



电力系统自动化

Automation of Electric Power Systems

ISSN 1000-1026, CN 32-1180/TP

《电力系统自动化》网络首发论文

题目： 规模化储能参与电网调频的双层控制策略
作者： 张舒鹏，董树锋，徐成司，韩荣杰，寿挺，李建斌
收稿日期： 2020-03-12
网络首发日期： 2020-07-20
引用格式： 张舒鹏，董树锋，徐成司，韩荣杰，寿挺，李建斌. 规模化储能参与电网调频的双层控制策略[J/OL]. 电力系统自动化.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20200717.1718.012.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

规模化储能参与电网调频的双层控制策略

张舒鹏¹, 董树锋¹, 徐成司¹, 韩荣杰², 寿挺², 李建斌²

(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: 随着风电等可再生能源的大规模并网,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,文中提出一种规模化储能参与电网调频的双层控制策略。首先,针对规模化储能参与电网调频,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,提出规模化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,通过仿真对比验证了文中所提策略的经济性和有效性。

关键词: 规模化储能; 调频; 分配模式; 成本函数; 模型预测控制

0 引言

随着风电、光伏等可再生能源的大规模并网,其间歇性与不确定性的出力特性会给电网调频带来压力^[1]。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^[2-3]。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^[4-5]。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^[6-7],如《江苏电力辅助服务(调频)市场交易规则(征求意见稿)》^[6]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^[8-9]和基于区域控制误差(area control error, ACE)信号分配^[10-11]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。进一步地,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^[12]。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位置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,提出一种规模化储能参与电网

收稿日期: 2020-03-12; 修回日期: 2020-06-20。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0901300)。

调频的双层控制策略。首先,基于复频域分析确定规模化BESS参与调频时ACE信号分配和ARR信号分配这2种模式的切换时机。然后,提出规模化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 规模化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^[8-9]和基于ACE信号分配^[10-11]。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规模化BESS。本文通过复频域分析确定规模化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分配的规模化储能参与电网调频的频率响应模型如图1所示^[9]。

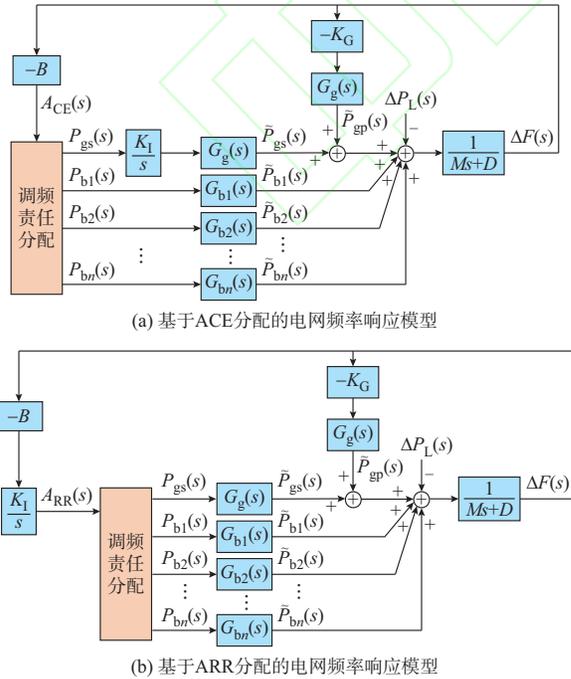


图1 基于ACE和基于ARR分配的电网频率响应模型
Fig. 1 Power grid frequency response model based on ACE and ARR allocation

图1中, $1/(Ms+D)$ 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 ($i=1, 2, \dots, n$),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; $\bar{P}_{gp}(s), \bar{P}_{gs}(s)$ 和 $\bar{P}_{bi}(s)$ 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 $A_{RR}(s)$ 分别为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:

$$\begin{cases} A_{CE}(s) = -B\Delta F(s) \\ (Ms+D)\Delta F(s) = \bar{P}_{gp}(s) + \bar{P}_{gs}(s) + \sum_{i=1}^n \bar{P}_{bi}(s) - \Delta P_L(s) \\ \bar{P}_{gp}(s) = -K_G G_g(s)\Delta F(s) \\ \bar{P}_{gs}(s) = P_{gs}(s) \frac{K_I}{s} G_g(s) \\ \bar{P}_{bi}(s) = P_{bi}(s) G_{bi}(s) \end{cases} \quad (1)$$

其中,火电机组和BESS传递函数模型^[9]为:

$$\begin{cases} G_g(s) = \frac{1 + F_{HP} T_{RH} s}{(1 + T_G s)(1 + T_{CH} s)(1 + T_{RH} s)} \\ G_{bi}(s) = \frac{1}{1 + T_p s} \end{cases} \quad (2)$$

式中: F_{HP} 为再热器的增益; T_{RH}, T_G 和 T_{CH} 分别为再热器时间常数、调速器时间常数和汽轮机时间常数; 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:

$$A_{CE}(s) = -B \cdot \frac{P_{gs}(s) \frac{K_I}{s} G_g(s) + \sum_{i=1}^n P_{bi}(s) G_{bi}(s) - 1}{K_G G_g(s) + Ms + D} \quad (3)$$

同样地,忽略死区和限幅,由图1(b)可知:

$$\begin{cases} A_{RR}(s) = -B \frac{K_I}{s} \Delta F(s) \\ (Ms+D)\Delta F(s) = \bar{P}_{gp}(s) + \bar{P}_{gs}(s) + \sum_{i=1}^n \bar{P}_{bi}(s) - \Delta P_L(s) \\ \bar{P}_{gp}(s) = -K_G G_g(s)\Delta F(s) \\ \bar{P}_{gs}(s) = P_{gs}(s) G_g(s) \\ \bar{P}_{bi}(s) = P_{bi}(s) G_{bi}(s) \end{cases} \quad (4)$$

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:

$$A_{RR}(s) = -B \frac{K_I}{s} \frac{P_{gs}(s)G_g(s) + \sum_{i=1}^n P_{bi}(s)G_{bi}(s) - 1}{K_G G_g(s) + Ms + D} \quad (5)$$

当调频责任分配模块确定了火电机组和BESS的出力后, $A_{CE}(s)$ 和 $A_{RR}(s)$ 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, $A_{RR}(s)$ 的幅值一开始会由于积分环节的缓冲作用而小于 $A_{CE}(s)$,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, $A_{CE}(s)$ 的幅值会逐渐小于经过积分环节后的 $A_{RR}(s)$,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 $A_{CE}(s)$ 和 $A_{RR}(s)$ 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。

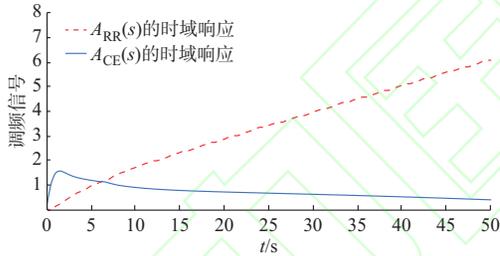


图2 $A_{RR}(s)$ 和 $A_{CE}(s)$ 的时域响应曲线
Fig. 2 Time domain response curves of $A_{RR}(s)$ and $A_{CE}(s)$

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_T 的过零时刻。若 S_T 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。

$$S_T = A_{RR}(s) - A_{CE}(s) \quad (6)$$

2 规模化BESS和火电机组协调参与AGC的双层控制策略

2.1 双层控制框架

针对规模化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,提高调频的经济性和有效性,本文在考虑不同BESS的技术特征的基础上,提出规模化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^[16]。通过上下两层之间的递进优化,实现电网频率调节中规模化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^[17]。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:

$$C_{g,k} = a_0 P_{gs,k}^2 \quad (7)$$

式中: $C_{g,k}$ 为火电机组在 k 时刻的二次调频成本; $P_{gs,k}$ 为火电机组在 k 时刻承担的二次调频责任; a_0 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^[20]和高功率^[21]导致的电池老化和寿命衰减。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:

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

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:

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

式中： $S_{i,k-1}$ 为第 i 个 BESS 在 $k-1$ 时刻的 SOC； η_i 为第 i 个 BESS 的充放电效率； Δt 为采样时间间隔； S_{bi} 为第 i 个 BESS 的容量； $P_{bi,k}$ 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 $P_{bi,k}$ 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^[22]和约束条件为：

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

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

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 $P_{agc,k}$ 。此时，调频 k 时刻上层功率经济分配层的目标函数转变为：

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

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^[23]。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：

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

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。

$$\begin{aligned} X &= [\Delta F \quad A_{RR} \quad \bar{P}_{gp} \quad \bar{P}_{gs} \quad \bar{P}_{b1} \quad \bar{P}_{b2} \quad \dots \quad \bar{P}_{bn}]^T \\ U &= [P_{gs} \quad P_{b1} \quad P_{b2} \quad \dots \quad P_{bn}]^T \\ W &= [\Delta P_L] \\ Y &= [\Delta F \quad \bar{P}_{gs} \quad \bar{P}_{b1} \quad \bar{P}_{b2} \quad \dots \quad \bar{P}_{bn}]^T \end{aligned}$$

以 T_s 为采样周期将式(13)离散化得到系统的离散状态空间模型：

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

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

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：

$$\begin{aligned} \min J_k = & \sum_{j=1}^p (Y(k+j|k) - Y_r(k+j))^T Q (Y(k+j) - \\ & Y_r(k+j)) + \sum_{i=1}^m U^T(k+i-1|k) R U(k+i-1|k) \end{aligned} \quad (15)$$

式中： Q 和 R 分别为输出加权矩阵和控制加权矩阵； $Y(k+j|k)$ 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_k 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^[23]，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，本文提出的规模化 BESS 联合火电机组参与调频时的控制策略如图 3 所示。

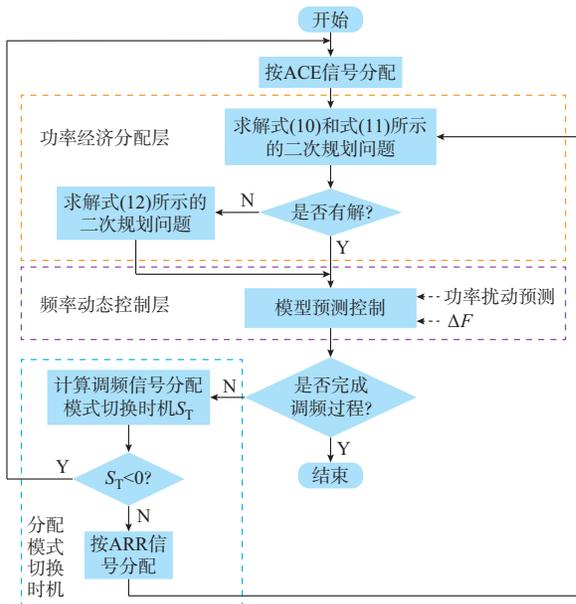


图3 本文所提控制策略流程图
Fig. 3 Flow chart of proposed control strategy in this paper

3 仿真分析

3.1 仿真条件

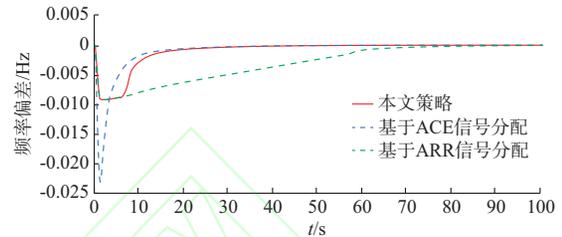
在MATLAB/Simulink平台中建立如图1所示的系统频率响应模型,调频信号分配模式可进行切换。模型中再热式火电机组的额定功率为750 MW,机组调频备用容量为 $-60\sim 60$ MW,机组爬坡率为22.5 MW/min,机组功率偏移成本系数为3。3个BESS(分别记为BESS1, BESS2, BESS3)的额定功率和容量分别为40 MW/40 MW·h、30 MW/20 MW·h、20 MW/5 MW·h;充放电效率分别为0.95, 0.8, 0.9; BESS功率成本系数分别为1, 0.7, 0.5; SOC偏移成本系数分别为0.05, 0.035, 0.2。模型以100 MW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

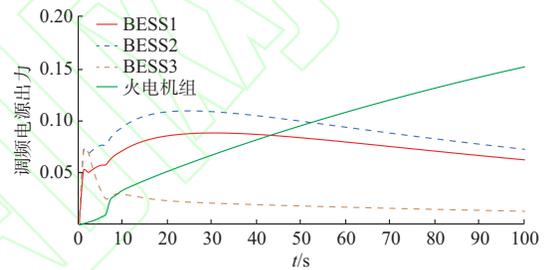
对系统施加标幺值为0.3的阶跃负荷扰动,仿真时长为100 s。将双层控制策略分别采用基于ARR信号和基于ACE信号分配模式与本文调频信号分配模式进行对比仿真,仿真结果如图4所示,表1为调频评价指标对比。

从图4(a)和表1可以看出,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

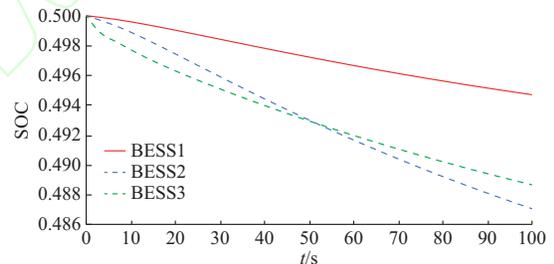
系统最大频率偏差减少了59.5%,频率偏差均方根值减少了23.3%,这是因为调频前期基于ACE信号分配减小了系统暂态频率偏差。相较于采用基于ACE信号分配模式,本文策略下的系统频率偏差均方根值减少了43.2%,这是因为调频中后期切换为基于ARR信号分配缩短了系统频率恢复时间。



(a) 三种信号分配模式下的系统频率偏差曲线



(b) 调频电源二次调频出力曲线



(c) BESS的荷电状态曲线

图4 系统动态响应仿真结果

Fig. 4 Simulation results of system dynamic responses

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 index 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	-9.03×10^{-3}	2.388×10^{-3}	34
基于ARR信号分配	-2.23×10^{-2}	3.112×10^{-3}	32
基于ACE信号分配	-9.03×10^{-3}	4.204×10^{-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规模化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,BESS3优先降低出力。由于BESS2的调频成本系数小于BESS1且其容量足够,因此BESS2的出力始终高于BESS1。仿真过程中,时间为6s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100s。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^[12](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不同策略下的系统频率偏差曲线。表2为调频评价指标对比。

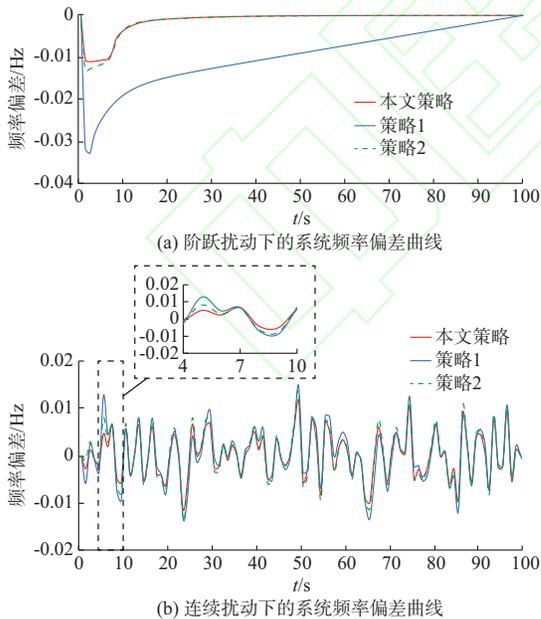


图5 阶跃负荷扰动和连续负荷扰动下的系统频率偏差曲线

Fig. 5 Frequency deviation curves under step load disturbance and continuous load disturbance

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。

表2 3种策略下的系统调频评价指标
Table 2 System frequency regulation evaluation index 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	-1.10×10^{-2}	2.940×10^{-3}	6.570
	策略1	-3.27×10^{-2}	1.184×10^{-2}	
	策略2	-1.28×10^{-2}	3.252×10^{-3}	7.615
连续扰动	本文策略	1.15×10^{-2}	4.757×10^{-3}	0.014
	策略1	1.47×10^{-2}	5.646×10^{-3}	
	策略2	-1.37×10^{-2}	5.488×10^{-3}	0.021

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,提升规模化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,本文提出了规模化储能参与电网调频的双层控制策略,得到以下结论。

1)针对规模化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)本文提出的双层控制策略中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,满足规模化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> (in Chinese).
- [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 multi-objective 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, YUE 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] XUAN Zhang, NA Li, 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] NA Li, 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 Shupeng¹, DONG Shufeng¹, XU Chengsi¹, HAN Rongjie², SHOU Ting², LI Jianbin²

(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: With the integration of large-scale renewable energy such as wind power into power grid, the intermittency and fluctuation would bring problems such as insufficient frequency regulation capacity and unsatisfactory frequency regulation effect to power grid. Therefore, a bi-level control strategy for power grid frequency regulation with participation of large-scale energy storage is proposed. Firstly, for large-scale energy storage participating in frequency regulation, a criterion for switching time of area regulation requirement allocation mode and area control error allocation mode is proposed based on the analysis of complex frequency domain. Secondly, comprehensively considering the technical characteristics of different power sources for frequency regulation, 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 unit. In the upper layer, the economic distribution of power is realized based on the frequency regulation cost function of power sources, and in the lower layer, distributed optimal control of frequency 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



附录 A

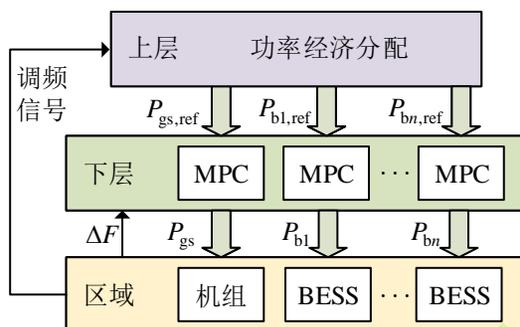


图 A1 双层控制框图

Fig. A1 Bi-level control framework

表 A1 仿真模型参数

Table A1 Parameters of simulation model

参数	设定值	参数	设定值
M	8	T_G	0.08
D	1	T_{CH}	0.3
T_p	0.02	K_G	20
F_{HP}	0.5	B	21
T_{RH}	10	K_I	0.15