

计及电熔镁负荷与储能联合调峰的电力系统 日前-日内联合经济调度方法

刘 闯¹, 孙 傲¹, 王艺博¹, 贺 欢², 张海亮¹, 宁辽逸²

(1. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 国网辽宁省电力有限公司鞍山供电公司, 辽宁 鞍山 114009)

摘要:随着碳达峰、碳中和目标的推进, 新能源并网数量将大规模增加, 新能源固有的随机性和波动性使得电网发电侧与需求侧的平衡受到挑战, 现有的调度模式不能满足以新能源为主体的电力系统调度需求。为了提高电力系统的调峰能力, 提出将需求侧具有代表性的电熔镁负荷纳入调度主体, 通过在电熔镁负荷侧配置电池储能装置, 与火电机组进行联合优化调度。以电力系统运行成本最小为优化目标, 形成日前-日内联合经济调度方法, 并采用遗传算法进行求解。最后以实例进行了仿真计算, 说明了所提调峰模型的有效性, 可以提高系统的新能源消纳量, 降低系统的运行成本。

关键词:电熔镁负荷; 电力系统调度; 风电消纳; 遗传算法; 储能

中图分类号: TM 73

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202110031

0 引言

煤、石油等化石能源的短缺以及大量化石能源的使用导致的环境污染问题, 使得人类对新能源的发展产生了足够的重视。我国能源消费总量十分突出, 所以建设一个安全、清洁和可持续发展的能源系统成为我国能源发展的必然要求^[1]。截至2019年年底, 我国风电累计装机达 2.1×10^8 kW, 光伏发电累计装机达 2.04×10^8 kW, 装机占比达到20.6%。但新能源并网容量大规模增加, 其波动性和反调峰特性导致电力运行成本呈现增长态势。当采用传统调度方法时, 需要火电平抑新能源所带来的功率波动, 若继续采取传统调度方法, 则新能源如何进行消纳将成为难题, 同时会对火电机组的运行造成巨大压力^[2-4]。

为了提高系统新能源的消纳水平, 有关需求侧负荷调控的研究日益兴起, 利用现有的负荷端资源参与新能源的就地消纳是解决弃风问题的新思路, 通过增强需求侧与电源侧的互动, 为电网调峰模式的转变提供了前提条件^[5]。目前国内外关于需求侧负荷调控的研究已经取得了一定成果。文献[6]建立了电热水器集群温控负荷的模型, 研究了其在频率响应下的控制策略。文献[7]提出了具有储能特性的空调负荷快速参与需求响应的方案, 并建立了空调负荷总功率与环境温度、室外温度的关系模型, 实现了对空调负荷可调度潜力的评估。文献[8-9]首先分析了电动汽车随机接入电网时参加系统需求响应的可行性, 提出了一种适用于电动汽车的分布式需求响应算法, 以降低系统负荷最大峰值。文献[10]定义了“源-网-荷”互动协调的概念, 利用可控负荷调节电力系统的运行, 并以风电消纳为目标给

出了相关的控制研究框架。将负荷侧中具有代表性的高耗能负荷作为参加需求响应的主体控制对象有着明显的优势。首先高耗能负荷具有更高的单体负荷容量, 比商业和住宅负荷具有更大的调节潜力; 其次, 高耗能负荷的自动化生产水平较高, 更易于实现负荷控制^[11]。因此, 研究以高耗能负荷为需求响应主体的协调调度方法具有较强的工程意义与应用价值^[12]。

高耗能负荷参与对电网调峰的作用在国内外已有研究。文献[13]提出了一种高耗能-风电协调调度策略; 文献[14]提出了一种源荷协调控制的多目标优化算法; 文献[15]构建了一种考虑风电消纳成本的源荷协调2层优化模型; 文献[16]研究了综合考虑风电价格约束和电网调峰约束下高耗能企业内部转移负荷和增加负荷, 利用优化预测函数控制寻优算法求解风电出力波动数值; 文献[17]综合考虑源、网、荷三方利益, 引入电价竞争机制, 提出了风电消纳模型, 以实现降低风电出力波动、减少受阻风电功率的目的。综合而言, 大多数研究仅集中在利用可调节负荷参与系统的可再生能源消纳方面, 随着需求响应和储能技术的成熟和成本的降低, 研究含储能与高耗能负荷参与系统联合调峰的协调优化调度方法具有重要意义。

氧化镁作为一种高温耐火材料, 在航天、水泥、化工及电子工业等中都得到了应用。我国辽宁省中部菱镁矿资源丰富, 制备氧化镁的方法主要是利用电熔镁炉产生电弧进行高温灼烧, 将菱镁矿石加热到熔融状态, 以获取高纯度的氧化镁晶体^[18]。电熔镁负荷是一种高能耗的工业负荷, 由于电熔镁负荷的容量为几十兆瓦级或数百兆瓦级, 即使只进行部分功率调节, 也能作为火电机组调节能力的补充, 降

低火电机组的调节次数和调峰深度。目前相关研究大多数集中在电熔镁炉运行控制方面。关于电熔镁用能的研究,文献[19]提出了一种基于改进粒子群优化算法的电弧炉供电模型,可以达到缩减电熔镁熔炼时间、降低单位用能的效果;文献[20]考虑了在电熔镁负荷运行过程中的不同运行状态,实现了在不同工况下电熔镁熔炼过程中全厂电能分配的实时多目标优化。

针对上述火电机组和新能源发展中的问题,本文将高耗能负荷中具有代表性的电熔镁负荷作为负荷侧调控的主体对象,在电熔镁负荷侧配置电池储能装置,共同参与系统的风电消纳。考虑到不同调峰主体参与电力系统调峰的时间尺度不同,使各参与主体分别参与到相应时段的调峰过程中,对风电预测误差与负荷预测误差进行逐步消除,形成计及电熔镁负荷和储能的联合调峰方法。通过深入分析电熔镁负荷和储能参与系统调峰的机理,建立以电力系统运行成本最小为目标的协调优化调度方法,实现了负荷侧调峰主体和源侧机组的协调运行,仿真结果表明该方法能有效提高系统调峰灵活性,降低系统的运行成本,提升风电的消纳能力。

1 需求侧调峰主体在电力系统调峰中的作用

1.1 电熔镁负荷

1.1.1 电熔镁负荷运行方式

电熔镁炉的工作原理图如图1所示。图中1—4分别为电熔镁炉接入降压变压器的短网、电极升降装置、电熔镁炉炉体、可升降电极。在电熔镁的生产过程中,主要通过电熔镁炉进行制备。从炉体结构上,电熔镁炉属于一种交流电弧炉。从生产工艺上,电熔镁炉是利用交流电弧产生的热量对电熔镁矿石进行加热,使矿石达到熔融状态,进而可以得到氧化镁晶体。电熔镁炉可以通过电极控制器对电极进行升降,达到控制炉内电流,进而控制电熔镁炉消耗功率的效果。

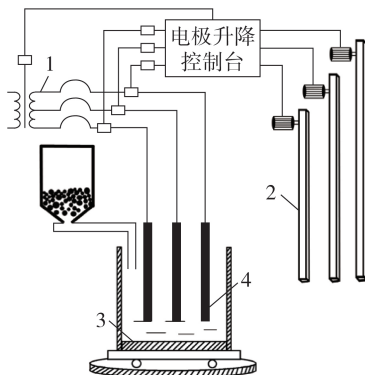


图1 电熔镁炉原理示意图

Fig.1 Principle diagram of fused magnesium furnace

1.1.2 电熔镁负荷调节特性模型

电熔镁负荷在生产过程中受到多种生产工艺的限制,故在电熔镁负荷调节过程中应考虑以下约束。

1) 调节容量约束。

$$P_m(t) = P_{base}^t + s_1^t N(t) P_{up} - s_2^t N(t) P_{down} \quad (1)$$

$$s_1^t + s_2^t \leq 1 \quad (2)$$

$$P_{m_min} \leq P_m(t) \leq P_{m_max} \quad (3)$$

式中: $P_m(t)$ 为 t 时刻电熔镁负荷调节后的运行功率; P_{up} 和 P_{down} 分别为电熔镁负荷的功率上调和下调裕度; P_{base}^t 为 t 时刻电熔镁炉运行的基准功率; P_{m_max} 和 P_{m_min} 分别为电熔镁炉在保证安全运行的前提下的最大和最小稳定运行功率; $N(t)$ 为 t 时刻可参与调节的电熔镁炉的台数; s_1^t 和 s_2^t 分别为 t 时刻电熔镁炉功率上调和下调的 0-1 变量, $s_1^t=1, s_2^t=0$ 和 $s_1^t=0, s_2^t=1$ 分别表示电熔镁炉处于功率上调和下调状态。

2) 调节次数约束。

$$0 \leq \left[\sum_{t=2}^T (|s_1^t - s_1^{t-1}| + |s_2^t - s_2^{t-1}|) \right] / 2 \leq M \quad (4)$$

式(4)表示在电熔镁炉的一个完整生产周期 T 内,每台电熔镁炉的调节次数不应超过所设定的最大调节次数 M ,这样可以避免单台电熔镁炉进行多次调节,影响该台电熔镁炉的产品纯度与产量。

3) 电熔镁负荷功率调节时间约束。

单台电熔镁炉不宜在连续的几个时间段内进行持续上调,否则会导致电熔镁炉中熔融的液体温度持续升高,造成喷炉等事故。另外,如果电熔镁炉功率持续下调时间过长,则会导致炉内温度不满足反应要求,影响电熔镁产品纯度。所以对电熔镁负荷功率调节时间约束为:

$$|s_1^{t-1} - s_1^t| s_1^{t-1} \left(T_{up_max} - \sum_{\tau=t-T_{up_max}-1}^{t-1} s_1^\tau \right) \geq 0 \quad (5)$$

$$|s_2^{t-1} - s_2^t| s_2^t \left(T_{down_max} - \sum_{\tau=t-T_{down_max}-1}^{t-1} s_2^\tau \right) \geq 0 \quad (6)$$

式中: T_{up_max} 、 T_{down_max} 分别为电熔镁负荷功率的最长持续上调、下调时间。

4) 电熔镁负荷的产量约束。

为了保证电熔镁负荷在参与调节前、后产量不受影响,对电熔镁负荷的产量约束为:

$$\sum_{i=1}^T \lambda_i (P_{base}^i + s_1^i P_{up} - s_2^i P_{down}) \Delta T \geq W_m \quad i=1, 2, 3 \quad (7)$$

式中: $\lambda_1 - \lambda_3$ 分别为功率上调状态、功率下调状态、额定功率状态下的电熔镁产率; ΔT 为电熔镁负荷的调度周期; W_m 为电熔镁的预计产量值。

1.2 储能系统运行方式与模型

目前,由于储能技术的不断成熟和成本降低,其能广泛参与到电力工程的实际应用中。在多种储能技术中,电池储能集成度水平高、响应速度快,成为

了最受关注的储能技术之一。当负荷侧配置集中式电池储能时,储能装置可以参与电网调峰与新能源消纳,提高电网接纳新能源水平,降低火电机组调峰负担。

荷电状态 SOC(State Of Charge)为评价电池储能装置剩余能量的参数,其计算公式为:

$$\lambda_{\text{SOC}} = \frac{E_{\text{battery}}}{C_{\text{battery}}} \times 100\% \quad (8)$$

式中: λ_{SOC} 为 SOC 值; E_{battery} 为储能电池当前的储存电量; C_{battery} 为储能电池容量。

储能电池充放电过程中 SOC 的变化为:

$$\lambda_{\text{SOC}}(t+1) = \left(\frac{\Delta P_{\text{battery}}^{\text{cha},t} \eta_{\text{cha}} \Delta t}{C_{\text{battery}}} - \frac{\Delta P_{\text{battery}}^{\text{dis},t} \Delta t}{\eta_{\text{dis}} C_{\text{battery}}} \right) \times 100\% + \lambda_{\text{SOC}}(t) \quad (9)$$

式中: $\Delta P_{\text{battery}}^{\text{cha},t}$ 、 $\Delta P_{\text{battery}}^{\text{dis},t}$ 分别为 t 时刻电池储能装置的充、放电功率; η_{cha} 、 η_{dis} 分别为储能电池的充、放电效率; Δt 为充放电时间间隔。

电池储能装置在系统中的运行约束为:

$$\lambda_{\text{SOCmin}} \leq \lambda_{\text{SOC}}(t) \leq \lambda_{\text{SOCmax}} \quad (10)$$

$$\begin{cases} P_{\text{b_min}}^{\text{cha}} \leq \Delta P_{\text{battery}}^{\text{cha},t} \leq P_{\text{b_max}}^{\text{cha}} \\ P_{\text{b_min}}^{\text{dis}} \leq \Delta P_{\text{battery}}^{\text{dis},t} \leq P_{\text{b_max}}^{\text{dis}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: λ_{SOCmax} 和 λ_{SOCmin} 分别为储能电池 SOC 的最大值和最小值; $P_{\text{b_min}}^{\text{cha}}$ 、 $P_{\text{b_max}}^{\text{cha}}$ 和 $P_{\text{b_min}}^{\text{dis}}$ 、 $P_{\text{b_max}}^{\text{dis}}$ 分别为电池储能装置的最小、最大充电功率和放电功率。

1.3 需求侧调峰主体在调峰中的作用

通过整合需求侧的可调控资源与电网进行“双向互动”,是应对日益增长且多样化的电力需求和缓解电力供需不平衡的有效手段。

在传统调度方式下,电力系统的净负荷为:

$$P_{\text{load_eq}} = P_{\text{load}} - P_{\text{wind}} \quad (12)$$

式中: $P_{\text{load_eq}}$ 为电力系统的净负荷; P_{load} 为不考虑电熔镁负荷参与调节时的系统有功负荷; P_{wind} 为风电出力。当常规调峰资源无法平抑风电出力波动时,系统的受阻风电量为:

$$W_{\text{wind_cur}} = \int_0^{T_3} (P_{\text{g_min}} - P_{\text{load_eq}}) dt = \int_0^{T_3} (P_{\text{g_min}} - P_{\text{load}} + P_{\text{wind}}) dt \quad (13)$$

式中: $W_{\text{wind_cur}}$ 为受阻风电量; $P_{\text{g_min}}$ 为火电机组常规调峰出力最小值; $0 \sim T_3$ 为图 2 中系统存在弃风的时段。

若电熔镁负荷参与系统调峰,则存在弃风时段时,高耗能负荷上调功率 ΔP_{m} ,此时电力系统的净负荷 $P'_{\text{load_eq}}$ 为:

$$P'_{\text{load_eq}} = P_{\text{load}} + \Delta P_{\text{m}} - P_{\text{wind}} \quad (14)$$

电熔镁负荷参与调峰后,系统的受阻风电量 $W'_{\text{wind_cur}}$ 如式(15)所示。对比式(13)、(15)可见,由于电熔镁负荷参与系统调峰,所以系统的弃风电量

减小。

$$W'_{\text{wind_cur}} = \int_0^{T_3} (P_{\text{g_min}} - P'_{\text{load_eq}}) dt = \int_0^{T_3} (P_{\text{g_min}} - P_{\text{load}} - \Delta P_{\text{m}} + P_{\text{wind}}) dt \quad (15)$$

图 2 为 3 种调度方式的系统日净负荷对比图。由图可见,在电熔镁负荷进行调峰的基础上,电池储能能在弃风时段吸收风电功率,并在后续出现负荷高峰时段释放功率。这说明电熔镁负荷和电池储能联合调峰方式使系统净负荷峰谷差进一步减小,缓解了火电机组调峰压力。

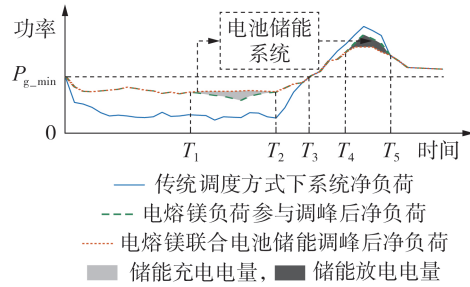


图2 3种调度方式的净负荷对比

Fig.2 Comparison of net load among three kinds of dispatching modes

2 火电机组调峰成本模型

随着碳达峰、碳中和目标的逐步推进,新能源机组将会大规模接入电力系统,电源侧将呈现出多能互补的局面,为了提高电力系统新能源占比,火电需要进行频繁调节并增大调峰宽度来平抑新能源的功率波动,这将增加火电机组的运行成本。本节将从经济性角度,以火电机组为研究对象,对大规模新能源接入电力系统后的火电机组运行成本进行分析,基于此针对调峰过程的不同阶段进行细化,建立火电机组运行成本模型。

根据火电机组在电力系统中不同的运行状态和能耗特性,可以分为常规调峰阶段、不投油深度调峰阶段和投油深度调峰阶段。在常规调峰阶段中,火电机组的煤耗成本占据主要部分,根据机组类型查阅相关的煤耗曲线可以获得对应机组在具体出力情况下的煤耗量,故火电机组运行在常规调峰阶段的煤耗成本 $f_{\text{g}}(P_{\text{g},i}^t)$ 为:

$$f_{\text{g}}(P_{\text{g},i}^t) = [a_i (P_{\text{g},i}^t)^2 + b_i P_{\text{g},i}^t + c_i] p_{\text{coal}} \quad (16)$$

式中: a_i 、 b_i 、 c_i 为火电机组 i 的煤耗特性曲线系数; $P_{\text{g},i}^t$ 为 t 时刻火电机组 i 的出力; p_{coal} 为火电机组消耗的煤炭价格。

由于电源侧呈现多能互补的趋势,为更大程度地消纳新能源,需要火电机组降低出力,运行在深度调峰模式,为新能源让出更大的上网空间。但随着火电机组出力的下降,机组效率也会随之降低,因此

有必要对深度调峰过程中的火电机组运行成本进行分析。

在不投油的深度调峰阶段,除考虑式(16)所示的煤耗成本外,还应考虑在交变应力作用下机组寿命衰减所导致的机组寿命损耗成本。本文选择Manson-Coffin公式对火电机组的寿命损耗成本 f_s 进行定量计算^[21],如式(17)所示。

$$f_s = \frac{\alpha p_g}{2N_s(P_{g,i}^t)} \quad (17)$$

$$N_s(P_{g,i}^t) = 0.00577(P_{g,i}^t)^3 - 2.682(P_{g,i}^t)^2 + 484.8P_{g,i}^t - 8411 \quad (18)$$

式中: α 为机组运行损耗系数,其随着调峰深度的不同而变化; p_g 为火电机组购机成本,主要与机组的容量有关; $N_s(P_{g,i}^t)$ 为转子致裂循环周次。

若火电机组采用更深度调峰方式,则锅炉内的燃烧稳定性无法保证,此时需要在炉内加注助燃油维持锅炉内的燃烧情况,则在该投油深度调峰阶段,还需要考虑附加的投油成本 f_o ,如式(19)所示。

$$f_o = m_{oil} p_{oil} \quad (19)$$

式中: p_{oil} 为单位油价; m_{oil} 为投油深度调峰阶段使用的油量。

综上所述,不同调峰阶段的火电机组成本 f_{sd} 如表1所示。

表1 不同调峰阶段的火电机组成本

Table 1 Cost of thermal power generators in different peaking stages

调峰阶段	f_{sd}
常规调峰	f_g
不投油深度调峰	$f_g + f_s$
投油深度调峰	$f_g + f_s + f_o$

3 计及电熔镁负荷和储能联合调峰的日前-日内经济调度优化模型

随着风电等新能源的装机容量逐年提升,其消纳问题也愈发突出。虽然对风电进行功率预测可以对后续系统调度提供帮助,但是风电预测结果仍存有一定偏差,并且风电功率的预测准确度随着时间尺度的减小而提高,所以为了达到更好的风电消纳效果,考虑分为日前与日内2种时间尺度对电力系统内可调度资源进行控制,建立日前和日内经济调度模型。根据第1、2节的分析可知,对于电力系统内不同类型的调峰资源,有着不同的控制方式,电熔镁负荷在响应系统调度需求时,需考虑调节时间约束,调节速度和范围有限。相比于电熔镁负荷,电池储能集成度水平高、响应速度快,能灵活响应系统的调度需求。将电熔镁负荷和电池储能在其适宜的时间尺度内进行调度,可最大限度地发挥两者的作用。下面从经济性角度,分别对日前和日内电熔镁

负荷和电池储能联合调峰经济调度模型进行说明。

3.1 日前经济调度模型

对于日前调度阶段,电源侧考虑常规火电机组、深度调峰火电机组和风电,负荷侧考虑电熔镁负荷参与电网调峰,日前调度以后续的24 h为1个调度周期,以1 h为时间间隔进行调度,以系统日前24 h内的总运行成本最低为目标,确定系统风电接入量、火电机组启停情况、深度调峰机组出力和电熔镁负荷的调节情况。

日前经济调度模型目标函数为:

$$\min F_{ad} = F_{Pg} + F_{st} + F_m + F_{obs} \quad (20)$$

$$F_{Pg} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{g1}} s_{g,i}^t [a_i (P_{g,i}^t)^2 + b_i P_{g,i}^t + c_i] p_{coal} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{g2}} s_{g,i}^t f_{sd,i}^t \quad (21)$$

$$F_{st} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{g1}+N_{g2}} [p_{start} s_{g,i}^t (1-s_{g,i}^{t-1}) + p_{stop} s_{g,i}^{t-1} (1-s_{g,i}^t)] \quad (22)$$

$$F_m = \sum_{t=1}^T (p_{m1} s_1^t + \eta P_{up} + p_{m2} s_2^t) \quad (23)$$

$$F_{obs} = \sum_{t=1}^T p_{wind} P_{obs}^t \quad (24)$$

式中: F_{ad} 为系统日前运行的总成本,其包括火电机组的运行成本 F_{Pg} 、启停成本 F_{st} 、电熔镁负荷调节成本 F_m 和弃风成本 F_{obs} ; N_{g1} 和 N_{g2} 分别为常规火电机组台数和可深调火电机组台数; $f_{sd,i}^t$ 为 t 时刻深度调峰火电机组 i 的运行成本; $s_{g,i}^t$ 为火电机组 i 在 t 时刻的启停状态变量,取值为1、0时分别表示启动、停机状态; p_{start} 、 p_{stop} 分别为火电机组单次启、停过程所产生的成本; p_{m1} 、 p_{m2} 分别为电熔镁负荷单次上调、下调的响应补贴成本; η 为在上调过程中的电费补贴系数,由调节时刻的分时电价决定; p_{wind} 为单位弃风成本; P_{obs}^t 为系统在 t 时刻的弃风量。

在日前调度中,需要考虑的约束条件包含风电出力约束、火电机组约束、系统运行约束和电熔镁负荷调节约束,其中电熔镁负荷调节约束如式(1)~(7)所示。

1) 风电出力约束。

风电出力的上、下限约束为:

$$0 \leq P_{wind}^t \leq P_{wind,fore}^t \quad (25)$$

风电出力的爬坡约束为:

$$-R_{wind,down} \leq P_{wind}^t - P_{wind}^{t-1} \leq R_{wind,up} \quad (26)$$

式中: $P_{wind,fore}^t$ 为 t 时刻日前风电功率预测值; $R_{wind,up}$ 和 $R_{wind,down}$ 分别为风电功率向上爬坡速率和向下爬坡速率极限值。

2) 火电机组约束。

火电机组的出力约束为:

$$s_{g,i}^t P_{gi,min}^t \leq P_{g,i}^t \leq s_{g,i}^t P_{gi,max}^t \quad (27)$$

火电机组的出力爬坡约束为:

$$-R_{gi,down} \leq P_{g,i}^t - P_{g,i}^{t-1} \leq R_{gi,up} \quad (28)$$

火电机组最小启停时间约束为:

$$\sum_{m=0}^{T_{on,i}-1} s_{g,i}^{t+m} \geq T_{on,i} (s_{g,i}^t - s_{g,i}^{t-1}) \quad (29)$$

$$\sum_{m=0}^{T_{off,i}-1} (1 - s_{g,i}^{t+m}) \geq T_{off,i} (s_{g,i}^{t-1} - s_{g,i}^t) \quad (30)$$

式中: $P_{gi_max}^t$ 和 $P_{gi_min}^t$ 分别为火电机组 i 的出力上、下限值; R_{gi_up} 和 R_{gi_down} 分别为火电机组功率向上爬坡速率和向下爬坡速率极限值; $T_{on,i}$ 、 $T_{off,i}$ 分别为火电机组 i 的连续开机、停机最小时长。

3) 系统运行约束。

系统内有功功率平衡约束为:

$$\sum_{i=1}^{N_{wind}} P_{wind,i}^t + \sum_{i=1}^{N_{g1}+N_{g2}} s_{g,i}^t P_{g,i}^t = P_m(t) + P_{load}^t \quad (31)$$

系统正负旋转备用容量约束为:

$$\sum_{i=1}^{N_{g1}+N_{g2}} s_{g,i}^t (P_{gi_max}^t - P_{g,i}^t) \geq R_{g,up}^t \quad (32)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{g1}+N_{g2}} s_{g,i}^t (P_{g,i}^t - P_{gi_min}^t) \geq R_{g,down}^t \quad (33)$$

式中: N_{wind} 为风电场总数; P_{load}^t 为 t 时刻的常规负荷日前预测值; $R_{g,up}^t$ 、 $R_{g,down}^t$ 分别为 t 时刻系统运行需要保证的上旋、下旋备用。

通过对日前优化调度模型进行求解,可以得到各台火电机组在各个时刻的启停情况、电熔镁负荷在各个时刻的功率调节情况、深度调峰机组的出力大小,并将上述求得的日前调度参考值代入日内优化调度模型中做进一步求解。

3.2 日内经济调度模型

在日内优化阶段,以 1 h 为调度周期,安排未来 1 h 的火电机组出力情况和储能功率变化情况。因此,可以构建以下一个调度周期内的系统总运行成本最小的日内经济调度模型,系统的总运行成本主要考虑火电机组运行成本和启停成本、电熔镁负荷调节成本、储能电池运行成本和弃风成本。且在系统运行约束中也需要考虑系统正负旋转备用、机组爬坡约束和储能电池运行约束。

日内经济调度模型目标函数为:

$$\min F_{id} = F_{Pg} + F_{st} + F_m + F_{battery} + F_{obs} \quad (34)$$

$$F_{Pg} = \sum_{i=1}^{N_{g1}} s_{g,i}^t [a_i (P_{g,i}^t)^2 + b_i P_{g,i}^t + c_i] p_{coal} + \sum_{i=1}^{N_{g2}} s_{g,i}^t f_{sd,i}^t \quad (35)$$

$$F_{st} = \sum_{i=1}^{N_{g1}+N_{g2}} [p_{start} s_{g,i}^t (1 - s_{g,i}^{t-1}) + p_{stop} s_{g,i}^{t-1} (1 - s_{g,i}^t)] \quad (36)$$

$$F_m = p_{m1} s_1^t + \eta p_{m1} + p_{m2} s_2^t \quad (37)$$

$$F_{battery} = p_{battery} |\Delta P_{battery}^{cha,t} + \Delta P_{battery}^{dis,t}| \quad (38)$$

$$F_{obs} = p_{wind} P_{obs}^t \quad (39)$$

系统内有功功率平衡约束为:

$$\sum_{i=1}^{N_{wind}} P_{wind,i}^t + \sum_{i=1}^{N_{g1}+N_{g2}} s_{g,i}^t P_{g,i}^t = P_m(t) + P_{load}^t + \Delta P_{battery}^{cha,t} - \Delta P_{battery}^{dis,t} \quad (40)$$

式中: F_{id} 为系统日内运行总成本; $F_{battery}$ 为电池储能系统运行成本; $p_{battery}$ 为电池储能的单位充放电成本; $P_{wind,i}^t$ 为 t 时刻的日内风电出力; P_{load}^t 为日内常规负荷的预测值。

通过对日内优化调度模型的求解,调整下一调度周期内的火电机组的出力情况和风电出力情况,并确定电池储能的充放电情况。日前-日内经济调度方法的流程图如附录 A 图 A1 所示。

4 算例分析

4.1 算例参数

基于改进的 IEEE 30 节点系统对本文所提出的两阶段日前-日内经济调度优化模型进行验证。改进后的 IEEE 30 节点系统中含有 1 座装机容量为 1 500 MW 的风电场、4 台常规火电机组、1 台可以进行深度调峰的火电机组,其中参考实际电网中风电上网电价,将弃风成本设置为 200 元/(MW·h),火电机组参数如附录 A 表 A1 所示。模型求解问题属于一种混合整数规划问题,本文考虑采用遗传算法进行求解。在日前调度模型中,设置遗传算法的最大迭代次数为 1 500 次,种群规模为 500,变异概率为 0.7,交叉概率为 0.3;相较于日前调度模型,日内调度模型中变量数量明显减少,故在日内调度模型中设置遗传算法的最大迭代次数为 500 次,种群规模为 100,变异概率为 0.7,交叉概率为 0.3。

本文假设电熔镁企业在安排生产计划时,采用全天生产方式。且为了避免由于连续调节时间过长对电熔镁产品的质量造成影响,假设电熔镁负荷最长的持续上调时间不超过 6 h,最长的持续下调时间不超过 4 h,则电熔镁负荷具体的调节参数如表 2 所示。

表 2 电熔镁负荷调节参数

Table 2 Regulation parameters of fused magnesium load

功率 / MW	最大持续上调 时间 / h	最大持续下调 时间 / h	上调空 间 / %	下调空 间 / %
700	6	4	20	15

系统中除电熔镁负荷外,常规负荷的日前预测曲线如附录 A 图 A2 所示,并假设常规负荷的日前、日内的预测结果相同。电熔镁企业内装配的储能电池采用磷酸铁锂电池,容量为 200 MW·h,储能电池的具体参数如附录 A 表 A2 所示。设储能电池的运营成本为 50 元/(MW·h)。

4.2 算例结果分析

为了验证本文所提出的日前-日内经济调度方法的有效性,设定以下场景进行对比分析。

1) 场景 1: 仅依靠常规火电机组进行调峰。

2) 场景 2: 仅依靠火电机组和电熔镁负荷进行日前调峰。根据日前风电预测数据,充分考虑电熔镁的运行约束的同时,使电熔镁负荷主动参与系统

调峰。

3)场景3:依靠火电机组,联合电熔镁负荷与储能电池进行日前-日内联合调峰。

结合风电日前-日内的预测数据,得出3种场景下的系统运行成本情况如表3所示,各场景下的弃风量对比如附录A图A3所示。

表 3 不同场景下电力系统运行总成本对比

Table 3 Comparison of total operating costs of electric power system among different scenarios

场景	总成本 / 元	常规火电机组调峰成本 / 元	深度调峰机组运行成本 / 元	电熔镁调节成本/元	储能成本 / 元	弃风成本 / 元
1	4393 778.08	3 141 178.08	—	—	—	1 252 600
2	3 929 167.55	1 678 091.01	1 590 226.54	24 800	—	636 050
3	3 677 058.48	1 813 877.71	1 385 654.56	24 800	27 226.21	425 500

从表3中所示不同场景下的系统运行各项成本对比可知,采用传统调度方式时,系统弃风情况最为严重。在场景2中,将电熔镁负荷作为一种调峰资源后,系统弃风成本有了显著降低。进而在场景3中,采用电熔镁和储能联合调峰方式后,相较于场景2,系统的弃风成本又降低了29.2%,且储能和电熔镁负荷的总调节成本仅占系统总运行成本的1.41%。由此可见,使用储能电池对降低系统运行成本有更好的效果。采用本文所提出的电熔镁和储能联合调峰模式能够降低系统运行成本,缓解火电机组调峰压力,提高风电消纳水平。

图3和图4分别为采用电熔镁负荷和储能联合调峰策略后,各个时刻的风电出力情况和电熔镁负荷的调节情况。由图4可见,在弃风率较高的时刻(如01:00—04:00和20:00—24:00),电熔镁负荷均进行了功率上调,以帮助系统消纳风电,且当风电功率降低时(如12:00)电熔镁负荷进行了功率下调,以满足系统源侧与荷侧的供需平衡,避免了火电机组进行频繁调节。

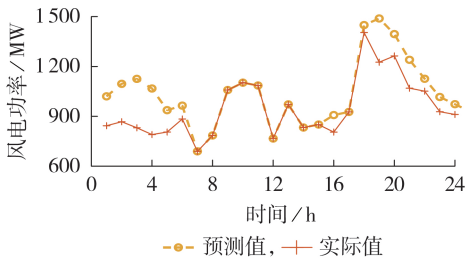


图 3 采用日前-日内调峰策略后的弃风情况
Fig.3 Amount of wind curtailment after adopting day-ahead and intra-day peak shaving strategy

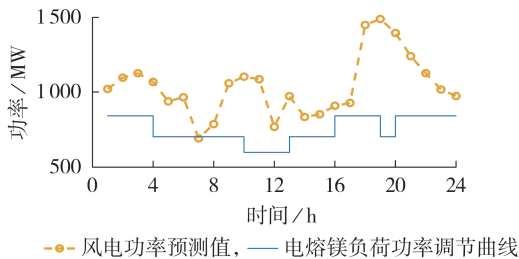


图 4 电熔镁负荷调节曲线
Fig.4 Regulation curve of fused magnesium load

图5为电池储能充放电功率情况,通过电熔镁负荷和电池储能的功率动态调整后,场景2和场景3中系统的净负荷对比情况如图6所示。由图可见,经日前-日内两阶段的优化调度后,系统净负荷的日峰谷差降低了30.98 MW。综上所述,电熔镁负荷和电池储能联合调峰策略能够降低系统的净负荷峰谷差值,同时可以充分接纳风电,具有良好的实用价值。

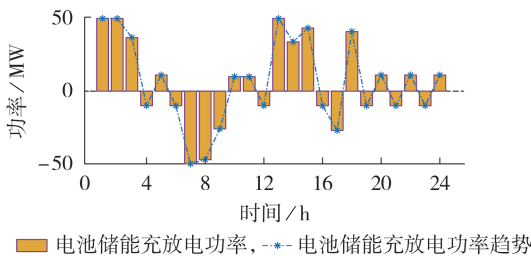


图 5 电池储能充放电功率情况
Fig.5 Charging and discharging power of battery energy storage

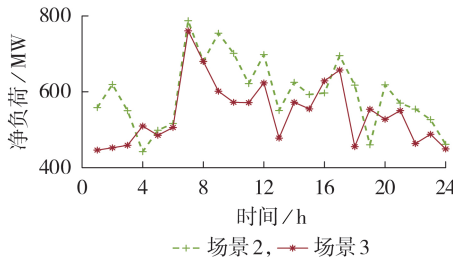


图 6 场景2和场景3中系统净负荷对比
Fig.6 Comparison of net load in electric power system between Scenario 2 and Scenario 3

当采用本文所提出的电熔镁负荷与储能联合调峰的运行模式时,系统中的火电机组出力情况如图7所示。由图7可知:当风电消纳存在困难时(如01:00—04:00和20:00—24:00),深度调峰机组会降低出力,为风电上网提供更大空间;且当系统风电有降低趋势时(如07:00—08:00),深度调峰机组可以补足风电功率的缺失。由此可见,深度调峰机组可以进一步提高系统调峰的灵活性,配合电熔镁负荷和电池储能共同参与系统调度,提高系统风电消纳水平。

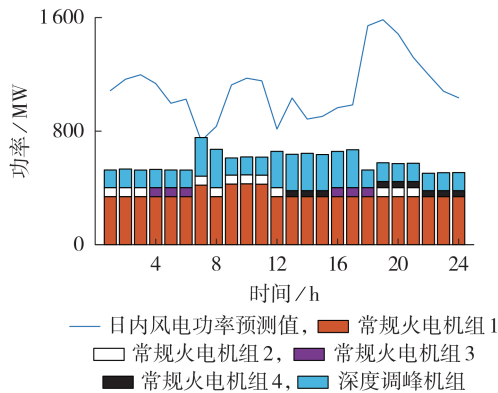


图7 火电机组出力情况

Fig.7 Output of thermal power units

5 结论

本文提出了一种计及需求侧电熔镁负荷和电池储能的联合调峰调度方法,得到主要结论如下。

1)从需求侧中的电熔镁负荷和电池储能模型入手,讨论了二者在电力系统调峰中的作用,从理论上揭示了通过合理调节电熔镁负荷和配置电池储能可以帮助系统提高风电消纳量。

2)火电机组中的深度调峰火电机组由于有着更宽的调节裕度,可以进一步提升电力系统风电功率的接入能力。通过联合电熔镁负荷以及储能进行辅助调峰,在提高系统灵活性的同时可以进一步降低系统弃风水平。由算例分析结果可知,本文所提优化调度策略相较于仅考虑电熔镁负荷调峰的场景,日平均弃风功率降低了29.2%,系统净负荷的日峰谷差降低了30.98 MW。在未来,随着储能的成本的降低,本文所提出的调度策略将有更为广阔的应用前景。

3)本文以系统总运行成本最低为目标,提出了一种日前-日内两阶段经济调度方法,使各调峰主体在不同时间尺度上发挥各自优势,灵活响应系统的调度需求。该方法可以用于分析风火系统中,利用电熔镁负荷和储能在不同模式下参与电力系统调峰的运行成本,为电力系统调度和电熔镁企业生产规划提供了一种有效的决策信息。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 陈国平,董昱,梁志峰. 能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5493-5505.
CHEN Guoping, DONG Yu, LIANG Zhifeng, et al. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with Chinese characteristics in energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5493-5505.
- [2] 崔杨,周慧娟,仲悟之,等. 考虑源荷两侧不确定性的含风电电力系统低碳调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11): 85-93.
CUI Yang, ZHOU Huijuan, ZHONG Wuzhi, et al. Low-carbon scheduling of power system with wind power considering uncertainty of both source and load sides[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 85-93.
- [3] 刘天琪,卢俊,何川,等. 考虑联合热电需求响应与高比例新能源消纳的多能源园区日前经济调度[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 261-268.
LIU Tianqi, LU Jun, HE Chuan, et al. Day-ahead economic dispatch of multi-energy parks considering integrated thermo-electric demand response and high penetration of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 261-268.
- [4] 李军徽,张嘉辉,穆钢,等. 计及负荷峰谷特性的储能调峰日前优化调度策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(7): 128-133, 140.
LI Junhui, ZHANG Jiahui, MU Gang, et al. Day-ahead optimal scheduling strategy of peak regulation for energy storage considering peak and valley characteristics of load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 128-133, 140.
- [5] LIAO Siyang, XU Jian, SUN Yuanzhang, et al. Local utilization of wind electricity in isolated power systems by employing coordinated control scheme of industrial energy-intensive load[J]. Applied Energy, 2018, 217(1): 14-24.
- [6] KONDOH J, LU N, HAMMERSTROM D J. An evaluation of the water heater load potential for providing regulation service[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1309-1316.
- [7] CHEN Xingying, WANG Jixiang, XIE Jun, et al. Demand response potential evaluation for residential air conditioning loads[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(19): 4260-4268.
- [8] TAN Zhao, YANG Peng, NEHORAI A. An optimal and distributed demand response strategy with electric vehicles in the smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 861-869.
- [9] RASSAEI F, SOH W S, CHUA K C. Demand response for residential electric vehicles with random usage patterns in smart grids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1367-1376.
- [10] 姚建国,杨胜春,王珂,等. 智能电网“源-网-荷”互动运行控制概念及研究框架[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 1-6, 12.
YAO Jianguo, YANG Shengchun, WANG Ke, et al. Concept and research framework of smart grid “source-grid-load” interactive operation and control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 1-6, 12.
- [11] 王健,鲁宗相,乔颖,等. 高载能负荷提高风电就地消纳的需求响应模式研究[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2115-2124.
WANG Jian, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. Research on demand response mechanism of wind power local accommodation utilizing energy-intensive loads[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2115-2124.
- [12] 王珂,姚建国,姚良忠,等. 电力柔性负荷调度研究综述[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 127-135.
WANG Ke, YAO Jianguo, YAO Liangzhong, et al. Survey of research on flexible loads scheduling technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 127-135.
- [13] 陈润泽,孙宏斌,晋宏杨. 高载能企业参与电力系统调度的模式与效益分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 168-175.
CHEN Runze, SUN Hongbin, JIN Hongyang. Pattern and benefit analysis of energy-intensive enterprises participating in power system dispatch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 168-175.
- [14] 刘文颖,文晶,谢昶,等. 考虑风电消纳的电力系统源荷协调多目标优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1079-

- 1088.
- LIU Wenying, WEN Jing, XIE Chang, et al. Multi-objective optimal method considering wind power accommodation based on source-load coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5):1079-1088.
- [15] 文晶, 刘文颖, 谢昶, 等. 计及风电消纳效益的电力系统源荷协调二层优化模型[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8):247-256.
- WEN Jing, LIU Wenying, XIE Chang, et al. Source-load coordination optimal model considering wind power consumptive benefits based on bi-level programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8):247-256.
- [16] 马林东, 葛智平, 张世才, 等. 基于高耗能企业参与电网内风电消纳的主动调峰技术[J]. 电力建设, 2013, 34(10):102-106.
- MA Lindong, GE Zhiping, ZHANG Shicai, et al. Active peaking technology based on high energy-consumption enterprise participating in wind power accommodation in power grid[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(10):102-106.
- [17] 黄培东, 詹红霞, 彭光斌, 等. 分时电价下考虑源网荷各侧收益的风电消纳模型[J]. 电测与仪表, 2017, 54(7):53-58.
- HUANG Peidong, ZHAN Hongxia, PENG Guangbin, et al. The model of wind power accommodation considering source network load on each side benefits in TOU price[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(7):53-58.
- [18] 王维洲, 吴志伟, 柴天佑. 电熔镁砂熔炼过程带输出补偿的PID控制[J]. 自动化学报, 2018, 44(7):1282-1292.
- WANG Weizhou, WU Zhiwei, CHAI Tianyou. PID control with output compensation for the fused magnesia smelting process[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(7):1282-1292.
- [19] 孔维健, 柴天佑, 丁进良, 等. 镁砂熔炼过程全厂电能分配实时多目标优化方法研究[J]. 自动化学报, 2014, 40(1):51-61.
- KONG Weijian, CHAI Tianyou, DING Jinliang, et al. A real-time multiobjective electric energy allocation optimization approach for the smelting process of magnesia[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(1):51-61.
- [20] 冯琳, 毛志忠, 袁平. 改进多目标粒子群算法及其在电弧炉供电优化中的应用[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(10):1455-1460.
- FENG Lin, MAO Zhizhong, YUAN Ping. Improved multi-objective particle swarm algorithm and its application to electric arc furnace in steelmaking process[J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(10):1455-1460.
- [21] 崔杨, 修志坚, 刘闯, 等. 计及需求响应与火-储深度调峰定价策略的电力系统双层优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13):4403-4415.
- CUI Yang, XIU Zhijian, LIU Chuang, et al. Dual level optimal dispatch of power system considering demand response and pricing strategy on deep peak regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13):4403-4415.

作者简介:



刘 闯

刘 闯(1985—),男,辽宁新民人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为能源高效变换与能源市场经济;

孙 傲(1996—),男,吉林松原人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行分析与优化调度;

王艺博(1989—),男,山东济宁人,讲师,博士,通信作者,主要研究方向为直接式AC/AC变换、配电网柔性调控、电力市场交易(E-mail:wangyibo@neepu.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Day-ahead and intra-day joint economic dispatching method of electric power system considering combined peak-shaving of fused magnesium load and energy storage

LIU Chuang¹, SUN Ao¹, WANG Yibo¹, HE Huan², ZHANG Hailiang¹, NING Liaoyi²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. Anshan Electric Power Supply Company of State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd., Anshan 114009, China)

Abstract: With the promotion of carbon peak and carbon neutrality target, the number of new energy generation connected to the grid will be considerably increased. The inherent randomness and volatility of new energy will significantly influence the balance between generation side and demand side of power grid. Accordingly, the existing dispatching mode cannot meet the dispatching demand of power system dominated by new energy. To improve the peak-shaving capacity of power system, the representative fused magnesium load on the demand side is brought into the dispatching main body to carry out joint optimal dispatching with thermal power units through the configuration of battery energy storage device on the fused magnesium load side. Taking the minimum operation cost of electric power system as the optimization objective, a day-ahead and intra-day joint economic dispatching method is formed and solved by genetic algorithm. An example is given to illustrate the effectiveness of the proposed peak-shaving model, which can improve the new energy consumption of the system and reduce the operation cost of the system.

Key words: fused magnesium load; electric power system dispatching; wind power consumption; genetic algorithm; energy storage

附录 A

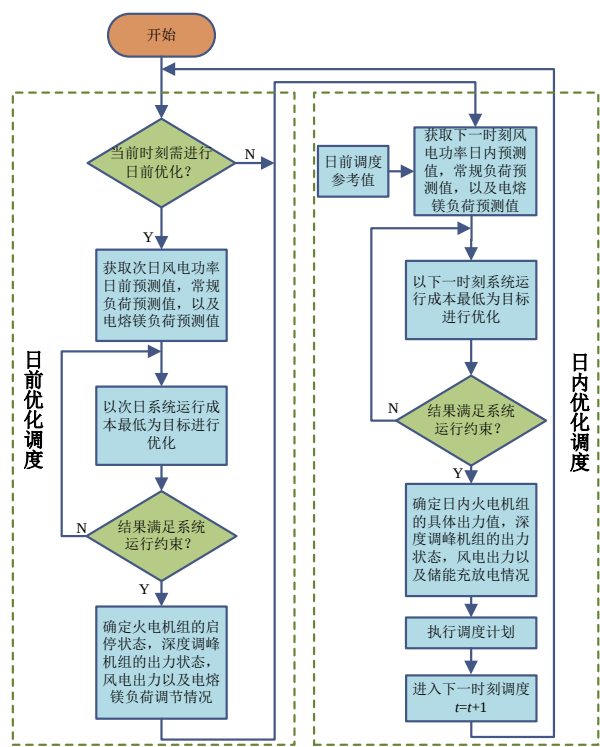


图 A1 日前-日内经济调度流程图

Fig.A1 Flowchart of day-ahead and intra-day economic dispatching method

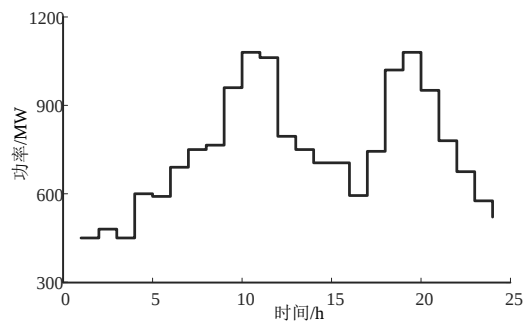


图 A2 系统内常规负荷预测值

Fig.A2 Forecasting value of conventional load

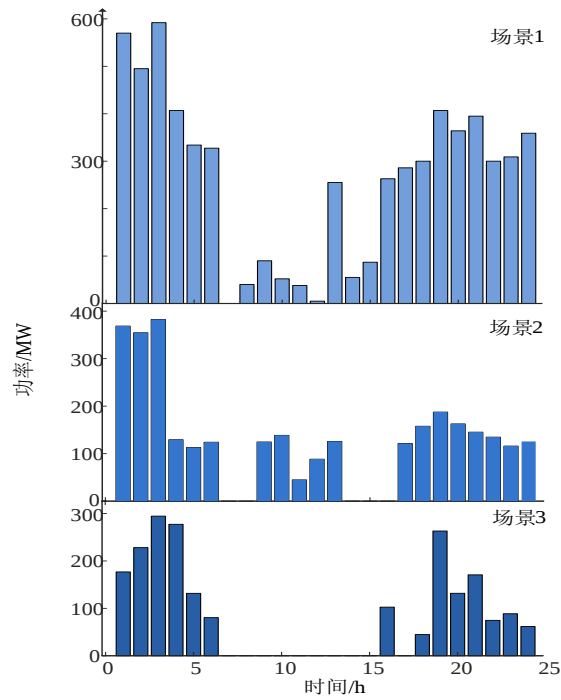


图 A3 3 个场景下的弃风量对比

Fig.A3 Comparison of wind curtailment value among three scenarios

表 A1 火电机组调节参数

Table A1 Adjustment parameters of thermal power units

编号	额定功率/MW	最大出力/%	最小出力/%
1	350	100	50
2	100	100	50
3	100	100	50
4	60	100	50
5	300	100	30

表 A2 电池储能参数

Table A2 Parameters of battery energy storage

电池储能参数	参数值
电池储能容量/(MW·h)	200
电池储能的初始荷电状态	0.3
荷电状态上限、下限	0.95、0.25
储能充放电效率	0.95
储能充放电功率上限、下限/MW	50\10MW