# 基于综合建模的 3 类电池储能电站性能对比分析

丁 明[1]，徐宁舟[1]，毕 锐[1]，陈自年[2]，罗亚桥[2]，宋 卓[2]
(1. 安徽省新能源利用与节能重点实验室，合肥工业大学，安徽省合肥市 230009；
2. 安徽省电力科学研究院，安徽省合肥市 230022)

**摘要：**新型蓄电池的诸多特点使其十分适用于平抑变化频繁且剧烈的功率波动，例如可再生能源的输出功率。如今较有前景的新型电池储能技术有锂电池、钠硫电池和液流电池。为比较研究以这些电池为储能介质的电池储能电站的性能，文中建立了新型电池储能电站的综合兼容性模型，并对不同电池的特性加以区别描述，体现了差别。在一次投资费用相近的基础上，通过算例比较了不同的电池储能技术对可再生能源出力波动平抑效果的区别，得到了相应的结论，并证明了模型的可行性。

**关键词：**电池储能电站；锂电池；钠硫电池；液流电池；可再生能源；动态规划

## 0 引言

由于受气候条件不确定性的影响，可再生能源电源对电网的稳定运行带来极大挑战，通过储能技术对其出力波动的平抑，可保证可再生能源电源输出功率的稳定，从而消除对电网的隐患[1]。相比其他储能技术[2-3]，由新型电池技术组成的电池储能电站(battery energy storage system，BESS)不仅具有能量高、安装地点灵活的特点，还具有功率高、充放电速度快、可深度充放电的优势。随着对清洁可再生能源需求的不断增加，电网中可再生能源电源的比例也不断增高[4-5]，推动了新型电池储能技术的快速发展。代表性的有锂电池、钠硫电池和液流电池。

锂电池具有极高的能量密度和充放电倍数，并可持续工作在较高的充放电倍数下[6]。锂电池本体虽然具有很高的充放电效率，但储能电站还需要功率转换系统(PCS)、电池管理系统(BMS)、空调等辅助设备，因此锂电池 BESS 的综合效率约为 85%。锂电池种类繁多，其中铁锂电池(LFP)[7]已开始作为储能电站的储能介质应用于电力系统中。由于工艺、价格等原因，现有锂电池电站的额定容量较小，暂不适用于调峰等对储能容量要求高的应用，主要与可再生能源配合或为电厂提供旋转备用、应急电源和频率电压支撑等对储能功率要求较高的辅助服务[6]。

钠硫电池是高温电池(工作温度在 320 ℃以上)，在高放电倍数放电情况下电池内部温度会迅速升高，从而导致电池本身受损，所以必须对其放电持续时间加以限制，在不同的放电倍数下都有相对应的最大放电持续时间[8]。目前，在钠硫电池的实际应用中还未涉及高倍率充电这一功能。另外，电池运行需要额外的加热器，这使得钠硫电池 BESS 的整体工作效率较锂电池 BESS 低，约为 70%。钠硫电池在电力系统中的应用和研究均已相对成熟，可为电力系统提供削峰填谷、平抑功率波动等各种能量和功率上的服务[9-10]。

以钒流电池和硫溴化合物电池为代表的液流电池具有较高的循环寿命[11-12]，但由于电池本体需要泵来保持内部溶液的流动，因此液流电池 BESS 的综合效率也较低，约为 70%。另外，由于受内部氧化反应速度、离子扩散和交换速度以及溶液流动速度的影响，液流电池也具有类似钠硫电池的高倍率放电限制[13-14]。钒流电池放电持续时间不仅与放电倍数有关，还与其荷电状态(state of charge，SOC)有关[14]。与钠硫电池相比，钒流电池的放电倍数较低，相对应的放电持续时间也较短。液流电池 BESS 在电力系统中主要用于平抑可再生能源出口功率[15]。

综上可见，不同介质的新型 BESS 在拥有共性的同时也有不少特性和参数的差别。结合电池性能以及成本，建立一个新型 BESS 的综合评价模型体系，对实际 BESS 中储能介质的选用和进一步分析研究均十分必要。考虑到目前电池储能技术成本偏高，在短期内还无法替代传统抽水蓄能电站削峰填谷的功能，所以本文选择对储存介质能量要求不高、而对功率要求较高的场景，建立了面向平抑可再生能源出口侧功率波动的新型 BESS 综合模型。

收稿日期：2010-11-14；修回日期：2011-03-19。
国家自然科学基金重点项目(50837001)；国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2007AA05Z240)；国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2009CB219702)。

## 1 新型BESS综合建模

本文选择磷酸铁锂电池、钠硫电池和钒流电池这3种不同储能介质的BESS进行横向比较,并参考实际商业化产品得到各种电池性能参数。BESS平抑目标为使可再生能源电源与储能电站总出力符合可再生能源电源的发电计划。假设每个BESS接受同样的调度指令,BESS模型的目标函数和各项约束条件分述如下。

### 1.1 平抑目标

平抑目标数学模型表示如下:

$$\max \frac{1}{N_{\mathrm{BESS}} C_{\mathrm{BESS}}}\left(\Delta t \sum_{t=0}^{T-1}\left|P_{\mathrm{RES}}(t)-P_{\mathrm{target}}(t)\right|-\Delta t \sum_{t=0}^{T-1}\left|P_{\mathrm{total}}(t)-P_{\mathrm{target}}(t)\right|\right) \tag{1}$$

约束条件为:

$$P_{\mathrm{total}}(t)=P_{\mathrm{BESS}}(t)+P_{\mathrm{RES}}(t) \tag{2}$$

$$P_{\mathrm{target}}(t)=\begin{cases}\dfrac{1}{m}\sum\limits_{n=t-m}^{t} P_{\mathrm{RES}}(n) & n>m \\ \dfrac{1}{t}\sum\limits_{n=1}^{t} P_{\mathrm{RES}}(n) & n \leqslant m\end{cases} \tag{3}$$

式中:$\Delta t$为单位时间长度,即模型的最小时间精度;$T$为模型的总研究时段,规定为$\Delta t$的倍数;$P_{\mathrm{RES}}(t)$为$t$时刻可再生能源电源的实际有功出力;$P_{\mathrm{target}}(t)$为$t$时刻可再生能源的发电计划,即储能电站的平抑目标;$P_{\mathrm{total}}(t)$为$t$时刻BESS和可再生能源有功出力的总和;$N_{\mathrm{BESS}}$为可再生能源电站出口侧BESS的安装数量;$C_{\mathrm{BESS}}$为单位BESS的投资成本;$P_{\mathrm{BESS}}(t)$为$t$时刻BESS的充放电总功率;$m$和$n$取正整数。

式(1)描述了BESS单位成本的平抑效果,而平抑效果则是以总研究时段内单位成本BESS使用前后的发电计划外不平衡电量下降的大小来判断的,下降得越多则平抑效果越好,见式(1)的分子部分。这里以前$m$个时段可再生能源电源原始输出功率的平均值作为BESS的平抑目标,见式(3)。单位BESS的成本详见1.2节。

### 1.2 储能电站的成本

考虑到研究时间长度较短,以及运行维护费用占一次投资费用比例较小,并忽略通货膨胀、技术进步、设备折旧等因素带来的成本变动,本文仅以一次投资费用作为BESS的成本。储能电站的一次投资费用包括能量成本、功率成本和辅助设备的成本,分别对应式(4)中的3个部分,其中能量成本与BESS额定容量成正比,功率成本和辅助设备成本则与BESS最大输出功率成正比。

$$C_{\mathrm{BESS}}=E_{\mathrm{BESS}} C_{\mathrm{E}}+\max\{N_{\mathrm{d}}(S(t-1),D)\} P_{\mathrm{d,rated}} C_{\mathrm{p}}+\max\{N_{\mathrm{d}}(S(t-1),D)\} P_{\mathrm{d,rated}} C_{\mathrm{BOP}} \tag{4}$$

式中:$E_{\mathrm{BESS}}$为单位BESS容量;$C_{\mathrm{E}}$为BESS的容量单价;$N_{\mathrm{d}}(S(t-1),D)$为$t$时刻BESS的放电倍数,它是$S(t-1)$和$D$的函数,$S(t-1)$为$t-1$时刻单位BESS的SOC,$D$为放电倍数所对应的最大放电时间长度;$P_{\mathrm{d,rated}}$为单位BESS的额定放电功率;$C_{\mathrm{p}}$为BESS功率单价;$C_{\mathrm{BOP}}$为BESS辅助设备的单价。

### 1.3 储能电站充放电功率约束

$t$时刻储能电站的充放电总功率为:

$$P_{\mathrm{BESS}}(t)=N_{\mathrm{BESS}}(\mu_{\mathrm{d}} P_{\mathrm{d}}(t)+\mu_{\mathrm{c}} P_{\mathrm{c}}(t)) \tag{5}$$

$$P_{\mathrm{d}}(t)=\min\left\{\eta_{\mathrm{d}} N_{\mathrm{d}}(S(t-1),D) P_{\mathrm{d,rated}},\left[(1-\sigma\Delta t) S(t-1)-S_{\min}\right]\frac{E_{\mathrm{BESS}}}{\Delta t}\right\} \tag{6}$$

$$P_{\mathrm{c}}(t)=\min\left\{\eta_{\mathrm{c}} N_{\mathrm{c}}(t) P_{\mathrm{c,rated}},\left[S_{\max}-(1-\sigma\Delta t) S(t-1)\right]\frac{E_{\mathrm{BESS}}}{\Delta t}\right\} \tag{7}$$

式中:$\mu_{\mathrm{d}}$和$\mu_{\mathrm{c}}$分别为单位BESS的放电、充电标志,均为一非负整数,仅当取1时表示充电或放电;$P_{\mathrm{d}}(t)$和$P_{\mathrm{c}}(t)$分别为$t$时刻单位BESS的放电功率、充电功率;min{}为取较小值函数;$\eta_{\mathrm{d}}$和$\eta_{\mathrm{c}}$分别为BESS的放电和充电的效率;$N_{\mathrm{c}}(t)$为$t$时刻BESS充电倍数;$\sigma$为BESS的自放电率;$S_{\max}$和$S_{\min}$分别为单个BESS荷电状态的最大允许值和最小允许值。

由式(6)和式(7)可见,每时刻BESS的充放电功率值同时受充放电倍数和上一时刻荷电状态的限制。

当$\mu_{\mathrm{c}}$和$\mu_{\mathrm{d}}$均为0时表示BESS运行在浮充状态,即仅充入与自放电相当的电量以保持剩余电量不变,见下式:

$$P_{\mathrm{c}}(t)=\sigma S(t-1) E_{\mathrm{BESS}} \tag{8}$$

每时刻BESS只有充电、放电及浮充这3种状态中的1种可供选择,充电和放电过程不能同时进行,即$\mu_{\mathrm{c}}$和$\mu_{\mathrm{d}}$不能同时为1,其约束条件见下式:

$$0 \leqslant \mu_{\mathrm{d}}+\mu_{\mathrm{c}} \leqslant 1 \tag{9}$$

对于不同电池介质,BESS的充电倍数$N_{\mathrm{c}}(t)$和放电倍数$N_{\mathrm{d}}(S(t-1),D)$具有不同的要求。

#### 1.3.1 铁锂电池BESS

$$N_{\mathrm{d}}(S(t-1),D) \leqslant 10.7 \tag{10}$$

$$N_{\mathrm{c}}(t) \leqslant 3.33 \tag{11}$$

由式(10)和式(11)可见,以磷酸铁锂电池作为储能介质的BESS具有很高的充放电倍数,特别是放电功率,最快可在几秒内放完全部容量[7],且充放

电均不受额外限制，若容量允许，充放电倍数可保持不变，即为式中的常数。

### 1.3.2　钠硫电池 BESS

本文参考并改进文献[16]中的等效方法，考虑到不同电池模型的统一，以 Farazdaghi-Harris 模型[17]拟合出更精确的钠硫电池 BESS 放电倍数与相应最大放电持续时间的关系，见式(12)。

$$N_{\mathrm{d}}(S(t-1),D)=\frac{1}{a+bD^{c}} \tag{12}$$

$$N_{\mathrm{c}}(t)\leqslant 1.0 \tag{13}$$

$$30\ \mathrm{s}\leqslant \Delta t\leqslant D \tag{14}$$

$$\begin{cases} a=1.955\times 10^{-1} \\ b=2.651\times 10^{-4} \\ c=7.994\times 10^{-1} \end{cases} \tag{15}$$

由式(12)～式(15)可知，以钠硫电池作为储能介质的 BESS 仍具有较高的放电倍数(将式(14)中的 30 s 代入式(12)可得放电倍数高达 5 倍)。由于钠硫电池单体充电过程与放电过程相反，是一个持续降温的过程[18]，所以理论上应具有高倍率充电功能，但在各实际应用场合中并没有使用这一特性，因此本文与实际保持一致。

### 1.3.3　钒流电池 BESS

$$N_{\mathrm{d}}(S(t-1),D)=\frac{1}{a+bD^{c}}-2.01[90\%-S(t-1)] \tag{16}$$

$$N_{\mathrm{c}}(t)\leqslant 1.6 \tag{17}$$

$$0.01\ \mathrm{s}\leqslant \Delta t\leqslant D \tag{18}$$

$$\begin{cases} a=2.038\times 10^{-1} \\ b=1.849\times 10^{-2} \\ c=4.645\times 10^{-1} \end{cases} \tag{19}$$

同样通过拟合得到函数 $N_{\mathrm{d}}(S(t-1),D)$，由式(16)可以看出，放电倍数不仅与放电持续时间有关，还与荷电状态有关。这里需要注意的是，虽然钒流电池的最大充电倍数为 1.6 倍(见式(17))，但由于实际钒流电池 BESS 的额定放电功率为其额定充电功率的 1.2～2.0 倍不等，因此，综合来看液流电池 BESS 并没有高倍率放电能力。

### 1.4　储能电站电量(荷电状态)约束

$$S(t)=(1-\sigma\Delta t)S(t-1)+\frac{P_{\mathrm{BESS}}\Delta t}{E_{\mathrm{BESS}}}-S_{\mathrm{loss}}(t) \tag{20}$$

$$S_{\min}\leqslant S(t)\leqslant S_{\max} \tag{21}$$

$$S(0)\leqslant S_{\mathrm{avg}}\leqslant S_{\max} \tag{22}$$

$$S_{\mathrm{avg}}=\frac{1}{t}\sum_{n=0}^{T/\Delta t-1}S(n) \tag{23}$$

$$\begin{cases} S_{\mathrm{loss}}(t)=\mu_{\mathrm{d}}P_{\mathrm{d}}(t)\Delta t\,\dfrac{1}{D}\Big[\dfrac{E_{\mathrm{BESS}}}{P_{\mathrm{d,rated}}}- \\ \qquad DN_{\mathrm{d,max}}(S(t-1),D)\Big] \\ \qquad\qquad N_{\mathrm{d,max}}(S(t-1),D)>1.0 \\ S_{\mathrm{loss}}(t)=0 \qquad N_{\mathrm{d,max}}(S(t-1),D)\leqslant 1.0 \end{cases} \tag{24}$$

式中：$S_{\mathrm{avg}}$为 BESS 荷电状态的平均值；$S(0)$为初始时刻单位 BESS 的荷电状态；$T$ 为研究时段；$S_{\mathrm{loss}}(t)$为 $t$ 时刻单位 BESS 因高功率放电荷电状态的损失，当且仅当 $N_{\mathrm{d}}(S(t-1),D)$不为常数，即 BESS 储能介质为钠硫电池和液流电池时，$S_{\mathrm{loss}}(t)$非零。

式(20)表示 BESS 荷电状态前后时段的递推关系，同时考虑了 BESS 的出力和自放电的情况。式(21)～式(23)表示单位 BESS 荷电状态的限制，除了对 BESS 荷电状态的上下限的约束外，为了保证 BESS 能持续运行，还对 BESS 平均荷电状态进行了约束。式(22)表示 $S_{\mathrm{avg}}$ 须不小于运行的初始值，才可以在一定程度上保证不论选取多长的研究时段 $T$，在研究时段结束后 BESS 不会因为剩余电量太高而无法充电或剩余电量太低而无法放电，进而影响其动态功能的实现。为了便于建模和数学上的表达，这里仍引用文献[16]中对钠硫电池 BESS 建模时的等价方法，引入 $S_{\mathrm{loss}}(t)$以达到限制钠硫电池和钒流电池持续高倍率放电的目的，见式(24)。这种方法适合于各种具有连续充放电限制的 BESS 建模。

为便于比较，并从实际应用出发，规定 $S(0)$，$S_{\max}$和 $S_{\min}$的取值如下：

$$\begin{cases} S(0)=60\% \\ S_{\max}=90\% \\ S_{\min}=10\% \end{cases} \tag{25}$$

## 2　算例分析

为便于分析，本文算例在假定 3 种新型电池技术额定充电功率相同、单位 BESS 成本基本相同的条件下进行比较。设 $\Delta t=1$ min，$T=300$ min，$m=30$，计算后制订 BESS 规格，详见附录 A 表 A1。

为方便讨论各类电池平抑功率波动的效果，本文给定可再生能源原始出力及储能电站平抑目标如图 1 所示。

对图 1 数据统计可知，此时平抑目标外的功率波动幅值为−7.03 MW/+8.27 MW，300 min 内不平衡电量(即目标函数分子中的前一项)合计为 711.86 MW·h。

本文应用改进的动态规划法[19]，设 $N_{\mathrm{BESS}}=5$，求解模型得 3 种 BESS 的平抑效果及对应荷电状态情况如图 2 所示。

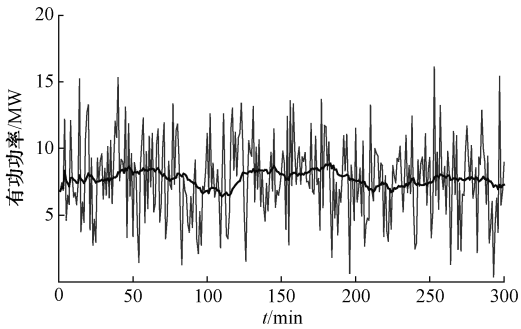


**图1　可再生能源原始出力及平抑目标**

**Fig. 1　Original output of RES and scheduled power**

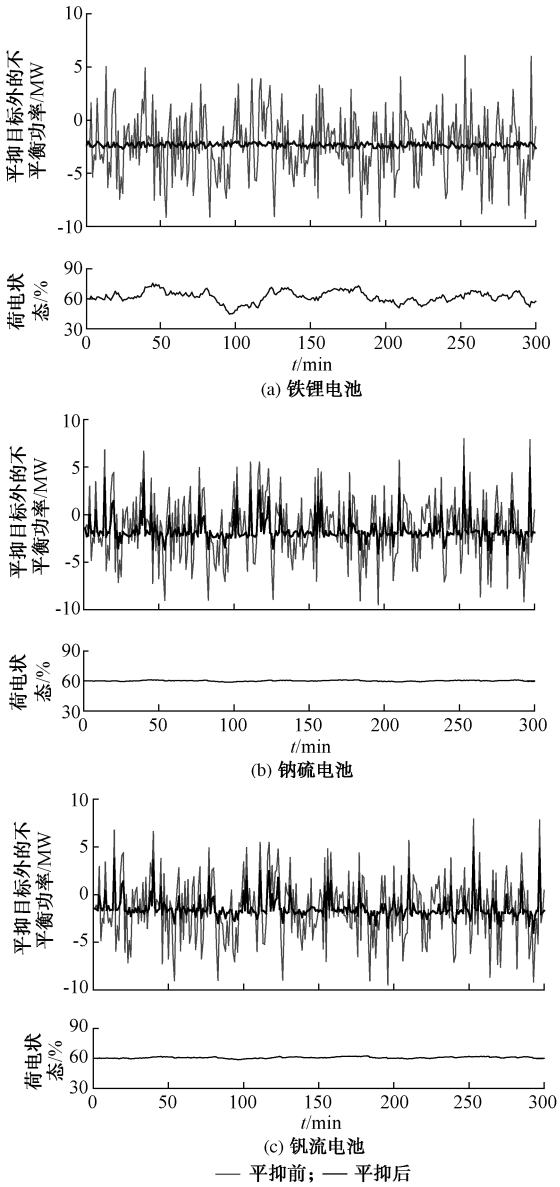


**图2　3种电池BESS平抑目标外的功率波动和电池剩余电量($N_{BESS}=5, m=30$)**

**Fig. 2　Power fluctuation out of scheduled value and SOC of LFP BESS, NaS BESS and VRB BESS ($N_{BESS}=5, m=30$)**

为便于比较，将BESS各重要平抑指标汇总在表1中。

**表1　各储能介质BESS平抑效果比较**

**Tab. 1　Performance indices of LFP, NaS and VRB BESS**

| BESS储能介质 | 平抑后剩余不平衡电量/(MW·h) | 不平衡电量下降百分比/% | 剩余最大正功率波动幅值/MW |
|---|---|---|---|
| 铁锂电池 | 4.77 | 91.96 | 0.32 |
| 钠硫电池 | 20.60 | 65.27 | 5.66 |
| 钒流电池 | 15.49 | 73.88 | 5.64 |

| BESS储能介质 | 剩余最大负功率波动幅值/MW | 剩余正功率波动平均值/MW | 剩余负功率波动平均值/MW |
|---|---|---|---|
| 铁锂电池 | −0.34 | 0.16 | −0.15 |
| 钠硫电池 | −2.42 | 1.71 | −0.62 |
| 钒流电池 | −2.24 | 1.13 | −0.42 |

从表1中数值上看，铁锂电池BESS平抑效果明显好于相同数量、成本近似的钠硫电池和钒流电池BESS。这是因为在额定功率相等的情况下，虽然铁锂电池BESS的额定容量较小，但其充电、放电倍数相比钠硫电池和钒流电池却更高，使得铁锂电池更适用于平抑波动十分频繁的可再生能源。

相比铁锂电池，钠硫电池和钒流电池仅具有高功率放电功能，且其放电倍数受到持续时间和荷电状态等因素的限制，使得其储能电站不能同等吸收正、负不平衡功率，对平抑目标外取值为负的不平衡功率的平抑效果要好于取值为正的不平衡功率，平抑后残留的正不平衡功率的平均值和最大幅值均大于残留的负不平衡功率。

钠硫电池BESS的平抑效果要略微差于钒流电池BESS，这是因为，虽然钠硫电池具有稍高的额定功率和更高的放电倍数，但在高倍率放电时的惩罚容量也很高。为保证荷电状态的约束，实际运行时并未频繁地选用高倍率放电模式。

继续将$N_{BESS}$增加到10，其他条件仍保持不变，由于BESS数量翻倍，2种BESS的平抑效果已较为满意，但仍略差于铁锂电池BESS。详见附录A图A1和图A2。

最后，$N_{BESS}$以0～20循环计算综合模型，得到单位成本的平抑效果与投资成本的关系如图3所示。

可以看到，在单位BESS的成本近似、BESS额定功率相等的情况下，铁锂电池BESS具有更高的性价比，对可再生能源出力的平抑效果要优于钠硫电池BESS和钒流电池BESS。在所设计的算例中，当可再生能源电站侧配置3个铁锂电池BESS，单位成本的平抑效果达到最佳值0.43 kW/美元，而钠硫电池和钒流电池的最佳值0.35 kW/美元和0.38 kW/美元在其电站数分别达到10个和11个

时出现，数值上仍低于铁锂电池。因此，可以认为在所给定的功率型应用和约束条件下，铁锂电池性价比最高，钒流电池其次，钠硫电池最低。

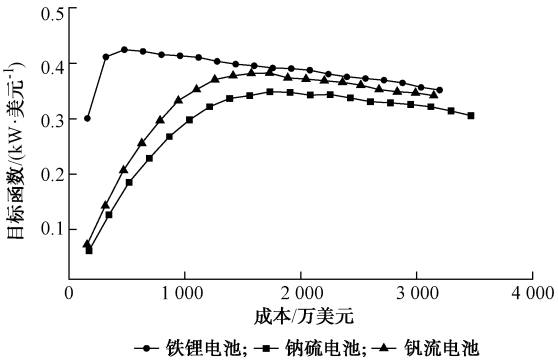


**图 3　单位价格平抑效果-成本关系图**

**Fig. 3　Relationship between unit price levelization in effect and cost**

## 3　结语

本文建立了目前比较引人关注的 3 种新型 BESS 模型，在平抑可再生能源输出功率波动的功能定位下，讨论了其应用效果和技术、经济指标，并得出了相应结论。在新型 BESS 的主流储能介质中，由于其高充放电功率的特点，铁锂电池 BESS 在处理如间歇性可再生能源出力等功率波动剧烈的应用场合具有较好的平抑效果；相比之下，钠硫电池则更适用于削峰填谷兼顾功率突变的应用场合；介于两者之间的是钒流电池。

附录见本刊网络版(http://aeps.sgepri.sgcc.com.cn/aeps/ch/index.aspx)。

## 参 考 文 献

[1] 廖怀庆，刘东，黄玉辉，等. 基于大规模储能系统的智能电网兼容性研究[J]. 电力系统自动化，2010，34(2)：15-19.
LIAO Huaiqing, LIU Dong, HUANG Yuhui, et al. A study on compatibility of smart grid based on large-scale energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 15-19.

[2] 罗正远，丁明. 概率模拟中蓄能电站经济运行的判据[J]. 中国电机工程学报，1993，13(2)：43-48.
LUO Zhengyuan, DING Ming. Economic operation criteria of storage plant in probabilistic simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13(2): 43-48.

[3] 丁明，刘友翔. 蓄能电站静动态综合效益评估[J]. 电力系统自动化，1994，18(9)：30-35.
DING Ming, LIU Youxiang. The comprehensive evaluation of the static and dynamic benefits of storage plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 1994, 18(9): 30-35.

[4] 陈伟，石晶，任丽，等. 微网中的多元复合储能技术[J]. 电力系统自动化，2010，34(1)：112-115.
CHEN Wei, SHI Jing, REN Li, et al. Composite usage of multi-type energy storage technologies in microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 112-115.

[5] 毕大强，葛宝明，王文亮，等. 基于钒电池储能系统的风电场并网功率控制[J]. 电力系统自动化，2010，34(13)：72-78.
BI Daqiang, GE Baoming, WANG Wenliang, et al. VRB energy storage system based power control of grid-connected wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(13): 72-78.

[6] HORIBA T, MAESHIMA T, MATSUMURA T, et al. Applications of high power density lithium ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2005, 146(1/2): 107-110.

[7] PADHI A K, NANJUNDASWAMY K S, GOODENOUGH J B. Phospho-olivines as positive-electrode materials for rechargeable lithium batteries [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1997, 144: 1188-1194.

[8] SPAHIÉ E, SHAKIB A D, BALZER G. Stability of the power systems in case of large wind penetration and battery application [C]// Proceedings of the 16th PSCC, July 14-16, 2008, Glasgow, Scotland: 56.

[9] TAMYUREK B, NICHOLS D K, DEMIRCI O. The NAS battery: a multi-function storage system energy [C]// Proceedings of 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting, July 13-17, 2003, Toronto, Canada: 1991-1996.

[10] MEARS D, GOTTSHALL H. Handbook of energy storage for transmission or distribution applications[R]. Palo Alto, CA, USA: Electric Power Research Institute, 2002.

[11] KAZACOS M S, ROBINS R G. All-vanadium redox battery: U. S., 4786567[P]. 1986.

[12] KAZACOS M S, KASHERMAN D, HONG R. Characteristics and performance of 1 kW vanadium redox battery[J]. Journal of Power Sources, 1991, 35: 399-404.

[13] RYCHCIK M, KAZACOS M S. Characteristics of new all-vanadium redox flow battery[J]. Journal of Power Sources, 1988, 22: 59-67.

[14] KAIZUKA T, SASAKI T. Evaluation of control maintaining electric power quality by use of rechargeable battery system [C]// Proceedings of 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, January 28-February 1, 2001, Columbus, USA: 88-93.

[15] BROWN R R. Vanadium redox flow batteries for large scale storage of electricity[EB/OL]. [2010-01-24]. http://www.energystoragenews.com/.

[16] KAZEMPOUR S J, MOGHADDAM M P, HAGHIFAM M R, et al. Electric energy storage systems in a market-based economy[J]. Renewable Energy, 2009, 34: 2630-2639.

[17] FARAZDAGHI H, HARRIS P M. Plant competition and crop yield[J]. Nature, 1997, 217(12): 289-290.

[18] Battery & Functional Materials Group. Research on the operation of Na-S battery energy storage system [R]. Yokohama, Japan: Electrotechnology Applications Research & Development Center, 1997.

[19] 丁明，徐宁舟. 用于平抑可再生能源功率波动的储能电站建模[J]. 电力系统自动化，2011，35(2)：66-72.
DING Ming, XU Ningzhou. Modeling of BESS for leveling

renewable energy output fluctuation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(2): 66-72.

丁 明(1956—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统规划及可靠性、新能源及其利用、柔性输电系统。E-mail: mingding56@126.com

徐宁舟(1985—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:电力系统规划及可靠性、新能源并网、储能系统。E-mail: robertr900@gmail.com

毕 锐(1979—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统通信、分布式发电技术。E-mail: biruizz@126.com

## Modeling and Comparative Study on Multiple Battery Energy Storage Systems

*DING Ming, XU Ningzhou, BI Rui, CHEN Zinian, LUO Yaqiao, SONG Zhuo*

(1. Anhui New Energy Utilization and Energy Saving Laboratory, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Electrical Power Research Institute of Anhui Power Company, Hefei 230022, China)

**Abstract:** Novel battery storage technologies are very qualified for levelizing the output of the renewable energy sources so as to give grids more safe energy. For describing their common characters and comparing their differences, a compatible model for novel battery energy storage system is presented to stabilize the intermittent power of renewable energy sources. The new battery technologies taken for examples are lithium iron phosphate battery (LFP), sodium sulfur battery (NaS) and vanadium redox battery (VRB). The battery energy storage system (BESS) cost are considered in the model as an important comparison basis. Numerical results show the validity of this model and give the optimal configuration of these on-site BESSs.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50837001), National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2007AA05Z240) and Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2009CB219702).

**Key words:** battery energy storage system (BESS); lithium battery; sodium sulfur battery; redox battery; renewable energy sources; dynamic programming

# 附录 A

## A1　三种 BESS 规格表

为便于分析，本文算例在假定铁锂、钠硫、钒流电池这三种新型电池技术额定充电功率相同、单位 BESS 成本基本相同的条件下进行比较。设 $\Delta t$=1min，$T$=300min，$m$=30，计算后制定 BESS 规格详细见下表：

**表 A1 各储能介质 BESS 规格**

**Tab.A1　Chosen parameters of LFP, VRB and NaS BESS**

| | BESS 储能介质 | 铁锂电池 | 钠硫电池 | 钒流电池 |
|---|---|---|---|---|
| 性能参数 | 额定放电功率（MW） | 0.72 | 0.72 | 0.72 |
| | 最大放电倍数 | 10.7 | 4.94 | 3.04 |
| | 额定充电功率（MW） | 0.6 | 0.6 | 0.45 |
| | 额定容量（MWh） | 0.5 | 4.8 | 3.4 |
| | 额定放电效率 | 92 | 83.67 | 83.67 |
| | 额定充电效率 | 92 | 83.67 | 83.67 |
| | 允许放电深度（100%DOD） | 10-90 | 10-90 | 10-90 |
| | 自放电率（100%/min） | 0 | 1 | 1.667 |
| 经济参数 | 能量单价（$/MWh） | 500000 | 250000 | 350000 |
| | 功率单价（$/MW) | 175000 | 150000 | 175000 |
| | 电站配套单价（$/MW） | 0 | 0 | 30 |
| | 单位 BESS 成本($) | 1598200 | 1733520 | 1573106 |

由表 A1 可见，在单位 BESS 成本基本相同前提下，铁锂电池除单价较高和额定容量最小两点不足外，其各项性能参数都是最高的。而钠硫电池经济参数中各项单价虽然最低，但是单位 BESS 的总成本却偏高，这是因为钠硫电池储能电站同时具有较高的放电倍数和最大的额定容量。

## A2　$N_{BESS}$=10 时钠硫电池和钒流电池的平抑效果

令 $N_{\mathrm{BESS}}$=10 且其他条件仍保持与第 2 节算例分析相同，重新计算后，得到钠硫电池和钒流电池的平抑效果及对应荷电状态（SOC）情况，如下图 A1、图 A2 所示：

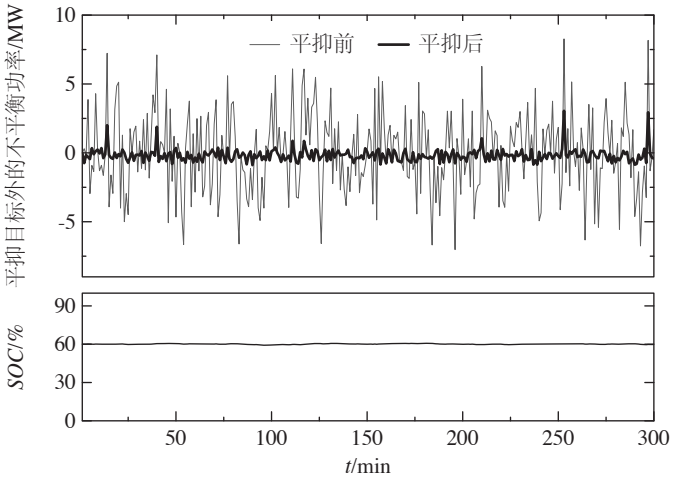


**图 A1　平抑目标外的功率波动和电池剩余电量（$N_{BESS}$=10，钠硫电池，$m$=30）**

**Fig. A1　Power fluctuation out of scheduled value and SOC of BESS ($N_{BESS}$=10, NaS, $m$=30)**

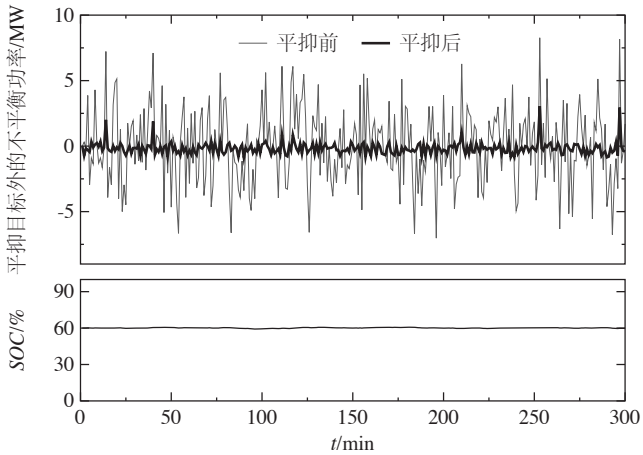


**图 A2　平抑目标外的功率波动和电池剩余电量（$N_{BESS}$=10，钒流电池，*m*=30）**

**Fig. A2　Power fluctuation out of scheduled value and SOC of BESS ($N_{BESS}$=10, VRB, *m*=30)**

此时，两种电池储能电站的平抑效果已较为满意，波动电量分别降为 9.2MWh 和 8.88MWh，平抑效果仍略差于铁锂电池储能电站。由于 BESS 数量的翻倍，正、负不平衡电量也均能被很好的平抑，残留不平衡功率的平均值分别为 0.29MW 和-0.40MW、0.30MW 和-0.38MW。