能源具有可再生、无污染等特点, 因此, 近年来我国积极倡导大力发展风、光等新能源发电并网。未来几年, 我国风电、光电等新能源装机容量将持续扩大, 新能源发电量也将节节升高。随着风、光等新能源大规模并网, 由于风光出力的随机性和波动性以及存在较强的反调峰特性, 给电力系统带来了极其严峻的调峰问题^[2-4]。

目前, 电网的调峰任务主要是由火电机组来承担。随着风电、光伏装机容量不断扩大, 为了更好地解决新能源消纳问题以及缓解电力系统调峰困境, 各电网纷纷开展火电机组深度调峰, 使机组运行在额定功率的 30%~50% 左右, 但火电机组进行深度调峰, 机组运行工况会发生一系列的变化, 机组相应的运行成本也会增加。如何平衡调峰性能与经济性能是火电机组运行的关键, 而储能具有响应速度快、双向功率调节、清洁无污染等优点, 将储能用于参与辅助火电机组调峰, 充分发挥储能作用, 已经成为解决新能源高渗透地区调峰问题的

重要手段之一^[5-6]。

现有研究主要分析大规模新能源并网下火电机组深度调峰经济性, 而在高比例风电、光伏渗透背景下, 储能参与火电深度调峰联合调度的研究较少, 并且往往更容易忽略储能所带来的新能源消纳效果及经济效益。

1 火电深度调峰成本分析

在火电机组参与常规调峰时, 运行成本主要是煤耗成本, 采用耗量特性进行计算, 公式为:

$$C_c(P_{i,t}) = a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i \quad (1)$$

式中, a_i 、 b_i 、 c_i 为第 i 台火电机组耗量特性函数的系数, $P_{i,t}$ 为 t 时刻机组 i 实际出力。

当机组降低出力时, 火电机组进入不投油深度调峰阶段, 低出力使得机组转子轴系的热应力过大, 引起机组部件的疲劳损耗, 缩短机组使用寿命, 进而增加发电成本。机组寿命损耗成本按照转子材料的低周疲劳特性关系进行计算, 根据 Manson-Coffin 公式^[7], 机组寿命损耗成本为:

$$A(P_{i,t}) = \frac{1}{2N_F(P_{i,t})} \delta S_{J,i} \quad (2)$$

式中, $N_F(P_{i,t})$ 为第 i 台机组 t 时刻转子致裂周次, 其值与火电机组出力有关; δ 为火电厂实际运行损耗系数; $S_{J,i}$ 为第 i 台火电机组购机成本。

若机组进一步降低出力, 需要投油以维持

$$C_1 = \begin{cases} C_c(P_{i,t}) & P_{i,a} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} \\ C_c(P_{i,t}) + A(P_{i,t}) & P_{i,b} \leq P_{i,t} \leq P_{i,a} \\ C_c(P_{i,t}) + A(P_{i,t}) + B(P_{i,t}) & P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,b} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $P_{i,a}$ 为机组 i 常规调峰的出力下限值; $P_{i,b}$ 为机组 i 不投油深度调峰的出力下限值; $P_{i,\max}$ 、 $P_{i,\min}$ 分别为火电机组 i 最大、最小出力;

2 储能运行收益及运行成本分析:

在储能参与电力系统调峰运行过程中, 其运行电量收益和环境收益是主要经济因素:

储能运行电量收益:

$$I_1 = \sum_{t=1}^T (\eta_D P_{D,t} P_{pri,t} - \eta_C P_{C,t} P_{pri,t}) \quad (5)$$

式中: $P_{C,t}$ 、 $P_{D,t}$ 分别为 t 时刻储能充、放电功率, 两者都为正值; η_D 、 η_C 分别为储能放电、充电效率; $P_{price,t}$ 为电价。

3 储能运行环境收益:

$$I_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (\eta_D P_{D,t} \zeta_{po,k} P_{price,k}) \quad (6)$$

式中: K 为电网产生的污染物排放总数; $\zeta_{po,k}$ 为生产单位电能的第 k 种污染物排放密度; $P_{price,k}$ 为污染物的单位排放费用;

优选地, 所述步骤 S22 的具体计算过程为:

储能参与系统调峰过程中, 由于响应时间短、频率高, 必然影响储能寿命, 因此需要充

锅炉稳定燃烧。投油成本为:

$$B(P_{i,t}) = O_{oil,i,t} S_{oil} \quad (3)$$

式中, $O_{oil,i,t}$ 第 i 台机组投油深度调峰阶段 t 时刻投油量; S_{oil} 为单位油价;

进一步地, 步骤 S1 中, 基于各类成本, 火电机组在运行过程中成本函数为:

分考虑储能快速充放电导致的储能运行维护成本:

$$C_{bess} = \sum_{t=1}^T [(P_{C,t} + P_{D,t})] P_{price}^M \quad (7)$$

式中, P_{price}^M 为储能系统运行维护单价;

4 储能参与火电深度调峰的双层优化模型

4.1 上层模型目标函数及约束条件

上层模型以储能运行经济性最优、净负荷方差最小及新能源弃电成本最小为目标上, 得到各时刻储能出力。主要如下:

$$f_1 = \sum_{t=1}^T (I_1 + I_2 - C_{Bess}) \quad (8)$$

$$f_2 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_{net,t} - P_{net,av})^2 \quad (9)$$

$$f_3 = \sum_{t=1}^T [\theta_{wind} (P_{wind,t}^{pre} - P_{wind,t}) + \beta_{pv} (P_{pv,t}^{pre} - P_{pv,t})] \quad (10)$$

$$P_{net,t} = P_{load,t} - P_{wind,t} - P_{pv,t} - P_{sto,t} \quad (11)$$

$$P_{sto,t} = \eta_D P_{D,t} - P_{C,t} \quad (12)$$

$$P_{net,av} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T P_{net,t} \quad (13)$$

式中, f1 为储能运行收益; f2 为净负荷方差; f3 新能源弃电成本; $P_{net,t}$ 为 t 时刻净负荷功率; $P_{net,av}$ 为净负荷功率的平均值; $P_{load,t}$ 为 t 时刻负荷值; $P_{wind,t}^{pre}$ 为风电预测功率; $P_{pv,t}^{pre}$ 为光伏预测功率; θ_{wind} 、 β_{pv} 分别为弃风、弃光惩罚系数;

基于优化目标形成的目标函数具有不同的量纲, 需要引入经济折算系数 ω_1 、 ω_2 将多目标优化问题转化为以经济性最小的单目标优化, 如下:

$$\min F_1 = -f_1 + \omega_1 f_2 + \omega_2 f_3 \quad (14)$$

对上述目标函数进行优化时, 存在以下约束:

(1) 储能系统约束条件:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq P_{C,t} \leq P_{sto} \\ 0 \leq P_{D,t} \leq P_{sto} \\ S_{soc,min} \leq S_{soc,t} \leq S_{soc,max} \\ S_{soc,start} = S_{soc,end} \\ I_{soc,t}^C I_{soc,t}^D = 0 \\ S_{soc,t} = S_{soc,t-1} + \frac{\eta_C P_{C,t} \Delta t - P_{D,t} \Delta t / \eta_D}{E_{sto}} \end{array} \right. \quad (15)$$

式中, P_{sto} 为储能系统额定功率; $S_{soc,max}$ 、 $S_{soc,min}$ 分别为储能荷电状态最大值和最小值; $S_{soc,t}$ 为储能系统 t 时刻荷电状态; $S_{soc,start}$ 、 $S_{soc,end}$ 分别为储能开始和结束时的荷电状态; $I_{soc,t}^C$ 、 $I_{soc,t}^D$ 分别为 t 时刻储能充、放电运行状态。两者为 0-1 变量。当储能放电时, $I_{soc,t}^D=1$, 储能充电时, $I_{soc,t}^C=1$ 。 E_{sto} 为储能系统容量;

(2) 功率平衡约束:

$$P_{load,t} = P_{i,t} + \eta_D P_{D,t} - P_{C,t} + P_{wind,t} + P_{pv,t} \quad (16)$$

(3) 新能源出力约束:

$$0 \leq P_{wind,t} \leq P_{wind,t}^{pre} \quad (17)$$

$$0 \leq P_{pv,t} \leq P_{pv,t}^{pre} \quad (18)$$

4.2 下层模型目标函数及约束条件。

下层模型根据上层模型得到的等效净负荷曲线, 以机组总运行成本最低为目标函数, 优化各机组出力。

目标函数:

$$\min F_2 = \min C_1 \quad (19)$$

式中: C_1 为火电机组运行成本;

对上述目标函数进行优化时, 存在以下约束:

功率平衡约束:

$$P_{net,t} = P_{i,t} \quad (20)$$

火电机组出力约束:

常规调峰机组:

$$U_{i,t} P_{i,a} \leq P_{i,t} \leq U_{i,t} P_{i,max} \quad (21)$$

深度调峰机组:

$$U_{i,t} P_{i,min} \leq P_{i,t} \leq U_{i,t} P_{i,max} \quad (22)$$

机组爬坡约束:

$$U_{i,t-1} P_{i,t-1} - \alpha_{down,i} \leq P_{i,t} \leq \alpha_{up,i} + U_{i,t-1} P_{i,t-1} \quad (23)$$

启停时间约束:

$$\left\{ \begin{array}{l} (U_{i,t-1} - U_{i,t})(T_{i,t-1}^{on} - T_{on,i}) \geq 0 \\ (U_{i,t} - U_{i,t-1})(T_{i,t-1}^{off} - T_{off,i}) \geq 0 \end{array} \right. \quad (24)$$

式中, $\alpha_{down,i}$ 、 $\alpha_{up,i}$ 分别为机组 i 的向下、向上爬坡率限制; $T_{i,t-1}^{on}$ 、 $T_{i,t-1}^{off}$ 分别为机组 i 在 t 时间段内持续运行、持续停机时间; $T_{on,i}$ 、 $T_{off,i}$ 分别为机组 i 的最小连续运行时间和最小停机时间; $U_{i,t}$ 为机组启停状态, 运行时 $U_{i,t}=1$, 停机时 $U_{i,t}=0$;

5 算例分析

本研究针对不同容量机组构建差异化调峰策略：配置 800MW 及 400MW 机组执行常规调峰（最低负荷率 50%），1200MW 机组实施深度调峰（非燃油模式最低负荷率 40%，燃油模式达 30%）。设置机组单位投资成本为 3464 元/kW，运行损耗系数设为 1.2，燃油消耗成本取 6130 元/吨。火电机组深度调峰补偿标准设定为：非燃油模式 0.3 元/(kW·h)，燃油模式 0.4 元/(kW·h)。日负荷曲线如图 1 所示，风电、光伏预测功率如图 2 所示。

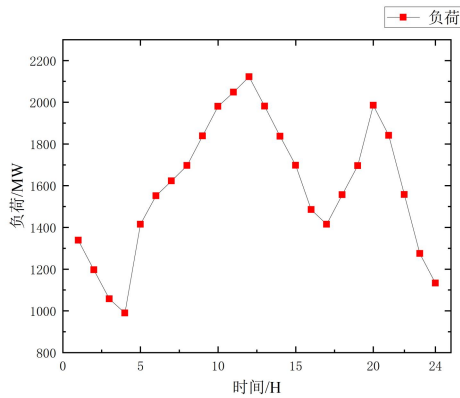


图 1 日负荷曲线

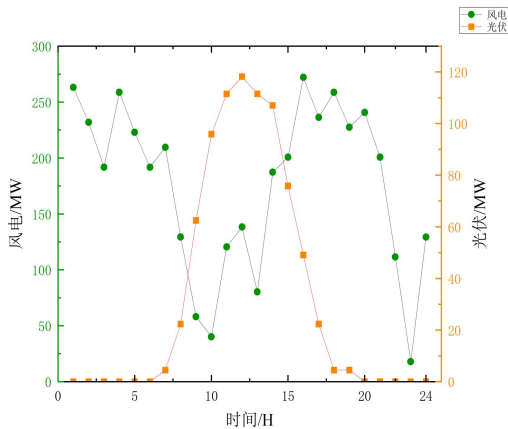


图 2 风电、光伏预测出力曲线

本算例中设置了两种不同调峰场景（包含储能、不含储能），根据算例数据，上层模型采用粒子群优化算法求解，得到优化后的净负荷波动和最优储能充放电功率，如图 3 和图 4 所示。下层模型采用 MATLAB 调用 Cplex 进行

求解，得到各机组出力。

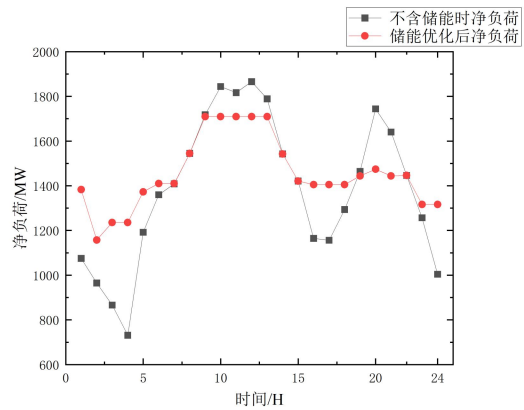


图 3 有无储能净负荷对比曲线

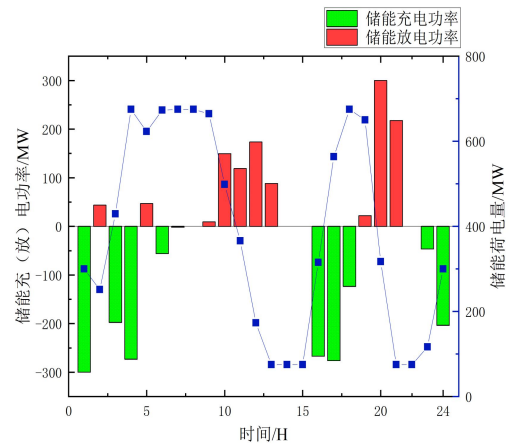


图 4 储能充放电图

结合图 3 和图 4 可知，仿真数据分析表明，储能集群的调控效能显著体现在净负荷峰谷特性改善方面。如图 3、图 4 对比显示，未配置储能时系统最大净负荷峰谷差达 1134.59MW，而引入储能系统后该指标降至 552.19MW，降幅达 51.3%。这种动态优化源于储能集群的双向功率调节能力：在负荷高峰时段，储能系统以 2C 倍率快速释放存储电能；当负荷处于低谷时，则以 0.5C 倍率有序吸纳过剩电力，形成多时间尺度协同优化的充放电策略。通过利用储能系统的“削峰填谷”作用，能够有效缓解火电机组调峰困境。

有无储能参与深度调峰时火电机组出力、风电出力和光伏出力如图 5、图 6 所示。

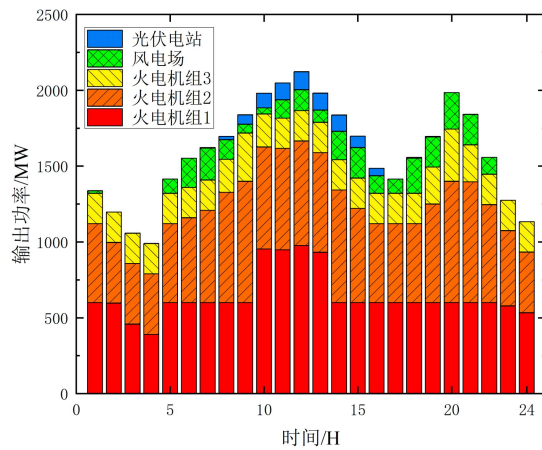


图 5 有储能参与各机组出力值

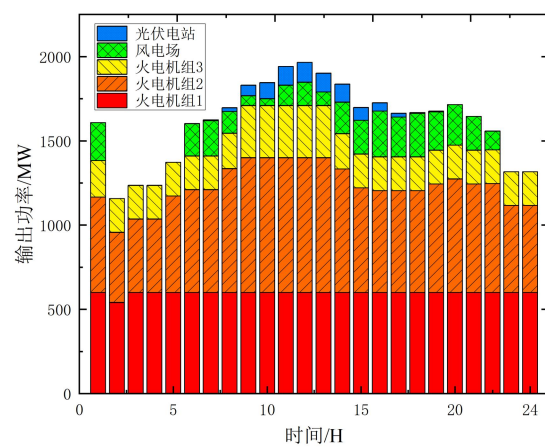


图 6 无储能参与各机组出力图

表 1 有无储能经济对比表

	运行总成本/元	单位发电成本/元 (kW·h) ⁻¹	新能源弃电率
无储能参与	13847292.1107	0.3614	27.42%
有储能参与	11155111.3200	0.2911	21.77%

通过表对比可知,当不含储能参与调峰运行时,火电机组 1 在 24 个时段中有 5 个时段处于深度调峰运行,增加了机组损耗成本,进而使得系统运行成本有所增加。而当引入储能系统参与调峰后,仅有 2 时段处于深度调峰运行,能够进一步降低对深度调峰机组的需求,减少了机组损耗和投油成本,电网运行总成本有所下降。

除此之外,有无储能系统的接入对新能源弃电率也有着较为明显的影响。当不考虑储能

时,新能源弃电率为 27.42%。储能系统接入后,新能源弃电率为 21.77%,使得整个系统提高了 5.65% 新能源利用率。

6 结论

本文提供了一种储能参与火电深度调峰的双层优化调度方法,通过储能充放电特性与火电机组深度调峰能力之间的配合,利用储能“削峰填谷”作用,能够有效减小整个系统的净负荷方差,缓解电网调峰压力,同时提高了新能源消纳,降低了整个系统的运行成本。

参考文献

- [1] 范征, 韩丛达, 周静, 等. “双碳”目标下未来电网形态发展模式及演变路径初探[J]. 新型电力系统, 2024, 2(03): 272-281.
- [2] 杨策, 孙伟卿, 韩冬. 考虑新能源消纳能力的电力系统灵活性评估方法[J]. 电网技术, 2023, 47(01): 338-349.
- [3] 马汀山, 王妍, 吕凯, 等. “双碳”目标下火电机组耦合储能的灵活性改造技术研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(S1): 136-148.

- [4] 邓婷婷, 娄素华, 田旭, 等. 计及需求响应与火电深度调峰的含风电系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 37-59.
- [5] 刘鑫, 王康平, 郭相阳, 等. 计及深度调峰与一次调频的风火负荷优化分配[J]. 电测与仪表, 2023, 60(01): 1-9.
- [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): 2255-2263.
- [7] 于国强, 刘克天, 胡尊民, 等. 大规模新能源并网下火电机组深度调峰优化调度[J]. 电力工程技术, 2023, 42(01): 243-250.

作者简介: 仇兴华 (2001.02.03-), 男, 汉, 江苏徐州人, 研究生学历, 研究方向为电力系统优化调度。