

电池储能系统参与电网削峰填谷控制策略

周喜超^{1,2}, 孟凡强², 李娜², 丛琳², 孟高军³

(1.西安理工大学电气工程学院, 陕西 西安 710048; 2.国网综合能源服务集团有限公司, 北京 100050;
3.江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心, 江苏 南京 211196)

[摘要] 现有针对电化学储能在电网调峰领域的研究缺乏在不同负荷场景下不同控制策略的应用对比, 使得削峰填谷控制策略的选择缺乏理论依据。本文结合已有相关研究和对储能系统特性的分析, 首先在考虑电网负荷、电池功率、电池容量等约束条件下, 建立了以削峰填谷效果为目标的储能系统优化模型; 然后在现有典型控制策略的基础上, 提出了电池储能参与电网削峰填谷的恒功率充放电控制策略和功率差控制策略; 最后, 以某地区实际负荷数据为例, 结合电池储能装置自身充放电特性, 通过仿真对比了2种控制策略的优缺点, 验证了考虑实际约束条件的功率差控制策略具有更优的削峰填谷效果。

[关键词] 电池储能; 削峰填谷; 恒功率控制; 功率差控制; 充放电; 负荷曲线

[中图分类号] TM73 **[文献标识码]** A **[DOI编号]** 10.19666/j.rfd.202004114

[引用本文格式] 周喜超, 孟凡强, 李娜, 等. 电池储能系统参与电网削峰填谷控制策略[J]. 热力发电, 2021, 50(4): 44-50.
ZHOU Xichao, MENG Fanqiang, LI Na, et al. Control strategies of battery energy storage system participating in peak load regulation of power grid[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(4): 44-50.

Control strategies of battery energy storage system participating in peak load regulation of power grid

ZHOU Xichao^{1,2}, MENG Fanqiang², LI Na², CONG Lin², MENG Gaojun³

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. State Grid Integrated Energy Service Group Co., Ltd., Beijing 100050, China;

3. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Smart Distribution Network, Nanjing 211169, China)

Abstract: The current research on electrochemical energy storage in the field of power grid peak-shaving is lack of application comparison between different control strategies in different load scenarios, which makes the selection of peak-shaving and valley-filling control strategy lack of theoretical basis. In this paper, the optimal model of energy storage system is established based on the existing typical control strategies, and the constant power charge-discharge control strategy and the power difference control strategy are proposed. Finally, taking the actual load data of a certain area as an example, combined with the charge-discharge characteristics of the battery energy storage device itself, the advantages and disadvantages of the two control strategies are compared by simulation, and the power difference control strategy considering the actual constraints is verified to have a better peak-cutting and valley filling effect.

Key words: battery energy storage, peak and valley filling, constant power control, power difference control, charge and discharge, load curve

21世纪以来, 社会经济繁荣发展, 导致电力需求逐年增加。随着电网结构的不断变化, 电网内负荷峰谷差现象日趋严重^[1]。此外, 由于化石燃料可用量逐年减少, 我国正在大力发展新能源发电。然而, 可再生能源发电输出功率的波动性、随机性对

电力系统的稳定运行造成一定影响。为提高电网稳定性, 保持电力系统内供用电功率平衡, 在电网运行时有必要采取相应的调峰措施^[2]。

传统的调峰方法包括火力发电调峰^[3]、燃气轮机调峰^[4]、水力发电调峰^[5]。此类调峰方式均通过跟

修回日期: 2020-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51777197); 国家电网有限公司科技项目(5278991900ML)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (51777197); Science and Technology Project of State Grid Corporation Co., Ltd. (5278991900 ML)

第一作者简介: 周喜超(1982), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为新能源并网、储能系统集成技术, 306292745@qq.com。

踪电网负荷波动来调整网内发电机组的输出功率,从而完成调峰过程,因此要求发电机组具备较高的调峰容量。此外,调峰时发电机组的频繁启停也造成了燃料资源的浪费^[6]。目前,常采用电池储能技术从负荷侧对电网负荷峰谷差进行调节^[7]。大规模电池储能系统以其独特的优势在削峰填谷方面发挥了巨大作用,合理利用储能系统可有效解决峰谷差日益增大的问题,实现削峰填谷并有效降低负荷曲线的大幅波动,还可提高设备利用率^[8-10]。

近年来,众多学者对电池储能系统(battery energy storage system, BESS)参与电网削峰填谷开展了广泛研究。文献[11]针对电网负荷曲线特性,提出了一种控制方式简单的恒功率充放电策略,并通过实用简化算法求解适合电网削峰填谷的优化模型,从而改善了恒功率控制策略治理精度低的问题;文献[12-13]采用二次规划算法解决电网负荷峰谷差问题,仿真结果表明该方法可有效提高储能系统削峰填谷的控制精度,但与恒功率充放电策略相比,二次规划算法计算量大,控制方式较为复杂,且会造成储能系统工作模式的频繁切换,不太适合实际工程应用;文献[14-15]采用改进鱼群算法、模拟退火等智能算法求解含储能装置的电力系统削峰填谷最优策略问题。

但是,上述智能算法均未考虑储能装置荷电状态(SOC)的约束,导致最优控制策略不精确。文献[16]针对每日不同运行阶段优化储能系统,根据前一阶段的储能能力制定下一阶段的削峰填谷策略,并在实时调度阶段根据储能运行约束进行计划跟踪。但文章未考虑到不同应用场景对储能的功率、容量和充放电次数要求有所不同,从而影响削峰填谷的效果。文献[17]在考虑储能系统实时功率及充放电深度的基础上,通过设定储能系统充放电次数的上限值对电网进行削峰填谷,但当电网内负荷值变化较大时,储能系统在短时间进行多次充放电操作后易达到设定的上限值,直接导致负荷峰谷差问题无法解决。

综上所述,现有文献所提及的控制策略很难在考虑多种约束条件下实现利用电池储能对电网的削峰填谷。对此,虽然国内外已有学者对电化学储能调峰领域开展了研究,但对于恒功率、功率差等常用的控制策略在不同负荷场景下的应用缺乏对比,使得削峰填谷控制策略选择缺乏理论依据。本文结合已有相关研究和对储能系统特性的分析,首先在考虑电网负荷、电池功率、电池容量等约束

条件下,建立以削峰填谷效果为目标的储能系统电气模型;随后在现有典型控制策略基础上,提出电池储能参与电网削峰填谷的恒功率充放电控制策略和功率差控制策略求解模型;最后以某地实际日负荷数据为例,通过仿真对2种控制策略的优劣性进行比较,以期后续储能工程应用提供参考。

1 BESS 电气模型

利用储能系统对电网进行削峰填谷,即在电网负荷高峰时储能系统放电,低谷时储能系统充电,以保证负荷运行平稳,减少发电机组的启停次数,同时降低系统装机容量的投资建设成本,以改善电网内变压器和输电线路的功率损耗,达到节能降耗的目的。

1.1 目标函数

网内负荷的方差值可用于评价电网削峰填谷的效果。电网负荷的方差值越小,表明电网负荷越平稳,此时电网峰谷之间的差距就越小,利用储能削峰填谷的效果就越好。所以,本文在含电池储能装置的电网中,基于电网负荷方差最小建立削峰填谷效果目标函数

$$\min f(b) = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} \left(D_1(i) - \frac{1}{n_p} \sum_{j=1}^{n_p} D_1(j) \right)^2 \quad (1)$$

式中, $D_1(i)$ 为经过电池储能系统削峰填谷后第 i 个时间段的负荷值, $i=1,2,\dots,n_p$, 其中将一天化为 n_p 个相等时间段。

1.2 约束条件

负荷值约束为

$$D_1(i) = D_0(i) - \sum_{j=1}^n [(\text{sign}(i - T_{\text{start}}(j)) - 1) \frac{P(j)}{2}] \quad (2)$$

$$i, j = 1, 2, \dots, n_p$$

式中: $D_0(i)$ 为第 i 个时间段的预测负荷数据, 为已知值; T_{start} 、 $P(j)$ 分别为电池储能装置充放电起始时间和充放电功率。

时序约束为:

$$1 \leq T_{\text{start}}(1) \quad (3)$$

$$T_{\text{start}}(j) < T_{\text{stop}}(j), j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$T_{\text{stop}}(i) < T_{\text{start}}(i+1), i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (5)$$

$$T_{\text{stop}}(n) \leq n_p \quad (6)$$

式中 T_{start} 、 T_{stop} 为每次充放电的起始时间和结束时间。

功率约束为

$$P_1 \leq P_i \leq P_{\text{max}}, P_{\text{min}} \leq P_i \leq P_2, i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中： P_1 为电池储能系统放电功率下限值； P_2 为电池储能系统充电功率上限值； P_{\max} 、 P_{\min} 为负荷峰、谷值。

容量约束为：

$$0 < E_{\text{initial}} + \sum_{i=1}^k [(T_{\text{stop}}(i) - T_{\text{start}}(i)P(i) \frac{24}{n_p})] < E, \quad (8)$$

$$k = 1, 2, \dots, n-1$$

$$\sum_{i=1}^n [(T_{\text{stop}}(i) - T_{\text{start}}(i)P(i) \frac{24}{n_p})] = E \quad (9)$$

式中 E_{initial} 、 E_{final} 分别为在不影响电池寿命下电池储能系统电量的初值和希望的终值。

此外，还可以考虑其他非线性约束，例如电池物理约束。在上述数学模型中，削峰填谷目标函数、容量约束为非线性，且式(2)中包含的符号函数 $\text{sign}(x)$ 不连续。因此，本文采用恒功率法和功率差法对模型进行求解。

2 BESS 削峰填谷的典型控制策略模型

2.1 恒功率充放电控制策略

恒功率充放电控制策略指无论外部电网负荷如何变化，电池储能系统在任意时刻均根据历史负荷曲线制定充放电规则，以恒定功率进行能量充放电。图1为电池储能系统采用恒功率充放电控制策略进行削峰填谷示意。该策略的一般步骤如下。

1) 设定储能系统容量 E 和恒定充放电功率 P 。由于是恒功率充放电，单位时间内储能系统充放电能量相同，由此计算出总的充放电时间为

$$T = E/P \quad (10)$$

2) 首先，根据电网各时间段历史负荷数据预测下一日电网负荷曲线，找出该负荷曲线中 24h 内的负荷低谷值，并在最低处作水平线 L 。然后，从负荷低谷值处出发，设定很小的步长 ΔM 向上移动，此时水平线 L 会与预测的电网负荷曲线交于两点，实时测量两点之间的距离。最后，将测出的两点距离与充电时间 T 相比：若相等，则说明该区域为电池储能系统较为合理的充电区域；若不等，则将 L 继续以步长 ΔM 向上移动，直至两者距离相等，确定储能电池最终的充电时间段。

3) 寻找储能电池合理放电时间段与步骤 2) 类似。需注意，若电网负荷曲线存在多个负荷高峰期或低谷期，水平线会与负荷曲线相交于多个点形成多个充放电时间段，此时只需要判断这几个时间段之和是否等于充放电时间 T 。

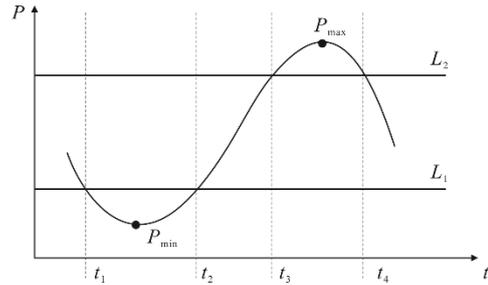


图1 基于恒功率充放电控制策略进行削峰填谷示意
Fig.1 Schematic diagram of peak cutting and valley filling based on constant power control strategy

恒功率充放电控制策略流程如图2所示。

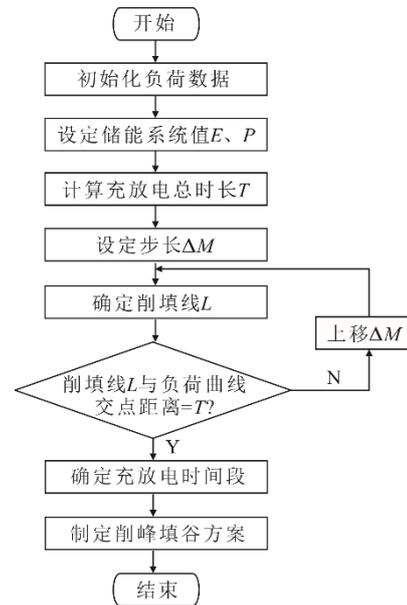


图2 恒功率充放电控制策略流程
Fig.2 Flow chart of the constant power control strategy

该方法易于计算，贴近实际工程应用，目前已应用于深圳宝清电池储能站。但是，该方法的缺陷也十分明显，即误差较大，尤其在实时控制阶段进行削峰填谷时。若实际负荷曲线与策略中所用的预测负荷曲线出入较大，则采用基于恒功率充放电控制策略制定的储能系统充放电规则无法及时做出调整，会减弱储能参与电网削峰填谷的效果，甚至使储能系统在负荷高峰时充电，加剧电网峰谷差。

2.2 功率差控制策略

BESS 在进行削峰填谷时，自身带有多种约束条件，而恒功率充放电控制策略并未考虑这些条件。本节对恒功率充放电控制策略进行改进，提出了功率差控制策略，主要增加了电池储能容量、功率以及电池荷电状态等约束条件。另外，从延长使用寿命角度考虑，要求储能系统在 24h 内以规定的

充放电次数工作。

功率差控制策略中,按照恒功率充放电控制策略中的负荷曲线,求出单日负荷平均功率 P_{av} ,得出 P_1 、 P_2 ,再与根据历史数据预测的负荷曲线进行对比,计算出24 h内各时间段内的储能系统充放电功率,如式(11)、式(12)所示。

$$\sum_{t=t_{k-1}}^{t_k} (P_d - P_1)\Delta t < \sum_{t=t_{j-1}}^{t_j} (P_2 - P_c)\Delta t < E \quad (11)$$

$$P_d \in [P_1, P_{max}], P_c \in [P_{min}, P_2]$$

$$P_{av} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T P_t, P_2 \leq P_{av} \leq P_1 \quad (12)$$

式中: P_d 、 P_c 分别为负荷高峰、负荷低谷时间段内的负荷; P_1 为电池储能系统放电功率下限值; P_2 为电池储能系统充电功率上限值; P_{max} 、 P_{min} 为负荷峰、谷值; P_{av} 为单日负荷平均功率; Δt 代表单位时间。

功率差控制策略的具体步骤如下。

1) 在预测负荷曲线的基础上,计算得到日负荷平均功率 P_{av} 。

2) 以 P_{av} 为初值、 ΔP 为步长进行迭代,该过程须满足以下条件:

$$\sum_{t=t_{j-1}}^{t_j} (P_2 - P_c)\Delta t = E_c < E \quad (13)$$

$$\sum_{t=t_{k-1}}^{t_k} (P_d - P_1)\Delta t = E_d < E \quad (14)$$

$$E_c - E_d < \varepsilon \quad (15)$$

式中: E_c 、 E_d 分别为储能电池总的充、放电量; ε 为无限接近0的常数,代表储能装置充放电平衡。当上述任一约束条件无法满足时,须重新返回初值 P_{av} ,继续以 ΔP 为步长进行迭代,直至满足所有约束条件,完成功率差控制策略迭代过程。

3) 通过步骤2)得到储能系统充放电功率上、下限值,并依据实际负荷数据判断储能充放电功率值。功率差控制策略示意如图3所示。

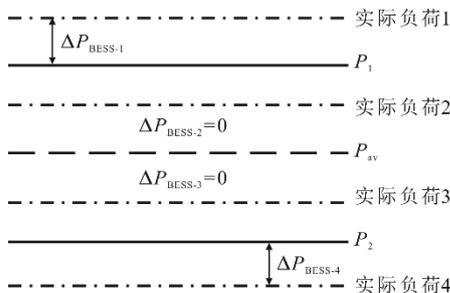


图3 功率差控制策略示意

Fig.3 Schematic diagram of the power difference control strategy

从图3可以看出:当实际负荷大于 P_1 时,储能系统放电;当实际负荷在 P_1 和 P_2 之间时,储能系统不动作;当实际负荷小于 P_2 时,储能系统充电。具体流程如图4所示。

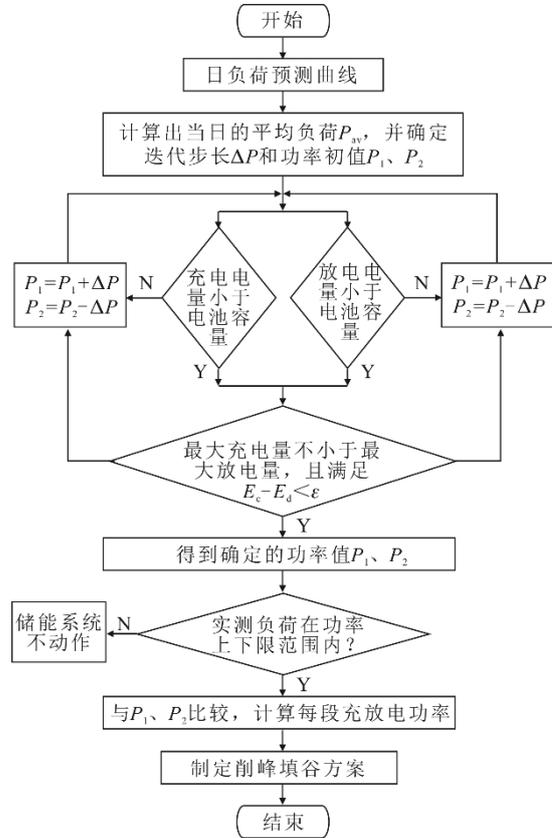


图4 功率差控制策略流程

Fig.4 Flow chart of the power difference control strategy

与恒功率充放电控制策略相比,功率差控制策略的优势在于能够在考虑储能容量、荷电状态等约束条件下实现实时控制。特别是当实际负荷曲线与预测负荷曲线有较大偏差时,可根据实际负荷在线灵活调整储能电池出力大小,避免出现控制失策的局面,提高储能电池参与电网削峰填谷的效果。

3 仿真实例

3.1 电池储能装置充放电、剩余容量曲线分析

搭建电池储能装置充放电测试平台。选取电压范围为3.5~5.2 V的锂电池,电池容量4 200 mA h,设置放电倍率范围为0.2C~2.4C,测试结果如图5所示。由图5可以看出,电池电压与放电容量的关系曲线即为剩余容量 δ_{soc} 曲线,其中近80%的容量集中于电压范围3.75~4.75 V。电池储能充放电过程有如下特征:

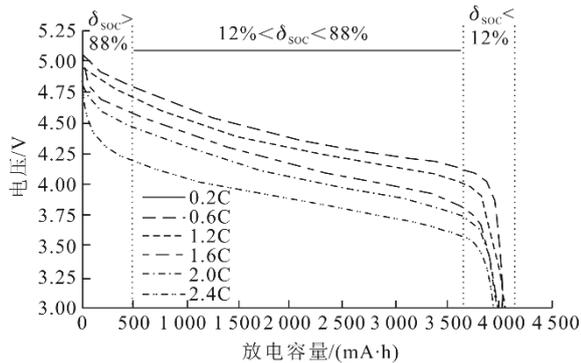


图 5 储能系统电池充放电曲线

Fig.5 The charging and discharging curves of the battery

1) 在初始阶段 ($\delta_{SOC} > 88\%$), 电池电压快速下降, 放电倍率越大, 电压下降得越快;

2) 电池电压进入一个缓慢变化的阶段 ($12\% < \delta_{SOC} < 88\%$), 即进入平台区, 此时放电倍率越小, 平台区持续的时间越长, 平台电压越高, 电压下降越缓慢;

3) 在电池电量接近放完时 ($\delta_{SOC} < 12\%$), 电池负载电压开始急剧下降直至达到放电截止电压。

因此, 为验证本文控制策略, 仿真过程中始终保持电池储能装置的 δ_{SOC} 处于平台区, 即 $12\% < \delta_{SOC} < 88\%$, 从而保证仿真结果的有效性及准确性。

3.2 恒功率充放电控制策略仿真

参考某地储能电池参与电网削峰填谷实例, 其仿真数据见表 1。

表 1 某地实例仿真数据

Tab.1 The simulation data of an actual project

参数	数值	备注
电池容量 S /(MW h)	20	Slow=0, Shigh=S
最大充放电功率 P_{max} /MW	5	
调整步长 ΔP /MW	0.01	

针对 2 组不同的预测负荷曲线, 采用 1 天充电 1 次、放电 2 次的策略, 电池出力曲线如图 6 所示, 削峰填谷仿真结果如图 7 所示。

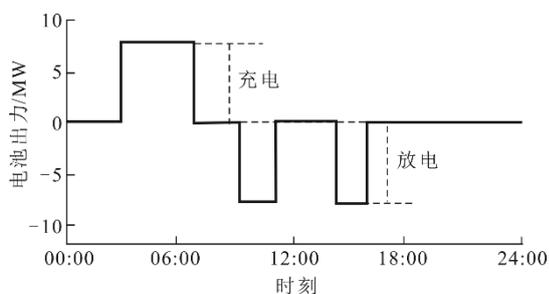
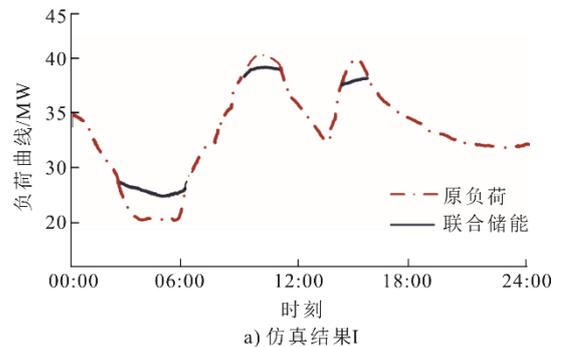
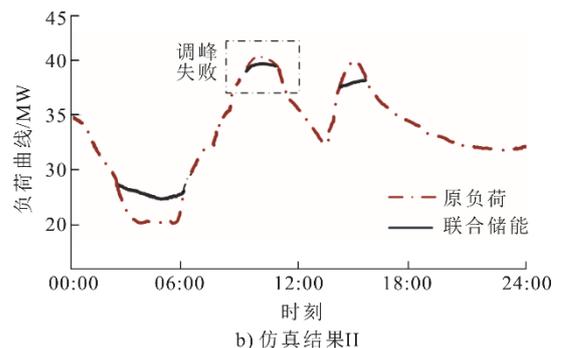


图 6 储能系统恒功率充放电过程电池出力曲线

Fig.6 The power output curve of the energy storage system during charging and discharging using constant power



a) 仿真结果I



b) 仿真结果II

图 7 恒功率充放电控制策略仿真结果

Fig.7 The simulation results of the constant power control strategy

由图 7a)可以看出: 储能电池参与电网削峰填谷前, 电网负荷峰值与谷值差距较大; 削峰填谷后, 峰谷差较大问题已得到明显改善。说明基于恒功率充放电控制策略的储能系统能够完成电网的削峰填谷任务。若电网第 2 日实际负荷曲线与预测的负荷曲线形状相同, 即负荷变化趋势相同, 仅仅是峰谷差值存在些许偏差, 则依据恒功率充放电控制策略就可以完成电网削峰填谷任务。但是, 由于电网负荷变动随机性较大, 无法达到预测曲线与实际曲线形状完全相同的理想情况, 当两者曲线在峰谷开始、截止时间及变化趋势与制定的负荷预测曲线存在偏差时, 储能参与电网削峰填谷的效果会减弱, 甚至发生负荷低谷时储能系统充电、峰值时放电的极端情况, 导致储能系统参与削峰填谷失败的案例, 如图 7b)虚线框内所示。

因此, 恒功率充放电控制策略并不完全契合电网削峰填谷的实际情况, 只能应用于一些控制方式简单、精度要求相对较低的场合。

3.3 功率差控制策略仿真

采用考虑实际约束条件的功率差控制策略进行仿真, 电池出力曲线如图 8、图 10 所示, 对应的削峰填谷仿真结果如图 9、图 11 所示。

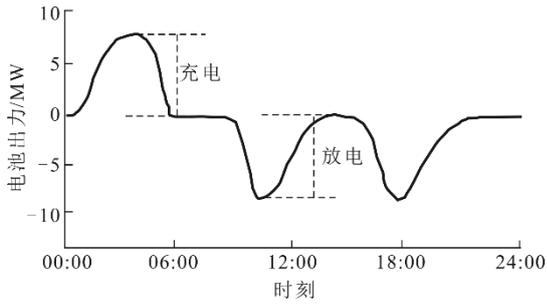


图 8 储能系统充放电过程电池出力曲线 I

Fig.8 The power output curve of the energy storage system during charge and discharge process (I)

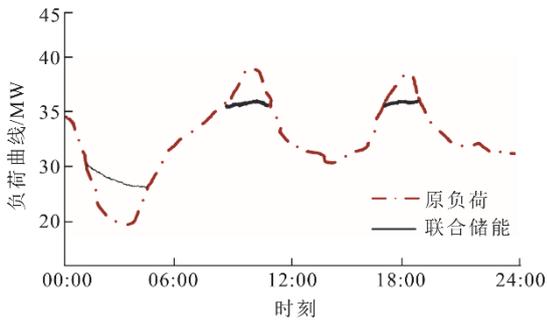


图 9 功率差控制策略仿真结果 I

Fig.9 The simulation results of the power difference control strategy (I)

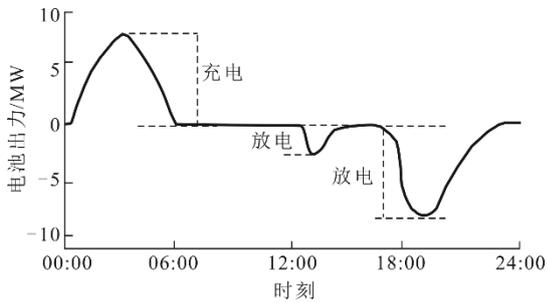


图 10 储能系统充放电过程电池出力曲线 II

Fig.10 The power output curve of the energy storage system during charge and discharge process (II)

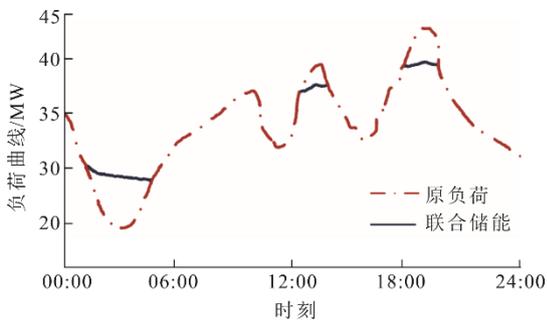


图 11 功率差控制策略仿真结果 II

Fig.11 The simulation results of the power difference control strategy (II)

由图 10、图 11 可以看出，采用功率差控制策略的储能系统能够很好地完成电网削峰填谷任务，

同时考虑了储能系统容量的约束，可根据电网负荷变化，准确识别负荷的高峰期与低谷期，在 2 个高峰时段储能系统放电，在 1 个低谷时段储能系统充电，同时保持充放电功率平衡。

此外，功率差控制策略根据功率上、下限值确定储能电池的充放电区域，当实际负荷曲线与预测曲线发生偏差时，储能系统仍能根据偏差变化调整出力大小，并制定有效的运行策略。经功率差控制策略优化后，电网负荷曲线平滑，与恒功率充放电控制策略相比，不存在合成出力曲线中的负荷尖峰区域。且储能系统动作均在功率约束、能量约束的限制下进行，延长了储能系统的使用寿命。

4 结 论

1) 恒功率充放电控制策略简单实用、计算速度快，在工程实践中具有较高的应用价值，多适用于负荷曲线预测准确的场景，但该策略过度依赖日负荷预测曲线，若负荷曲线偏移，则会对削峰填谷效果造成一定的影响。

2) 功率差控制策略不受电网负荷曲线偏差的影响，可随曲线的变化自适应调整自身充放电方式，其削峰填谷优化后的曲线更为平滑，合成曲线不存在负荷尖峰，相较于恒功率充放电控制策略，其削峰填谷效果显著提升，多适用于新能源基地等风光预测误差较大的场景。

3) 功率差控制策略受电池充放电功率、速率的影响较小，且单日内储能系统的充电电量与放电量相等，可一定程度上延长电池使用寿命，提升储能利用效率，节约成本。

[参 考 文 献]

- [1] 南雄, 张国强, 刘文毅. 多视角下典型蓄电系统参与调峰对电力市场的经济性影响分析[J]. 热力发电, 2019, 48(11): 13-21.
NAN Xiong, ZHANG Guoqiang, LIU Wenyi. Effects of typical energy storage systems participating in power grid peak-shaving on economy of power market: from multiple perspectives[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(11): 13-21.
- [2] 尚璠, 邵能灵, 刘琦, 等. 采用区间控制的蓄电池储能电站调峰运行控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 221-229.
SHANG Jin, YAN Nengling, LIU Qi, et al. Load shifting scheme of battery energy storage system based on interval controlling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 221-229.
- [3] 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.

- 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.
- [4] 苏焯, 张鹏, 张永军, 等. 特高压受端电网燃气轮机发电机组的深度调峰研究[J]. 中国电力, 2016, 49(6): 30-36.
- SU Ye, ZHANG Peng, ZHANG Yongjun, et al. Research on in-depth peak load regulation of gas turbine generator units at the UHV receiving end[J]. Electric Power, 2016, 49(6): 30-36.
- [5] 申建建, 程春田, 曹瑞, 等. 大规模水电消纳和调峰调度关键问题及研究进展[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 174-183.
- SHEN Jianjian, CHENG Chuntian, CAO Rui, et al. Key issues and development in large scale hydropower absorption and peak regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 174-183.
- [6] NOURAI A, KOGAN V I, CHRIS M S. Load leveling reduces T&D line losses[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 2168-2173.
- [7] 郑雪冰. 利用储能电池进行削峰填谷的多指标综合评价方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2015: 4-7.
- ZHENG Xuebing. Multi-index comprehensive evaluation method for peak-cutting and valley filling using energy storage battery[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015: 4-7.
- [8] 孟娅, 李欣然, 黎淑娟, 等. 电池储能参与配电网削峰填谷的变功率控制策略[J]. 电力建设, 2018, 39(4): 45.
- MENG Ya, LI Xinran, LI Shujuan, et al. Variable power control strategy of battery energy storage system participating in distribution network peak load shifting[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(4): 45.
- [9] 杨锡运, 董德华, 李相俊, 等. 商业园区储能系统削峰填谷的有功功率协调控制策略[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2551-2561.
- YANG Xiyun, DONG Dehua, LI Xiangjun, et al. Active power coordinated control strategy of peak load shifting for energy storage system in business park[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2551-2561
- [10] 董慧峰, 李文启, 牛文迪, 等. 电池储能系统参与电网削峰填谷实用算法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(18): 74.
- DONG Huifeng, LI Wenqi, NIU Wendi, et al. Practical algorithm applied in peak load shifting of battery energy storage system in power grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(18): 74.
- [11] 陈满, 陆志刚, 刘怡, 等. 电池储能系统恒功率削峰填谷优化策略研究[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 232-237.
- CHEN Man, LU Zhigang, LIU Yi, et al. Research on optimal peak load shifting strategy of battery energy storage system operated in constant power mode[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 232-237.
- [12] 鞠立伟, 于超, 谭忠富. 计及需求响应的风电储能两阶段调度优化模型及求解算法[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1287-1293.
- JÜ Liwei, YU Chao, TAN Zhongfu. A two-stage scheduling optimization model and corresponding solving algorithm for power grid containing wind farm and energy storage system considering demand response[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1287-1293.
- [13] 林俐, 费宏运. 规模化分布式光伏并网条件下储能电站削峰填谷的优化调度方法[J]. 现代电力, 2019, 36(5): 54-61.
- LIN Li, FEI Hongyun. Optimal scheduling method for peak load shifting of energy storage station with large-scale distributed photovoltaic integration[J]. Modern Electric Power, 2019, 36(5): 54-61.
- [14] 闫涛, 渠展展, 惠东, 等. 含规模化电池储能系统的商业型虚拟电厂经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 98-104.
- YAN Tao, QU Zhanzhan, HUI Dong, et al. Economic analysis of the virtual power plants with large-scale battery energy storage systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 98-104.
- [15] 周天沛, 孙伟. 风光互补电力系统混合储能单元的容量优化设计[J]. 太阳能学报, 2015, 36(3): 756-762.
- ZHOU Tianpei, SUN Wei. Capacity optimization design of hybrid energy storage unit for wind-solar complementary electric system[J]. Acta Energetica Sinica, 2015, 36(3): 756-762.
- [16] 翟世涛, 刘泽槐, 杨家豪, 等. 考虑多时段并网点电压控制的光储容量匹配及优化运行[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1855-1863.
- ZHAI Shitao, LIU Zehuai, YANG Jiahao, et al. Capacity matching and optimal operation of photovoltaic-storage systems based on multi-period PCC voltage control[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1855-1863.
- [17] 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.
- 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.

(责任编辑 李园)