[文章编号] 1003－4684(2025)01-0025-07

综合储能协同控制方法在一次调频中的应用

桂 玥，赵熙临

（湖北工业大学电气与电子工程学院，湖北 武汉 430068）

[摘 要] 针对不同储能类型运行成本和效率差异性的问题，以蓄电池和超级电容为例，提出一种综合储能协同控制方法用于电网频率控制，期望在提升调频效果的同时满足经济性要求。首先，根据超级电容和蓄电池自身特性，分别采用自适应控制和变系数下垂控制方式进行输出有功调整；然后，基于全寿命周期成本计算两种储能的调频效益，并据此来优化其容量配置；在此基础上，设计调频所需功率分配机制，根据超级电容和蓄电池的剩余调频能力，进行调频任务分配。最后，通过 Matlab/Simulink 进行仿真验证，结果表明所提方法在电网调频中的经济性和有效性。

[关键词] 综合储能；协同控制；一次调频；荷电状态

[中图分类号] TM71 [文献标识码] A

大比例火力发电带来的环境问题，使得新能源发电在电网中占比不断提升[1-2]。而以风电、光伏为代表的新能源具有较强的随机性，其渗透率的提高又会导致电力系统相对备用容量和相对转动惯量降低，对电网的稳定运行造成负面影响[3]。在此背景下，由于储能可较好弥补新能源发电对电网调频造成的不良影响，在一次调频领域得到广泛关注[4-5]。

经过近年来的研究和实践，储能参与电网调频的控制方法已趋近成熟[6-7]，然而蓄电池充放电深度与电池使用寿命密切相关，较高的充放电深度和高频次的充放电切换会降低其使用寿命[8-9]。因此，采取何种控制方式，使电池荷电状态(state of change，SOC)能够维持在合适区间以降低其运行损耗是当下研究的热点问题。文献[10]根据复频域灵敏度原理对电网频率特性进行了分析，提出储能的综合控制模式，将虚拟惯性和虚拟下垂进行结合，并确定合适的动作时机。文献[11]提出一种储能电量持续管理策略，将电池 SOC 划分为多个区间，不同区间内使用不同的控制方式，使得电池 SOC 保持在合适区间内，提高了 SOC 保持率，保证了电池的调频能力。文献[12]采用双电池系统，使用两个等容量的锂电池分别承担充电与放电任务，来减少电池充放电次数，但仍局限于单一类型电池，没有充分发挥具有不同功率特性电池的互补作用。目前多数储能在一次调频中的研究仅针对单一储能进行考量，在调频过程中由于负荷的随机性导致电池频繁地进行充/放电状态切换，增加其寿命损耗。

超级电容作为应用较为广泛的功率型储能设备，具有较强的瞬时大功率输出特性，响应时间和功率密度特性均强于传统电池，且循环寿命较长，但成本较高，限制了其应用规模[13]。如果能将超级电容和传统蓄电池结合，利用彼此特性进行互补运行，能有效解决上述问题。目前较为常见的蓄电池和超级电容协同动作方式是由超级电容承担高频信号，蓄电池承担低频信号[14]。然而电网调频过程中，分解后的 ACE 信号以零点为中心呈正态分布，低频功率波动会使蓄电池频繁切换充放电状态，降低电池使用寿命，未能达到降低运行成本的目的。如何解决蓄电池的使用损耗仍是目前待研究的问题。

本文提出了一种包含蓄电池和超级电容的综合储能参与电网一次调频的协同控制策略，拟根据两种不同类型储能设备的运行和功能特点，进行协同运行策略的设计，期望获得更好的调频效果和经济性。

1 综合储能模型及特征分析

1.1 综合储能类型

在目前广泛应用的储能设备中，超级电容功率密度大、响应速度快、使用寿命长，能够在极短的时间内输出大量能量，但无法长时间提供功率支撑；蓄

[收稿日期] 2022－12－14

[基金项目] 国家自然科学基金(61603127)

[第一作者] 桂 玥(1999－)，女，湖北武汉人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为新能源发电。

[通信作者] 赵熙临(1969－)，男，湖北武汉人，工学博士，湖北工业大学教授，研究方向为系统自动发电控制。

电池能量密度大、充放电时间长，但功率密度小、循环使用寿命较低。相关参数如表 1 所示。

表 1 蓄电池和超级电容器相关参数

储能类型	响应时间	持续时间	功率密度/(W·kg^{-1})	能量密度/(Wh·kg^{-1})	循环/次
蓄电池	s 级	min～h 级	120～210	30～90	2000～5000
超级电容器	ms 级	s 级	500～5000	2.5～15	＞100000

根据超级电容和蓄电池各自特征，为获得更好的调频效果，在频率变化前期使用超级电容器，快速平抑系统功率波动；在频率变化后期使用蓄电池，来提供持续性功率支撑。有研究对蓄电池及超级电容等效模型进行电路分析及推演，证实等效模型能准确体现储能的充放电特征，并将其应用于电网调频[15-16]。

1.2 荷电状态及充放电深度

电池荷电状态在一定程度上可表示其剩余调频能力的大小，在电池工作过程中需考虑电池荷电状态。超级电容和蓄电池 SOC 计算方式相同，其表达式为：

$$\mathrm{SOC}_{t+\Delta t}=\mathrm{SOC}_t+\frac{\int_t^{t+\Delta t}\Delta P_E\,\mathrm{d}t}{C_E} \tag{1}$$

式中：$\mathrm{SOC}_{t+\Delta t}$、$\mathrm{SOC}_t$、$\Delta P_{\mathrm{E}}$、$C_{\mathrm{E}}$分别为电池放电 Δt 时刻后荷电状态、电池 t 时刻荷电状态、电池输出功率、电池额定容量。

电池 SOC 在工作时需满足下式条件：

$$\begin{cases}\max(\mathrm{SOC}_{t+\Delta t})\leqslant \mathrm{SOC}_{\max}\\ \min(\mathrm{SOC}_{t+\Delta t})\geqslant \mathrm{SOC}_{\min}\end{cases} \tag{2}$$

式中：$\mathrm{SOC}_{\max}$、$\mathrm{SOC}_{\min}$分别为电池 SOC 约束上、下限。

除约束条件外，电池循环使用次数存在限制，不同充放电深度下对应的循环寿命不同，因此需考虑充放电深度对电池的影响。其表达式为：

$$H_D=\mathrm{SOC}_{t+\Delta t}-\mathrm{SOC}_t \tag{3}$$

由文献[17]经函数拟合后可得循环寿命与放电深度的四阶函数关系：

$$N_E=-3278H_D^4-5H_D^3+12823H_D^2-14122H_D+5112 \tag{4}$$

2 系统结构图

2.1 储能辅助调频策略

当综合储能作为辅助设备接入电网参与一次调频时，系统拓扑结构如图 1 所示。

超级电容和蓄电池通过 DC/AC 变流器在交流侧并联，经过功率变换系统(Power Converter System，PCS)、升压变压器接入电厂母线，变压后接入电网。

当负荷扰动发生时，系统频率产生偏差，发电机组根据接收到的一次调频指令和协调控制器发出的

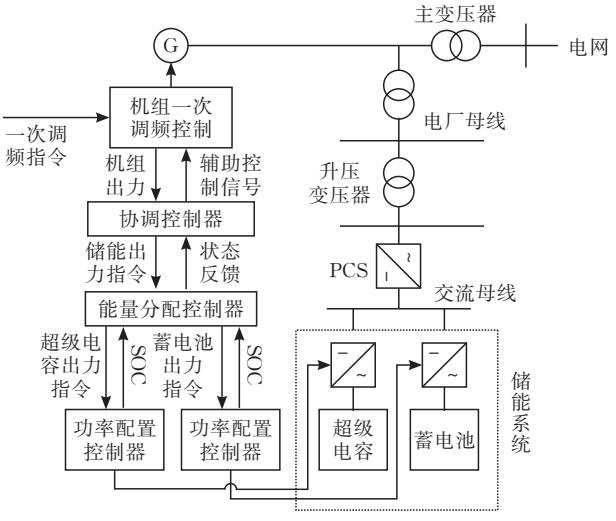


图 1 含综合储能系统拓扑结构

辅助控制信号调整机组出力，协调控制器依据一次调频指令、机组出力及储能系统状态反馈得到储能出力指令信号。随后，储能设备动作，完成一次调频。

2.2 储能辅助调频系统模型

当综合储能参与电网调频时，其系统模型如图 2 所示，图中传统发电机组模块中各环节数学模型详见文献[18]，SC 为超级电容，Battery 为蓄电池，k_1为超级电容功率分配比例系数，k_2为蓄电池功率分配比例系数。

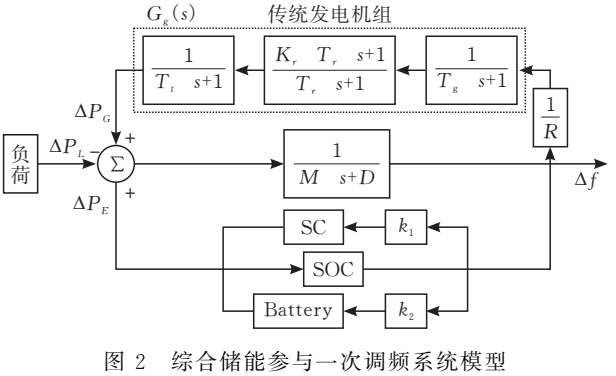


图 2 综合储能参与一次调频系统模型

其中，电网频率偏差为：

$$\dot{\Delta f}=-\frac{D}{M}\Delta f+\frac{1}{M}(\Delta P_G+\Delta P_E-\Delta P_L)+\frac{1}{T_g}\Delta P_C \tag{5}$$

式中：Δf 为系统频率偏差；ΔP_{L}为系统所接负荷扰动；ΔP_{G}为系统发电机组提供功率；ΔP_{E}为系统综合储能输出功率；ΔP_{C}为火电机组控制器信号增量。

传统发电机组在一次调频中的输出功率为：

$$\Delta P_G = -\frac{1}{R}G_g(s)\,\Delta f \tag{6}$$

式中：$G_g(s)$为图 3 中传统发电机组传递函数。

综合储能在一次调频中的输出功率

$$\Delta P_E = \Delta P_B + \Delta P_S \tag{7}$$

式中：ΔP_B为蓄电池输出功率；ΔP_S为超级电容器输出功率。

系统各参数具体描述如表 2 所示。

表 2　电力系统变量及参数

参数，变量	含义	单位	参数	物理意义	单位
T_g	调速器时间常数	s	R	发电机频率因子	p.u./Hz
K_r	再热系数	—	ΔP_L	负荷扰动	p.u.
T_r	再热时间常数	s	ΔP_G	传统发电机组输出功率	p.u.
T_t	汽容时间常数	s	ΔP_E	储能电池输出功率	p.u.
M	发动机转动惯量	kg·m^2	Δf	系统频率偏差	Hz
D	负荷阻尼系数	—	SOC	储能设备荷电状态	—

3　综合储能协同控制策略及评价指标

3.1　协同控制策略设计

综合储能参与调频过程中，当系统出现负荷扰动时，能量分配控制器根据储能处理指令及超级电容状态反馈判断超级电容能否独自承担调频任务。若可以，则超级电容动作，蓄电池不动作；若不能，则对超级电容和蓄电池进行调频能量分配。功率控制器接收到动作信号后，根据蓄电池的 SOC 反馈信息，确定蓄电池出力大小。

当超级电容和蓄电池均参与系统调频时，系统电源有功功率曲线如图 3 所示。

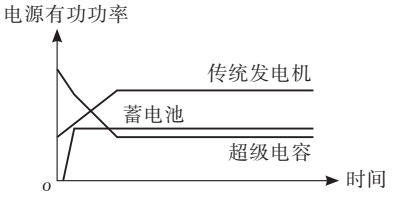


图 3　超级电容、蓄电池参与系统一次调频功率曲线

由于传统发电机组难以平抑负荷带来的波动，会产生频率偏差。根据系统频率的变化确定储能系统所需输出功率：

$$\Delta P_{req} = -K \cdot \Delta f \tag{8}$$

式中：K 表示系统恒功率特性，因默认储能设备输出功率为正，所以式中以负号连接。

当超级电容剩余能量满足调频需求时，即

$$C_{N_s} \cdot \mathrm{SOC}_s \geqslant \int_{t_0}^{t_s} \Delta P_{req}\,\mathrm{d}t \tag{9}$$

超级电容动作，蓄电池不动作。式中：C_{NS}为超级电容总容量；SOC_S为超级电容 SOC 值；t_0为超级电容动作起始时间；t_s为超级电容动作结束时间。

当超级电容剩余能量不满足调频需求时，即

$$C_{N_s} \cdot \mathrm{SOC}_s < \int_{t_0}^{t_s} \Delta P_{req}\,\mathrm{d}t \tag{10}$$

需要蓄电池参与以补充功率缺额，在频率变化后期加入与超级电容器共同参与调频。同时考虑到超级电容及蓄电池荷电状态和额定容量的不同，设计二者输出功率

$$\dot{P}_i = k_i\left(\Delta P_{Req} - \sum\nolimits_{i=1}^{n} P_{i,t}\right) \tag{11}$$

当系统出现正向扰动，即电池需输出功率时，

$$k_i = \frac{C_i \cdot (\mathrm{SOC}_{i,t} - \mathrm{SOC}_{\min})}{\sum_{i=1}^{n} C_i \cdot (\mathrm{SOC}_{i,t} - \mathrm{SOC}_{\min})} \tag{12}$$

式中：C_1为超级电容容量；$\mathrm{SOC}_{1,t}$为 t 时刻超级电容 SOC；C_2为蓄电池容量；$\mathrm{SOC}_{2,t}$为 t 时刻蓄电池 SOC。

当系统出现负向扰动，即电池需充电时，

$$k_i = \frac{C_i \cdot (\mathrm{SOC}_{\max} - \mathrm{SOC}_{i,t})}{\sum_{i=1}^{n} C_i \cdot (\mathrm{SOC}_{\max} - \mathrm{SOC}_{i,t})} \tag{13}$$

3.2　储能输出控制方法

虚拟惯性和虚拟下垂作为目前广泛使用的储能参与一次调频的出力控制方式，有很好的系统频率波动抑制作用。其中，虚拟惯性控制可在频率变化初期有效抑制频率变化，后期作用效果较小；虚拟下垂控制在频率变化前期作用效果较小，后期可提供有效功率支撑，减小频率稳态偏差。

因此，根据二者各自的优势，对超级电容采用虚拟惯性和虚拟下垂综合的自适应控制策略，在频率变化初期以虚拟惯性控制为主，放缓频率变化速度；后期以虚拟下垂为主，改善频率稳态偏差。具体控制如图 4 所示。

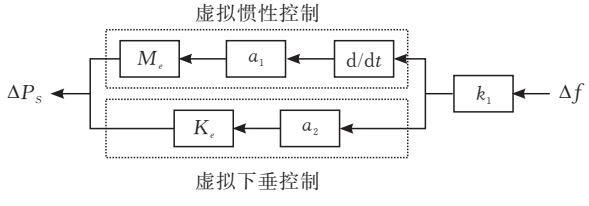


图 4　超级电容控制

超级电容在调频中的出力

$$\Delta P_S = a_1 M_e \frac{\mathrm{d}k_1 \Delta f}{\mathrm{d}t} + a_2 K_e k_1 \Delta f \tag{14}$$

式中：a_1、a_2分别为虚拟惯性模式和虚拟下垂模式下的分配比例系数；M_e为超级电容的虚拟惯性系数；K_e为超级电容虚拟下垂系数。

根据惯性响应阶段和下垂响应阶段频率偏差及频率偏差变化率的特点，设计惯性响应阶段比例系数为：

$$\begin{cases} a_1 = e^{n\Delta f} \geqslant 0.5 \\ a_2 = 1 - e^{n\Delta f} \leqslant 0.5 \end{cases} \tag{15}$$

惯性响应阶段，由于系统负荷改变造成频率偏差，Δf 值增大，a_1 值从 1 开始逐渐减小，a_2 值从 0 开始逐渐增加，且在此变化过程中二者之和恒为 1。

下垂响应阶段比例系数为：

$$\begin{cases} a_1 = \left(\dfrac{\Delta f - \Delta f_{\text{low}}}{\Delta f_{\max} - \Delta f_{\text{low}}}\right)^n \leqslant 0.5 \\ a_2 = 1 - \left(\dfrac{\Delta f - \Delta f_{\text{low}}}{\Delta f_{\max} - \Delta f_{\text{low}}}\right)^n \geqslant 0.5 \end{cases} \tag{16}$$

式中：Δf_{low} 为超级电容参与一次调频的阈值；$\Delta f_{\max}$ 为电力系统的最大频率偏差值。下垂响应阶段，系统频率偏差已达到最大值，Δf 值减小，a_1 值从 0.5 开始逐渐减小至 0，a_2 值从 0.5 开始逐渐增大为 1。

蓄电池仅在下垂响应阶段参与系统调频，同时考虑到自身荷电状态的影响较大，采用变系数下垂控制方式。具体控制框图如图 5 所示。

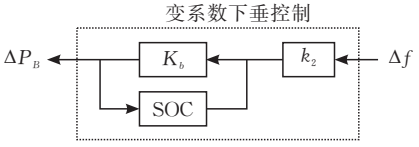


图 5 蓄电池控制

蓄电池在调频中出力为：

$$\Delta P_B = K_b k_2 \Delta f \tag{17}$$

式中，K_b 为蓄电池虚拟下垂系数。

以蓄电池充电时为例，当 $\text{SOC} \in [0, \text{SOC}_{\text{high}}]$ 时，电池余量充足，以最大下垂系数进行充电，此时

$$K_b = K_{b,\max} \tag{18}$$

当 $\text{SOC} \in (\text{SOC}_{\text{high}}, \text{SOC}_{\max}]$ 时，电池余量不足，调整惯性和下垂控制系数以保证调频效果和电池 SOC，此时

$$K_b = \frac{\text{SOC}_{\max} - \text{SOC}}{\text{SOC}_{\text{high}} - \text{SOC}_{\min}} \cdot K_{b,\max} \tag{19}$$

式中：SOC_{high} 为蓄电池 SOC 较大值。

当 $\text{SOC} \in (\text{SOC}_{\max}, 1]$ 时，电池达到极限状态，停止充电，此时

$$K_b = 0 \tag{20}$$

3.3 评价指标及容量配置

为提高综合储能经济性，设计全寿命周期成本来优化容量配置。全寿命周期成本主要包括投资成本和运行损耗成本。

投资成本：投资成本包括功率投资成本和容量投资成本。其表达式为：

$$C_{\text{inv}} = C_{\text{inv,SC}} + C_{\text{inv},b} \tag{21}$$

$$\begin{cases} C_{\text{inv,SC}} = C_{\text{PCS,SC}} \cdot P_{\text{rate,SC}} + C_{\text{fess,SC}} \cdot E_{\text{rate,SC}} \\ C_{\text{inv},b} = C_{\text{PCS},b} \cdot P_{\text{rate},b} + C_{\text{fess},b} \cdot E_{\text{rate},b} \end{cases} \tag{22}$$

式中：$C_{\text{inv,SC}}$、$C_{\text{PCS,SC}}$、$C_{\text{fess,SC}}$ 分别为超级电容初始投资成本、单位功率成本、单位容量成本；$P_{\text{rate,SC}}$ 为超级电容额定功率；$E_{\text{rate,SC}}$ 为超级电容配置容量；$C_{\text{inv},b}$、$C_{\text{PCS},b}$、$C_{\text{fess},b}$ 分别为蓄电池初始投资成本、单位功率成本、单位容量成本；$P_{\text{rate},b}$ 为蓄电池额定功率；$E_{\text{rate},b}$ 为蓄电池配置容量。

运行损耗成本：运行损耗成本包括功率维护成本和容量维护成本。其表达式为：

$$C_O = C_{\text{O,SC}} + C_{\text{O},b} \tag{23}$$

$$\begin{cases} C_{\text{O,SC}} = C_{\text{PO,SC}} \cdot P_{\text{rate,SC}} + C_{\text{EO,SC}} \cdot E_{\text{rate,SC}} \\ C_{O,b} = C_{\text{PO},b} \cdot P_{\text{rate},b} + C_{\text{EO},b} \cdot E_{\text{rate},b} \end{cases} \tag{24}$$

式中：$C_{\text{O,SC}}$、$C_{\text{PO,SC}}$、$C_{\text{EO,SC}}$ 分别为超级电容功率运维成本、单位功率运维成本、单位容量运维成本；$C_{\text{O},b}$、$C_{\text{PO},b}$、$C_{\text{EO},b}$ 分别为蓄电池容量运维成本、单位功率运维成本、单位容量运维成本。

综合储能成本现值为：

$$C_{\text{LCC}} = C_{\text{inv}} + C_o \tag{25}$$

储能效益计算较为复杂，由固定效益等效代替，综合储能效益现值为：

$$N_{\text{RES}} = \sum_{t=1}^{T_{\text{LCC}}} \frac{R_y}{(1+r)^t} \tag{26}$$

式中：T_{LCC} 为全寿命周期；R_y 为年效益；r 为折现率。

根据综合储能成本和效益，净效益现值为：

$$P_{\text{NET}} = N_{\text{RES}} - C_{\text{LCC}} \tag{27}$$

由上式可得，综合储能参与电网一次调频容量配置优化目标为：

$$J = \max P_{NET} \tag{28}$$

3.4 一次调频流程

综上所述，在综合储能参与电网一次调频过程中，首先需判断储能是否参与电网调频；在系统频率偏差达到最大值时，根据电网功率缺额判断超级电容能否单独承担调频任务；当确定蓄电池参与调频后，计算超级电容和蓄电池出力分配比例，并据此输出能量。具体而言，其流程如图 6 所示。

4 仿真分析

为验证上述协调控制策略的有效性，使用 Matlab/Simulink 平台对图 3 所示系统进行仿真验证。将综合储能系统与单一储能系统进行对比分析。经计算，在 800 MW 的火电机组背景下，配置 3.6 MW/0.03 MW·h 超级电容和 10 MW/2.5 MW·h蓄电池为最优配置。鉴于传统机组一次调频死区设置为±0.033 Hz，在此，电池储能系统的调频死区设置为火电机组一次调频死区上下限的 60%。

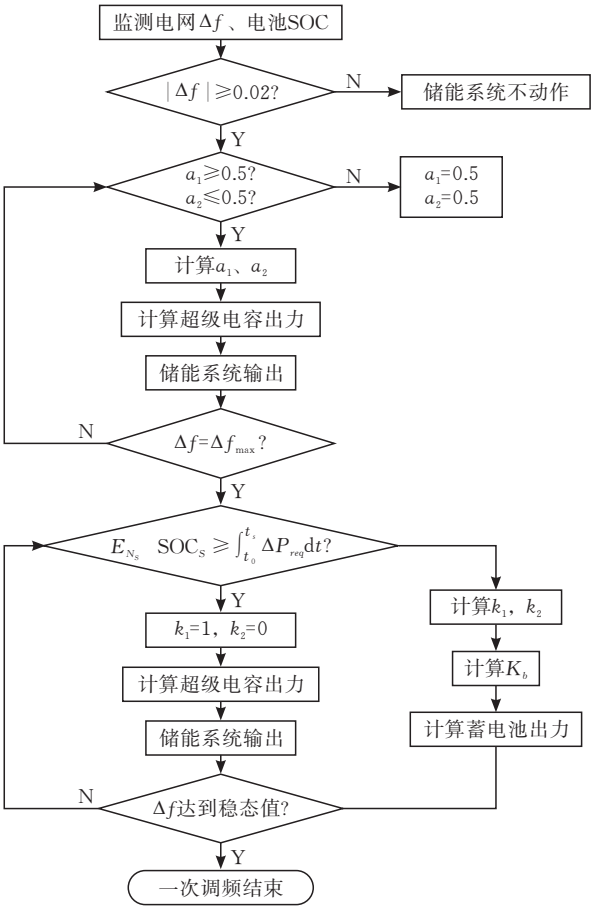


图 6　综合储能参与电网一次调频流程

1)情况一：电网负荷突增

考虑到负荷突增和突减分别对应储能的放电和充电过程，其物理机理具有相似性。在此，仅考虑负荷突增时的情况，假设在 10 s 时电网负荷突增 0.15 p.u.，电池初始 SOC 均为 0.65，在此过程中储能设备通过放电参与电网一次调频。其中，电网频率偏差曲线如图 7 所示，蓄电池和综合储能中各储能设备输出曲线和 SOC 曲线分别如图 8、9 所示，调频过程中 k 值变化曲线如图 10 所示。

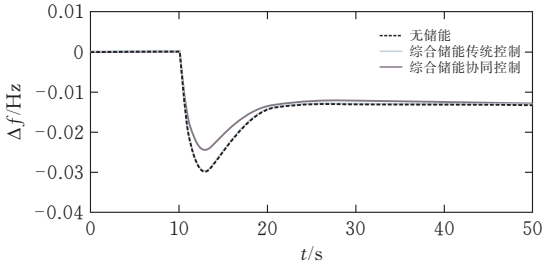


图 7　负荷突增时电网频率偏差曲线

从图 8 可知，有储能参与的系统较无储能系统而言在最大频率偏差及稳态频率偏差上均有所改善。两种综合储能控制下的电网频率偏差曲线无明显差别，基本相同。电网分别在 12.9 s 时达到最大频率偏差值，在 23 s 左右达到稳态频率值。

如图 8、9、10 可知，系统扰动发生时，k_1 为 1，仅

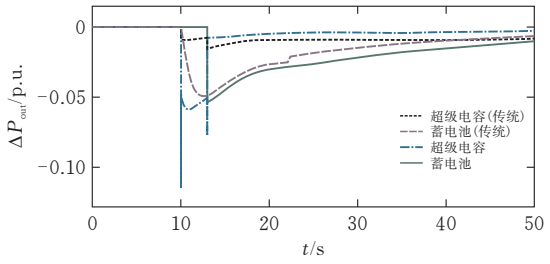


图 8　负荷突增时各储能设备输出曲线

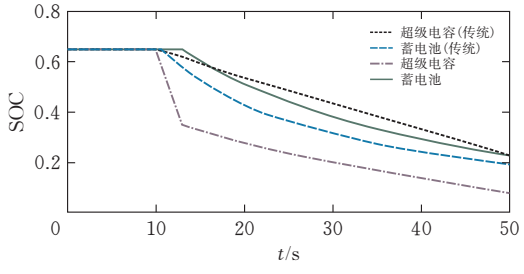


图 9　负荷突增时各储能设备 SOC 曲线

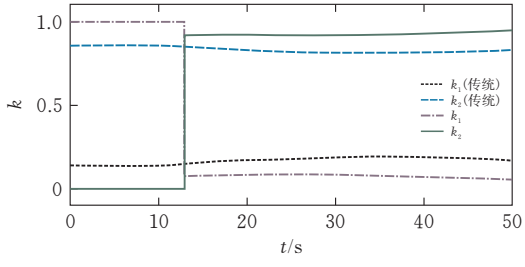


图 10　负荷突增时 k 值曲线

超级电容输出功率，其 SOC 下降速度较快。12.9 s 时，因蓄电池前期不动作，导致超级电容 SOC 明显低于蓄电池，加上本身的容量差异，超级电容的剩余调频能力远小于蓄电池。此时蓄电池参与调频，超级电容和蓄电池的出力比例根据剩余调频能力进行调整，k_1 值从 1 降至 0.1 左右，超级电容输出减小，其 SOC 值下降速度减缓，k_2 从 0 增至 0.9 左右，主要由蓄电池承担大部分的调频任务。同时在调频过程中 k 值因两种储能设备剩余调频能力在不断变化而产生微量的调整。50 s 时，传统控制方式下蓄电池 SOC 值为 0.2，协同控制方式下蓄电池 SOC 值为 0.23，较传统控制方式而言放电深度减小了 9%。

2)情况二：电网负荷连续波动

为近一步验证本文所提策略较传统综合储能控制策略优势，在电网连续扰动的条件下与无储能参与、传统综合储能控制方式参与下的调频结果进行对比。

如图 11 所示，10 s 时系统负荷波动为 0.3 p.u.，40 s 时降为 −0.03 p.u.，70 s 时增至 0.15 p.u.。系统频率偏差曲线如图 12 所示，综合储能传统控制方式及协调控制方式下超级电容和蓄电池 SOC 曲线如图 13 所示，两种控制方式下 k_i 值变化曲线如图 14 所示。

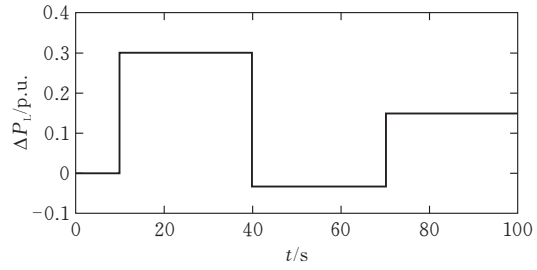


图 11 电网连续负荷扰动曲线

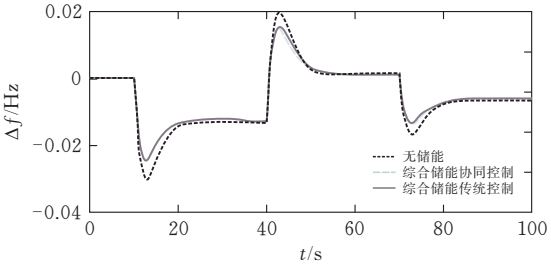


图 12 连续扰动下系统频率偏差曲线

从图 12 可以看出，综合储能相较无储能系统在调频效果上有明显改善。在第一段扰动发生后，有储能参与的系统储能可立即动作，为系统提供频率支撑，在 12.9 s 时达到最大频率偏差 −0.024，无储能参与的系统只能由火电机组提供频率支撑，由于火电机组爬坡速度较慢，前期输出不足，导致最大频率偏差较大，为 −0.03。同理而言，在第二段扰动发生后，系统频率在 42.8 s 时达到最大频率偏差，其中无储能系统频率偏差为 0.031，综合储能系统频率偏差为 0.027，小于无储能系统。三种情况下稳态频率偏差无明显差别。

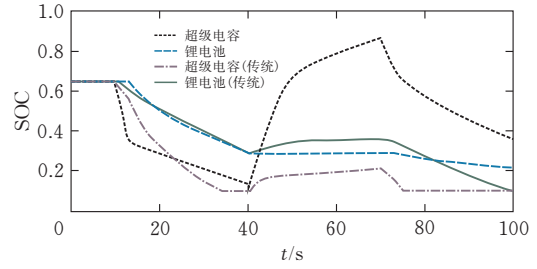


图 13 连续扰动下各设备 SOC 曲线

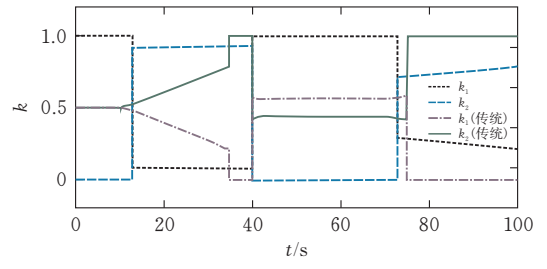


图 14 连续扰动下 k 值曲线

由图 13 可知，在扰动发生初期，在协同优化过程中，为了减小蓄电池的动作深度和频次，增加了超级电容的出力比例，承担了更多的调频任务，因此协同控制方式下超级电容 SOC 下降速度明显大于传统控制模式下超级电容 SOC 的下降速度。10 s 扰动发生时，协同控制方式下超级电容立即响应，蓄电池不动作。13 s 左右蓄电池输出能量，参与调频，k_1 值从 1 降至 0.1，k_2 值从 0 增至 0.9。40～70 s 第二段扰动发生时，因超级电容剩余调频能力可满足调频需求，因此仅超级电容动作，蓄电池处于静止状态，超级电容独自承担调频任务，减少了蓄电池的动作次数。经计算，综合储能协同控制方式下蓄电池 N_E 值为 1298，较传统控制方式提升了 39%。

5 结论

本文提出一种综合储能参与电网一次调频协同控制策略，通过理论分析及仿真验证，可得出以下结论：

1)以综合储能调频效益最大为目标优化容量配置，获得了更好的经济性。

2)采用虚拟惯性和虚拟下垂的自适应控制策略，使得系统频率在前期变化速度有所减缓、后期更快恢复至稳定状态，提升了系统频率的稳定性。

3) 根据超级电容和蓄电池响应特性的分析，设计超级电容与蓄电池协同的调频控制策略，可以发挥超级电容循环使用次数大的特点，减小蓄电池充放电次数，延长使用寿命，提高系统运行经济性。

[参 考 文 献]

[1] 郑亚先，杨争林，冯树海，等.碳达峰目标场景下全国统一电力市场关键问题分析[J].电网技术，2022，46(01)：1-20.

[2] 黄雨涵，丁涛，李雨婷，等.碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示[J].中国电机工程学报，2021，41(S1)：28-51.

[3] SAPONARA S，SALETTI R，MIHET-POPA L. Hybrid Micro-grids exploiting renewables sources，battery energy storages，and bi-directional converters[J]. Applied Sciences，2019，9(22)：2076-3417.

[4] AMIN M R，NEGNEVITSKY M，FRANKLIN E，et al. Application of battery energy storage systems for primay frequency control in power systems with high renewable energy penetration[J]. Energies，2021，14(05)：1379-1379.

[5] DATTA U，KALAM A，SHI J. Battery energy storage system control for mitigating pv penetration impact on primary frequency control and state-of-charge recovery[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy，2020，11(02)：746-757.

[6] 李建林，王哲，曾伟，等.百兆瓦级电化学储能电站能量管理研究综述[J].高电压技术，2023，49(01)：72-84.

[7] 董旭柱,华祝虎,尚磊,等.新型配电系统形态特征与技术展望[J].高电压技术,2021,47(09):3021-3035.

[8] XU B, SHI Y, KISCHEN D S,et al. Optimal battery participation in frequency regulation markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(06):6715-6725.

[9] OMAR N , MONEM M A , FIROUZ Y , et al. Lithium iron phosphate based battery-assessment of the aging parameters and development of cycle life model[J]. Applied Energy, 2014, 113:1575-1585.

[10] 黄际元,李欣然,曹一家,等.考虑储能参与快速调频动作时机与深度的容量配置方法[J].电工技术学报,2015,30(12):454-464.

[11] 罗耀东,田立军,王垚,等.飞轮储能参与电网一次调频协调控制策略与容量优化配置[J].电力系统自动化,2022,46(09):71-82.

[12] 凌开元,赵乐冰,张新松,等.基于双储能系统的主动配电网储能配置[J].电力自动化设备,2018,38(05):171-176.

[13] LIN Y, FU L, XIAO X. Decentralised power distribution and SOC management algorithm for the hybrid energy storage of shipboard integrated power system [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2021, 14(01): 6493-6503.

[14] 程龙,张方华.用于混合储能系统平抑功率波动的小波变换方法[J].电力自动化设备,2021,41(03):100-104.

[15] TREMBLAY O, DESSAINT L A, DEKKICHE A I. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles[C]. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007: 284-289.

[16] KUPERMAN A, MELLINCOVSKY M, LERMAN C, et al. Supercapacitor sizing based on desired power and energy performance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(10): 5399-5401.

[17] 韩晓娟,程成,籍天明,等.计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型[J].中国电机工程学报,2013,33(34):91-97.

[18] 赵熙临,林震宇,付波,等.预测优化 PID 方法在含风电电力系统 AGC 中的应用[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(03):16-22.

Application of a Comprehensive Energy Storage Cooperative Control Method in Primary Frequency Modulation

GUI Yue, ZHAO Xilin

(*School of Electrical and Electronic Engin., Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: In view of the variability of operating cost and efficiency of different energy storage types, an integrated energy storage cooperative control method is proposed to meet the economic requirements while improving the grid frequency control effect, which is analyzed in the paper with battery and super-capacitor as examples. Firstly, according to the characteristics of the super-capacitor and battery, the output active power is adjusted by adaptive control and variable coefficient droop control respectively. Then, the frequency modulation benefit of two kinds of energy storage is calculated based on the life-cycle cost. According to that, the capacity allocation is optimized. Based on that, the power distribution mechanism for frequency regulation is designed. The task of frequency regulation is allocated according to the remaining frequency regulation capability of the super-capacitor and the battery. Finally, the simulation results of Matlab/Simulink show that the proposed method is economical and effective in power grid frequency regulation.

Keywords: integrated energy storage; cooperative control; primary frequency modulation; state of charge

[责任编校:闫　品]