

# 规模化储能参与下的电网二次调频优化控制策略

张圣祺,袁 蓓,徐青山,赵剑锋  
(东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210009)

**摘要:**近年来,大规模电池储能参与电网二次调频控制是其继调峰之后最具潜力的应用方向之一,但是传统的二次调频控制策略无法区分不同电池储能技术特征的差异,进而难以充分发挥其调频优势,造成资源浪费。为此,提出一种计及电池储能技术特征的电网二次调频控制策略。受传统机组的调频成本模型启发建立电池储能调频成本函数,定量描述具有不同技术特征的储能在承担调频责任时所对应的调频成本。以调频成本最小化为目标,配置储能调频责任以满足电网二次调频需要。利用 MATLAB/Simulink 搭建含多个电池储能的区域电网动态模型,验证所提二次调频策略的可行性,并与其他 2 种调频策略进行对比分析。仿真结果表明,所提控制策略能够充分考虑不同电池储能的技术特征,从而精确地调度储能以满足电网调频需要,并实现荷电状态的均衡控制。

**关键词:**二次调频;规模化电池储能;二次规划;调频动态模型;优化控制

**中图分类号:**TM 732

**文献标识码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2019.05.012

## 0 引言

随着新能源发电渗透率的不断提高,电网面临由系统惯性下降、净负荷波动增加、传统机组调频容量不足等因素所带来的调频压力<sup>[1]</sup>。与此同时,因为火电机组的调频时滞时间长,水电机组的调频容量受地域和季节制约大,所以传统机组在二次调频即自动发电控制(AGC)中表现乏力<sup>[2]</sup>。电池储能具有爬坡速度快、精度高、不受地域和季节限制的特点<sup>[3]</sup>,可以在调频应用方面表现出巨大的优势<sup>[4]</sup>。相关的数据表明,电池储能的二次调频能力相当于容量为  $1.7S_N$  ( $S_N$  为电池储能的容量)的水电机组、容量为  $25S_N$  的燃气机组、容量为  $20S_N$  的燃煤机组的二次调频能力<sup>[5]</sup>。统计显示<sup>[5-9]</sup>,全球具有调频功能的 MW 级电池储能工程已逾百项。其中,美国德克萨斯州的 32 MW/8 MW·h 铅酸电池为风电场提供调频、调峰和改善电能质量等多项服务;中国北京石景山的 2 MW/0.5 MW·h 锂离子电池储能配合火力发电参与 AGC,电厂调频综合评判指标得到显著提高;南澳大利亚霍恩斯代尔建设了全球最大的锂离子电池储能项目,以保障南澳电力高风电渗透率下的有功平衡。实践表明,规模化电池储能将成为弥补传统机组在调频容量和爬坡速率方面的不足以及满足未来电网调频需求的有效手段<sup>[6-7]</sup>,可进一步减小传统机组频繁往复爬坡带来的机械磨损<sup>[5]</sup>。

同时,为了鼓励储能参与电网二次调频,美国、

日本等国的电力市场主要采取了储能容量补偿、调频里程补偿等措施<sup>[10]</sup>。我国尚未全面落实电力市场,华北电网作为全国试点制定了储能调频补偿细则<sup>[11]</sup>。文献[12-13]对电池储能参与含调频在内的多种服务的联合运行进行了研究,分别采用动态规划、超线性算法等优化算法进行求解,为避免电池储能在发展中对补贴政策产生依赖提供了重要的解决思路。毋庸置疑,开展电池储能控制策略研究、优化资源分配是电池储能可持续发展并获利的前提和保证。

文献[14]针对电池储能参与二次调频控制方法的研究,指出了 2 种主要思路:①按调频电源的功率备用分配调频责任;②按调频信号的频域特征分配调频责任。基于思路①,文献[14]根据事先约定的比例在电池储能、传统机组间静态地分配调频责任;文献[15]在二次调频中优先利用飞轮储能,仅当其接近容量边界时由传统机组弥补其不足。在以上文献中,储能扮演了与传统机组类似的角色,其爬坡速率、实时荷电(容量)状态等技术特征被忽略。

思路②提出由储能承担幅值较小、变化频率较快的调频分量,基于该思路,文献[16-17]利用傅里叶变换对系统调频分量中高频分量的占比进行了分析,并由储能和传统机组分别承担调频信号中的高频和低频分量;文献[18]针对储能参与调频的调节速度、调节精度和响应时间这 3 项指标,细化调频信号的特征,并通过判断 AGC 指令和机组出力的关系,划分储能的动作区间和出力大小。然而上述控制策略主要依据储能的爬坡速率、响应速度等技术特征,无法区分储能额定功率、容量对调频责任分配的影响,不利于储能实时荷电状态的均衡控制<sup>[19]</sup>。

为了在思路②的基础上解决储能荷电状态均衡控制的问题,文献[20]利用模糊控制策略将区域控

收稿日期:2018-03-14;修回日期:2019-02-06

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2242016R20004);江苏省重点研发计划项目(BE2015157)  
Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2242016R20004) and the Key Research and Development Program of Jiangsu Province(BE2015157)

制偏差 (ACE) 及其变化率作为输入量,当变化率为 0 时,停止储能出力;文献[21]利用状态机将荷电状态离散地分成 5 个等级,通过储能实时荷电状态与等级之间的对应关系,离散地实现了荷电状态的均衡控制。但是,实时荷电状态是连续变化的,所以上述方法存在明显的缺陷。

总体而言,现有的电池储能参与下的二次调频控制策略都没有全面、综合地考虑不同储能的技术特征。为此,本文提出了一种计及电池储能技术特征(功率、容量、爬坡速率、充放电效率和实时荷电状态)的电网二次调频控制策略。该策略通过建立储能调频成本函数模型,结合二次规划算法分配传统机组和具有不同技术特征的电池储能之间的调频责任,从而实现对调频信号的精确跟踪。该控制策略具有以下优势:通过设置储能调频成本函数的系数,可精确地评估具有不同技术特征的储能的实时调频能力;在调频责任分配中发挥储能响应速度快和传统机组不受容量限制的双重优势;实现不同电池储能荷电状态的均衡控制;引入充电效率和放电效率,使控制策略更符合储能的实际运行工况。

## 1 计及电池储能技术特征的二次调频控制策略

本文所述含规模化电池储能的区域电网动态模型如图 1 所示,其包含  $I$  台传统机组和  $J$  个电池储能,共  $N(N=I+J)$  个调频电源。图 1 中,  $\Delta f$  为系统频率偏差;  $P'_i (i=1, 2, \dots, I)$  为第  $i$  台传统机组的一次调频出力;  $P_i$  为第  $i$  台传统机组的二次调频出力;  $P_j (j=1, 2, \dots, J)$  为第  $j$  个电池储能二次调频出力;  $P^{\text{AGC}}$  为二次调频信号,即区域内所有调频电源需提供的二次调频出力总和;  $P_{\text{Ld}}$  为系统净负荷波动;  $\Delta P_{\text{tie}}$  为互联电网联络线交换功率;  $R$  为一次调频的调差系数;  $B$  为二次调频频率偏差系数;  $K_i$  为积分系数;  $M$  为区域电网的惯性时间常数;  $D$  为负荷阻尼系数。计及电池储能技术特征的二次调频控制策略的关键是根据不同的储能技术特征及其变化,对调频信号  $P^{\text{AGC}}$  进行优化分配。

该控制策略可具体描述为:以调频电源的调频成本最小化为目标,在调频电源技术特征的允许范

围内,寻找其调频责任分配的最优解。控制策略流程见图 2,图中调频电源的技术特征信息包括调频电源的功率偏移范围  $[P^{\min}, P^{\max}]$ 、调频电源的爬坡速率范围  $[R^{\min}, R^{\max}]$ 、电池储能的充电效率  $\eta^c$ 、放电效率  $\eta^d$ 、电池储能的基准荷电状态  $S_{\text{soc}}^0$  及荷电状态允许波动范围  $[S_{\text{soc}}^{\min}, S_{\text{soc}}^{\max}]$ 、电池储能的额定容量  $S$ 。

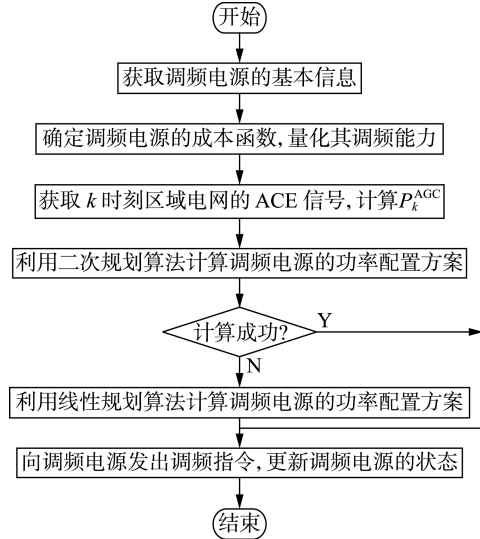


图 2 计及电池储能技术特征的二次调频控制策略

Fig.2 Secondary frequency regulation control strategy considering technical characteristics of battery energy storage

### 1.1 规模化储能调频成本函数

根据传统机组的运行成本及其输出功率的经验曲线,得到传统机组的二次调频成本函数<sup>[22]</sup>,如式(1)所示。受其启发,定义电池储能的调频成本函数如式(2)所示,该函数是以储能的充放电功率与实时荷电状态为变量的二元二次函数。当储能承担幅值较大的调频信号分量或处于深充深放状态时,该函数使其单位功率调频成本增加,从而可减少对其的使用次数。

$$D_{i,k}^1 = a_i P_{i,k}^2 \quad (1)$$

$$D_{j,k}^1 = a_j [(P_{j,k}^c)^2 + (P_{j,k}^d)^2] + b_j S_j^2 (S_{\text{socj},k} - S_{\text{socj}}^0)^2 \quad (2)$$

其中,  $D_{i,k}^1$  和  $D_{j,k}^1$  分别为第  $i$  台传统机组和第  $j$  个电池储能在  $k$  时刻的调频成本(调频成本的一种指标,无

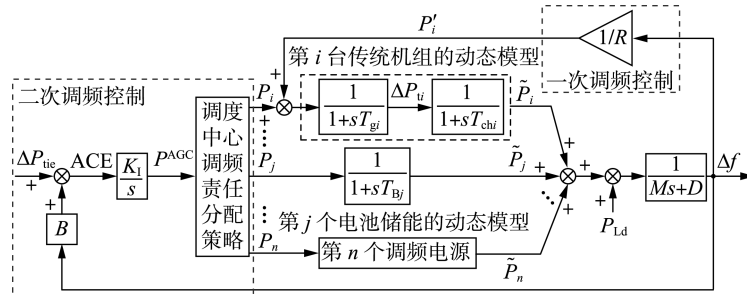


图 1 含多个电池储能的区域电网调频动态模型

Fig.1 Dynamic frequency regulation model of regional power grid with multiple battery energy storages

量纲);  $P_{i,k}$  为第  $i$  台传统机组在  $k$  时刻的功率偏移;  $P_{j,k}^c$ 、 $P_{j,k}^d$  分别为第  $j$  个电池储能在  $k$  时刻的充、放电功率,且有  $P_{j,k}^c P_{j,k}^d = 0$ ;  $S_{soej,k}$  为第  $j$  个电池储能在  $k$  时刻的荷电状态;  $S_{soej}^0$  为第  $j$  个电池储能的基准荷电状态;  $S_j$  为第  $j$  个电池储能的电池容量;  $a_i$  为第  $i$  台传统机组因功率偏移所带来调频成本的权重系数;  $a_j$  为第  $j$  个电池储能因功率偏移所带来调频成本的权重,  $b_j$  为第  $j$  个电池储能因荷电状态偏移所带来调频成本的权重,分别由电池储能的额定充放电功率、额定容量决定。为了配合传统机组,  $a_i$ 、 $a_j$  参照传统机组最大调频功率偏差、储能额定功率的比例设定。

式(2)中的  $S_{soej,k}$  可进一步表示为以  $P_{j,k}^c$  和  $P_{j,k}^d$  为变量的函数,如式(3)所示。进一步得到仅以  $P_{j,k}$  为单一变量的电池储能调频成本函数,如式(4)所示。

$$S_{soej,k} = S_{soej,k-1} - (\eta_j^c P_{j,k}^c + P_{j,k}^d / \eta_j^d) \Delta t / S_j \quad (3)$$

$$D_{j,k}^1 = \alpha_j P_{j,k}^2 + \beta_{j,k} P_{j,k} + \gamma_{j,k} \quad (4)$$

$$\alpha_j = \begin{cases} a_j + b_j (\Delta t \eta_j^c / S_j)^2 & P_{j,k} < 0 \\ a_j + b_j [\Delta t / (\eta_j^d S_j)]^2 & P_{j,k} > 0 \end{cases}$$

$$\beta_{j,k} = \begin{cases} -2b_j (S_{soej,k-1} - S_{soej}^0) \Delta t \eta_j^c / S_j & P_{j,k} < 0 \\ -2b_j (S_{soej,k-1} - S_{soej}^0) \Delta t / (\eta_j^d S_j) & P_{j,k} > 0 \end{cases}$$

$$P_{j,k} = \begin{cases} P_{j,k}^c & P_{j,k} < 0 \\ P_{j,k}^d & P_{j,k} > 0 \end{cases}$$

$$\gamma_{j,k} = b_j S_j^2 (S_{soej,k-1} - S_{soej}^0)^2$$

其中,  $\eta_j^c$  和  $\eta_j^d$  分别为第  $j$  个电池储能的充、放电效率;  $\Delta t$  为 2 次采样时刻的时间间隔;  $\alpha_j$  为第  $j$  个电池储能调频成本函数的二次项系数,为常数;  $\beta_{j,k}$  为第  $j$  个电池储能在  $k$  时刻调频成本函数的一次项系数;  $\gamma_{j,k}$  为第  $j$  个电池储能在  $k$  时刻调频成本函数的常数项系数。

## 1.2 二次调频控制目标函数

调频电源( $I$  台传统机组、 $J$  个电池储能)的调频成本函数之和见式(5),本文将其作为调频责任分配的目标函数。调频成本函数是充分考虑调频电源技术指标后对其实时调频能力的综合评估,某一时刻调频成本函数较低的调频电源将被优先调度。

$$D_k^1 = \sum_{i=1}^I D_{i,k}^1 + \sum_{j=1}^J D_{j,k}^1 \quad (5)$$

$$\begin{cases} D_{i,k}^1 = a_i P_{i,k}^2 \\ D_{j,k}^1 = \alpha_j P_{j,k}^2 + \beta_{j,k} P_{j,k} + \gamma_{j,k} \end{cases}$$

## 1.3 二次调频控制约束条件

在区域电网的二次调频过程中,约束条件主要来源于“系统调频需求”和“电源调频能力”这 2 个方面。“系统调频需求”约束是指:  $k$  时刻所有调频电源增发(减发)的功率总和应等于调频信号  $P_k^{\text{AGC}}$ ,

如式(6)所示。

$$\sum_{i=1}^I P_{i,k} + \sum_{j=1}^J P_{j,k} = P_k^{\text{AGC}} \quad (6)$$

“电源调频能力”约束主要包括额定功率、容量、爬坡速率等技术指标。第  $i$  台传统机组在  $k$  时刻所允许的功率偏离基准值的范围、爬坡速率范围如式(7)所示。第  $j$  个电池储能在  $k$  时刻的额定功率、爬坡速率及荷电状态可变范围约束如式(8)所示。

$$\begin{aligned} \max(P_i^{\min}, R_i^{\min} \Delta t + P_{i,k-1}) &\leq P_{i,k} \leq \\ \min(P_i^{\max}, R_i^{\max} \Delta t + P_{i,k-1}) &\end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \max\left[P_j^{\min}, R_j^{\min} \Delta t + P_{j,k-1}, \frac{(S_{soej,k-1} - S_{soej}^{\max}) S_j}{\Delta t}\right] &\leq \\ P_{j,k} &\leq \min\left[P_j^{\max}, R_j^{\max} \Delta t + P_{j,k-1}, \frac{(S_{soej,k-1} - S_{soej}^{\min}) S_j}{\Delta t}\right] \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $P_i^{\max}$  和  $P_i^{\min}$  分别为第  $i$  台传统机组出力的最大值和最小值;  $P_j^{\max}$  和  $P_j^{\min}$  分别为第  $j$  个电池储能功率的最大值和最小值;  $R_i^{\max}$  和  $R_i^{\min}$  分别为第  $i$  台传统机组爬坡速率的最大值和最小值;  $R_j^{\max}$  和  $R_j^{\min}$  分别为第  $j$  个电池储能爬坡速率的最大值和最小值;  $S_{soej}^{\max}$  和  $S_{soej}^{\min}$  分别为第  $j$  个电池储能荷电状态的最大值和最小值。

## 1.4 调频电源调频责任分配策略

由 1.2 和 1.3 节可知,二次调频责任分配的目标函数为多元二次函数,约束条件包含等式约束以及自变量约束,符合如式(9)所示的二次规划 QP (Quadratic Programming) 方法的标准形式,故本文采用该方法对目标函数进行求解。针对本文所描述的具体问题,式(9)中各参数的定义见附录。

$$\begin{cases} \min_x \left( \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{f}^T \mathbf{x} \right) \\ \text{s.t.} \quad \mathbf{A}_{\text{eq}} \mathbf{x} = \mathbf{b}_{\text{eq}} \\ \mathbf{b}^l \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{b}^u \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $\mathbf{H}$  为二次项系数矩阵;  $\mathbf{f}$  为一次项系数向量;  $\mathbf{A}_{\text{eq}}$  为等式约束的系数矩阵;  $\mathbf{b}_{\text{eq}}$  为等式约束的右端向量;  $\mathbf{b}^u$  为自变量上界约束向量;  $\mathbf{b}^l$  为自变量下界约束向量。

在求解上述二次规划问题的过程中,若等式约束、自变量约束相互矛盾,即在自变量约束范围内等式约束无法满足,会出现计算失败的现象。对应实际情况可解释如下:信号  $P^{\text{AGC}}$  的幅值过大,调频电源的调频容量不足;或者信号  $P^{\text{AGC}}$  的变化率过大,调频电源的爬坡速率不足。此时本文所述控制策略将优化配置目标从调频总成本  $D^1$  最小改为跟踪二次调频信号  $P^{\text{AGC}}$  的误差最小。由于目标函数为一次函

数,故采用线性规划算法进行优化求解,具体定义如下:

$$E_k = \left| P_k^{\text{AGC}} - \sum_{i=1}^I P_{i,k} - \sum_{j=1}^J P_{j,k} \right| \quad (10)$$

$$\begin{cases} \min_x & \mathbf{f}^T \mathbf{x} \\ \text{s.t.} & \mathbf{A}_{\text{eq}} \mathbf{x} = \mathbf{b}_{\text{eq}} \\ & \mathbf{b}^l \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{b}^u \end{cases} \quad (11)$$

$$\mathbf{f} = [1, 1, \dots, 1]^T \quad (12)$$

其中,  $E_k$  为二次调频跟踪误差函数;式(11)为线性规划的标准形式,  $\mathbf{f}$  为  $N$  维列向量,作为线性规划的一次项向量;  $\mathbf{b}^u$  和  $\mathbf{b}^l$  分别为由  $P_{n,k}$  ( $n=1, 2, \dots, N$ ;  $N=I+J$ ) 组成向量的上、下界约束,取值见附录。

综上所述,计及电池储能技术特征的二次调频控制策略在电池储能成本函数系数的设置和二次规划边界条件的设定中全方位地考虑了电池储能包括额定功率、容量、爬坡速率、充放电效率在内的技术指标。同时,通过荷电状态的实时反馈更新储能调频成本,改变调频责任分配,实现对电池储能荷电状态的均衡控制。

## 2 算例分析

### 2.1 调频电源和区域电网关键参数说明

本文研究的典型区域电网包含传统机组、若干规模化电池储能和一定比例的新能源发电设备。在 MATLAB/Simulink 中建立如图 1 所示的区域电网调频动态模型<sup>[23]</sup>,区域电网的装机容量为 750 MW,新能源占比为 10%。由于新能源电源不具备惯性,可将其作为功率消耗为负的负荷,并导致电网惯性下降,所以设置区域电网的惯性时间常数  $M=8$  s 和负荷阻尼系数  $D=1$ 。火电机组参数的取值参照文献[23],其中一次调频的调差系数  $R=0.05$ ,二次调频系数  $B=21$ 、 $K_1=-0.15$ 。电池储能的 5 个技术特征范围如附录中表 A1 所示。负荷波动如图 3 所示,包含阶跃、连续高频、连续低频等多种典型工况,图中纵轴为标幺值,额定功率取为 100 MW。

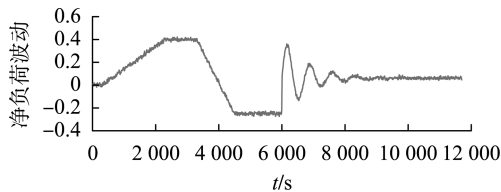


图3 区域电网净负荷波动

Fig.3 Net load fluctuation of regional power grid

### 2.2 计及电池储能技术特征的二次调频控制策略仿真

计及电池储能技术特征的二次调频优化控制策略的仿真结果如图 4—7 所示(图 5 的纵轴为标幺值)。图 4 为 3 种调频控制策略下区域电网的频率

偏差曲线。图中策略 1 为本文所提控制策略,策略 2、策略 3 分别为文献[14]和文献[16]所述控制策

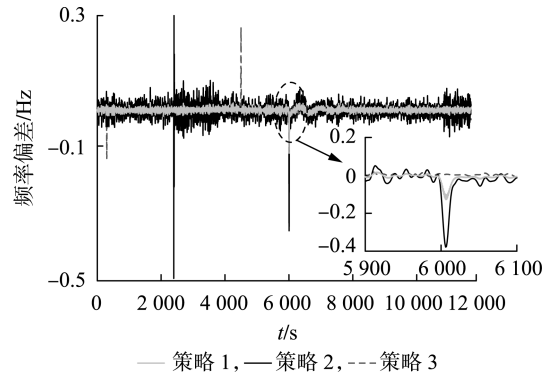


图4 3种调频控制策略下的区域电网频率偏差曲线

Fig.4 Frequency deviation curves of regional power grid under three frequency regulation control strategies

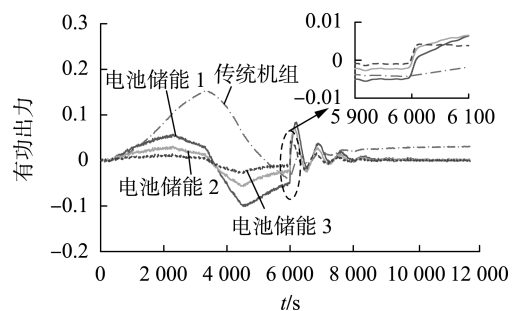


图5 调频电源的二次调频有功出力曲线(策略1)

Fig.5 Secondary frequency regulation active power output curves of frequency power sources (Strategy 1)

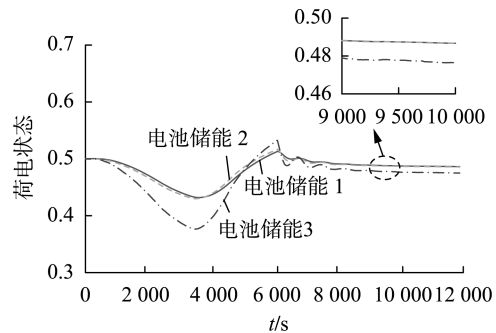


图6 电池储能的荷电状态变化曲线(策略1)

Fig.6 SOC of battery energy storages (Strategy 1)

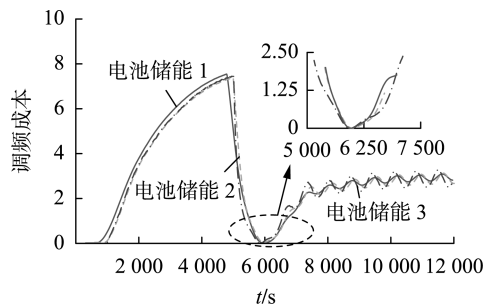


图7 电池储能的调频成本变化曲线(策略1)

Fig.7 Frequency regulation cost curves of battery energy storages (Strategy 1)

略。由图 4 可知,本文所提控制策略(策略 1)能够将频率偏差控制在极小的范围内,即使在 6 000 s 时出现负荷阶跃变化的状况,电网频率波动也能维持在  $\pm 0.1$  Hz 范围内。

图 5 为策略 1 下各调频电源的二次调频有功出力曲线。由图 5 可知,传统机组响应了信号  $P_k^{AGC}$  中的低频分量,出力曲线平滑,有效地减少了机械磨损;电池储能则发挥了爬坡速率快的特点,更多地承担了高频低幅的调频信号。具体而言,在 2 000 s 附近,传统机组尚未完成爬坡,策略 1 依据电池储能的功率、容量大小分配调频责任,电池储能 1 承担了最多的调频责任;而在 6 000 s 出现  $P_k^{AGC}$  阶跃上升时,策略 1 不仅能够优先调用电池储能,同时还能根据电池储能爬坡速率的差异,优先调用功率容量最小但爬坡速率最快的电池储能 3,而功率容量最大的电池储能 1 反而承担了较少的调频责任。

图 6 为策略 1 下电池储能的荷电状态波动曲线。由图 6 可知,在调频过程中 3 个电池储能的荷电状态被有效地维持在基准荷电状态附近。具体而言,前期由于调频需求上升,电池储能辅助传统机组持续出力,荷电状态下降;当传统机组满足电网调频需求后,电池储能通过及时充电恢复其荷电状态;在 6 000 s 时短暂波动后,电池储能主要承担调频信号中的高频往复分量,电网调频责任由传统机组承担,电池储能的荷电状态表现为轻微波动。

图 7 为策略 1 下 3 个电池储能响应调频过程的成本变化曲线。由图 7 可知,3 个电池储能的实时调频成本近似但不完全一致,这是因为:一方面,策略 1 始终由调频成本最低的储能承担调频责任;另一方面,策略 1 既考虑了功率、容量、爬坡速率、充放电效率和实时荷电状态等技术指标约束,又满足电网实时调频需求。如在 6 000 s 附近,电池储能 3 的成本从最低变为最高,因其爬坡速率最快,能够满足电网净负荷突变带来的调频需要,所以尽管电池储能 1 或电池储能 2 的实时调频成本较低,但依旧由电池储能 3 承担更多的调频责任。另外,在较长时间尺度内,如 12 000 s 时,3 个电池储能的累计成本(每 4 s 核算一次)分别为  $3.92 \times 10^9$ 、 $3.97 \times 10^9$ 、 $3.87 \times 10^9$ ,几乎保持一致。综上,本文所提策略在充分考虑每个电池储能的调频特征、满足电网需要的基础上,实现了对储能荷电状态的均衡控制。

### 2.3 3 种调频策略的仿真对比

为了进一步体现本文所提二次调频控制策略的优越性,将本文所述控制策略(策略 1)与策略 2、策略 3 进行仿真对比。3 种控制策略的主要区别在于调度中心集中控制对调频责任的分配(见图 1 中左侧的虚线框),并利用 MATLAB m. function 与 Simulink 仿真相结合的方式实现仿真,结果如图 8—10

所示(图 8、10 的纵轴为标幺值)。其中,策略 2 依据每个调频电源调频容量占总容量的比例,将二次调频信号  $P_k^{AGC}$  分配给各个调频电源;策略 3 将二次调频信号  $P_k^{AGC}$  分成高频分量和低频分量,并将高频分量按功率占比分配给电池储能,将低频分量按分配给传统机组。

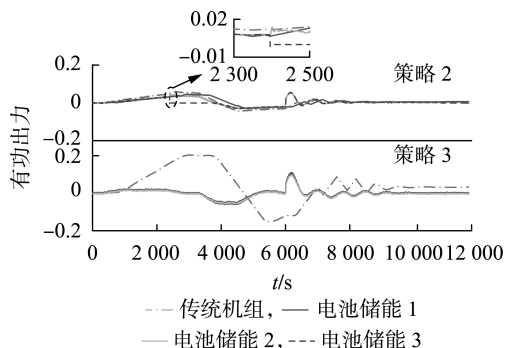


图 8 策略 2、3 下调频电源的二次调频有功出力曲线

Fig.8 Secondary frequency regulation active power output curves of frequency power sources under Strategy 2 and 3

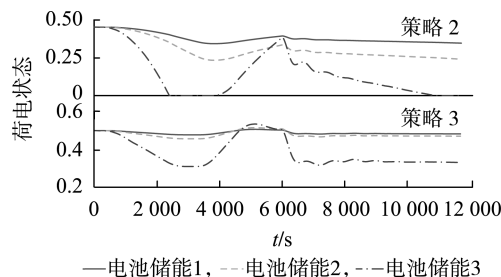


图 9 策略 2、3 下电池储能的荷电状态变化曲线

Fig.9 SOC of battery energy storages under Strategy 2 and 3

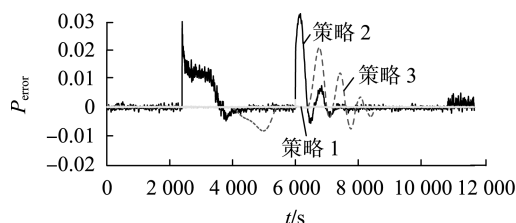


图 10 3 种控制策略下跟踪调频需求的误差曲线

Fig.10 Frequency regulation power tracking error of three control strategies

图 8 为策略 2、3 下各调频电源的二次调频有功出力曲线。由于策略 2 中每个调频电源是按静态比例出力,且不考虑电池储能的实时荷电状态,电池储能会因持续出力直至电量耗尽。如大约在 2 300 ~ 3 800 s 时段内,电池储能 3 退出二次调频控制,并造成频率剧烈波动。策略 3 中电池储能只响应高频信号,这虽然在一定程度上发挥了电池储能快速响应的优势,但是无法区分电池储能的功率、容量,不同功率、容量的电池储能承担了几乎相同的调频责任。

图 9 为策略 2、3 下电池储能的荷电状态波动曲线。在策略 2 下 3 个电池储能的荷电状态均出

现了较大的偏移,容量最小的电池储能3出现了荷电状态越限而退出的现象。策略3对电池储能1、电池储能2的利用率明显不足,而电池储能3被过度使用。

图10为3种策略下调频电源出力跟踪信号 $P^{AGC}$ 的误差曲线。策略1的信号跟踪误差始终接近于0,表现明显优于策略2(最大为0.03 MW)和策略3(最大为0.018 MW)。通过仿真结果对比可知,无论是对调频责任在电池储能间分配的合理性,还是对储能荷电状态的均衡控制,本文所述控制策略(策略1)都有明显的优势。这种优势来自于对电池储能技术指标的全面考虑,并在控制过程中不断调整给出实时最佳的调频责任分配方式。

根据图8—10所示结果做进一步的定量对比,结果如表1所示。不同仿真时长下,策略1的各项指标(如频率偏差平均值、均方根等)都有明显的优势。同时,策略1的累计调频成本始终低于策略2和策略3,且仿真时长越久,优势越明显。

表1 3种控制策略下各项仿真结果对比

Table 1 Comparison of simulative results among three control strategies

| 仿真时长/h | 控制策略 | 频率偏差平均值/Hz              | 频率偏差均方根/Hz             | 荷电状态范围    | 跟踪误差范围/MW                                     | 累计调频总成本                |
|--------|------|-------------------------|------------------------|-----------|-----------------------------------------------|------------------------|
| 0.5    | 1    | $-7.652 \times 10^{-6}$ | $2.470 \times 10^{-5}$ | 0.45~0.50 | $-3.2 \times 10^{-5} \sim 4.7 \times 10^{-5}$ | $1.371 \times 10^9$    |
|        | 2    | $-9.978 \times 10^{-6}$ | $5.952 \times 10^{-5}$ | 0.38~0.51 | $-2 \times 10^{-4} \sim 3.3 \times 10^{-4}$   | $1.664 \times 10^{10}$ |
|        | 3    | $-8.215 \times 10^{-6}$ | $2.620 \times 10^{-5}$ | 0.38~0.52 | -0.08~0                                       | $1.34 \times 10^{10}$  |
| 1.5    | 1    | $-1.643 \times 10^{-7}$ | $8.673 \times 10^{-5}$ | 0.37~0.52 | $-2 \times 10^{-5} \sim 5.3 \times 10^{-5}$   | $5.537 \times 10^9$    |
|        | 2    | $-1.440 \times 10^{-6}$ | $1.022 \times 10^{-4}$ | 0~0.50    | $-2 \times 10^{-4} \sim 3.3 \times 10^{-4}$   | $1.674 \times 10^{11}$ |
|        | 3    | $-4.684 \times 10^{-6}$ | $2.499 \times 10^{-4}$ | 0.29~0.54 | $-2 \times 10^{-3} \sim 0.23$                 | $2.955 \times 10^{10}$ |
| 3.25   | 1    | $-4.573 \times 10^{-7}$ | $4.442 \times 10^{-5}$ | 0.44~0.52 | $-3 \times 10^{-5} \sim 1.65 \times 10^{-3}$  | $1.45 \times 10^{10}$  |
|        | 2    | $-9.476 \times 10^{-5}$ | $9.931 \times 10^{-4}$ | 0~0.50    | -0.008~0.024                                  | $7.125 \times 10^{11}$ |
|        | 3    | $-5.564 \times 10^{-6}$ | $6.745 \times 10^{-4}$ | 0.28~0.53 | -0.05~0.18                                    | $4.56 \times 10^{10}$  |

由图11可知,在模式1下,由于一次调频是有差调节,区域电网在面对阶跃净负荷波动时频率波动幅度较大且短时无法恢复;模式2下由于传统机组二次调频的作用,能够明显将区域电网的频率偏差控制在较小的范围内,但是由于传统机组爬坡速率的限制,在大约6 000 s时电网频率仍发生了较大的偏差;模式3利用电池快速响应的特性,对频率偏差起到了明显的改善作用。

### 3 结论

本文针对规模化电池储能参与二次调频控制提出了一种新的控制策略。该策略通过定义储能调频成本函数,精确量化具有不同技术特征的储能在调频控制中所承担的调频责任。根据区域电网调频动态模型的仿真结果,可得如下结论:

a. 所提策略通过充分考虑电池储能的功率、容量、爬坡速率、充放电效率和实时荷电状态等技术指标,将频率波动控制在 $\pm 0.1$  Hz范围内;

b. 所提策略将调频电源跟踪调频信号的误差

### 2.4 3种调频模式的仿真对比

为了体现储能参与二次调频对改善区域电网频率偏差的显著作用,对3种调频模式进行仿真对比分析,结果如图11所示。其中,模式1为传统机组仅参与一次调频,不含储能;模式2为传统机组同时参与一、二次调频,不含储能;模式3为传统机组同时参与一、二次调频,电池储能参与二次调频。

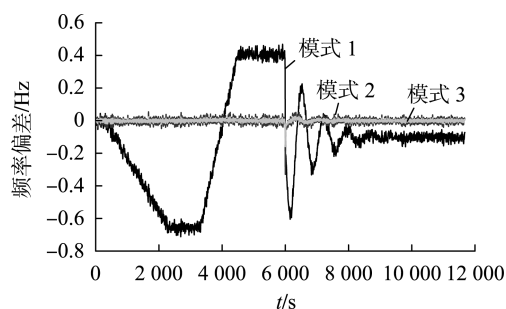


图11 3种调频模式下区域电网频率偏差曲线

Fig.11 Frequency deviation curves of regional power grid under three frequency regulation modes

控制在 $10^{-4}$ 以下,同时将电池储能的荷电状态维持在基准荷电状态的 $\pm 15\%$ 以内;

c. 所提策略对传统机组调频呈友好状态,传统机组的功率输出曲线平滑,显著降低了机械磨损。

另外,由于本文所提控制策略实现了对电池储能资源的充分合理利用,使得电池储能有更好的市场表现,并获得收益。需注意的是,本文所提优化控制策略只是从控制策略层面出发,没有考虑通信延时等工程问题。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

### 参考文献:

- [1] 苗青,吴俊勇,艾洪克,等. 组合级联式兆瓦级功率调节装置协调控制策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(7):43-49.  
MIAO Qing, WU Junyong, AI Hongke, et al. Coordinated control of hybrid cascaded megawatt power regulation device [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 43-49.
- [2] 江全元,石庆均,李兴鹏,等. 风光储独立供电系统电源优化配置[J]. 电力自动化设备,2013,33(7):19-26.  
JIANG Quanyuan, SHI Qingjun, LI Xingpeng, et al. Optimal configu-

- ration of standalone wind-solar-storage power supply system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7): 19-26.
- [3] 李相俊, 王上行, 惠东. 电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3315-3325.
- LI Xiangjun, WANG Shangxing, HUI Dong. Summary and prospect of operation control and application method for battery energy storage systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3315-3325.
- [4] 李建林, 马会萌, 袁晓冬, 等. 规模化分布式储能的关键应用技术综述[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3365-3375.
- LI Jianlin, MA Huimeng, YUAN Xiaodong, et al. Overview on key applied technologies of large-scale distributed energy storage[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3365-3375.
- [5] 李欣然, 黄际元, 陈远扬, 等. 大规模储能电源参与电网调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 145-153.
- LI Xinran, HUANG Jiyuan, CHEN Yuanyang, et al. Review on large-scale involvement of energy storage in power grid fast frequency regulation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 145-153.
- [6] 钟宇峰, 黄民翔, 叶承晋. 基于电池储能系统动态调度的微电网多目标运行优化[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 114-121.
- ZHONG Yufeng, HUANG Minxiang, YE Chengjin. Multi-objective optimization of microgrid operation based on dynamic dispatch of battery energy storage system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 114-121.
- [7] 苏浩, 张建成, 冯冬涵, 等. 模块化混合储能系统及其能量管理策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 127-133, 140.
- SU Hao, ZHANG Jiancheng, FENG Donghan, et al. Modular hybrid energy storage system and its energy management strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 127-133, 140.
- [8] 孙冰莹, 杨水丽, 刘宗歧, 等. 国内外兆瓦级储能调频示范应用现状分析与启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 8-16, 38.
- SUN Bingying, YANG Shuili, LIU Zongqi, et al. Analysis on present application of megawatt-scale energy storage in frequency regulation and its enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 8-16, 38.
- [9] 李少林, 秦世耀, 王瑞明, 等. 大容量双馈风电机组虚拟惯量调频技术[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4): 1-7.
- LI Shaolin, QIN Shiyao, WANG Ruiming, et al. Control strategy of virtual inertia frequency regulation for large capacity DFIG-based wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 1-7.
- [10] 陈达鹏, 荆朝霞. 美国调频辅助服务市场的调频补偿机制分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 1-9.
- CHEN Dapeng, JING Zhaoxia. Analysis of frequency modulation compensation mechanism in frequency modulation ancillary service market of the United States[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 1-9.
- [11] 任晓滕. 考虑储能设备的 AGC 竞价市场研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2015.
- REN Xiaomeng. Research on AGC auction market considering energy storage devices[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2015.
- [12] SHI Y Y, XU B L, WANG D, et al. Using battery storage for peak shaving and frequency regulation: joint optimization for superlinear gains[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 2882-2894.
- [13] CHENG B L, POWELL W. Co-optimizing battery storage for the frequency regulation and energy arbitrage using multi-scale dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 1997-2005.
- [14] CHENG Y Z, TABRIZI M, SAHNI M, et al. Dynamic available AGC based approach for enhancing utility scale energy storage performance [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 1070-1078.
- [15] KHALID M, SAVKIN A V. An optimal operation of wind energy storage system for frequency control based on model predictive control[J]. Renewable Energy, 2012, 48: 127-132.
- [16] JIN C L, LU N, LU S, et al. A coordinating algorithm for dispatching regulation services between slow and fast power regulating resources [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 1043-1050.
- [17] FORD J J, LEDWICH G, DONG Z Y. Efficient and robust model predictive control for first swing transient stability of power systems using flexible AC transmission systems devices[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2008, 2(5): 731.
- [18] 陈丽娟, 姜宇轩, 汪春. 改善电厂调频性能的储能策略研究和容量配置[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 52-59.
- CHEN Lijuan, JIANG Yuxuan, WANG Chun. Strategy and capacity of energy storage for improving AGC performance of power plant [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 52-59.
- [19] 蒋玮, 周赣, 王晓东, 等. 一种适用于微电网混合储能系统的功率分配策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 38-43, 52.
- JIANG Wei, ZHOU Gan, WANG Xiaodong, et al. Power allocation strategy of hybrid energy storage system for microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 38-43, 52.
- [20] 丁冬, 刘宗歧, 杨水丽, 等. 基于模糊控制的电池储能系统辅助 AGC 调频方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 81-87.
- DING Dong, LIU Zongqi, YANG Shuili, et al. Battery energy storage aid automatic generation control for load frequency control based on fuzzy control [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 81-87.
- [21] TAN J, ZHANG Y. Coordinated control strategy of a battery energy storage system to support a wind power plant providing multi-timescale frequency ancillary services[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(3): 1140-1153.
- [22] MEGEL O, LIU T, HILL D J, et al. Distributed secondary frequency control algorithm considering storage efficiency [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6214-6228.
- [23] KUNDER P. Power system stability and control [M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1993: 581-617.

#### 作者简介:



张圣祺

张圣祺 (1988—), 男, 江苏苏州人, 博士, 主要研究方向为电力系统二次调频控制 (E-mail: shengqi\_zhang8816@163.com);

袁蓓 (1993—), 女, 河南开封人, 硕士研究生, 主要研究方向为储能调度与控制 (E-mail: yuanbei11a11@qq.com);

徐青山 (1979—), 男, 江苏泰州人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为电力系统运行与控制、智能电网调度与需求侧管理 (E-mail: xuqingshan@seu.edu.cn);

赵剑锋 (1972—), 男, 浙江临海人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用 (E-mail: jianfeng\_zhao@seu.edu.cn)。

(下转第 95 页 continued on page 95)

- MENG Jianhui, SHI Xinchun, WANG Yi, et al. Control strategy of DER inverter for improving frequency stability of microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 70-79.
- [25] LI B, ZHOU L, YU X, et al. Improved power decoupling control strategy based on virtual synchronous generator [J]. IET Power Electronics, 2017, 10(4): 462-470.

#### 作者简介:

田铭兴(1968—),男,甘肃武威人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统电能质量分析与控制、电机设计及其控制系统、电力电子技术及其应用等



田铭兴

(E-mail: tianmingxing@mail.lzjtu.cn);

路涛涛(1993—),男,甘肃白银人,硕士研究生,主要研究方向为新能源发电控制技术等(E-mail: 724701972@qq.com);

贾志博(1994—),男,山西临汾人,硕士研究生,主要研究方向为新能源在铁路上的应用(E-mail: 363543896@qq.com);

高云波(1980—),男,陕西眉县人,副教授,硕士,主要研究方向为交通运输工程(E-mail: 5090142@qq.com)。

## Energy management of photovoltaic-storage-fuel cell microgrid based on virtual synchronous generator control

TIAN Mingxing<sup>1,2</sup>, LU Taotao<sup>1,2</sup>, JIA Zhibo<sup>1,2</sup>, GAO Yunbo<sup>1,2</sup>

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Rail Transit Electrical Automation Engineering Laboratory of Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** To improve the ability of microgrid to participate in grid operation and management, a PV (PhotoVoltaic)-storage-fuel cell microgrid based on VSG (Virtual Synchronous Generator) control is proposed. In order to coordinate the VSG control of inverters with the distributed power supply and the additional energy storage unit, based on the SOC (State Of Charge) of energy storage, the energy management schemes of PV and fuel cell VSG are designed respectively, which enables microgrid to efficiently participate in primary frequency modulation and provide inertia in response to the demand of power grid. At the same time, the maximum power output of the photovoltaic power generation, the fuel balance regulation of the fuel cell power generation, as well as the safety and controllability of SOC in energy storage unit are realized. Finally, simulative results on MATLAB/Simulink verify that the proposed energy management scheme effectively coordinates the VSG control with distributed generation and energy storage, and ensures safe and reliable operation of microgrid under both grid-connected and islanded conditions.

**Key words:** virtual synchronous generator; microgrid; energy management; constant power; droop control

(上接第88页 continued from page 88)

## Optimal control strategy of secondary frequency regulation for power grid with large-scale energy storages

ZHANG Shengqi, YUAN Bei, XU Qingshan, ZHAO Jianfeng

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** In recent years, it is one of the most potential application directions for large-scale battery energy storages to participate in the secondary frequency regulation control of power grid besides the peak-shaving application. However, traditional secondary frequency regulation control strategies cannot distinguish the technical characteristic differences of different BESSs (Battery Energy Storage Systems), so it is difficult to make full use of BESS's frequency regulation advantages, resulting in waste of resources. Therefore, a secondary frequency regulation control strategy of power grid considering the technical characteristics of BESS is proposed. Inspired by the frequency regulation cost model of traditional generators, the frequency regulation cost function of BESS is established, based on which to quantitatively describe the frequency regulation cost of energy storage with different technical characteristics. The frequency regulation responsibility of energy storage is allocated to meet the secondary frequency regulation requirements of power grid with the minimum frequency regulation cost as the objective. The dynamic model of regional power grid with multiple BESSs is built in MATLAB/Simulink to verify the feasibility of the proposed control strategy, and the proposed control strategy is compared with other two frequency regulation control strategies. Simulative results show that the proposed control strategy can fully consider the technical characteristics of different BESSs, so as to accurately dispatch the energy storage to meet the frequency regulation requirements of power grid, and realize the balanced control of BESS's state of charge.

**Key words:** secondary frequency regulation; large-scale battery energy storage; quadratic programming; dynamic frequency regulation model; optimal control

# 附录

$$\begin{aligned}
 H_1 &= \begin{bmatrix} 2a_1 & & \\ & \ddots & \\ & & 2a_1 \end{bmatrix}, \quad H_J = \begin{bmatrix} 2\alpha_1 & & \\ & \ddots & \\ & & 2\alpha_J \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} H_1 & \\ & H_J \end{bmatrix} \\
 f_1 &= \begin{bmatrix} \beta_{1,k} \\ \vdots \\ \beta_{I,k} \end{bmatrix}, \quad f_J = \begin{bmatrix} \beta_{1,k} \\ \vdots \\ \beta_{J,k} \end{bmatrix}, \quad f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_J \end{bmatrix} \\
 A_{eq} &= [1, \dots, 1]_N, \quad b_{eq} = P_k^{AGC} \\
 b_1^l &= \begin{bmatrix} l_{1,k} \\ \vdots \\ l_{I,k} \end{bmatrix}, \quad b_J^l = \begin{bmatrix} l_{1,k} \\ \vdots \\ l_{J,k} \end{bmatrix}, \quad b^l = \begin{bmatrix} b_1^l \\ b_J^l \end{bmatrix} \\
 \begin{cases} l_{i,k} = \max(P_i^{\min}, R_i^{\min} \Delta t + P_{i,k-1}) \\ l_{j,k} = \max\left(P_j^{\min}, R_j^{\min} \Delta t + P_{j,k-1}, \frac{(S_{socj,k-1} - S_{socj}^{\max})S_j}{\Delta t}\right) \end{cases} \\
 b_1^u &= \begin{bmatrix} u_{1,k} \\ \vdots \\ u_{I,k} \end{bmatrix}, \quad b_J^u = \begin{bmatrix} u_{1,k} \\ \vdots \\ u_{J,k} \end{bmatrix}, \quad b^u = \begin{bmatrix} b_1^u \\ b_J^u \end{bmatrix} \\
 \begin{cases} u_{i,k} = \min(P_i^{\max}, R_i^{\max} \Delta t + P_{i,k-1}) \\ u_{j,k} = \min\left(P_j^{\max}, R_j^{\max} \Delta t + P_{j,k-1}, \frac{(S_{socj,k-1} - S_{socj}^{\min})S_j}{\Delta t}\right) \end{cases}
 \end{aligned}$$

表 A1 调频电源的技术特征

Table A1 Technical characteristics of frequency power sources

| 调频电源   | 功率备用范围/MW | 爬坡速率范围/(MW·h <sup>-1</sup> )      | 电池容量/<br>(MW·h) | 充电效率 | 放电效率 | 基准荷电状态 | <i>a</i> | <i>b</i> |
|--------|-----------|-----------------------------------|-----------------|------|------|--------|----------|----------|
| 传统机组   | -60~60    | -65~65                            | —               | —    | —    | —      | 3        | 0        |
| 电池储能 1 | -40~40    | -10 <sup>3</sup> ~10 <sup>3</sup> | 40              | 0.9  | 0.95 | 0.5    | 1        | 0.05     |
| 电池储能 2 | -30~30    | -500~500                          | 20              | 0.9  | 0.8  | 0.5    | 0.7      | 0.035    |
| 电池储能 3 | -20~20    | -10 <sup>4</sup> ~10 <sup>4</sup> | 5               | 0.95 | 0.9  | 0.5    | 0.5      | 0.2      |