

计及负荷峰谷特性的储能调峰日前优化调度策略

李军徽¹, 张嘉辉¹, 穆 钢¹, 葛延峰², 严干贵¹, 史松杰³

(1. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012;
2. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110006; 3. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110003)

摘要:为了使储能系统达到最优的削峰填谷效果,提出一种计及负荷峰谷特性的储能调峰日前优化调度策略。根据调度日内的负荷曲线,以储能系统的额定容量与额定功率为约束条件,分别计算在调峰过程中所能达到的最高填谷功率线、最低削峰功率线以及与之对应的充放电电量。根据所需的充放电电量差值,在储能系统未动作区间内,以储能系统经济性和负荷峰谷差改善量最优为目标,确定各时刻储能系统的充放电功率,实现充放电电量平衡。分别建立填谷调度模型、削峰调度模型及电量平衡调度模型,并制定相应的调度策略执行流程。构建调度策略评价指标,以某电网的负荷及风电数据为基础验证所提调度策略的有效性。

关键词:储能;削峰填谷;负荷特性;经济性;优化调度

中图分类号:TM 734

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202006012

0 引言

近年来,以风电为代表的新能源装机容量显著增加,截至2018年底,全国风电累计装机容量达 1.84×10^8 kW,占电源总装机容量的9.7%^[1]。但风电具有反调峰特性,增大了电网的等效峰谷差,给电力系统的稳定运行带来了严重的影响^[2-4]。储能系统具备对能量的时空平移能力,被视为对电网削峰填谷、提高风电接纳的有效手段之一^[5-7]。此外随着大规模储能技术发展成熟以及储能成本的不断下降,利用储能系统调峰也成为目前研究的热点。

目前,关于储能参与电力系统调峰方面,已经有许多学者开展了研究。文献[8]提出了电池储能系统的恒功率削峰填谷优化模型及求解该模型的实用简化算法;文献[9]提出了一种电池储能参与配电网削峰填谷的可变功率控制策略,有效改善了配电网峰谷差过大的问题;文献[10]提出了一种考虑短期负荷预测的微网储能系统控制策略,分析了分别采用恒功率法及功率差法时储能系统的削峰填谷效果。

在已有的研究中,储能系统的调度策略采用的

恒功率法或功率差法是根据负荷峰谷差特性制定的简单调度策略。但由于在不同的时期,负荷低谷和高峰的持续时间有很大的差别,采用上述2种方法并不能使储能系统达到最优的削峰填谷效果。本文首先仅以储能系统的额定容量与额定功率为约束条件,在考虑储能系统充放电效率的基础上,分别采用填谷调度模型及削峰调度模型计算所能达到的最高填谷功率线、最低削峰功率线以及与之对应的充放电电量,然后根据所需的充放电电量差值,在储能系统未动作区间内采用平衡电量调度模型来优化各时刻储能系统的充放电功率。

而关于储能系统优化调度策略的研究,文献[11]针对负荷状态和储能荷电状态(SOC)进行区间划分子目标函数,并对目标函数进行寻优,确定了不同负荷区间与SOC区间的储能系统控制策略;文献[12]提出了一种蓄电池和虚拟储能的协调控制策略,用于平抑微网联络线功率波动及减少电池储能的充放电频次;文献[13]以负荷标准差最小为目标,提出了一种基于动态规划的实时修正优化控制策略;文献[14-15]基于机会约束规划法,以最大限度消纳风电或以调度与计划出力曲线匹配程度最大为目标函数,得到了最优的储能充放电功率;文献[16]提出了一种用于调峰的混合储能调度系统,以此来提高风电的接纳量,优化负荷曲线;文献[17]采用了混合储能系统来优化光伏功率波动并且延长混合储能系统的寿命。

上述储能优化调度策略大多以负荷波动最小、风电接纳量最大或延长电池寿命为目标。但是,目前影响储能技术大规模发展的主要因素之一是其经济性,如何保证储能系统在运行中能有一个良好的收益是目前研究的热点。

本文储能系统的应用场景是削峰填谷,故在平

收稿日期:2019-08-12;**修回日期:**2020-04-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1766204);国家电网公司科技项目(超大容量电池储能电站并网运行关键技术及应用);2017年吉林省发改委产业创新专项项目(2017C017-2)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(U1766204), the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(Key Technology and Application of Grid-connected Operation of Large Capacity Battery Energy Storage Power Station) and the Special Fund for Industrial Innovation of Jilin Province Development and Reform Commission(2017C017-2)

衡电量模型中将以负荷峰谷差改善量及储能系统经济性最好为目标,优化各时刻储能系统的充放电功率。然后,根据上述建立的填谷调度模型、削峰调度模型及电量平衡调度模型,制定相应的调度策略执行流程。最后,建立相应的调度策略评价指标,并以某局部电网的负荷和风电数据为算例条件,验证所提方法的有效性。算例结果表明,本文所提调度策略将储能系统应用于风电高渗透电网的调峰场景中,可以有效地降低电网的负荷峰谷差,提高风电接纳量,并保持其具有良好的经济性。

1 储能调峰机理分析

储能系统具有能量可双向流动的特性,其参与电网调峰的原理如图1所示。图中, $P_{load,t}$ 为 t 时段的负荷功率; $P_{wind,t}$ 为 t 时段的风电功率; $P_{G,min}$ 、 $P_{G,max}$ 分别为常规电源出力的最小值、最大值; $P_{C,t}$ 、 $P_{D,t}$ 分别为 t 时段储能系统的充电、放电功率; η_C 、 η_D 分别为储能系统的充电、放电效率; ΔP_1 、 ΔP_2 分别为储能接入前、后的负荷峰谷差值; Δt 为单位时段间隔时长。

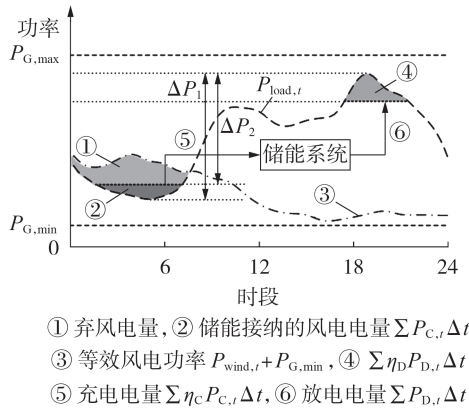


图1 储能调峰的机理

Fig.1 Peak regulation mechanism of energy storage

由图1可以看出,储能系统可以有效地降低系统的负荷峰谷差,并且在原有常规机组调节能力的基础上提高了负荷低谷时期的风电接纳空间,有效地减少了弃风电量。

2 储能参与削峰填谷优化调度策略

2.1 调度策略的目标函数及求解方法

为了使储能系统在参与削峰填谷过程中达到最高填谷功率线及最低削峰功率线,并对充放电电量差值进行优化,分别建立填谷调度模型、削峰调度模型及平衡电量调度模型,各调度模型的目标函数如下。

(1)填谷调度模型。

填谷调度模型将以负荷谷值提高量 F_{lg} 最大为目标,如式(1)所示。

$$\max F_{lg} = \min \{ P_{load,t} + P_{C,t} \} - \min \{ P_{load,t} \} \quad (1)$$

求解该模型的步骤如下。

a. 从日负荷曲线最小值 $P_{load,min}$,以储能系统的额定功率 P_B 向上作填谷功率线 $L = P_{load,min} + P_B$ 。

b. 计算当填谷功率线为 L 时储能系统的充电电量 E_C ,计算式为:

$$E_C = \int_{t_1}^{t_2} \eta_C (P_{load,min} + P_B - P_{load,t}) dt \quad (2)$$

其中, t_1 — t_2 为填谷功率线 L 与负荷曲线相交所对应的时段区间。

c. 判断充电电量是否满足式(3)所示储能系统的容量约束关系,若不满足,则令 $L = P_{load,min} + P_B - \Delta P$ (ΔP 为迭代步长)进行迭代,直至满足约束条件,并输出 E_C 及充电时段区间 t_1 — t_2 。

$$0 < S_{SOC,max} - S_{SOC,min} + E_C/E_B < \varepsilon \quad (3)$$

其中, $S_{SOC,max}$ 、 $S_{SOC,min}$ 分别为储能系统的SOC上、下限值; E_B 为储能系统的额定容量; ε 为接近0的正数。

(2)削峰调度模型。

削峰调度模型将以负荷峰值降低量 F_{xf} 最大为目标,如式(4)所示。

$$\max F_{xf} = \max \{ P_{load,t} \} - \max \{ P_{load,t} - \eta_D P_{D,t} \} \quad (4)$$

求解该模型的步骤如下。

a. 从负荷曲线最大值 $P_{load,max}$,以储能系统的额定功率 P_B 向下作削峰功率线 $L' = P_{load,max} - \eta_D P_B$ 。

b. 计算在削峰功率线为 L' 时的放电电量 E_D ,计算式为:

$$E_D = \int_{t'_1}^{t'_2} [P_{load,t} - (P_{load,max} - \eta_D P_B)] / \eta_D dt \quad (5)$$

其中, t'_1 — t'_2 为削峰功率线 L' 与负荷曲线相交所对应的时段区间。

c. 判断放电电量是否满足式(6)所示储能系统的容量约束关系,若不满足,则令 $L' = P_{load,max} - \eta_D P_B + \Delta P$ 进行迭代,直至满足约束,并输出 E_D 以及放电时段区间 t'_1 — t'_2 。

$$0 < S_{SOC,max} - S_{SOC,min} + E_D/E_B < \varepsilon \quad (6)$$

(3)平衡电量调度模型。

首先,经过填谷和削峰调度模型动作后,确定了基础的充电时段 t_1 — t_2 和放电时段 t'_1 — t'_2 ,则剩余储能系统的未动作时段 T_s 为:

$$T_s = \{1, 2, \dots, t_1, t_2, \dots, t'_1, t'_2, \dots, T\} \quad (7)$$

其中, T 为原数据的总时段数。

然后,平衡电量调度模型将根据 E_C 与 E_D 的差值确定在 T_s 内各时段储能的充放电功率,以达到调度日内储能的充放电电量平衡。在确定储能充放电功率时以减小负荷波动和提高储能系统的经济性为目的,故在计算过程中将以负荷标准差改善量及储能系统收益最优为目标。

当充电电量大于放电电量($E_C > E_D$)时,需根据剩余所需放电电量在 T_s 内确定各时段储能系统的放电功率,此时以放电收益 I_h 以及负荷标准差改善量 S_h 最大为目标函数:

$$I_h = \int_1^{T'} \eta_D (P_{D,t} p_{\text{price},t}) dt \quad t \in T_s \quad (8)$$

$$S_h = P_{\text{load},s} - \sqrt{\sum_{t=1, t \in T_s}^{T'} (P_{\text{load},t} - \eta_D P_{D,t} - P_{\text{load},\text{ver}})^2} / T' \quad (9)$$

$$\max F_{b1} = I_h + S_h \quad (10)$$

其中, $p_{\text{price},t}$ 为 t 时段电网的实时峰谷电价; $P_{\text{load},\text{ver}}$ 为原负荷功率平均值; $P_{\text{load},s}$ 为原负荷功率标准差; T' 为 T_s 内的时段数。

当充电电量小于放电电量($E_C < E_D$)时,需根据剩余所需充电电量在 T_s 内确定各时段储能系统的充电功率,此时以充电成本 I_v 以及负荷标准差 S_v 最小为目标函数:

$$I_v = \int_1^{T'} P_{C,t} p_{\text{price},t} dt \quad t \in T_s \quad (11)$$

$$S_v = \sqrt{\sum_{t=1, t \in T_s}^{T'} (P_{\text{load},t} + P_{C,t} - P_{\text{load},\text{ver}})^2} / T' \quad (12)$$

$$\min F_{b2} = I_v + S_v \quad (13)$$

此外,由于优化目标中涉及的储能经济性和负荷标准差的量纲不同,所以需要对其进行归一化处理,处理后的函数表达式分别为:

$$I_h^* = I_h / \left[\int_1^{T'} \eta_D (P_{D,t} p_{\text{price},\text{max}}) dt \right] \quad (14)$$

$$S_h^* = S_h / P_{\text{load},s} \quad (15)$$

$$I_v^* = \left(\int_1^{T'} P_{C,t} p_{\text{price},\text{min}} dt \right) / I_v \quad (16)$$

$$S_v^* = S_v / P_{\text{load},s} \quad (17)$$

其中, $p_{\text{price},\text{min}}$ 、 $p_{\text{price},\text{max}}$ 分别为电网峰谷电价的最小值、最大值。

则归一化后的目标函数为:

$$\begin{cases} \max F_{b1}^* = I_h^* + S_h^* \\ \min F_{b2}^* = I_v^* + S_v^* \end{cases} \quad (18)$$

采用改进粒子群优化算法求解平衡电量调度模型^[18],根据剩余所需的放电电量或充电电量,在相应的时段内对储能的充放电功率进行优化,其计算流程见附录A中图A1。

2.2 调度策略执行流程

根据上述确定的各调度模型,制定调度日总体优化调度策略的执行流程如图2所示。

2.3 约束条件

调度策略的主要约束包括系统功率平衡约束、储能功率约束、SOC约束及运行状态约束。

(1)系统功率平衡约束。

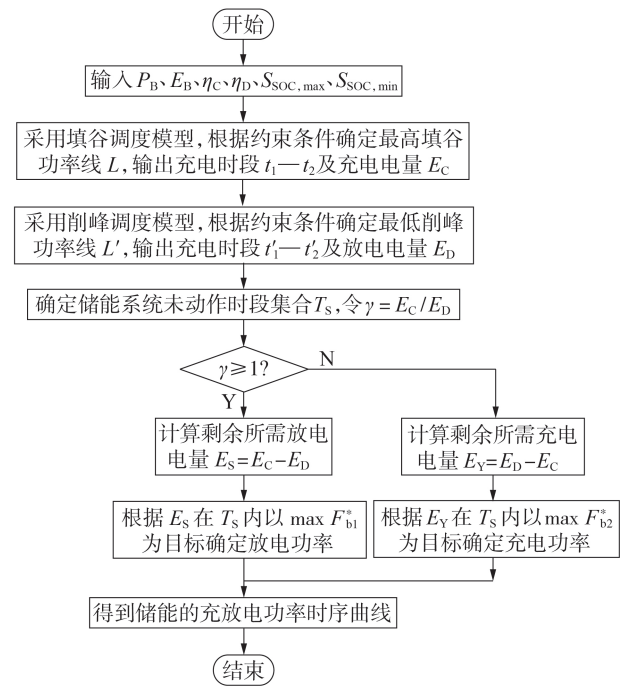


图2 优化调度策略的流程

Fig.2 Flowchart of optimal scheduling strategy

$$P_{G,t} + P_{\text{awind},t} = P_{\text{load},t} + P_{C,t} - \eta_D P_{D,t} \quad (19)$$

其中, $P_{G,t}$ 为 t 时段常规电源的出力; $P_{\text{awind},t}$ 为 t 时段风电上网功率。

(2)储能功率约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{C,t} \leq P_{C,\text{rate}} \\ 0 \leq P_{D,t} \leq P_{D,\text{rate}} \end{cases} \quad (20)$$

其中, $P_{C,\text{rate}}$ 、 $P_{D,\text{rate}}$ 分别为储能系统的额定充电、放电功率,均等于储能的额定功率 P_{B0} 。

(3)储能SOC约束。

$$S_{\text{SOC},t} = S_{\text{SOC},t-1} + (\eta_C P_{C,t} \Delta t - P_{D,t} \Delta t) / E_B \quad (21)$$

$$S_{\text{SOC},\text{min}} \leq S_{\text{SOC},t} \leq S_{\text{SOC},\text{max}} \quad (22)$$

$$S_{\text{SOC},\text{start}} = S_{\text{SOC},\text{end}} \quad (23)$$

其中, $S_{\text{SOC},t}$ 为 t 时段储能系统的SOC; $S_{\text{SOC},\text{start}}$ 为初始时刻储能系统的SOC; $S_{\text{SOC},\text{end}}$ 为终止时刻储能系统的SOC。

(4)储能充放电状态约束。

$$B_{C,t} B_{D,t} = 0 \quad B_{C,t}, B_{D,t} \in \{0, 1\} \quad (24)$$

其中, $B_{C,t}$ 、 $B_{D,t}$ 分别为 t 时段储能系统的充电、放电运行状态,充电(放电)时有 $B_{C,t}=1$ ($B_{D,t}=1$),不充电(不放电)时有 $B_{C,t}=0$ ($B_{D,t}=0$)。

3 评价指标

为了对调度策略的效果进行评价,本文提出了4个评价指标。从调峰效果角度,建立负荷峰谷差、负荷峰谷差率以及弃风电量3个指标,通过比较储能介入前、后3个指标的变化情况,反映储能系统的

调峰效果;从储能经济性角度,建立储能系统的收益指标,评价储能系统在调峰过程中的收益情况。

(1)负荷峰谷差。

负荷峰谷差 α 定义为电力系统在一个调度日内的最大负荷与最小负荷之差,计算公式为:

$$\alpha = P_{\text{load, max}} - P_{\text{load, min}} \quad (25)$$

(2)负荷峰谷差率。

负荷峰谷差率 β 定义为电力系统在一个调度日内的峰谷差与最大负荷的比值,计算公式为:

$$\beta = \frac{P_{\text{load, max}} - P_{\text{load, min}}}{P_{\text{load, max}}} \times 100\% \quad (26)$$

(3)弃风电量。

当某一时刻的风电功率超出储能系统及常规机组提供的风电接纳空间时,就会有弃风产生,弃风电量 E_{qwind} 的计算公式如下:

$$E_{\text{qwind}} = \sum_{t=1}^T P_{\text{qwind}, t} \quad (27)$$

$$P_{\text{qwind}, t} = \begin{cases} P_{\text{wind}, t} - P_{\text{wind}, t}^{\text{inkj}} & P_{\text{wind}, t} > P_{\text{wind}, t}^{\text{inkj}} \\ 0 & P_{\text{wind}, t} \leq P_{\text{wind}, t}^{\text{inkj}} \end{cases} \quad (28)$$

$$P_{\text{wind}, t}^{\text{inkj}} = P_{\text{load}, t} + P_{\text{C}, t} - \eta_{\text{D}} P_{\text{D}, t} - P_{\text{G}, \text{min}} \quad (29)$$

其中, $P_{\text{qwind}, t}$ 为 t 时段的弃风功率; $P_{\text{wind}, t}^{\text{inkj}}$ 为 t 时段的风电功率接纳空间。

(4)储能系统的收益。

储能系统利用电网峰谷电价,通过“低储高发”获得收益,收益 I 的计算公式为:

$$I = \sum_{t=1}^T (\eta_{\text{D}} P_{\text{D}, t} p_{\text{price}, t} - P_{\text{C}, t} p_{\text{price}, t}) \quad (30)$$

4 算例仿真

4.1 算例参数

以某电网2016年全年负荷和风电历史数据为算例进行仿真计算,该电网火电机组的装机容量为7100 MW,电网峰谷电价时段见附录B中表B1。储能系统选用已有大规模应用的集中式磷酸铁锂电池储能系统,其参数见附录B中表B2^[19]。

4.2 算例结果与分析

(1)调度策略决策系数计算。

以磷酸铁锂电池储能系统的额定功率200 MW为约束,结合负荷数据,计算以200 MW为最大填谷功率及最大削峰功率时每天所需的储能充电电量及放电电量,并计算决策系数 $\gamma = E_{\text{c}}/E_{\text{d}}$,计算结果如图3所示。

由图3可知,在第1—125天及第250—365天之间, γ 值基本大于1,最大值为3.78;在第125—250天之间, γ 值基本小于1,最小值为0.46;而仅有13 d的 γ 值近似等于1。可见在相同的功率约束条件下,由于不同时期的负荷低谷与高峰持续时间不同,储

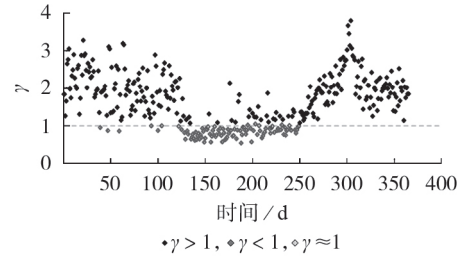


图3 γ 的计算结果

Fig.3 Calculative results of γ

能系统所需的充放电电量有很大的差别。

(2)调度策略效果分析。

为了展现本文所提方法的有效性,将其与恒功率调度策略及功率差调度策略^[20]进行对比分析,2种对比调度策略的具体介绍分别见附录C和附录D。

首先,根据图3,选取 $\gamma > 1$ 的第10—12天的负荷数据进行分析。其经3种调度策略优化后的负荷曲线、储能充放电功率及SOC分别如图4—6所示。

由图4可以看出,当 $\gamma > 1$,即负荷低谷持续时间高于高峰持续时间时,本文所提优化调度策略的削峰填谷效果明显优于功率差调度策略和恒功率调度策略。分析数据可知,本文所提优化调度策略的峰谷差改善量为375.62 MW,功率差调度策略的峰谷差改善量为308.81 MW,为本文所提优化调度策略

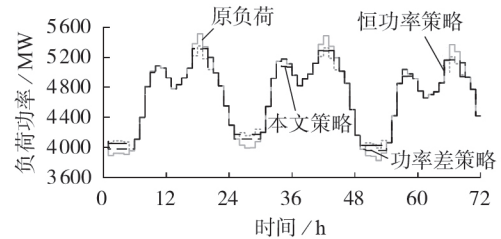


图4 3种调度策略优化后的负荷曲线对比

Fig.4 Comparison of load curves after optimization among three scheduling strategies

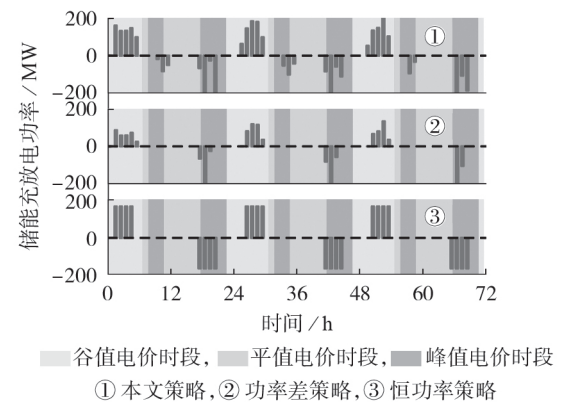


图5 3种调度策略下储能系统的充放电功率对比

Fig.5 Comparison of charging and discharging power of energy storage system among three scheduling strategies

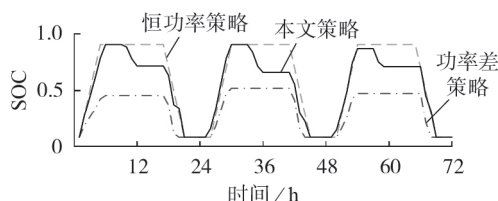


图6 3种调度策略下储能系统的SOC对比

Fig.6 Comparison of SOC of energy storage system among three scheduling strategies

的82.21%，恒功率调度策略的峰谷差改善量为269.83 MW，为本文所提优化调度策略的71.83%。从图4中还可以看出，负荷曲线在高峰时期呈尖峰状，其高峰时期持续时间较短，导致削峰功率线达到极限值时所需的放电电量较少，功率差调度策略在计算过程中需降低填谷功率线，以此来减少充电电量，达到充放电电量平衡的目的，故其峰谷差改善量会低于本文所提优化调度策略，但与恒功率调度策略相比，功率差调度策略仍有一定的优势。

由图5和图6可以看出，为了达到充放电电量平衡，功率差调度策略需降低每天的充电电量来匹配放电电量，其每天的最大SOC只有0.5左右。此外，从图5也可以看出，功率差调度策略每天的充电功率也并没有达到储能功率约束，说明储能系统仍有空间来优化削峰填谷效果。而本文所提优化调度策略可以充分利用储能系统，达到最优的削峰填谷效果，结合图4中的负荷曲线及图5中的充放电功率可以看出，本文所提优化调度策略在负荷低谷时期的填谷效果明显优于功率差调度策略，而多余的充电电量则会在负荷功率较高及峰谷电价较高的时段进行放电，从而达到充放电电量的平衡。

然后根据图3，选取 $\gamma \approx 1$ 的第220—222天的负荷数据进行分析，具体分析过程及结果见附录E。

根据上述分析，再结合全年的负荷功率数据，分别求取3种调度策略下的平均负荷峰谷差及平均负荷峰谷差率。并且为了更全面地对3种调度策略进行对比分析，按每天负荷最大值的1.1倍来选择机组的开机容量，并在常规调峰手段（机组最低出力为开机容量的50%）下，计算日平均弃风电量。然后，结合附录E中图E2所示储能系统的充放电功率及峰谷电价时段，计算全年的储能系统运行收益，结果如表1所示。

由表1可以看出，通过3种调度策略进行削峰填谷后，负荷的峰谷差相比于原负荷都有了很大的改善；且相较于功率差调度策略及恒功率调度策略，本文所提优化调度策略的峰谷差改善效果更为明显，比功率差调度策略的负荷峰谷差降低了43.1 MW，比恒功率调度策略的负荷峰谷差降低了92.3 MW。

从弃风电量及经济性的角度分析可知，本文所

表1 调度策略的评价指标结果

Table 1 Evaluation index results of scheduling strategies

调度策略	日平均峰谷差 / MW	日平均峰谷差率 / %	日平均弃风电量 / (MW·h)	储能系统运行收益 / 万元
原负荷	1462.7	31.39	616.76	—
本文策略	1089.3	24.32	470.08	14 125.64
功率差策略	1132.4	25.17	500.98	10 125.12
恒功率策略	1181.6	26.16	467.47	14 592.14

提优化调度策略可以充分利用储能系统以达到最优的削峰填谷效果，故其日平均弃风电量低于功率差调度策略，储能系统的运行收益也远高于功率差调度策略。

此外，本文所提优化调度策略在达到最优的削峰填谷效果后，为了延长储能系统的使用寿命，不会再进行过度的充放电。而恒功率调度策略每天都是满充满放，所以弃风电量略低于本文所提优化调度策略，降幅为0.588%，储能系统收益略高于本文所提优化调度策略，增幅为3.19%。但在削峰填谷效果方面，本文所提优化调度策略的负荷峰谷差相较于恒功率调度策略降低了7.81%。故综合调峰效果及经济性角度考虑，本文所提优化调度策略仍具有一定的优势。

5 结论

本文提出了一种计及负荷特性的储能调峰日前优化调度策略，所得具体结论如下。

(1)为了使储能系统的调峰效果达到最优，分别建立了填谷调度模型、削峰调度模型以及平衡电量调度模型，制定了相应的调度流程，并且通过相应的储能调峰调度策略评价指标对调度策略进行了评估。

(2)从调峰效果角度考虑，相较于恒功率调度策略和功率差调度策略，本文所提优化调度策略分别使日平均峰谷差降低了92.3 MW和43.1 MW；此外，相较于功率差调度策略，本文所提优化调度策略使日平均弃风功率降低了30.9 MW。

(3)从储能系统经济性的角度考虑，本文所提优化调度策略比功率差调度策略的经济性提高了39.51%，虽然相较于恒功率调度策略的经济性有所下降，但综合考虑调峰的改善效果，本文所提优化调度策略仍具有一定的优势。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 2018年风电并网运行情况[EB/OL]. (2019-01-28)[2019-08-12]. http://www.nea.gov.cn/2019-01/28/c_137780779.htm.
- [2] 张峰, 张鹏, 梁军. 考虑风电功率不确定性的风电场出力计划上报策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 34-40.

- ZHANG Feng, ZHANG Peng, LIANG Jun. Wind farm generation schedule strategy considering wind power uncertainty[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 34-40.
- [3] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 9-20.
- LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 9-20.
- [4] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-9.
- SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-9.
- [5] 徐国栋, 程浩忠, 马紫峰, 等. 用于缓解电网调峰压力的储能系统规划方法综述[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 3-11.
- XU Guodong, CHENG Haozhong, MA Zifeng, et al. Overview of ESS planning methods for alleviating peak-shaving pressure of grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 3-11.
- [6] 沈冠治, 李琛, 徐冰亮, 等. 考虑风电并网系统的储能优化配置[J]. 东北电力大学学报, 2018, 38(4): 27-34.
- SHEN Guanye, LI Chen, XU Bingliang, et al. Economic allocation for energy storage system considering wind power[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2018, 38(4): 27-34.
- [7] 陈厚合, 杜欢欢, 张儒峰, 等. 考虑风电不确定性的混合储能容量优化配置及运行策略研究[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 174-182, 188.
- CHEN Houhe, DU Huanhuan, ZHANG Rufeng, et al. Optimal capacity configuration and operation strategy of hybrid energy storage considering uncertainty of wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 174-182, 188.
- [8] 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.
- [9] 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): 45-50.
- 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): 45-50.
- [10] 陈益哲, 张步涵, 王江虹, 等. 基于短期负荷预测的微网储能系统主动控制策略[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 35-40.
- CHEN Yizhe, ZHANG Buhuan, WANG Jianghong, et al. Active control strategy for microgrid energy storage system based on short-term load forecasting[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 35-40.
- [11] 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.
- [12] 王冉, 王丹, 贾宏杰, 等. 一种平抑微网联络线功率波动的电池及虚拟储能协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5124-5134.
- WANG Ran, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. A coordination control strategy of battery and virtual energy storage to smooth the micro-grid tie-line power fluctuations[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5124-5134.
- [13] 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.
- [14] 赵书强, 刘晨亮, 王明雨, 等. 基于机会约束规划的储能日前优化调度[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3055-3059.
- ZHAO Shuqiang, LIU Chenliang, WANG Mingyu, et al. Chance-constrained programming based day-ahead optimal scheduling of energy storage[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3055-3059.
- [15] 赵书强, 刘大正, 谢宇琪, 等. 基于相关机会目标规划的风光储联合发电系统储能调度策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 30-36, 53.
- ZHAO Shuqiang, LIU Dazheng, XIE Yuqi, et al. Scheduling strategy of energy storage in wind-solar-battery hybrid power system based on dependent-chance goal programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 30-36, 53.
- [16] SONG Zongyun, ZHANG Jian, ZHENG Zedong, et al. Peak dispatching for wind power with demand-side energy storage based on a particle swarm optimization model[J]. Utilities Policy, 2019, 56: 136-148.
- [17] 马伟, 王玮, 吴学智, 等. 平抑光伏并网功率波动的混合储能系统优化调度策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 58-69.
- MA Wei, WANG Wei, WU Xuezhi, et al. Optimal dispatching strategy of hybrid energy storage system for smoothing power fluctuation caused by grid-connected photovoltaic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 58-69.
- [18] 张德丰. MATLAB R2017a人工智能算法[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018: 174-207.
- [19] 李建林, 马会萌, 田春光, 等. 基于区间层次分析法的电化学储能选型方案[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2707-2714.
- LI Jianlin, MA Huimeng, TIAN Chunguang, et al. Selection scheme of electrochemical energy storage based on interval analytic hierarchy process method[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2707-2714.
- [20] 牛文迪. 电池储能参与电网削峰填谷优化策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- NIU Wendi. Load shift optimization strategy of battery energy storage system in power grid[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.

作者简介:



李军徽

李军徽(1976—),男,陕西宝鸡人,教授,博士,主要从事新能源发电联网运行关键技术和储能技术应用等方面的研究工作(E-mail: lijunhui@neepu.edu.cn);

张嘉辉(1994—),男,浙江嘉兴人,硕士研究生,主要研究方向为储能技术在新能源发电中的应用(E-mail: zhangjiahui1994@126.com);

穆钢(1957—),男,辽宁大连人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为可再生能源联网规划运行控制和电力系统稳定分析(E-mail: mg@neepu.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

(下转第140页 continued on page 140)

Optimization design of residents' real-time score plan for promoting peak-load shifting

CHEN Lu¹, XU Qingshan¹, YANG Yongbiao¹, YANG Bin²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210028, China)

Abstract: Under the background of a new round of electricity market reform, a residents' real-time score plan for promoting peak-load shifting is put forward to make preliminary discussion on the residential side market trading mode of electricity sales. Firstly, the mechanism of residents' real-time score plan is designed to promote peak-load shifting. In the valley-load periods, positive scores are introduced to encourage residents to use more electricity, while in the peak-load periods, negative scores are used to guide residents to use less electricity. On the basis of consumer psychology, the uncertainty model of residential load response based on the real-time score plan is established. Then, based on the principle of utility maximization, the optimization model of residents' real-time score plan is proposed, which takes both the decreasing rate of peak-valley electricity difference and incentive cost into account, and is solved by the combination method of Latin hypercube sampling method and genetic algorithm. Finally, the implementation architecture and mode of the proposed real-time score plan are designed. The example results show that the real-time score plan can adapt to the electricity consumption characteristics of residents well, and stimulate the interactive potential of resident community, providing support for residents to participate in the electricity market transactions in the future.

Key words: peak-load shifting; real-time score; demand response; price incentive; implementation mode

(上接第133页 continued from page 133)

Day-ahead optimal scheduling strategy of peak regulation for energy storage considering peak and valley characteristics of load

LI Junhui¹, ZHANG Jiahui¹, MU Gang¹, GE Yanfeng², YAN Gangui¹, SHI Songjie³

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology,

Ministry of Education(Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China;

2. State Grid Liaoning Electric Power Company, Shenyang 110006, China;

3. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110003, China)

Abstract: In order to achieve the optimal peak load shifting effect of energy storage system, a day-ahead optimal scheduling strategy of peak regulation for energy storage considering peak and valley characteristics of load is proposed. According to the load curve of the scheduling day, the highest valley filling power line and the lowest peak clipping power line that can be achieved during the peak regulation process and the corresponding charging and discharging energy are calculated respectively with the rated capacity and rated power of energy storage system as the constraints. According to the required charging and discharging energy difference, the charging and discharging power of the energy storage system at each moment is determined aiming at the optimization of the energy storage system economy and the load peak-valley difference improvement within the non-operation range of energy storage system, so as to achieve the balance between charging and discharging energy. The valley filling scheduling model, peak clipping scheduling model and energy balance scheduling model are established respectively, and the corresponding scheduling strategy execution process is developed. The evaluation indexes of scheduling strategy are constructed to verify the effectiveness of the proposed dispatching strategy based on the load and wind power data of a power grid.

Key words: energy storage; peak load shifting; load characteristics; economy; optimal scheduling

附录 A

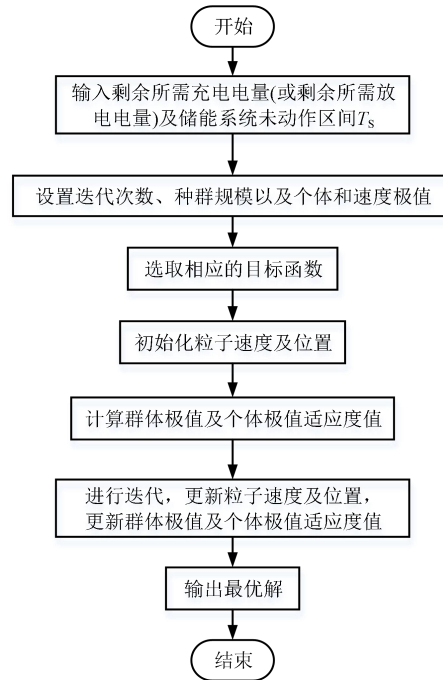


图 A1 粒子群优化算法的计算流程图
Fig.A1 Flowchart of particle swarm algorithm

附录 B

表 B1 某省峰谷电价参数

Table B1 Peak and valley electricity prices of a province

	时段	电价/[元·(kW·h) ⁻¹]
谷	23:00 至次日 07:00	0.414
平	07:00—08:00, 11:00—18:00	0.782
峰	08:00—11:00, 18:00—23:00	1.149

表 B2 锂离子电池参数

Table B2 Parameters of lithium ion battery

参数	数值	参数	数值
功率/MW	200	放电效率/%	0.95
容量/(MW·h)	800	最大 SOC	0.9
充电效率/%	0.95	最小 SOC	0.1

附录 C

恒功率调度策略的基本方法是令储能系统在任何充放电时刻均以恒定的功率进行能量充放。该调度策略的一般步骤如下。

(1) 根据储能系统的额定容量 E_B 和额定功率 P_B , 计算总的充放电时间 $T=E_B/P_B$ 。由于是恒功率充放电, 故保证了储能系统的充电时间与放电时间相等以及储能系统的充电电量与放电电量相同。

(2) 根据预测负荷最低点, 做水平直线 L , 并以设定步长 ΔP 向上移动, 该水平直线会与负荷曲线相交于两点。计算两点间的时间间隔, 若等于充电时间 T , 则找到了合理的充电区域, 反之继续向上以步长 ΔP 移动, 直到找到合理的充电时间区域为止。

(3) 同理于充电时间区域的选择, 在负荷最高点处做直线 L' , 并以步长 ΔP 向下移动, 该水平直线会与负荷曲线相交于两点。计算两点间的时间间隔, 若等于放电时间 T , 则找到了合理的放电区域, 反之继续向下以步长 ΔP 移动, 直到找到合理放电时间区域为止。

附录 D

功率差调度策略根据调度日内负荷曲线得到最优的填谷功率线与削峰功率线，该策略的一般步骤如下。

(1) 基于预测负荷曲线计算得到日负荷平均功率 $P_{load,ver}$ 。

(2) 以 $P_{load,ver}$ 为中心，在考虑储能系统额定功率和额定容量约束的条件下，以步长 ΔP 向下作直线 L ，交负荷曲线于两点，并计算两点间的充电电量 E_C 。同理，以 P_a 为中心，以步长 ΔP 向上作直线 L' ，与负荷曲线交于两点，并计算两点间的放电电量 E_D 。在整个迭代过程中须满足一定的约束条件，即最大充放电功率必须满足储能额定功率 P_B ，充放电电量必须满足储能额定容量 E_B 。

(3) 以 $E_C - E_D \leq \varepsilon$ 为判断条件 (ε 为接近于 0 的常数)。若不满足该条件，则继续进行迭代，直到得到合适的充放电上下限直线 L 与 L' 。直线 L 的值与负荷低谷功率的差值则为储能系统的充电功率，负荷高峰功率与直线 L' 的值的差值则为储能系统的放电功率。

附录 E

根据图 3，选取 γ 值近似等于 1 的第 220—222 天的负荷数据进行分析，其经 3 种策略优化后的负荷曲线如图 E1 所示。

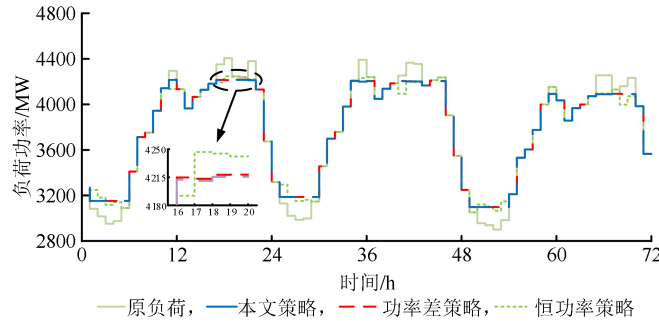


图 E1 第 220—222 天的负荷曲线对比

Fig.E1 Comparison of load curves from day 220 to 222

由图 E1 可以看出，经本文所提优化调度策略与功率差调度策略优化后的负荷曲线仅有非常小的差别，峰谷差改善情况基本相同，但与恒功率调度策略相比，本文调度策略还是有较为明显的优势。通过具体数据可以得出，本文所提优化调度策略 3 d 的平均最大填谷功率与削峰功率分别为 188.53、193.28 MW，功率差调度策略 3 d 的平均最大填谷功率与削峰功率分别为 188.53、193.28 MW，恒功率调度策略 3 d 的平均最大填谷功率与削峰功率分别为 149.50、158.96 MW。本文所提优化调度策略与功率差调度策略的峰谷差改善量基本相同，为 381.81 MW，而恒功调度策略的峰谷差改善量为 308.46 MW，仅为其余 2 种策略的 80.78%。可见，当 $\gamma \approx 1$ ，即负荷低谷持续时间与高峰持续时间基本相似时，本文所提优化调度策略与功率差调度策略的削峰填谷效果基本相似，但与恒功率调度策略相比，其仍有一定的优越性。

图 E2 与图 E3 分别比较了 3 中调度策略下储能的充放电功率及 SOC。

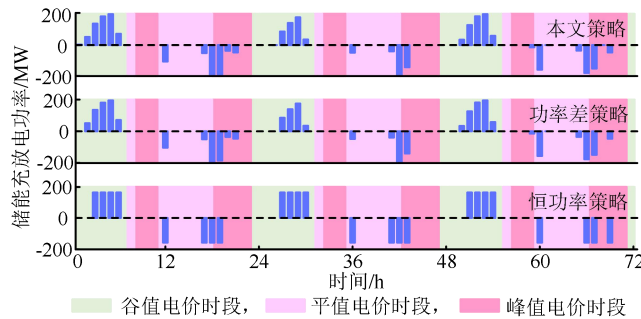


图 E2 3 种调度策略下储能系统的充放电功率对比

Fig.E2 Comparison of charging and discharging power of energy storage system among three scheduling strategies

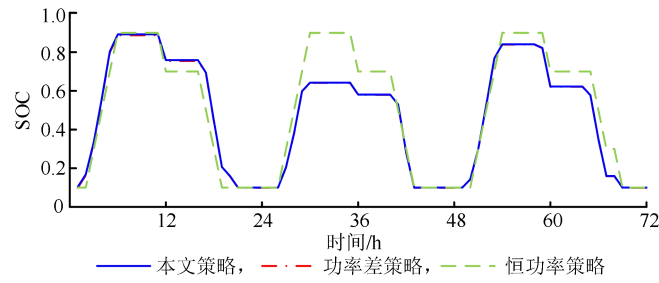


图 E3 3 种调度策略下储能系统的充放电功率对比

Fig.E3 Comparison of SOC of energy storage system among three scheduling strategies

由图 E2 和图 E3 可以看出,在本文所提调度策略的计算过程中,储能系统可以很好地满足功率约束和 SOC 约束,且充放电电量也达到了平衡;第 220 天与第 222 天储能 SOC 的趋势大致相同,而第 221 天功率差调度策略及本文所提优化调度策略下的储能 SOC 最大值仅为 0.67,但储能的最大充放电功率都达到了 200 MW,即达到了最优的削峰填谷效果,这是因为负荷低谷及高峰时段持续时间都比较短,在最大填谷功率及最大削峰功率达到储能功率约束时,所对应的充放电电量较少。而在恒功率调度策略下,储能系统每天都在 SOC 约束范围内满充满放,不仅削峰填谷效果不佳,也增加了储能系统的寿命损耗。