

# 储能调频系统控制策略与投资收益评估研究

陈大宇<sup>1</sup>, 张粒子<sup>1</sup>, 王立国<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 国网天津滨海供电公司, 天津 300450)

## Control Strategy of Energy Storage System for Frequency Regulation and Evaluation of Investment Income

CHEN Dayu<sup>1</sup>, ZHANG Lizi<sup>1</sup>, WANG Ligu<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Grid Tianjin Binhai Electric Power Supply Company, Tianjin 300450, China)

**摘 要:** 本文以华北区域 AGC 补偿机制为基础, 提出了电储能系统响应电网 AGC 指令的优化控制模型, 模型以最大化电储能系统 AGC 运行的净收益为目标, 考虑了电储能系统寿命损耗成本以及 AGC 补偿收益, 并应用粒子群(PSO)算法求解最大化收益的控制策略。在算例分析中, 基于电网实际下发的 AGC 指令, 应用本文模型对锂离子电池储能系统的控制策略进行时序仿真, 即首先对每个 AGC 指令周期优化储能系统的控制策略, 然后计算电储能调频服务在整个仿真周期净收益, 最后对储能调频系统的投资经济性进行评估。

**关键词:** 电池储能; 调频; AGC; 粒子群算法; 投资收益

**Abstract:** An optimal control strategy of electric energy storage system for responding AGC control signal is proposed based on AGC compensation mechanism of Huabei Area in the paper. The objective of optimization model is to maximize the net AGC revenue, and capacity degradation cost of storage system due to frequent cycling during responding AGC is modeled. AGC compensation based on ancillary service compensation policy for Huabei region is formulated in the model as well, and PSO algorithm is applied for solving the optimization problem to provide control mode of power output for energy storage. In the case study, a chronological simulation of output control for a Lithium-Ion battery storage system is performed by using a series of actual AGC control signal, in which the control strategy of energy storage system is optimized for each AGC control cycle, and total net AGC service revenue during the simulation period is calculated. In the end, the investment income of energy storage system for frequency regulation is evaluated.

**Keywords:** energy storage system; frequency regulation; AGC; PSO; return of investment

## 0 引 言

储能系统提供电网 AGC 调频服务始于美国, 通过多年的充分测试和验证, 取得了较好的效果, 在多个电力市场中实现了商业化应用, 例如, 超过 50MW 的锂离子电池储能电站参与 PJM 电力市场的调频市场, 有 20MW 的飞轮储能调频电站为纽约电力市场提供调频服务。为更好地利用和推广储能等优质调频电源, 美国联邦能源监管委员会还制定了完善的调频服务补偿机制。美国的成功经验表明: ①相较于传统调频电源, 储能电池系统可以提供更优质 AGC 服务, 在毫秒级时间范围内完成 AGC 指令; 可以实现精确控制, 能够在任何功率点保持稳定输出; 具有双向调节能力, 其充电过程表现为负荷, 放电过程表现为电源, 其充、放电过程可以根据 AGC 调节指令的需要转换<sup>[1]</sup>。②储能系统能够有效改善电网 AGC 调频的整体控制效率和经济性。③在一定的 AGC 市场机制下, 以提供 AGC 服务为目的的储能电站, 通过合理选择储能系统的技术类型、功率和容量等参数, 能够实现储能的纯商业化运营。

文献[2]针对美国加州电力市场中调频市场, 根据飞轮储能的特性, 研究在不同调频服务运营模式情况下的调频电站的经济效益。文献[3]基于 PJM 电力市场的调频市场状况, 提出了应用飞轮储能的建设方案、预期的调节效果以及定性评估了飞轮储能调频电站的经济性。在国内, 储能电池系统在电力系统中的应用目前多集中于电网调峰、新能源电站移峰和稳定输出等领域, 相关文章的研究

也大多针对这些领域展开<sup>[4-12]</sup>。

关于储能系统参与电网 AGC 调频服务，国内才刚刚起步，相关研究也很少。自 2009 年华北区域正式运行《华北区域发电厂并网运行管理实施细则》和《华北区域并网发电厂辅助服务管理实施细则》（简称“两个细则”）以来，包括 AGC、黑启动、深度调峰等辅助服务市场已经基本建成，特别是 AGC 调频市场化已经取得了显著的成效，针对包括火电、水电等常规机组的 AGC 机组的优选、AGC 调度运行、AGC 性能评价等方面的工作已经日趋成熟。但是，国内采用新技术提供 AGC 服务的实际案例较少，从公开报道来看，京能集团的石景山热电厂与北京睿能世纪科技有限公司合作建设的 2MW/500kWh 锂离子电池储能系统，用于辅助火电机组提供 AGC 调频服务。根据华北电网的 AGC 性能监测数据显示，采用电池储能系统配合运行后，石景山热电厂火电机组的 AGC 调节平均性能大幅提升，其长期平均 AGC 调节性能指标  $K_p$  在 4.6 以上，稳定保持全华北电网第一，明显超过网内其他所有机组。

储能电池调频系统的投资收益不仅取决于其投资成本和调频服务补偿机制及补偿费用水平，还与储能电池调频系统的控制策略密切相关。国内各区域实行的调频服务补偿机制，都是依据 2006 年国家电力监管委员会发布的《并网发电厂辅助服务管理暂行办法》制定的，尚未充分考虑储能系统的优质价值，亟待完善。相应地，针对国内调频服务补偿机制下的储能调频系统控制策略与投资收益评估方法的研究成果尚未见文献报道。

储能电池主要分为功率型和能量型两种。功率型储能电池具有较高的功率输出能力和较快的功率响应速度，但能量存储量很有限，例如超级电容储能、超导磁储能等；能量型储能电池有较大的能量储存能力，通常能够以额定功率充电或放电数个小时，例如钒液流电池、钠硫电池等。由于 AGC 调频要求调频电源可以短时间内大幅度、频繁地改变出力，以实现快速、精确地控制区域电网控制偏差，故要选用功率型储能电池作为调频储能电源，目前技术经济性较好的调频储能电站一般选配锂电池。

本文主要研究在我国现行调频补偿机制下，锂离子电池储能系统参与电网 AGC 调频服务净收益最大化控制策略，根据预期收益对给出调频储能电

站的投资经济性进行评估。

本文研究储能调频电站的基本 AGC 响应策略，基于已有的 AGC 指令特性进行事后评估，主要应用于评估储能调频系统的经济性，能够在一定市场机制下辅助储能调频电站的投资决策。本文不涉及实际运行中储能的详细控制策略。

## 1 储能系统寿命及寿命损耗成本模型

锂离子电池储能系统寿命通常是指储能系统的容量损耗达到额定容量 20% 时的充放电循环次数。电池的容量损耗主要是由电池内部溶液浓度下降、溶质氧化引起内阻增加造成的<sup>[13-15]</sup>。储能系统寿命主要受放电深度、运行温度等因素的影响。成熟的储能产品会配备有较为完善的温度控制系统，以保持储能电池工作在最合适的温度环境，因此可以认为储能系统基本运行于恒温状态。本文主要考虑储能系统放电深度因素的影响。

放电深度 (Depth of Discharge, DOD) 是指在电池使用过程中，电池的放电容量占其额定容量的百分比称为放电深度。图 1 给出了不同放电深度下，锂电池容量衰减损耗与充放电循环次数的关系曲线，数据由某锂电池生产厂家提供。图中，“DOD=50% (100% 到 50%)”是指储能系统在 100% 电量时放电，放电至剩余 50% 电量时停止放电，之后充电至 100% 电量，如此反复。DOD=100% 和 DOD=20% 时情况相同。由图可知，充放电循环次数相同时，放电深度越小，储能系统的寿命损耗越小，即储能系统的循环寿命越长。

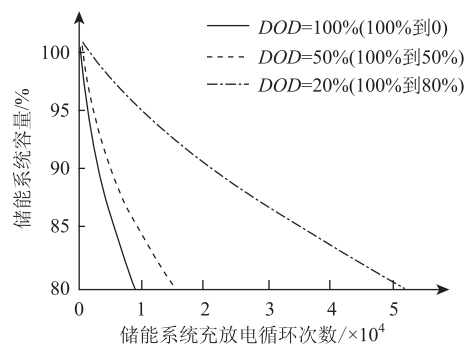


图 1 不同放电深度情况下，储能系统的容量损耗曲线

根据在不同 DOD 水平下的储能容量衰减与循环寿命的曲线，获得在储能电池容量衰减至额定容量的 80% 时的循环次数，可以拟合出储能电池循环寿命与 DOD 的关系曲线。图 2 给出了储能系统

寿命周期内最大充放电循环次数和放电深度间的关系曲线,其数据由某锂电池生产厂家提供。

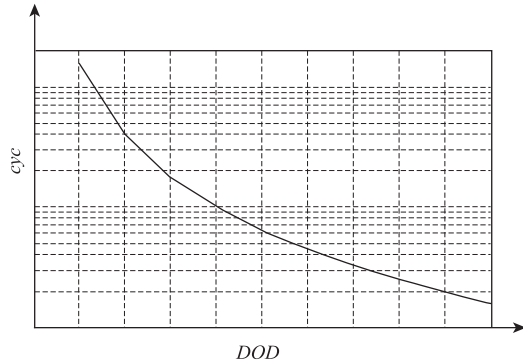


图2 储能系统循环寿命与放电深度关系曲线

由图2可以更直观地看出,储能系统的循环寿命随着放电深度的增大而减小,且二者呈e的负指数关系,可通过拟合方法得到储能系统的寿命方程为

$$cyc = \begin{cases} a \cdot e^{b \cdot DOD} + c \cdot e^{d \cdot DOD}, & DOD > 0 \\ +\infty, & DOD = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $cyc$ 为储能系统寿命周期内最大充放电循环次数; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 为储能系统寿命方程的特征参数,可根据电池厂商提供的实测数据获得。

根据总循环寿命和系统总成本,可以计算储能系统完成一次充放电过程,其寿命损耗成本为

$$C_{loss} = \frac{C_{total}}{cyc} \quad (2)$$

式中: $C_{loss}$ 为储能系统的寿命损耗成本; $C_{total}$ 为调频储能电站储能系统的投资成本。

## 2 考虑储能运行寿命损耗的调频储能电站净收益最大化控制策略

本文以单个AGC指令为单位,在指令周期内以收益最大化为目标优化储能系统调频控制策略。AGC补偿是依据《华北区域电网发电厂辅助服务管理实施细则(试行)》规定,即AGC补偿计算方式为针对单一AGC电源以日为单位进行补偿,采用实测效果事后计算补偿金额。

### 2.1 AGC补偿与考核

在一个AGC指令周期 $T$ 时间内,储能系统的调节过程如图3所示。在 $t_s$ 时刻储能系统接收到AGC指令,此时储能系统的出力为 $P_s$ ,放电深度为 $DOD_s$ 。储能系统接到指令后开始匀速充放电,

经过 $\Delta t$ 时间,储能系统出力调整为 $P_E$ ,达到指令有效阈值范围(即 $P_{ref} - \Delta P_N \leq P_E \leq P_{ref} + \Delta P_N$ ),并保持至下一个新的AGC指令为止。特别的,在计算调频补偿时,通常要求调频电源补偿深度达到指令有效阈值范围并保持一段时间(一般为2s),此次调节才认为达到指令目标,记为有效。

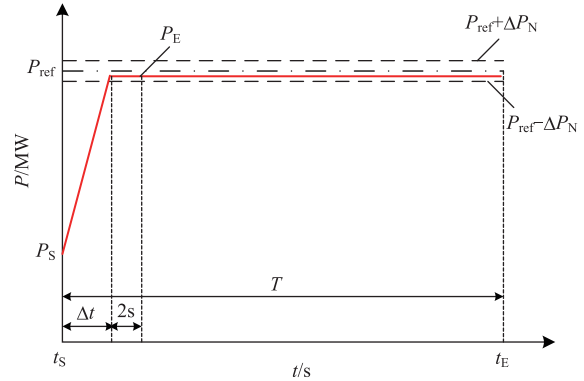


图3 指令周期 $T$ 时间内储能系统动作过程

依据《华北区域电网发电厂辅助服务管理实施细则(试行)》中规定的AGC服务补偿办法,列写指令周期 $T$ 内储能系统参与AGC调频的补偿为

$$R_{gross} = Dk_1k_2k_3A_{AGC} \quad (3)$$

式中: $D$ 为补偿深度,当调频电源补偿深度达到指令有效阈值范围并保持规定时间时,其值为 $|P_{ref}|$ ,否则为0; $P_E > 0$ 为储能系统放电, $P_E < 0$ 为储能系统充电; $R_{gross}$ 为储能系统获得的AGC补偿,单位为元; $A_{AGC}$ 为储能系统参与AGC调频的补偿单价,单位为元/MW; $k$ 为储能系统跟踪AGC指令的调节效果指标,其中 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 分别表示调节速率、调节精度和响应时间,其计算公式如下:

$$\begin{cases} k_1 = 2 - \frac{v_N}{|P_E - P_s|} \Delta t \\ k_2 = 2 - \frac{|P_E - P_{ref}|}{\Delta P_N} \\ k_3 = 2 - \frac{\Delta P_N}{t_{st} |P_E - P_s|} \Delta t \end{cases} \quad (4)$$

式中: $v_N$ 为标准调节速率, MW/min;  $\Delta P_N$ 为调节允许的偏差量, MW;  $t_{st}$ 为标准响应时间, s。

特别地,当 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 计算值小于0.1时,取值0.1。

在AGC补偿管理规定中,当AGC电源没有达到调节性能的下限时,该电源将会被考核。因此,当储能不响应AGC指令会接收考核,即罚款。

当不响应 AGC 指令时，虽然储能没有发生寿命的损耗，但是罚款导致该次调节的净收益为负。关于惩罚的详细计算可参照“两个细则”。

### 2.2 调频储能电站净收益模型

储能系统参与 AGC 调频的净收益由两部分组成，即储能系统参与 AGC 调频获得的补偿和储能系统自身寿命损耗导致的成本，其表达式为

$$R = R_{\text{gross}} - C_{\text{loss}} \quad (5)$$

式(3)和(4)显示，当储能系统响应时间越短，出力调整速度越快，调节精度越高，调频储能电站获得的 AGC 调频补偿越多；相应地，当 AGC 指令目标幅度越大维持时间越长，储能系统的放电深度也会变大。由式(2)可以看出，储能系统放电深度的加大会增大储能系统的寿命损耗成本。可见，AGC 调频补偿  $R_{\text{gross}}$  和储能电池损耗成本  $C_{\text{loss}}$  之间存在正相关的关系，若单纯如图 3 中那样控制储能系统追随 AGC 指令，随着 AGC 补偿收入的增多，电池损耗成本也会随之加大，从调频储能电站角度来说，其净收益未必是最大值。若追求净收益最大化，未必是储能系统的响应时间越短越好，出力调整速度越快越好，控制精度越高越好。

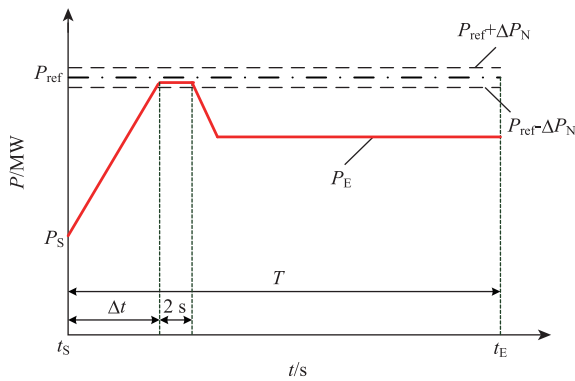


图 4 收益最大化情况下的储能系统调整过程

现将储能系统接收到 AGC 指令后的动作过程调整为如图 4 所示。与图 3 不同的是，储能系统调整出力至指令有效阈值范围，并保持 2s 后，选择调整出力至由净收益最大化控制策略确定的补偿深度  $P_E$ ，并保持至下一指令周期。因此，式(4)改写成

$$\begin{cases} k_1 = 2 - \frac{v_N}{|P_{\text{ref}} - P_S|} \Delta t \\ k_2 = 2 - \frac{|P_E - P_{\text{ref}}|}{\Delta P_N} \\ k_3 = 2 - \frac{\Delta P_N}{t_{\text{st}} |P_{\text{ref}} - P_S|} \Delta t \end{cases} \quad (6)$$

储能系统的放电深度为

$$DOD = (0.5 |P_{\text{ref}} + P_S| \Delta t + 2 |P_{\text{ref}}| + |P_E| (T - 2 - \Delta t)) / Q_N \quad (7)$$

式中： $Q_N$  为储能系统的额定容量，MWs。

对于调频储能电站， $P_N$ 、 $\Delta P_N$ 、 $Q_N$ 、 $C_{\text{total}}$ 、 $v_N$ 、 $t_{\text{st}}$  和  $A_{\text{AGC}}$  均为已知参数，指令周期  $T$  时间内储能系统参与 AGC 调频的补偿金额、储能系统寿命损耗成本以及未达到响应指标的考核罚款是  $\Delta t$  和  $P_E$  的函数，即  $R_{\text{gross}} = R_{\text{gross}}(\Delta t, P_E)$ ， $C_{\text{loss}} = C_{\text{loss}}(\Delta t, P_E)$  以及  $P_{\text{penalty}}(\Delta t, P_E)$ 。

储能系统参与 AGC 调频的净收益模型为

$$R(\Delta t, P_E) = R_{\text{gross}}(\Delta t, P_E) - C_{\text{loss}}(\Delta t, P_E) - P_{\text{penalty}}(\Delta t, P_E) \quad (8)$$

其自变量的物理意义如下： $\Delta t$  为反映储能系统的响应时间和出力调整速度； $P_E$  为反映储能系统的调节精度。

### 2.3 调频储能电站净收益最大化控制策略

至此，求指令周期内调频储能电站净收益最大化问题就可以转化为式(8)的非线性优化问题。其目标函数为

$$\max R(\Delta t, P_E) \quad (9)$$

约束条件：

①时间  $\Delta t$  约束范围： $0 < \Delta t \leq T - 2$ ；

②储能系统充放电功率约束：

$$P_{\text{dmin}} \leq P_{\text{dE}} \leq P_{\text{dmax}} \text{ or } P_{\text{cmin}} \leq P_{\text{cE}} \leq P_{\text{cmax}};$$

③ 储能系统荷电状态约束： $SOC_{\text{min}} \leq SOC \leq SOC_{\text{max}}$ ；

式中：下标 d 为储能系统放电；下标 c 为储能系统充电； $P_{\text{max}}$ 、 $P_{\text{min}}$  为储能系统相应充放电状态下的功率限值，MW；SOC 为储能系统的荷电状态； $SOC_{\text{max}}$ 、 $SOC_{\text{min}}$  为储能系统荷电状态的限值。SOC 计算公式如下：

$$SOC = SOC_S - (0.5(P_{\text{ref}} + P_S)\Delta t + 2P_{\text{ref}} + P_E(T - 2 - \Delta t)) / Q_N \quad (10)$$

式中： $SOC_S$  为  $t_s$  时刻储能系统的荷电状态。

本文采用 PSO 粒子群算法对于式(9)进行求解，关于 PSO 算法的原理，已有诸多文献进行了研究，本文不再赘述。

其求解流程如下：

Step1. 接收 AGC 指令，判断指令值  $P_{\text{ref}}$ ， $n$  与前一指令周期的指令值  $P_{\text{ref}}$ ， $n-1$  是否相等。如不等，执行 Step2，否则执行 Step7。

Step2. 初始化粒子群中粒子的速度、位置、



学习因子和惯性权重等。

Step3. 计算并记录每个粒子的位置和适应度, 存储所有粒子的最优位置和适应度。

Step4. 更新粒子的速度和位置。

Step5. 计算并更新每个粒子的最优位置和适应度, 更新所有粒子的最优位置和适应度, 并判断最优位置是否满足约束条件, 如越限, 将最优位置限制在限值。

Step6. 判断是否满足结束条件, 如满足, 执行 Step7; 否则, 执行 Step4。

Step7. 停止运算, 输出结果。

### 3 算例分析

选取国内某锂电池厂商提供的磷酸铁锂电池组成的 32MW, 15 min 电池储能调频系统作为测试算例, 其参数如表 1 所示。电池的成本为 3 500 元/kWh, 储能系统逆变器成本、建设成本为 1 500 元/kW。储能电池运行环境温度为 25℃。

表 1 电池储能调频系统参数

参数/单位	参数值	参数/单位	参数值
$P_N$ /MW	32	$P_{cmax}$ /MW	32
$Q_N$ /MWh	8	$P_{cmin}$ /MW	0
$P_{dmax}$ /MW	32	$SOC_{max}$	0.95
$P_{dmin}$ /MW	0	$SOC_{min}$	0.25

电池储能系统参与 AGC 调频补偿计算参数如下:

$v_N = 1.5\% \times P_N$  MW/min,  $P_N = 1\% \times P_N$  MW,  $t_{st} = 30s$ ,  $A_{AGC} = 15$  元/MW。

采用 Matlab 的 cftool 工具箱, 依据式(2)对电池厂商提供的放电深度和循环寿命曲线和数据拟合, 得到储能系统寿命模型的特征参数如下:  $a = 4.966 \times 10^4$ ,  $b = -14.32$ ,  $c = 3.428 \times 10^4$ ,  $d = -2.182$ 。

拟合曲线与厂家提供数据比较如图 5 所示。

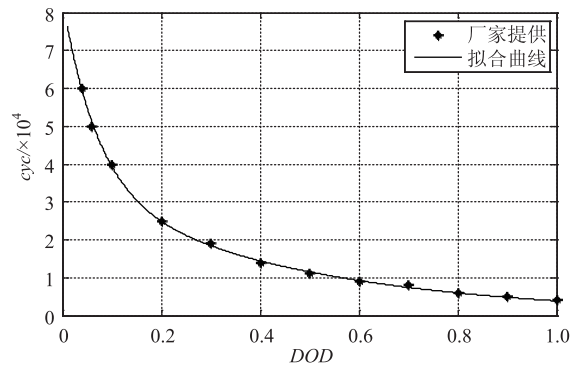


图 5 锂电池储能系统循环寿命模型拟合曲线

#### 3.1 电池储能调频系统净收益最大化控制

应用第 2 节提出的净收益最大化控制模型, 基于电网实际下发的典型日某时段 AGC 指令进行时序仿真, 结果如图 6 所示。

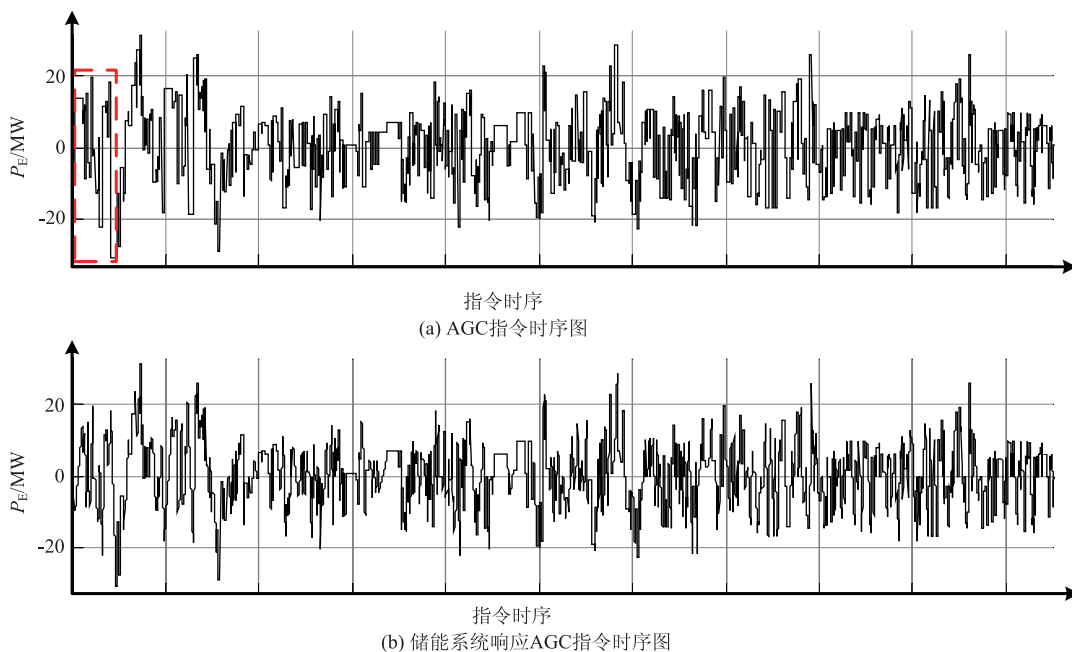


图 6 仿真结果

图 6 中，电池储能调频系统能快速响应 AGC 指令，并能根据自身净收益最大化控制策略进行优化控制。为能更清晰体现本文优化模型，现将图 6 中 AGC 指令的虚框段进行放大，如图 7 所示。

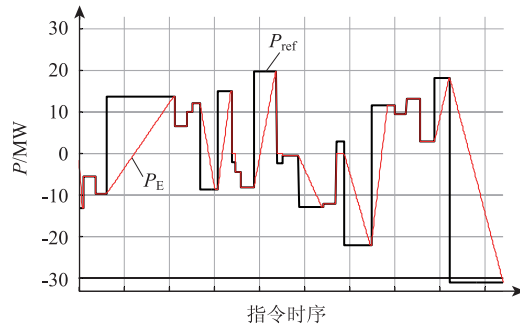


图 7 仿真结果局部放大图

仿真数据如表 2 所示。

表 2 图 7 对应仿真数据

$P_{ref}/\text{MW}$	$T/s$	$P_E/\text{MW}$	$t/s$	净收益/元
-13.2	10	-13.2	8	646.1
-5.5	27	-5.5	0	-289.7
-9.7	25	-9.7	0	185.6
13.6	150	13.6	148	535.5
6.6	27	6.6	0	-166.8
10	13	10	0	255.8
12	17	12	0	473.4
-8.7	39	-8.7	32.8	123.2
15.1	31	15.1	29	849.4
-2.2	8	0	—	-153.6
-4.4	12	0	—	-230.4
-8.2	29	-8.2	27	10.7
19.7	50	19.7	48	1 325.2
-2.4	13	0	—	-249.6
-0.6	36	0	—	-691.2
-13	54	-13	52	486.1
-12	28	-12	0	432.6
2.9	19	0	—	-364.8
-22.2	60	-22.2	58	1 478.6
11.5	52	11.5	35.5	461.1
9.5	25	9.5	0	163.1
13.1	31	13.1	0	542.5
2.9	32	2.9	0	-585
18.1	34	18.1	32	1 110.7
-30.9	120	-30.9	118	2 461.3

结合图 7 和表 2 对典型过程进行分析：

① 当储能系统接收到 AGC 指令  $-13.2\text{MW}$  时，没有立即跟踪 AGC 指令进行跳转，而是根据自身优化结果从  $0\text{MW}$ （仿真开始前，储能系统的初始状态）经过  $8\text{s}$  爬升至  $-13.2\text{MW}$ ，此时净收益为  $646.1$  元。如若电池储能系统直接跟随 AGC 指令快速变出力至  $-13.2\text{MW}$ ，经计算其净收益为  $639$  元。

② 当 AGC 指令从  $-13.2\text{MW}$  跳转到  $-5.5\text{MW}$  时，电池储能系统经过优化控制后迅速动作，变出力至  $-5.5\text{MW}$ ，此时储能系统亏损  $289.7$  元。如若储能系统不响应此次调频，经计算储能系统因拒绝配合 AGC 调频而将遭受  $518.4$  元的考核罚款。

③ 当 AGC 指令从  $15.1\text{MW}$  跳转为  $-2.2\text{MW}$  时，电池储能系统经过优化控制后选择不出力，承担电网对电池储能系统不响应 AGC 指令的考核惩罚  $153.6$  元。如若继续跟踪 AGC 指令，经计算，系统将亏损  $646.6$  元。

④ 其他优化结果中  $\Delta t=0$  代表电池储能系统接收到 AGC 指令后，立即响应将储能出力调整到指令值，电池储能系统调频的净收益越多。

综上不难看出，经过优化控制，电池储能系统可以收敛到净收益最大值点，验证了本文所提模型和算法的正确性、合理性、有效性和可行性。

### 3.2 投资收益预期评估

应用收益最大化模型进行仿真计算得到，典型日电池储能调频系统参与 AGC 调频收益约为  $7.46$  万元，按照全年  $300\text{d}$  运行，可估算出电池储能调频系统的年度净收益约为  $2\,238$  万元。而电池储能调频系统的投资成本为  $7\,600$  万元。因此在不考虑缴纳各类税费的情况下，本算例储能调频电站可以在  $3.4\text{a}$  回收成本。

## 4 结束语

本文首先建立了考虑储能电站运行寿命损耗和华北电网现行调频服务补偿机制的储能电站收益模型，并提出了基于 PSO 算法的储能电站收益最大化控制策略。其次通过对储能电站收益模型的简化，给出了基于预期收益及历史 AGC 指令概率最大补偿深度的电池储能系统投资经济性评估方法。本文的研究可以为储能电站的规划、高效经济运行提供有效的工具。

## 参 考 文 献

- [1] 李丰, 张粒子, 舒隽. 考虑间歇式电源与储能的随机柔性优化调度方法 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (5): 88-93.
- [2] Lu N, Weimar M R, Makarov Y V, et al. An Evaluation of the Flywheel Potential for Providing Regulation Service in California [C]. 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 25-29 July 2010, Minneapolis, MN.
- [3] Lazarewicz M L, Rojas A. Grid Frequency Regulation by Recycling Electrical Energy in Flywheels [C]. 2004 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 10-10 June 2004, Denver, CO.
- [4] 邱培春, 葛宝明, 毕大强. 基于蓄电池储能的光伏并网发电功率平抑控制研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (3): 30-33.
- [5] 洪海生, 江全元, 严玉婷. 实时平抑风电场功率波动的电池储能系统优化控制方法 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (1): 105-109.
- [6] 韩晓娟, 程成, 籍天明, 等. 计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (34): 91-97.
- [7] 沈玉明, 胡博, 谢开贵, 等. 计及储能寿命损耗的孤立微电网最优经济运行 [J]. 电网技术, 2014, 38 (9): 2371-2377.
- [8] 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.
- [9] 李军徽. 抑制风电对电网影响的储能系统优化配置及控制研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [10] 胡春泽, 谢旭, 张放, 等. 含储能资源参与的自动发电控制策略研究 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (29): 5080-5086.
- [11] 张野, 郭力, 贾宏杰, 等. 基于电池荷电状态和可变滤波时间常数的储能控制方法 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (6): 34-38.
- [12] 李逢兵, 谢开贵, 张雪松, 等. 基于锂电池充放电状态的混合储能系统控制策略设计 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (1): 70-75.
- [13] Peterson S, Apt J, Whitacre J. Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilization [J]. Journal of Power Sources, 2010, 195 (8): 2385-2392.
- [14] 李逢兵, 谢开贵, 张雪松, 等. 基于寿命量化的混合储能系统协调控制参数优化 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (1): 1-5.
- [15] 高飞, 杨凯, 惠东, 等. 储能用磷酸铁锂电池循环寿命的能量分析 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (5): 41-45.

收稿日期: 2015-07-14

作者简介:

陈大宇 (1978—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力市场和电力经济, E-mail: wangbigtree@qq.com;

张粒子 (1963—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制、电力市场及其技术支持系统;

王立国 (1988—), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统运行、电力市场。

(责任编辑: 林海文)