

基于二次规划的电池储能系统参与电网削峰填谷离线优化

参与电网削峰填谷是电池储能系统的基本功能之一。为使电池储能系统有效参与电网削峰填谷,提出一种基于二次规划的电池储能系统参与电网削峰填谷离线优化策略,该方法充分考虑电池储能系统实际约束,并能有效跟踪负荷波动规划电池储能系统充放电时间段及充放电功率。通过实例分析,验证了该算法简单、实用且可行。

董慧峰¹ 牛文迪² 杨旭强² 郭志敏³ 周 丽¹/1.国网河南节能服务有限公司
2.哈尔滨工业大学电气学院 3.河南恩湃高科集团有限公司

0 引言

随着经济的飞速发展和社会生产力的不断提高,电力负荷呈逐年增大趋势,而最大负荷利用小时数却呈现逐年下降的特征。电力负荷的逐年增长将导致负荷的峰谷差日益增大,从而可能导致电力系统的供需出现不平衡现象^[1-4]。电池储能系统应用于电网,可利用电池储能系统的快速吞吐特性在负荷低谷期时吸收能量储存待用,在负荷高峰期时释放能量,可完成削峰填谷任务,不仅可以直接缓和用电高峰时用电紧张情况,也可以间接地延缓电力设备的投资升级,减少电力系统备用容量,提高输电和配电设备的利用率,有利于电网的经济运行^[5-7]。

如何利用有限的电池容量达到最优的削峰填谷效果,并满足相应约束条件的限制,需要借助于优化算法来实现^[8-9]。本文提出一种基于二次规划的电池储能系统参与电网削峰填谷离线优化策略,该方法充分考虑电池储能系统实际约束,并能有效跟踪负荷波动规划电池储能系

统充放电时间段及充放电功率。

1 电池储能系统参与电网削峰填谷功率优化模型

削峰填谷主要实现减小电力高峰时电网负荷,增大电力低谷时电网负荷,从而保证电网负荷的相对平稳。所以,可通过负荷标准差对削峰填谷效果进行衡量。负荷标准差越小,负荷越平稳。

1.1 目标函数

电池储能系统参与电网削峰填谷优化目标函数如下,即

$$\min f(P_b) = \sqrt{\sum_{t=1}^T (P_{l,t} - P_{b,t} - P_a)^2 / T} \quad (1)$$

$$P_b = [P_{b,1}, P_{b,2}, \dots, P_{b,t}, \dots, P_{b,T}] \quad (2)$$

式中, $P_{l,t}$ 为第 t 时刻的实际电网负荷; P_b 为目标函数优化对象变量的向量形式,即电池储能系统优化周期内对外功率构成的向量; $P_{b,t}$ 为第 t 时刻储能系统的充放电功率,放电时: $P_{b,t} > 0$,充电时: $P_{b,t} < 0$, $P_{b,t} = 0$ 则为浮充状态,既不充电也不放电; T 为负荷采样周期,指采样的个数,并不是时间长度; P_a 为储能系统放电或充电后的负荷平均值。

$$P_a = \sum_{t=1}^T (P_{l,t} - P_{b,t}) / T \quad (3)$$

1.2 约束条件

(1) 功率约束

充电时

$$P_{ch,max} \leq P_{b,t} \leq 0 \quad (4)$$



董慧峰/高级工程师

关键词/Keywords

电池储能系统 ·
削峰填谷 ·
二次规划 ·

放电时

$$0 \leq P_{b,t} \leq P_{dis,max} \quad (5)$$

式中, $P_{ch,max}$ 为储能系统的最大充电功率, 由于充电时功率小于零, 因此 $P_{ch,max}$ 为负值; $P_{dis,max}$ 为储能系统的最大放电功率, 由于放电时功率大于零, 因此 $P_{dis,max}$ 为正值。

(2) 剩余电量约束

储能系统储蓄电能的能力有限, 因此充放电时还需要考虑其容量大小。储能系统的容量计算公式如下, 即

$$E_t = E_{t-1} - \int_{t-1}^t \xi P_{b,t} dt \quad (6)$$

式中, E_t 为 t 时刻电池储能系统所储存的能量; ξ 为充电系数。

引入荷电状态(State of Charge, SOC)对剩余电量进行评估, 即

$$SOC = \frac{E}{C} \times 100\% \quad (7)$$

$$SOC_t = SOC_{t-1} - \frac{\int_{t-1}^t \xi P_{b,t} dt}{C} \times 100\% \quad (8)$$

$$SOC_t = SOC_{t-1} - \frac{\xi P_{b,t} \Delta t}{C} \times 100\% \quad (9)$$

$$SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{max} \quad (10)$$

式中, E 为当前电池储能系统所储存能量; C 为电池储能系统额定容量; SOC_{min} 为储能系统荷电状态的最小值; SOC_{max} 为储能系统荷电状态的最大值; SOC_t 为第 t 时刻的荷电状态; Δt 为功率采样的时间间隔。

2 基于二次规划的离线优化模型求解方法

标准的二次规划数学模型为

$$\begin{aligned} \min & \frac{1}{2} x^T H x + g^T x \\ \text{s.t.} & A x \leq b, \quad A_{eq} x = B_{eq}, \quad l_b \leq x \leq u_b \end{aligned} \quad (11)$$

式中, A 、 A_{eq} 分别为不等式约束与等式约束矩阵; b 、 B_{eq} 、 l_b 、 u_b 、 g 和 x 均为向量; H 为二次型矩阵也称Hessian矩阵, 如果Hessian矩阵为正定或半正定矩阵, 则目标函数为凸函数, 即目标函数可寻优。

将电池储能系统参与电网削峰填谷平滑度评价模型转换为二次规划数学模型, 具体转换过程如下。

设

$$f = \sqrt{\sum_{t=1}^T (P_{l,t} - P_{b,t} - P_a)^2 / T} \quad (12)$$

将式 (3) 代入式 (12) 得

$$f = \sqrt{\sum_{t=1}^T (P_{l,t} - P_{b,t} - \sum_{t=1}^T (P_{l,t} - P_{b,t}) / T)^2 / T} \quad (13)$$

设

$$P_{l,t}^* = P_{l,t} - \sum_{t=1}^T P_{l,t} / T \quad (14)$$

$$\overline{P}_{b,t} = \sum_{t=1}^T P_{b,t} / T \quad (15)$$

将式 (14)、式 (15) 代入式 (13) 得

$$f = \sqrt{\sum_{t=1}^T (P_{l,t}^* - P_{b,t} + \overline{P}_{b,t})^2 / T} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} Tf^2 &= \sum_{t=1}^T P_{b,t}^2 - \frac{(\sum_{t=1}^T P_{b,t})^2}{T} - 2 \sum_{t=1}^T P_{l,t}^* P_{b,t} + \\ & 2 \sum_{t=1}^T P_{l,t}^* \frac{\sum_{t=1}^T P_{b,t}}{T} + \sum_{t=1}^T P_{l,t}^{*2} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} f_1 &= Tf^2 - \sum_{t=1}^T P_{l,t}^{*2} = \sum_{t=1}^T P_{b,t}^2 - \frac{(\sum_{t=1}^T P_{b,t})^2}{T} - \\ & 2 \sum_{t=1}^T P_{l,t}^* P_{b,t} + 2 \sum_{t=1}^T P_{l,t}^* \frac{\sum_{t=1}^T P_{b,t}}{T} \end{aligned} \quad (18)$$

式中, $P_{l,t}$ 为第 t 时刻的实际电网负荷, 为优化中已知量; 由式 (14) 可知, $P_{l,t}^*$ 也为优化中已知量, 所以 f_1 为优化对象变量 $P_{b,t}$ 的二次函数, 则 $\min f_1$ 是关于 $P_{b,t}$ 的二次规划数学模型。

由式 (12) 可得 $f > 0$ (对于有限容量与功率的电池储能系统 $f \neq 0$), 由式 (18) 可得 $df_1/df = 2Tf > 0$, 即 f_1 为 f 的严格单调递增函数, 所以在相同约束条件下, 对于目标函数 $\min f$ 与 $\min f_1$ 存在相同的 $P_{b,t}$, 所以可将 $\min f$ 问题转换为 $\min f_1$ 关于 $P_{b,t}$ 的二次规划问题。

对于目标函数 $\min f_1$ ，其Hessian矩阵为

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial P_{b,1}^2} & \frac{\partial f_1}{\partial P_{b,1} \partial P_{b,2}} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial P_{b,1} \partial P_{b,T}} \\ \frac{\partial f_1}{\partial P_{b,2} \partial P_{b,1}} & \frac{\partial f_1}{\partial P_{b,2}^2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial P_{b,2} \partial P_{b,T}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_1}{\partial P_{b,T} \partial P_{b,1}} & \frac{\partial f_1}{\partial P_{b,T} \partial P_{b,2}} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial P_{b,T}^2} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$H = \begin{bmatrix} 2 - \frac{2}{T} & -\frac{2}{T} & \cdots & -\frac{2}{T} \\ -\frac{2}{T} & 2 - \frac{2}{T} & \cdots & -\frac{2}{T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{2}{T} & -\frac{2}{T} & \cdots & 2 - \frac{2}{T} \end{bmatrix} \quad (20)$$

判断 H 是否为正定或半正定矩阵，只需计算其顺序主子式 h_n

$$h_n = 2^n (1 - \frac{n}{T}) \quad n=1, 2, \cdots, T \quad (21)$$

当 $T \geq 2$ 时， $h_1, h_1, \cdots, h_{T-1} > 0$ 且 $h_T = 0$ ，所以为半正定矩阵， f_1 为关于 $P_{b,t}$ 的可寻优二次规划问题，即凸二次规划问题。

对目标函数 f_1 的剩余电量 SOC 约束式 (9) 和式 (10) 进行变换处理转换为二次规划约束，即

$$k = -\frac{\xi \Delta}{C} \times 100\% \quad (22)$$

$$SOC_t = SOC_{t-1} + kP_{b,t} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} SOC_1 &= SOC_0 + kP_{b,1} \\ SOC_2 &= SOC_1 + kP_{b,2} = SOC_0 + kP_{b,1} + kP_{b,2} \\ SOC_3 &= SOC_0 + kP_{b,1} + kP_{b,2} + kP_{b,3} \\ &\cdots \end{aligned} \quad (24)$$

$$SOC_T = SOC_0 + kP_{b,1} + kP_{b,2} + kP_{b,3} + \cdots + kP_{b,T}$$

$$SOC = SOC_0 + kBP_b \quad (25)$$

$$SOC = [SOC_1 \quad SOC_2 \quad \cdots \quad SOC_T]^T \quad (26)$$

$$SOC_0 = [SOC_0 \quad SOC_0 \quad \cdots \quad SOC_0]^T \quad (27)$$

$$P_b = [P_{b,1} \quad P_{b,2} \quad \cdots \quad P_{b,T}]^T \quad (28)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

式中， SOC 为荷电状态向量； SOC_0 为初始荷电状态向量 (T 阶)； P_b 为目标函数变量的向量形式； B 为系数矩阵 (T 阶方阵) 且 $|B|=1$ 。

联系式 (10) 可得

$$SOC_{\min} - SOC_0 \leq AP_b \leq SOC_{\max} - SOC_0 \quad (30)$$

$$SOC_{\min} = [SOC_{\min} \quad SOC_{\min} \quad \cdots \quad SOC_{\min}]^T \quad (31)$$

$$SOC_{\max} = [SOC_{\max} \quad SOC_{\max} \quad \cdots \quad SOC_{\max}]^T \quad (32)$$

$$A = kB \quad (33)$$

对于凸二次规划问题的算法已经日趋完善，在此不作赘述。常用的算法有内点法、有效集法和共轭梯度法等。本文采用共轭梯度法进行仿真分析。

3 实例分析

某地区日负荷如图 1 所示。

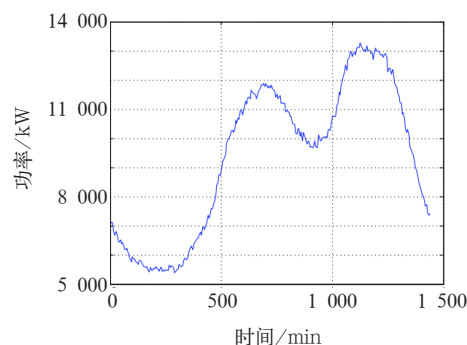


图1 某地区日负荷

电池储能系统参数为 1 MW/6 MW·h， $\xi=0.8$ 。基于二次规划的实例仿真结果如图 2~图 4 所示。

引入负荷标准差指标 f 与谷峰系数 α 对算法削峰填谷效果进行衡量，即

$$f = \sqrt{\sum_{t=1}^T (P_{l,t} - P_{b,t} - P_a)^2 / T} \quad (34)$$

$$\alpha = P_{\min} / P_{\max} \quad (35)$$

负荷标准差指标 f 越小，负荷波动越小；谷

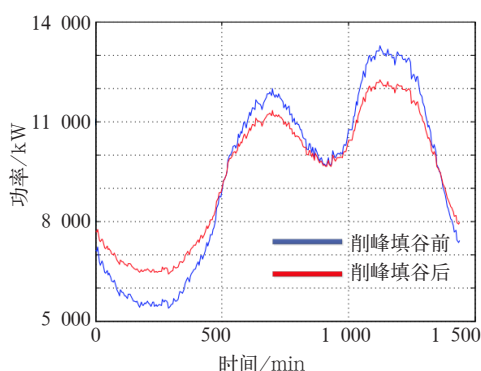


图2 削峰填谷前后对比图

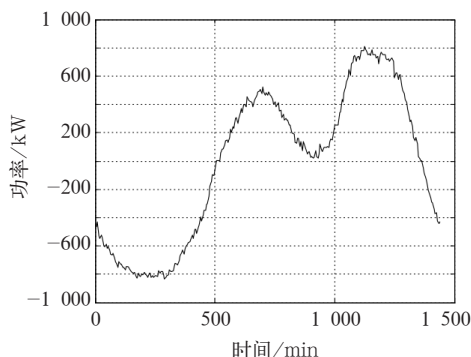


图3 电池储能系统充放电功率

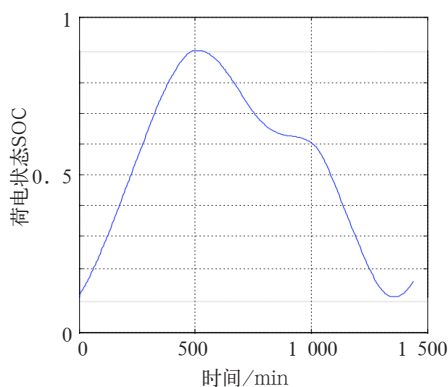


图4 电池储能系统荷电状态

峰系数 α 越大, 负荷波动越小。未进行削峰填谷的负荷标准差 $f=2\ 592.4$, 谷峰系数 $\alpha=0.413\ 5$; 削峰填谷后负荷标准差 $f=2\ 049.9$, 谷峰系数 $\alpha=0.537\ 1$ 。由此实例分析可以得出, 所提出的基于二次规划的电池储能系统参与电网削峰填谷离线优化, 可有效跟踪负荷波动, 减小负荷谷峰差, 指标性良好, 算法简便可行。

4 结束语

提出电池储能系统参与电网削峰填谷功率优化模型, 并将其转换为二次规划问题, 并证明

此二次规划问题存在全局唯一最优解为凸二次规划问题。将原优化模型约束条件转换为典型二次规划约束, 采用共轭梯度法对电池储能系统参与电网削峰填谷二次规划问题进行实例仿真分析。该方法充分考虑电池储能系统实际约束, 并能有效跟踪负荷波动规划电池储能系统充放电时间段及充放电功率, 削峰填谷效果良好, 算法简便可行。

参考文献

- [1] Bagen, Billinton R. Impacts of energy storage on power system reliability performance[C]. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, IEEE, 2005: 494-497.
- [2] 赵阅群, 艾欣, 周树鹏. 直接负荷控制技术研究[J]. 电气应用, 2016, 35(6): 48-55.
- [3] Ding M, Zhang Y, Mao M, et al. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 7-14.
- [4] 陈江艳. 基于模糊推理算法的电力负荷预测系统的研究[J]. 电气应用, 2015, 34(13): 186-189.
- [5] 李国庆, 张慧杰, 王鹤, 等. 计及储能装置削峰填谷的微网优化运行[J]. 电测与仪表, 2013, 50(10): 73-78.
- [6] Man C, Zhigang L U, Yi L, 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.
- [7] 李芹芹, 张维戈, 黄梅. 快速充电站储能系统容量配置的研究[J]. 电气应用, 2017, 36(5): 26-31.
- [8] 张阁, 杨艺云, 肖园园, 等. 分布式电源接入配电网的双层协调电压控制策略研究[J]. 电气应用, 2015, 34(S2): 356-361.
- [9] 宁阳天, 李相俊, 麻秀范, 等. 考虑供电可靠性的电池储能系统削峰填谷策略研究[J]. 电气应用, 2015, 34(6): 62-68.

(收稿日期: 2018-07-27) **EA**