[电池储能]

电池储能参与电网系统调频的控制技术

文/王聪[1]　黄柳[2]
1. 东方电气（成都）氢能科技有限公司；2. 中控风能控制技术（北京）有限公司

在传统电网系统负荷频率控制原理基础上：分析了电池储能系统参与负荷频率控制的基本原理，构建了调速器、汽轮机、发电机–负荷以及电池储能系统传递函数模型，建立电池储能系统参与电网频率调节的动态响应模型。针对电池储能系统的特性，对模型进行适当简化，并提出一种基于电池保护前提的电网负荷频率控制的双层分布控制策略。

近年来，“双碳”战略与电力体制革新越来越深入发展，越来越多新能源电力并入电网，传统调频机组频率的稳定性更易受到影响，急需新的调频控制策略来应对。

电池储能系统（BESS）能够快速充电放电，具备快速响应电网调节的能力，在新形势下区域电网调频性能方面能够发挥关键作用。当前，关于储能参与电力调频控制的研究正在如火如荼开展，但如何进一步提高储能系统参与电网频率调节的响应并应用于实际等方面的研究还不够深入。基于此，本文在分析储能参与电力系统调频的运行机理基础上，建立电池储能系统参与电网调频特性的仿真模型，并提出控制优化策略。模型仿真实验表明，控制策略实用高效，可为研究电池储能参与电网调频的控制策略及实际应用提供一定借鉴。

电力系统频率控制模型建立

1. 传统频率控制过程

电网频率调节分为一次调频和二次调频。当电网的负荷也就是有功功率平衡状态被打破时，机组调速器一次调频系统开始动作，根据频率偏差控制调节汽门的开度来改变机组有功功率。一次调频控制需要对频率扰动快速响应，通常响应时间为秒级，但由于发电机的特性很难做到无差调节，就需要二次调频进一步对比功率信号做出修正。机组调频控制框图如图1所示。

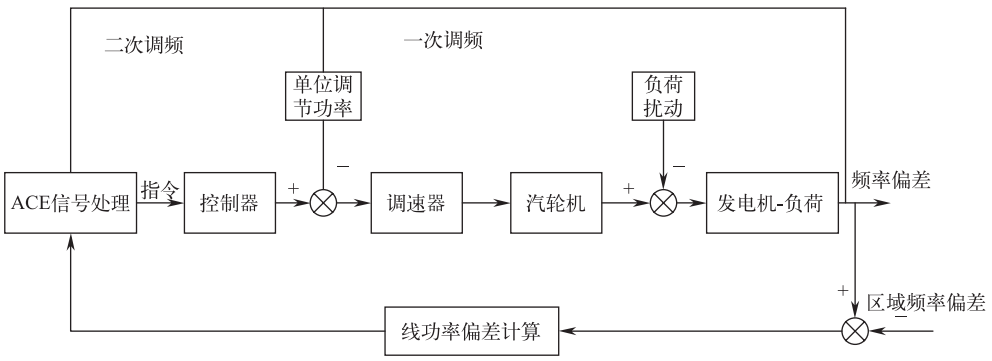

图1　电网调控控制基本原理图

2. 等效模型建立

传统频率调节过程中，因发电机升降功率变化是个缓慢的过程，而有储能系统参与后，可以快速控制有功功率，从而使得机组快速响应调节。典型的调频控制模型主要包含调速器模型、汽轮机模型和发电机-负荷模型等几大模块，其传递函数以及等效模型非常明确，因此本文主要关注电池储能系统等效模型。

电池储能系统模型主要是从电池本身充电和放电过程进行等效，参考通用做法，本文采取一阶惯性环节函数来等效。

$$\begin{cases} G_{\mathrm{B}}(s)=\dfrac{1}{1+sT_{\mathrm{B}}} \\ S(t)=S_0-\dfrac{1}{E_{\mathrm{B}}}\displaystyle\int_0^t P_{\mathrm{B}}(t)\mathrm{d}t \end{cases} \tag{1}$$

式中，T_{B}为电池储能系统出力的时间响应常数；$S(t)$表示储能系统剩余电量和额定容量的比值；S_0为储能系统的初始状态；E_{B}为储能额定量；$P_{\mathrm{B}}(t)$为储能系统的放电特性函数。

根据上述等效模型，得到储能系统参与电网负荷频率控制模型，如图2所示。

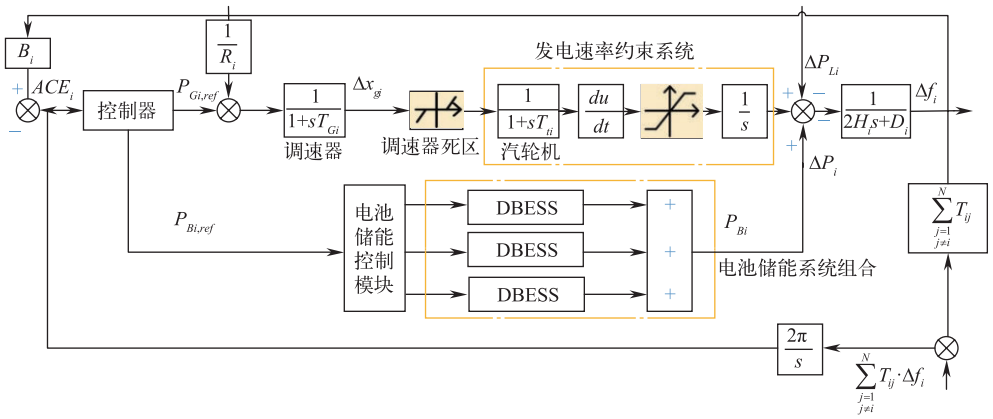

图2　电池储能系统参与负荷频率控制模型

电池储能参与电网调频控制策略

1. 控制框架搭建

本文基于电力系统调频需求、电池储能系统的快速响应优势以及多个储能系统之间协调特性等因素，提出一种双层分布调频控制策略，其控制结构如图3所示。

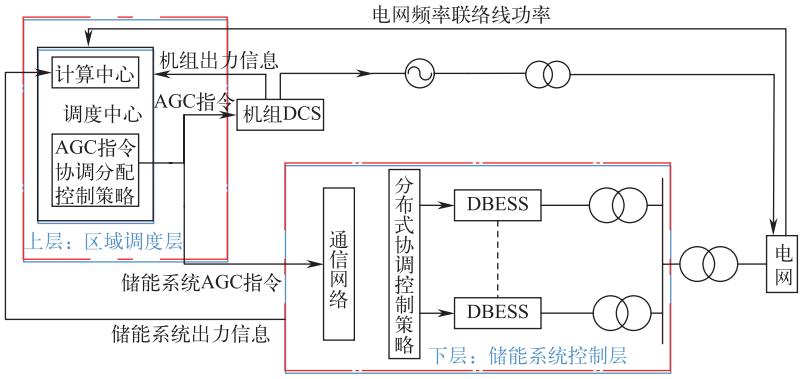

图3　双层协调频率控制结构图

图3中，上层（区域调度层）主要完成调频信号在传统机组和电池储能系统间的协调分配；下层（储能系统控制层）主要完成多个分布式储能系统参与调频的通信控制。

2. 区域调度层控制策略

区域调度层作用是根据ACE信号划分好调节区间，通过协调控制策略优化给出各调节区参考出力数据，如图4所示。

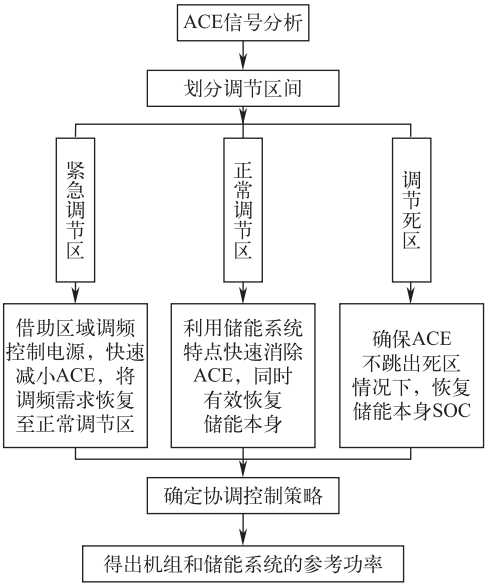

图4　区域调度层结构图

（1）调节死区和紧急调节区控制策略

当ACE信号落于机组调节死区时，系统整体受到的外来扰动较小，只需将电池储能系统的SOC尽快恢复至额定状态。

当ACE信号落与紧急调节区，储能系统参考出力功率为

$$P_{B,ref}=\begin{cases}\max(\Delta P_{AGC},\Delta P_{B,maxc}),(P_{B,ref}\leqslant 0)\\ \min(\Delta P_{AGC},\Delta P_{B,maxd}),(P_{B,ref}>0)\end{cases} \tag{2}$$

式中，$\triangle P_{AGC}$为电网系统调频控制需求功率；$\triangle P_{B,maxc}$和$\triangle P_{B,maxc}$分别为储能系统的最大充电和放电功率，其数值大于0为放电，小于0则为充电。

（2）正常调节区控制策略

当ACE信号落于正常调节区内，控制思路为：当储能系统SOC处在理想状态时，储能系统优先响应调频信号；当储能系统处于非理想状态，并且当前调频的功率需求有利于储能系统SOC恢复至理想状态时，由储能系统按照最大充放电功率参与调节；否则出于保护系统考虑，储能系统不参与本次调频控制，公式为

$$P_{B,maxc}=\begin{cases}P_m,\mathrm{SOC}\leqslant \mathrm{SOC}_1\\ \dfrac{P_m}{1-\frac{15(\mathrm{SOC}_{high}-\mathrm{SOC})}{(\mathrm{SOC}_{high}-\mathrm{SOC})}}+1,\mathrm{SOC}_1<\mathrm{SOC}<\mathrm{SOC}_{high}\\ 100P_m e\\ 0,\mathrm{SOC}\leqslant \mathrm{SOC}_{high}\end{cases} \tag{3}$$

$$P_{B,maxd}=\begin{cases}P_m,\mathrm{SOC}\geqslant \mathrm{SOC}_0\\ \dfrac{P_m}{1-\frac{15(\mathrm{SOC}_{high}-\mathrm{SOC})}{(\mathrm{SOC}_{high}-\mathrm{SOC})}}+1,\mathrm{SOC}_{low}\leqslant \mathrm{SOC}<\mathrm{SOC}_0\\ 100P_m e\\ 0,\mathrm{SOC}\leqslant \mathrm{SOC}_{low}\end{cases} \tag{4}$$

式中，SOC_0和SOC_1分别为判断电池储能系统是否处在理想状态的上下判据因子。

3. 储能系统层控制策略

在区域控制层分析给出电池储能系统是否参与频率调节以及参考功率后，下一步就是各分布储能系统之间的协调控制，本文提出一种基于分布一致性算法的协调控制措施，旨在完成调频控制基础上降低系统运行成本。定义储能调频运行的成本函数为

$$Y_{1Bi,k}=a_i P_{Bi,k}^2+b_i E_{BN,i}^2(S_{bi,k}-S_{bi})^2 \tag{5}$$

式中，a_i和b_i分别表示第i个分布储能系统调频运行的成本收到系统即时功率影响的权重因子；$P_{Bi,k}$是第i个系统在k时刻的调节控制出力；$E_{BN,i}$是第i储能系统的额定储存容量；$S_{bi,k}$是第i储能系统在k时刻的荷电状态情况；S_{bi}则为储能系统的最佳荷电状态。

引入电池寿命指标DOD（放电深度），该数值越大表示损耗也大，计算式为

$$\begin{cases}\mathrm{DOD}_{Bi,k}=\dfrac{(E_{BN,i}-E_{0,i})+P_{Bi,k}\Delta t}{E_{BN,i}}\\ \delta=\lambda_1\mathrm{DOD}^{-\lambda_2}\end{cases} \tag{6}$$

式中，$E_{0,i}$为第i个分布储能系统的初始储能容量；δ为储能电池的循环寿命；λ_1、λ_2为寿命计算系数；$\triangle t$为统计的时间间隔。

拟定第i个储能系统的初始投资为$C_{0,i}$，那么当系统在恒电压恒电流状态运行时，其输出电量与DOD成正比，据此可得与输出电量相关的电池损耗函数

$$Y_{2Bi,k}=\frac{C_{0,i}}{\lambda_1 E_{BN,i}^{\lambda_2}}E_{Bi,k}^{\lambda_2} \tag{7}$$

式中，$E_{Bi,k}$为第i个系统在k时刻的电量输出值；$E_{Bi,N}$为系统额定容量。

因此，储能系统参与调频的综合成本为

$$Y_{Bi,k}=Y_{1Bi,k}+Y_{2Bi,k} \tag{8}$$

至此，电池分布储能系统参与电网调频控制问题转化为公式的最小值问题，为此引入拉格朗日方程求取最优解。方程表达式为

$$l(P_{Bi,k})=\sum_{i=1}^{N}C_{Bi,k}+(\sum_{i=1}^{N}P_{Bi,k}-P_{B,ref}) \tag{9}$$

该方程的最优解满足以下条件

$$\begin{cases}\dfrac{\partial l_i}{\partial P_{Bi,k}}=\dfrac{\partial C_{Bi,k}}{\partial P_{Bi,k}}-\lambda=0\\ \dfrac{\partial l_i}{\partial \lambda}=\sum_{i=1}^{N}P_{Bi,k}-P_{B,ref}=0\end{cases} \tag{10}$$

考虑到电池储能系统的复杂性，将储能系统调频运行成本函数对调频控制功率的偏导数作为一致性变量，根据分布一致性算法理论设计变量迭代更新步骤，达到变量最终收敛[6]。

调频控制Simulink仿真分析

在Simulink仿真环境中按照图3结构建立电池分布储能系统参与电网系统频率控制模型。设置各分布电池储能系统的初始SOC以及额定SOC系数为0.6，各系统初始投资成本为3 000元/（kW·h），设置收敛准确度系数为0.01。仿真设置4组分布电池储能系统参与频率调节，各系统基本参数见表1。

表1　四组分布电池储能系统基本参数

编号	功率/MW	额定容量/（MW·h）	充/放电效率	储能时间常数	功率成本系数	SOC偏移成本系数
1	±15	3.5	0.90/0.90	0.01	0.90	0.65
2	±14	3.0	0.95/0.90	0.01	0.90	0.73
3	±13	2.5	0.90/0.85	0.01	0.90	0.86
4	±12	2.2	0.90/0.90	0.01	0.85	1.35

将上述模型与传统电网控制模型对比。模拟机组正常运行工况下受到阶跃负荷扰动，即在系统开始后5 s时刻施加0.2 pu（标幺值）的阶跃负荷扰动，对比两组调频模型的响应输出情况。

仿真结果如图5～图7所示。

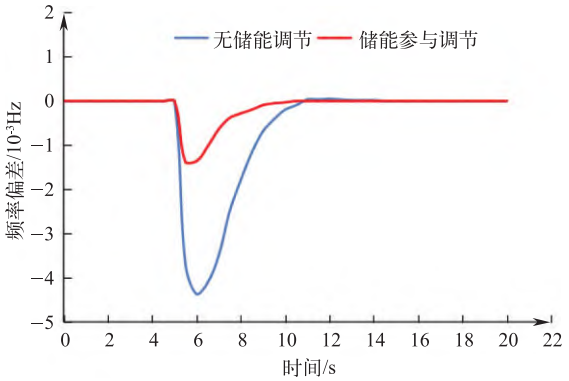

图5　频率偏差曲线对比

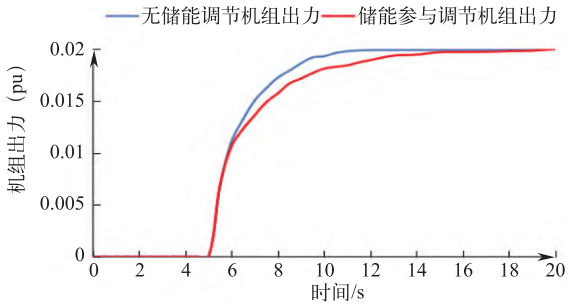

图6　出力对比图

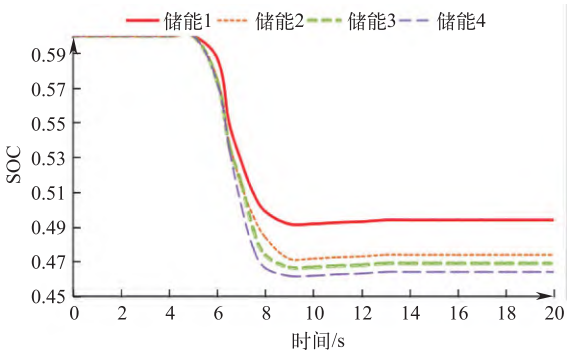

图7　四组储能系统SOC变化情况图

从上述曲线可得出，在阶跃负荷扰动情况下，有电池储能系统参与的调频无论在响应时间、滞后幅度等方面要明显优于无电池储能系统参与的调节系统。此外从图7可看出，在整改调节过程中四组电池储能系统持续出力直至调节结束，期间未出现某组储能系统SOC恶化而不出力现象，表明协调控制策略能够有效控制电池储能系统出力参与调节，进而优化传统机组调频响应。

结束语

针对调频控制策略各分布储能系统如何参与调频出力问题提出一种双层分布控制策略，根据分布一致性算法理论搭建了一致性变量收敛程序并通过Simulink对上述模型进行仿真验证，得出以下结论。

1）电池储能系统参与电网调频控制是传统电网系统调频控制的有力补充。在区域控制层中要考虑电池系统本身特性，避免调节过程中电池SOC超限对电网产生二次扰动。

2）仿真结果表明，在阶跃负荷扰动下，双层分布控制策略，有电池储能系统参与的调节过程响应时间更短，调节效率更高。**EA**

（收稿日期：2025-03-06）