DOI: 10.7500/AEPS20200312007

**をか系统自动化** Automation of Electric Power Systems

# 大规模储能参与电网调频的双层控制策略

张 舒 鹏<sup>1</sup>, 董 树 锋<sup>1</sup>, 徐 成 司<sup>1</sup>, 韩 荣 杰<sup>2</sup>, 寿 挺<sup>2</sup>, 李 建 斌<sup>2</sup> (1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 国网浙江杭州市萧山区供电有限公司, 浙江省杭州市 311200)

摘要:风电等可再生能源大规模并网,其间歇性和波动性的出力特性会给电网带来机组调频容量 不充足、调频效果不理想等调频问题。为此,文中提出一种大规模储能参与电网调频的双层控制策 略。首先,基于复频域分析提出区域调节需求信号分配模式和区域控制误差信号分配模式的切换 时机判据。然后,全面考虑不同调频电源的技术特征,提出大规模电池储能和火电机组协调响应系 统自动发电控制指令的双层控制策略,在上层基于电源调频成本函数实现多约束条件下的功率经 济分配,在下层基于模型预测控制实现频率分布式优化控制。最后,通过仿真验证了文中所提策略 的经济性和有效性。

关键词: 大规模储能; 调频; 分配模式; 成本函数; 模型预测控制

# 0 引言

风电、光伏等可再生能源大规模并网,其间歇性 与不确定性的出力特性会给电网调频带来压力<sup>[1]</sup>。 作为调频主力的传统火电机组面临着调频容量受 限、调节精度不足等问题,威胁电网的频率安全,成 为制约电网接纳可再生能源的因素之一<sup>[2-3]</sup>。而电 池储能系统(battery energy storage system, BESS) 由于其响应速度快、控制灵活的出力特性可以协助 传统调频机组维护电网频率稳定。在技术可行性方 面,一些学者通过对比传统调频机组与火储、风储等 联合系统的调频效果,定量说明了BESS参与电网 调频的优势<sup>[4-5]</sup>。在政策支持方面,国内外一些地方 相继出台了相关机制来引导BESS参与调频辅助服 务市场<sup>[6-7]</sup>,如《江苏电力辅助服务(调频)市场交易 规则(征求意见稿)》<sup>[6]</sup>中规定符合一定条件的储能 电站可以直接注册成为调频辅助服务市场成员。

BESS与火电机组配合协调响应自动发电控制 (automatic generation control, AGC)指令的控制策 略一直是储能参与电网调频的研究热点之一。在调 频信号分配模式方面,一般分为基于区域调节需求 (area regulation requirement, ARR)信号分配<sup>[8-9]</sup>和 基于区域控制误差(area control error, ACE)信号分 配<sup>[10-11]</sup>这2种模式。文献[12]通过2种分配模式的 调频仿真效果对比,发现基于ACE信号的分配模式 有利于减小调频前期的频率偏差,而基于ARR信号的分配模式有利于减少调频中后期的频率恢复时间。进一步,文献[13]在复频域中采用系统频率偏差相对于单个储能参与因子的灵敏度过零点作为2种调频信号分配模式的切换时机判据,从机理层面说明了调频前期基于ACE信号分配而中后期基于ARR信号分配的优势。

在调频责任分配大小方面,主要分为按调频信 号的频域特征分配[14-15]和按电源动态可调容量比例 分配<sup>[12]</sup>。文献[14]通过定量分析实际调频信号中 的高低频分量占比,提出了BESS和火电机组分别 适合承担其中的高频分量和低频分量,但是其缺乏 对电池荷电状态(state of charge, SOC)的控制, SOC 偏移参考值过多会增加储能损耗,偏高或偏低 的 SOC 也不利于储能参与后续调频过程。文献 [12]提出了依据电源的动态调频容量按比例分配 调频责任,其本质仍是调频责任按比例进行满分配, 未考虑调频电源由于容量、爬坡率等限制而无法进 行满分配的情况。此外,部分学者通过求解 BESS 参与调频的优化目标问题来分配电源的调频责任。 文献[9]构造了考虑调频效果、储能SOC和储能损 耗的多目标函数,并通过网格自适应搜索算法求解 调频电源的出力,但是这类思路需要关注优化算法 的求解时间,算法收敛速度关系着控制策略的可行 性,需要满足储能参与电网调频秒级响应的要求。

基于以上背景,提出一种大规模储能参与电网 调频的双层控制策略。首先,基于复频域分析确定 大规模BESS参与调频时ACE信号分配和ARR信

收稿日期: 2020-03-12; 修回日期: 2020-06-20。

上网日期: 2020-08-13。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0901300)。

号分配这2种模式的切换时机。然后,提出大规模 BESS和火电机组协调响应系统AGC指令的双层 控制策略,实现多电源的调频责任分配与协调控 制。最后,通过仿真对比验证了本文所提策略的有 效性和经济性。

# 1 大规模 BESS 参与 AGC 的调频信号分配 模式

BESS参与电网调频时的调频信号分配模式分为基于 ARR 信号分配<sup>[8:9]</sup>和基于 ACE 信号分 配<sup>[10:11]</sup>。文献[13]提出了信号分配综合调节模式: 前期基于 ACE 信号分配改善系统的暂态频率偏差, 中后期切换为基于 ARR 信号分配改善系统频率调 节时间,并采用系统频率偏差相对于单个储能参与 因子的灵敏度过零点作为调频信号分配模式切换时 机的判据。然而灵敏度的公式推导只针对单个储能 的参与因子,且推导过程假设储能与机组的参与因 子之和为1,其分配模式切换时机的判据不适用于 大规模 BESS。本文通过复频域分析确定大规模 BESS 参与调频时2种模式的切换时机判据。

基于ACE分配和基于ARR分配的大规模储能 参与电网调频的频率响应模型如图1所示<sup>[9]</sup>。



图 1 基于 ACE 和 ARR 分配模式的电网频率响应模型 Fig. 1 Frequency response model of power grid based on ACE and ARR allocation modes

图 1 中,  $1/(M_s+D)$ 为机网接口模型,其中M为系统转动惯量, D为负荷阻尼系数;  $G_g(s)$ 为火电机组模型;  $G_{bi}(s)$ 为第 i 个 BESS 的模型( $i=1,2,\cdots$ ,

・学术研究・

n),其中n为BESS模型总数; $K_{G}$ , $K_{I}$ 和B分别为机 组一次调频调差系数、积分控制器系数和系统频率 偏差系数; $\Delta F(s)$ 为系统频率偏差; $\Delta P_{L}(s)$ 为区域负 荷扰动; $P_{gs}(s)$ 和 $P_{bi}(s)$ 分别为火电机组和第i个 BESS承担的二次调频责任; $\tilde{P}_{gp}(s)$ , $\tilde{P}_{gs}(s)$ 和 $\tilde{P}_{bi}(s)$ 分别为火电机组的一、二次调频出力和第i个BESS 的二次调频出力; $A_{CE}(s)$ 和 $A_{RR}(s)$ 为2种信号分配 模式的调频信号。

忽略死区和限幅,由图1(a)可知:

$$\begin{cases} A_{\rm CE}(s) = -B\Delta F(s) \\ (Ms+D)\Delta F(s) = \tilde{P}_{\rm gp}(s) + \tilde{P}_{\rm gs}(s) + \\ \sum_{i=1}^{n} \tilde{P}_{\rm bi}(s) - \Delta P_{\rm L}(s) \\ \tilde{P}_{\rm gp}(s) = -K_{\rm G}G_{\rm g}(s)\Delta F(s) \\ \tilde{P}_{\rm gs}(s) = P_{\rm gs}(s) \frac{K_{\rm I}}{s}G_{\rm g}(s) \\ \tilde{P}_{\rm bi}(s) = P_{\rm bi}(s)G_{\rm bi}(s) \end{cases}$$
(1)

其中,火电机组和BESS模型<sup>[9]</sup>分别为:

$$\begin{cases} G_{g}(s) = \frac{1 + F_{HP}T_{RH}s}{(1 + T_{G}s)(1 + T_{CH}s)(1 + T_{RH}s)} \\ G_{bi}(s) = \frac{1}{1 + T_{P}s} \end{cases}$$
(2)

式中: $F_{HP}$ 为再热器的增益; $T_{RH}$ , $T_{G}$ 和 $T_{CH}$ 分别为再 热器、调速器和汽轮机的时间常数; $T_{P}$ 为BESS中功 率转换系统(power convert system, PCS)的时间 常数。

由式(1)可得单位负荷扰动时,基于ACE信号 分配的调频信号为:

$$A_{\rm CE}(s) = -B \cdot \frac{P_{\rm gs}(s) \frac{K_{\rm I}}{s} G_{\rm g}(s) + \sum_{i=1}^{n} P_{\rm bi}(s) G_{\rm bi}(s) - 1}{K_{\rm C} G_{\rm g}(s) + Ms + D}$$
(3)

同样的,忽略死区和限幅,由图1(b)可知:

$$\begin{cases} A_{\rm RR}(s) = -B \frac{K_{\rm I}}{s} \Delta F(s) \\ (Ms + D) \Delta F(s) = \tilde{P}_{\rm gp}(s) + \tilde{P}_{\rm gs}(s) + \\ \sum_{i=1}^{n} \tilde{P}_{bi}(s) - \Delta P_{\rm L}(s) \\ \tilde{P}_{\rm L}(s) = -K_{\rm L}C_{\rm L}(s) \Delta F(s) \end{cases}$$
(4)

$$\begin{bmatrix}
 P_{gg}(s) & H_{G}G_{g}(s) \\
 \bar{P}_{gg}(s) = P_{gg}(s)G_{g}(s) \\
 \bar{P}_{bi}(s) = P_{bi}(s)G_{bi}(s)$$

由式(4)可得单位负荷扰动时,基于ARR信号 分配的调频信号为:

$$A_{\rm RR}(s) = -B \frac{K_{\rm I}}{s} \frac{P_{\rm gs}(s)G_{\rm g}(s) + \sum_{i=1}^{n} P_{\rm bi}(s)G_{\rm bi}(s) - 1}{K_{\rm G}G_{\rm g}(s) + Ms + D}$$
(5)

当调频责任分配模块确定了火电机组和BESS 的出力后,A<sub>CE</sub>(s)和A<sub>RR</sub>(s)的时域响应曲线如图2 所示。可以看到ARR信号的生成相较于ACE信号 多了一个积分环节,负荷发生扰动时,A<sub>RR</sub>(s)的幅值 一开始会由于积分环节的缓冲作用而小于A<sub>CE</sub>(s), 若是前期采用基于ARR信号分配模式,则调频电源 承担的调频责任变小,系统无法及时跟踪负荷扰 动。随着调频电源的运行,频率偏差减小,A<sub>CE</sub>(s)的 幅值会逐渐小于经过积分环节后的A<sub>RR</sub>(s),因此中 后期采用基于ARR信号分配模式才能缩短系统频 率恢复时间。为了不让调频信号幅值在模式切换前 后相差过大而导致调频电源出力和系统频率出现大 的波动,本文采用A<sub>CE</sub>(s)和A<sub>RR</sub>(s)时域响应曲线的 相交点作为调频信号分配模式的切换时机判据。



图 2  $A_{RR}(s)$ 和 $A_{CE}(s)$ 的时域响应曲线 Fig. 2 Time domain response curves of  $A_{RR}(s)$  and  $A_{CE}(s)$ 

当调频过程开始时,首先,采用基于ACE信号 分配的模式;然后,按第2章的策略确定各调频电源 二次调频的出力,将调频电源的出力代入式(6)所描 述的调频信号切换时机判据中,实时检测*S*<sub>T</sub>的过零 时刻。若*S*<sub>T</sub>小于零则继续基于ACE信号分配,否 则转换为基于ARR信号分配模式。

$$S_{\mathrm{T}} = A_{\mathrm{RR}}(s) - A_{\mathrm{CE}}(s) \tag{6}$$

# 2 大规模 BESS 和火电机组协调参与 AGC 的双层控制策略

#### 2.1 双层控制策略框架

针对大规模 BESS 联合火电机组参与调频时的 电源功率分配问题和多目标协调控制问题,为提高 调频的经济性和有效性,本文在考虑不同 BESS 技 术特征的基础上,提出大规模 BESS 和火电机组协 调响应系统 AGC 指令的双层控制策略,策略框图如 附录 A图 A1 所示。上层以调频电源参与 AGC 成 本最小化为目标函数,将调频责任的经济最优化分 配结果作为各调频电源的出力参考值。下层利用模型预测控制(model predictive control, MPC)对各调频电源实现分布式控制,使系统频率偏差快速恢复 至零<sup>[16]</sup>。通过上下两层之间的递进优化,实现电网频率调节中大规模 BESS 与火电机组的协调优化 运行。

#### 2.2 上层——功率经济分配层

区域电网发生负荷扰动后产生的调频信号,需 要在机组和BESS之间合理地进行分配。上层功率 经济分配层的基本思路是:以调频电源调频成本最 小化为目标,全面考虑不同调频电源的多技术特征 (包括调频备用容量、爬坡率、SOC、充放电效率 等),在多约束条件下进行机组和BESS调频责任的 优化分配。成本函数作为衡量电源调频成本的指 标,考虑了电源参与调频过程中影响调频成本的机 组磨损、储能损耗等因素,成本函数最小化可以保证 每个计算周期中功率分配的经济最优性。

传统火电机组的调频成本主要来源于频率调节 会使功率偏离机组的最佳运行点,进而导致燃油效 率下降,磨损增加<sup>[17]</sup>。和文献[18-19]一样,本文用 机组偏移功率的二次函数来描述机组调频成本:

$$C_{\mathrm{g},k} = a_0 P_{\mathrm{gs},k}^2 \tag{7}$$

式中:*C*<sub>g,k</sub>为火电机组在*k*时刻的二次调频成本;*P*<sub>gs,k</sub>为火电机组在*k*时刻承担的二次调频责任;*a*<sub>0</sub>为机 组因功率偏移增加调频成本的权重系数。

BESS的调频成本主要来源于电池工作时较大的 SOC 偏移<sup>[20]</sup>和高功率<sup>[21]</sup>导致的电池老化及寿命 衰减。同样采用电池 SOC 偏移和功率的二次函数 来描述 BESS 调频成本:

$$C_{\rm bi,k} = a_{\rm bi} P_{\rm bi,k}^2 + b_{\rm bi} (S_{i,k} - S_{i0})^2 \tag{8}$$

式中: $C_{bi,k}$ 为第i个 BESS 在k时刻的调频成本; $P_{bi,k}$ 为第i个 BESS 在k时刻承担的二次调频责任; $S_{i,k}$ 为第i个 BESS 在k时刻的 SOC; $S_{i0}$ 为 BESS 的 SOC 基 准值; $a_{bi}$ 和 $b_{bi}$ 分别为第i个 BESS 因高功率和 SOC 偏移增加调频成本的权重系数。

对于 BESS 来说, k 时刻的 SOC 与 k 时刻的 BESS 功率及 k - 1 时刻的 SOC 有关, 可表示为:

$$S_{i,k} = \begin{cases} S_{i,k-1} - \frac{\eta_i P_{\text{bi},k} \Delta t}{S_{\text{bi}}} & P_{\text{bi},k} < 0 \\ S_{i,k-1} - \frac{P_{\text{bi},k} \Delta t}{\eta_i S_{\text{bi}}} & P_{\text{bi},k} > 0 \end{cases}$$
(9)

式中:η<sub>i</sub>为第*i*个BESS的充放电效率;Δ*t*为采样时 间间隔;*S*<sub>bi</sub>为第*i*个BESS的容量;*P*<sub>bi,k</sub>取正表示电 池放电,取负表示电池充电。

结合式(8)和式(9),可将第i个BESS的调频成

本表示为只与Pbi,k有关的二次函数。在调频 k 时刻 上层功率经济分配层的目标函数<sup>[22]</sup>和约束条件为:

$$\min\left(C_{g,k} + \sum_{i=1}^{n} C_{bi,k}\right) \tag{10}$$

$$\left(P_{gs,k} + P_{bi,k} = P_{agc,k}\right)$$

s.t.  
$$\begin{cases} \max\left(P_{g,\min}, R_{g,\min}\Delta t + P_{gs,k-1}\right) \leqslant P_{gs,k} \leqslant \\ \min\left(P_{g,\max}, R_{g,\max}\Delta t + P_{gs,k-1}\right) \\ \max\left(P_{bi,\min}, \frac{(S_{i,k-1} - S_{i,\max})S_{bi}}{\Delta t}\right) \leqslant P_{bi,k} \leqslant \\ \min\left(P_{bi,\max}, \frac{(S_{i,k-1} - S_{i,\min})S_{bi}}{\Delta t}\right) \end{cases}$$
(11)

式中: $P_{agc,k}$ 表示调频信号 $A_{CE}(s)$ 或者 $A_{RR}(s)$ ,由本文 第1章所述方法确定; $P_{g,max}$ 和 $P_{g,min}$ 分别为机组调 频可调节功率的上下限值; $R_{g,max}$ 和 $R_{g,min}$ 分别为机 组爬坡率的上下限值; $P_{bi,max}$ 和 $P_{bi,min}$ 分别为 BESS 功率的上下限值; $S_{i,max}$ 和 $S_{i,min}$ 分别为 BESS 的 SOC 上下限值。

式(10)和式(11)描述的二次规划问题中,等式 约束和不等式约束可能无法同时满足,这是因为机 组由于其爬坡率限制或者 BESS 由于其 SOC 限制 可能无法满足大的 Page,ko 此时,调频 k 时刻上层功 率经济分配层的目标函数转变为:

$$\min (P_{\text{gs},k} + P_{\text{bi},k} - P_{\text{agc},k})^2$$
(12)

上述二次规划的约束为式(11)中的不等式约 束,其意义是当满足电源技术特征约束下的机组和 BESS的功率之和无法满足调频信号时,以跟踪调 频信号的误差最小为目标。

#### 2.3 下层——频率动态控制层

为了进一步减小区域电网的最大频率偏差并使 频率偏差快速恢复至零,本文设计了下层频率动态 控制层,根据系统的频率偏差和功率经济分配层提 供的调频电源出力参考值,利用MPC实现多调频电 源的分布式动态优化控制。

MPC 对数学模型精确性的依赖程度较小且具 有良好的显式处理约束的能力<sup>[23]</sup>。MPC 算法通过 预测模型、滚动优化和反馈校正等步骤,对系统未来 动态行为进行预测,并把约束显式表示在一个在线 求解的二次规划或非线性规划问题中。

以基于ARR调频信号的分配模式为例,图1(b)的状态空间模型可表示为:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU + RW \\ Y = CX \end{cases}$$
(13)

式中:A,B,R和C分别为系统的状态矩阵、输入矩

阵、扰动矩阵和输出矩阵;X,U,W和Y分别为系统的状态变量、输入变量、扰动量和输出量,变量的具体元素如下。

$$\begin{split} X = \begin{bmatrix} \Delta F & A_{\text{RR}} & \tilde{P}_{\text{gp}} & \tilde{P}_{\text{gs}} & \tilde{P}_{\text{b1}} & \tilde{P}_{\text{b2}} & \cdots & \tilde{P}_{\text{bn}} \end{bmatrix}^{\text{T}} \\ U = \begin{bmatrix} P_{\text{gs}} & P_{\text{b1}} & P_{\text{b2}} & \cdots & P_{\text{bn}} \end{bmatrix}^{\text{T}} \\ W = \begin{bmatrix} \Delta P_{\text{L}} \end{bmatrix} \\ Y = \begin{bmatrix} \Delta F & \tilde{P}_{\text{gs}} & \tilde{P}_{\text{b1}} & \tilde{P}_{\text{b2}} & \cdots & \tilde{P}_{\text{bn}} \end{bmatrix}^{\text{T}} \end{split}$$

以 T<sub>s</sub>为采样周期将式(13)离散化得到系统的 离散状态空间模型:

$$\begin{cases} X(k+1) = \bar{A}X(k) + \bar{B}U(k) + \bar{R}W(k) \\ Y(k) = CX(k) \end{cases}$$
(14)

式中: $\bar{A}$ = $e^{AT_s}$ ; $\bar{B}$ = $\int_0^{T_s} e^{At} B dt$ ; $\bar{R}$ = $\int_0^{T_s} e^{At} R dt_o$ 

由式(14)可以预测系统起始于k时刻的未来一 段时间内的模型输出。构造如式(15)所示的满足一 定约束下的二次规划目标函数: min  $J_k =$ 

$$\sum_{j=1}^{p} (Y(k+j|k) - Y_{r}(k+j))^{\mathsf{T}} Q((Y(k+j)) - Y_{r}(k+j)) + \sum_{i=1}^{m} U^{\mathsf{T}}(k+i-1|k) GU(k+i-1|k)$$
(15)

式中:Q和 G分别为输出加权矩阵和控制加权矩阵; Y(k+jk)为在k时刻对系统输出 Y在未来k+j时 刻的预测,其中 $j \in (1,p)$ ,p为预测时域; $Y_r(k+j)$ 为系统输出 Y在未来k+j时刻的参考值,本文系统 输出向量 Y中频率偏差的参考值为0,调频电源功 率的参考值为功率经济分配层结果;U(k+i-1|k)为在k时刻对控制变量 U在未来k+i-1时刻的预 测,其中 $i \in (1,m)$ ,m为控制时域。

通过目标函数 J<sub>k</sub>的最优化来确定起始于 k时刻 的未来一段时间内的最优控制序列 U(k+i-1|k), 再将控制序列中第1个时段的控制变量作用于调频 电源,到下一采样时刻,优化时段向前推移并刷新优 化问题后进行求解<sup>[23]</sup>,实现频率的优化动态控制。

根据第1章所述的调频模式切换时机判据 和第2章所述的双层控制策略,本文提出的大规模 BESS联合火电机组参与调频时的控制策略如图3 所示。

# 3 仿真分析

#### 3.1 仿真条件

在 MATLAB/Simulink 平台中建立如图 1 所示的系统频率响应模型,调频信号分配模式可进行切换。模型中再热式火电机组的额定功率为





750 MW,机组调频备用容量为-60~60 MW,机组 爬坡率为22.5 MW/min,机组功率偏移成本系数为 3。3个 BESS(分别记为 BESS1, BESS2, BESS3) 的额定功率和容量分别为40 MW/40 MW・h, 30 MW/20 MW・h,20 MW/5 MW・h,充放电效率分 别为0.95,0.8,0.9, BESS 功率成本系数分别为1, 0.7,0.5, SOC 偏移成本系数分别为0.05,0.035,0.2。 模型以100 MW 为基准值进行标幺化。MPC 中采 样周期为0.1 s,控制时域为2,预测时域为15,输出 加权矩阵为[1,0.7,0.7,0.7,0.7],控制加权矩阵为 [0.1,0.1,0.1,0.1]。其余参数见附录A表A1。

#### 3.2 调频信号分配模式结果分析

对系统施加标幺值为0.3的阶跃负荷扰动,仿 真时长为100 s。将双层控制策略分别采用基于 ARR信号和基于ACE信号分配模式与本文调频信 号分配模式进行对比仿真,仿真结果如图4所示, 表1为调频评价指标对比。

从图 4(a)和表1可知,本文策略无论是在调频 前期减小最大频率偏差方面,还是在调频中后期使 频率偏差快速恢复方面都呈现出很好的效果。相较 于采用基于 ARR 信号分配模式,本文策略下的系统 最大频率偏差减少了 59.5%,频率偏差均方根值减 少了 23.3%,这是因为调频前期基于 ACE 信号分配 减小了系统暂态频率偏差。相较于采用基于 ACE 信号分配模式,本文策略下的系统频率偏差均方根 值减少了 43.2%,这是因为调频中后期切换为基于 ARR 信号分配模式,缩短了系统频率恢复时间。



图 4 系统动态响应仿真结果 Fig. 4 Simulation results of system dynamic response

表1 3种信号分配模式下的系统调频评价指标 Table 1 System frequency regulation evaluation indices with three signal allocation modes

控制策略	最大频率偏 差/Hz	频率偏差均方 根值/Hz	频率恢复 时间/s
本文策略	$-9.03 \times 10^{-3}$	$2.388 \times 10^{-3}$	34
基于ARR信号分配	$-2.23 \times 10^{-2}$	$3.112 \times 10^{-3}$	32
基于ACE信号分配	$-9.03 \times 10^{-3}$	$4.204 \times 10^{-3}$	78

图 4(b)表明,当BESS 联合火电机组进行调频 时,BESS 由于其快速出力的特性在调频前期的出 力会高于机组出力;在后期由于容量限制,为了不使 SOC 发生大的偏移会逐渐减少出力,转而由机组承 担调频主要责任。本文策略在上层功率优化分配层 充分考虑了大规模储能不同的技术特征,BESS3 由 于功率偏移调频成本系数最小在前期出力最快,但 是中期由于其容量最小,为了防止高 SOC 偏移调频 成本系数带来的高调频成本系数小于BESS1 且其 容量足够,因此BESS2 的出力始终高于BESS1 。仿 真过程中,t=6 s左右时的电源出力波动由调频信 号分配模式从ACE 分配变为ARR 分配导致。 由图 4(c)可知,在调频开始时,BESS3 由于功率偏移调频成本系数最小优先出力导致 SOC 下降最快,但中期由于比较大的 SOC 偏移调频成本系数 造成 SOC 下降速度趋缓。同时由于 BESS2 的调频 成本系数小于 BESS1 且其容量小于 BESS1,出力较 多的 BESS2 的 SOC 下降速度远快于 BESS1,体现 了本文策略具备充分考虑不同调频电源技术特征的 优越性。

#### 3.3 双层控制策略结果分析

对系统分别施加阶跃负荷扰动和连续负荷扰 动,仿真时长为100 s。在调频信号分配模式相同的 情况下,将无储能策略(策略1)、基于动态调频容 量分配策略<sup>[12]</sup>(策略2)与本文策略进行对比仿真。 图5(a)和(b)分别为阶跃负荷扰动与连续负荷扰动 下采取不同策略时的系统频率偏差曲线。表2为调 频评价指标对比。







表 2 3 种策略下的系统调频评价指标 Table 2 System frequency regulation evaluation indices with three control strategies

			-	
扰动 条件	控制策略	最大频率 偏差/Hz	频率偏差均方 根值/Hz	调频 成本
阶跃 扰动	本文策略	$-1.10 \times 10^{-2}$	$2.940  imes 10^{-3}$	6.570
	策略1	$-3.27  imes 10^{-2}$	$1.184 \times 10^{-2}$	
	策略2	$-1.28 \times 10^{-2}$	$3.252  imes 10^{-3}$	7.615
连续 扰动	本文策略	$1.15  imes 10^{-2}$	$4.757  imes 10^{-3}$	0.014
	策略1	$1.47  imes 10^{-2}$	$5.646  imes 10^{-3}$	
	策略2	$-1.37  imes 10^{-2}$	$5.488  imes 10^{-3}$	0.021

图 5 和表 2 表明本文策略无论是在抑制频率偏差还是控制调频成本方面,都呈现出较好的效果。 相较于无储能参与调频的策略 1,阶跃负荷扰动下 使用本文策略时的系统最大频率偏差减小了 66.4%,频率偏差均方根值减小了 75.2%;连续负荷 扰动下使用本文策略时的系统最大频率偏差减小了 21.8%,频率偏差均方根值减小了 15.7%,突显出相 比传统机组存在的爬坡率限制,储能依靠其出力快 的特性在调频过程中能够快速跟踪负荷扰动的 优点。

相较于基于动态调频容量分配的策略2,针对 阶跃负荷扰动和连续负荷扰动2种不同工况,本文 的双层控制策略通过功率经济分配层对电源调频责 任的优化分配能够有效降低调频成本,提升大规模 BESS联合火电机组参与调频过程中的经济性。通 过频率动态控制层的分布式MPC进一步减小系统 最大频率偏差和频率偏差均方根值,有效改善了系 统调频效果。

### 4 结语

为解决大规模可再生能源接入背景下电网 AGC容量不足、调频性能不理想的问题,本文提出 了大规模储能参与电网调频的双层控制策略,得到 以下结论。

1)针对大规模 BESS 参与电网调频,本文提出 了调频信号分配模式的切换时机判据,在阶跃负荷 扰动下能够很好地综合 ACE 信号分配模式和 ARR 信号分配模式的优点,兼顾调频前期减小最大频率 偏差和调频中后期缩短频率恢复时间的要求。

2)本文所提双层控制策略中的上层功率优化 分配层全面考虑了不同调频电源的多技术特征,发 挥了BESS响应速度快和机组调频容量足的优势, 以二次调频成本最小化为目标优化各调频电源出力 参考值,满足大规模BESS联合火电机组参与调频 过程中的经济性要求。同时,下层频率优化控制层 依据上层的优化结果,利用MPC实现了调频电源的 分布式动态控制,上下层之间递进优化,进一步提升 了调频效果。

后续将考虑可再生能源的调频能力,对含储能 的多区域多种调频资源的电网调频控制策略展开进 一步的研究。

本文研究得到浙江中新电力工程建设有限公司"以智能电网为核心的园区综合能源 系统及能源智慧化管理顶层设计研究"项目的资助,谨此致谢! 附录见本刊网络版(http://www.aeps-info.com/ aeps/ch/index.aspx),扫英文摘要后二维码可以阅读 网络全文。

## 参考文献

- [1] 胡泽春,罗浩成.大规模可再生能源接入背景下自动发电控制 研究现状与展望[J].电力系统自动化,2018,42(8):1-15.
  HU Zechun, LUO Haocheng. Research status and prospect of automatic generation control with integration of large-scale renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018,42(8):1-15.
- [2] 贾祺,严干贵,张善峰,等.多光伏发电参与电网频率调节的动态协调机理[J].电力系统自动化,2019,43(24):59-66.
  JIA Qi, YAN Gangui, ZHANG Shanfeng, et al. Dynamic coordination mechanism of grid frequency regulation with multiple photovoltaic generation units[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 59-66.
- [3] 杨家琪,喻洁,田宏杰,等.考虑新能源性能风险的调频辅助服务市场出清与调度策略[J].电力系统自动化,2020,44(8): 66-74.

YANG Jiaqi, YU Jie, TIAN Hongjie, et al. Clearing and scheduling strategy of frequency regulation ancillary service market considering performance risk of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 66-74.

[4] 贾燕冰,郑晋,陈浩,等.基于集合经验模态分解的火-储联合调 度调频储能容量优化配置[J].电网技术,2018,42(9):2930-2937.

JIA Yanbing, ZHENG Jin, CHEN Hao, et al. Capacity allocation optimization of energy storage in thermal-storage frequency regulation dispatch system based on EEMD[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2930-2937.

- [5] 虞临波,寇鹏,冯玉涛,等.风储联合发电系统参与频率响应的 模型预测控制策略[J].电力系统自动化,2019,43(12):36-43.
  YU Linbo, KOU Peng, FENG Yutao, et al. Model predictive control strategy for combined wind-storage system to participate in frequency response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 36-43.
- [6] 国家能源局江苏监管办公室.江苏电力辅助服务(调频)市场交易规则(征求意见稿)[EB/OL].[2019-12-25].http://jsb.nea.gov.cn/news/2019-12/20191225173450.htm.

Jiangsu Energy Regulatory Office of National Energy Administration of the People's Republic of China. Jiangsu power auxiliary service (frequency regulation) market trading rules (draft for comments) [EB/OL]. [2019-12-25]. http://jsb. nea.gov.cn/news/2019-12/20191225173450.htm.

- [7] XU Bolun, DVORKIN Y, KIRSCHEN D S, et al. A comparison of policies on the participation of storage in U.S. frequency regulation markets [C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), July 17-21, 2016, Boston, USA; 1-5.
- [8] 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.

[9] 路小俊,伊建伟,李炎.基于多目标网格自适应搜索算法的储能 系统参与AGC优化控制策略[J].电网技术,2019,43(6):2116-2124.

LU Xiaojun, YI Jianwei, LI Yan. Optimal control strategy of AGC with participation of energy storage system based on multiobjective mesh adaptive direct search algorithm [J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 2116-2124.

- [10] 李若,李欣然,谭庄熙,等.考虑储能电池参与二次调频的综合 控制策略[J].电力系统自动化,2018,42(8):74-82.
  LI Ruo, LI Xinran, TAN Zhuangxi, et al. Integrated control strategy considering energy storage battery participating in secondary frequency regulation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 74-82.
- [11] DATTA M, SENJYU T. Fuzzy control of distributed PV inverters/energy storage systems/electric vehicles for frequency regulation in a large power system [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1): 479-488.
- [12] CHENG Yunzhi, 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.
- [13] 李欣然,黄际元,陈远扬,等.基于灵敏度分析的储能电池参与 二次调频控制策略[J].电工技术学报,2017,32(12):224-233.
  LI Xinran, HUANG Jiyuan, CHEN Yuanyang, et al. Battery energy storage control strategy in secondary frequency regulation considering its action moment and depth [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(12): 224-233.
- [14] 胡泽春,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):5080-5087.
  HU Zechun, XIE Xu, ZHANG Fang, et al. Research on automatic generation control strategy incorporating energy storage resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5080-5087.
- [15]廖小兵,刘开培,乐健,等.基于双层模型预测结构的跨区域 AGC 机组协同控制策略[J].中国电机工程学报,2019, 39(16):4674-4685.

LIAO Xiaobing, LIU Kaipei, LE Jian, et al. Coordinated control strategy for AGC units across areas based on bi-level model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4674-4685.

- [16] JIN Chunlian, LU Ning, LU Shuai, 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] ZHAO Changhong, MALLADA E, LOW S, et al. A unified framework for frequency control and congestion management
   [C]// Power Systems Computation Conference (PSCC), June 20-24, 2016, Genoa, Italy.
- [18] ZHANG Xuan, LI Na, ANTONIS P. Achieving real-time economic dispatch in power networks via a saddle point design approach [C]// IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2015, Denver, USA.

- [19] LI Na, CHEN Lijun, ZHAO Changhong, et al. Connecting automatic generation control and economic dispatch from an optimization view[C]// American Control Conference, July 21, 2014, Denver, USA: 735-740.
- [20] BARRÉ A, DEGUILHEM B, GROLLEAU S, et al. A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications [J]. Journal of Power Sources, 2013, 241(11): 680-689.
- [21] NAMOR E, TORREGROSSA D, FABRIZIO S, et al. Assessment of battery ageing and implementation of an ageing aware control strategy for a load leveling application of a Lithium titanate battery energy storage system [C]// IEEE 17th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), June 27-30, 2016, Trondheim, Norway.
- [22] 张圣祺,袁蓓,徐青山,等.规模化储能参与下的电网二次调频 优化控制策略[J].电力自动化设备,2019,39(5):82-88. ZHANG Shengqi, YUAN Bei, XU Qingshan, et al. Optimal

control strategy of secondary frequency regulation for power grid with large-scale energy storages[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5): 82-88.

[23] 席裕庚,李德伟,林姝.模型预测控制——现状与挑战[J].自动 化学报,2013,39(3):222-236.

XI Yugeng, LI Dewei, LIN Shu. Model predictive control status and challenges[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(3): 222-236.

张舒鹏(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向:电网储 能调频、综合能源系统运行。E-mail:1043264292@qq.com

董树锋(1982—),男,通信作者,博士,副教授,主要研究 方向:输配一体化电网分析、配电网建模和分析。E-mail: dongshufeng@zju.edu.cn

徐成司(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向:综合能 源系统运行、配电网建模。E-mail:3140103128@zju.edu.cn

(编辑 施冬敏)

# Bi-level Control Strategy for Power Grid Frequency Regulation with Participation of Large-scale Energy Storage

ZHANG Shupeng<sup>1</sup>, DONG Shufeng<sup>1</sup>, XU Chengsi<sup>1</sup>, HAN Rongjie<sup>2</sup>, SHOU Ting<sup>2</sup>, LI Jianbin<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Hangzhou Xiaoshan Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 311200, China)

Abstract: When large-scale renewable energy such as wind power is integrated into power grid, the intermittency and fluctuation of its output characteristics bring problems such as insufficient frequency regulation capacity and unsatisfactory frequency regulation performance to power grid. Therefore, a bi-level control strategy for power grid frequency regulation with participation of large-scale energy storage is proposed. Firstly, a criterion for switching between area regulation requirement and area control error allocation modes is proposed based on the analysis in the complex frequency domain. Secondly, considering technical characteristics of different frequency regulation power sources comprehensively, a bi-level control strategy is proposed for the coordinated response to automatic generation control instructions with large-scale battery energy storage and thermal power generation units. In the upper layer, the economic distribution of power is realized based on model predictive control. Finally, the economics and effectiveness of the proposed strategy are verified by simulation.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2016YFB0901300).

Key words: large-scale energy storage; frequency regulation; allocation mode; cost function; model predictive control

