

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181558

基于模糊控制和 SOC 自恢复储能参与二次调频控制策略

崔红芬¹, 杨波¹, 蒋叶², 谭庄熙², 崔岱³, 李培强²

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 210003; 2. 湖南大学, 湖南 长沙 410082;
3. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 通过对储能电池基于区域控制偏差 ACE 信号和区域控制需求 ARR 信号参与系统 AGC 控制的优缺点进行分析, 提出了一种综合控制方式, 并定义了切换的时机和深度。即在系统频率恶化, 且 $|\Delta f|$ 较大时, 基于模糊控制理论根据 SOC 状态来平滑储能电池的出力深度; 在系统状态良好, 且 $|\Delta f|$ 较小时, 为充分利用传统机组二次调频的剩余调频容量, 对储能进行 SOC 自恢复。并根据定义的评价指标, 利用 Matlab/Simulink 对储能协同传统机组参与电网二次调频, 选取典型连续扰动与传统策略进行了对比仿真。结果表明, 所提出的控制策略兼顾减少最大频偏和稳态频偏的优点; 相较于基于 ARR 的控制方式对储能电池的容量和功率需求更小, 相较于基于 ACE 的控制方式其调频效果更优且对常规机组的利用率更高; 提升了储能电池参与二次调频的调频能力。

关键词: 储能电池; 二次调频; ACE; ARR; 模糊控制; SOC 自恢复

Strategy based on fuzzy control and self adaptive modification of SOC involved in secondary frequency regulation with battery energy storage

CUI Hongfen¹, YANG Bo¹, JIANG Ye², TAN Zhuangxi², CUI Dai³, LI Peiqiang²

(1. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210003, China; 2. Hunan University, Changsha 410082, China;
3. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110000, China)

Abstract: Through the analysis of advantages and disadvantages of ACE signal and ARR signal based on battery energy storage participating in AGC, an integrated control method is proposed and the timing and depth of switch are also defined. That is when the system frequency being deteriorated, the $|\Delta f|$ is large, according to the fuzzy control theory, smoothing the output depth of the energy storage battery is based on the SOC. When the system is in good condition and the $|\Delta f|$ is small, to make full use of the remaining capacity of traditional generator in secondary frequency regulation, the storage need doing self adaptive modification of SOC. With the definition of the evaluation indicators, it uses Matlab/Simulink to participate in the secondary frequency regulation of energy grid and selects a typical continuous disturbance in simulation. Compared with the traditional strategy, the results show that the proposed method has advantages in terms of reducing the frequency deviation and steady frequency deviation. Compared to the ARR-based control method, the capacity and power requirements of the energy storage battery are smaller; compared to the ACE-based control method, the frequency modification effect is better and the utilization rate of the conventional generator is higher. This control strategy can promote the secondary frequency regulation ability.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation China (No. NY71-18-014); Energy Storage Substation Optimization Configuration and Control Oriented to Power Grid and National Natural Science Foundation of China (No. 51677059).

Key words: battery energy storage; secondary frequency modulation; ACE; ARR; fuzzy control; self adaptive modification of SOC

0 引言

随着化石能源危机和环境污染等问题的严重化,

开发新的可再生能源成为热点。由于可再生能源固有的波动性和不确定性, 其大规模并网给电网的电能质量带来挑战^[1-2]。文献[3]提出了考虑可再生能源高渗透率的孤岛微电网的负载频率控制和数字频率保护的协调策略, 该策略能有效维持电力系统频率稳定性和安全性。文献[4]提出了一种基于储能 SOC 状态的微电网能量优化调度策略, 提高可再生能源

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助(NY71-18-014)“面向电网的储能电站优化配置及控制策略研究”; 国家自然科学基金项目资助(51677059)

利用率。大规模的间歇性能源并网使得传统电源的容量难以满足电网调频需要, 储能技术的发展恰好为控制电网频率提供了解决方案^[5-6]。

相对于传统发电机组, 储能系统具有较快的功率调节速度^[7-8], 能对系统的频率变化作出快速的响应, 适合参与到电力系统的频率调节之中^[9]。并且储能电池二次调频效果优于火电机组, 文献[10]引入储能辅助火电机组调频, 可显著减少火电机组的动作次数, 从而减缓了因机组频繁调节导致的设备磨损, 有利于延长机组使用寿命, 同时储能电池也满足电网对调频机组的考核指标。

联络线功率需求控制是自动发电控制(AGC)的主要方式之一^[11], 文献[12]通过模拟电池储能系统(BESS)在几天内的充电状态, 使用频率测量数据, 提出了一种电池储能校正算法, 为进一步研究储能参与自动发电控制提供了研究基础。文献[13]提出一种优化方法, 即基于区域控制偏差信号动态分配的储能电源控制方式, 但是仍未考虑储能电池的荷电状态。

在此基础上, 文献[14]考虑储能系统的荷电状态(SOC), 提出了一种基于储能系统和常规机组最大可用调频容量的动态分配系数确定方法, 并构建同时考虑电网调频效果和储能系统 SOC 保持效果的综合评价指标。文献[15]对常规发电机引入模糊控制理论对其进行改进, 设计出具有模糊 PID 复合结构的控制器, 文献[16]应用实时小波变换进行频率分配, 并采用双层模糊控制理论进行储能功率修正的多类型储能系统, 达到平滑储能电池的出力深度的效果^[17-18], 文献[19-21]将模糊控制应用到储能的出力策略之中。

本文通过对储能电源参与二次调频的两种常见控制方式进行分析, 择其两者优点, 将模糊控制应用到平滑储能的出力之中, 并在系统状态良好时进行储能 SOC 自恢复, 进而形成了一种综合控制方式, 定义了储能的出力时机与深度, 最后进行了仿真验证。

1 储能电源参与二次调频的控制方式

通常利用自动发电控制(Automation Generation Control, AGC)系统来保证系统频率质量, 在目前阶段内, 电网调度中心负荷频率控制软件采集电网的频率、联络线潮流、系统电时钟差, 可以计算得到区域控制偏差(Area Control Error, ACE)信号。

ACE 信号通过 PI 控制器转换, 加上二次调频死区的限制之后, 就形成区域控制需求(Area Regulation Requirement, ARR)信号。储能电池参与

二次调频的控制方式, 通常包括基于 ACE 信号和基于 ARR 信号这两种分配模式^[11], 即将这两种信号分配给传统机组和储能电源(合称调频电源)。

1.1 基于 ACE 信号的控制方式分析

基于区域控制偏差 ACE 信号, 储能参与二次调频的单区域电网调频动态模型如图 1 所示。

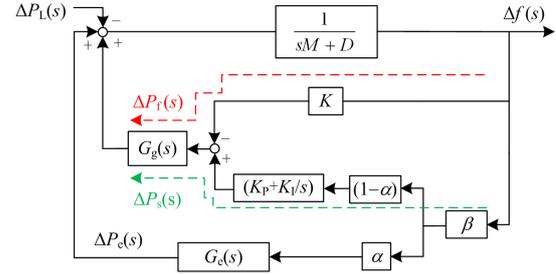


图 1 基于 ACE 信号分配的控制方式框图

Fig. 1 Diagram of control method based on ACE signal

图中: $G_e(s)$ 和 $G_s(s)$ 分别为储能电池和传统机组电源的传递函数模型; α 和 $1-\alpha$ 分别为储能电池和传统电源的二次调频参与因子; K 为传统电源一次调频单位功率调节系数; K_p 、 K_i 和 β 分别为系统二次调频 PI 控制器的比例控制器系数、积分控制器系数和频率偏差系数; $1/(sM+D)$ 为回转质量与负荷即机网接口模型; $\Delta P_L(s)$ 和 $\Delta f(s)$ 分别为负荷扰动和频率偏差; $\Delta P_f(s)$ 和 $\Delta P_s(s)$ 分别为传统电源参与一次和二次调频的动作深度; $\Delta P_e(s)$ 为储能电源的动作深度。

其中储能电池和传统电源的传递函数 $G_e(s)$ 和 $G_s(s)$ 分别为

$$\begin{cases} G_e(s) = \frac{1}{1+sT_e} \\ G_s(s) = \frac{1+F_{HP}T_{RH}s}{(1+T_{CH}s)(1+T_{RH}s)(1+T_g s)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_e 为储能电池调速器时间常数; T_g 、 T_{CH} 、 T_{RH} 和 F_{HP} 分别为常规机组的调速器常数、汽轮机时间常数、再热器时间常数和再热器增益。

由图 1 可得储能电池和传统机组的一二次调频出力深度, 如式(2)。

$$\begin{cases} \Delta P_e = \beta \cdot \alpha \cdot G_e(s) \cdot \Delta f(s) \\ \Delta P_f = -K \cdot G_s(s) \cdot \Delta f(s) \\ \Delta P_s = \beta \cdot (1-\alpha) \cdot (K_p + K_i/s) G_s(s) \cdot \Delta f(s) \end{cases} \quad (2)$$

结合式(1)、式(2), 可得系统的频率偏差为

$$\Delta f(s) = \frac{\Delta P_f + \Delta P_e + \Delta P_s - \Delta P_L(s)}{sM + D} \quad (3)$$

结合式(2)、式(3)可得系统频率偏差和负荷扰动变化率的关系式为

$$\frac{\Delta f(s)}{\Delta P_L(s)} = \frac{1}{[-K + \beta \cdot (1 - \alpha) \cdot (K_p + K_I/s)] \cdot G_g(s) + \beta \cdot \alpha \cdot G_e(s) - (sM + D)} \quad (4)$$

对式(4)求储能电池二次调频参与因子 α 的偏导数如式(5)。

$$\frac{\partial \Delta f(s)}{\partial \alpha} = \left(\frac{\Delta f(s)}{\Delta P_L(s)} \right)^2 \cdot \Delta P_L(s) \cdot [\beta \cdot G_e(s) - G_g(s)] \quad (5)$$

由式(5)推导出基于 ACE 控制方式的无量纲灵敏度^[14], 如式(6)所示。

$$S_{\alpha 1} = \frac{d\Delta f(s)/\Delta f(s)}{d\alpha/\alpha} = \frac{\partial \Delta f(s)}{\partial \alpha} \cdot \frac{\alpha}{\Delta f(s)} = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot \Delta f(s)}{\Delta P_L(s)} \left[G_e(s) - \left(K_p + \frac{K_I}{s} \right) G_g(s) \right] \quad (6)$$

由式(6)可知, 当发生阶跃扰动时, 由于频率偏差和负荷增量始终异号, 灵敏度表达式前半部分 $\alpha \beta f(s)/P_L(s)$ 一直为负; 由于 $G_e(s)$ 的时间常数小于 $G_g(s)$ 的时间常数, $S_{\alpha 1}$ 在初期小于零, 绝对值先增大后减小至零, 并最终越过零点越来越大, 直至达到稳态。此时, $S_{\alpha 1} = \alpha/(1-\alpha)$ 。可以看出, 在 $S_{\alpha 1}$ 过零以后, α 越大越加剧频率偏差的增大。

基于 ACE 信号的控制方式, 其控制信号没有经过 PI 环节, 直接来自于 ACE 信号, 即储能电源出力与 ACE 信号成正比关系, 则可即时响应 ACE 的变化, 有利于快速恢复暂态频率偏差, 但对稳态频率偏差的恢复反而起到抑制作用。

1.2 基于 ARR 信号的控制方式分析

基于区域控制需求 ARR 信号, 在目前已有的研究中, 储能参与 AGC 控制策略绝大多数均为 ARR 信号的分配方式。储能参与 AGC 控制的单区域电网调频动态模型如图 2 所示。

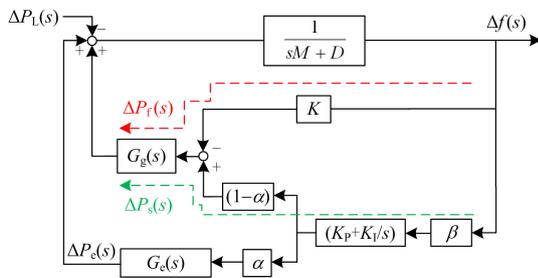


图 2 基于 ARR 信号分配的控制方式框图

Fig. 2 Diagram of control method based on ARR signal

系统参数与基于 ACE 的控制方式相同。

忽略死区和限幅, 由图 2 可得储能电池和传统

机组的一二次调频出力深度, 如式(7)。

$$\begin{cases} \Delta P_f = -K \cdot G_g(s) \cdot \Delta f(s) \\ \Delta P_e = \beta \cdot \alpha \cdot (K_p + K_I/s) \cdot G_e(s) \cdot \Delta f(s) \\ \Delta P_s = \beta \cdot (1 - \alpha) \cdot (K_p + K_I/s) \cdot G_g(s) \cdot \Delta f(s) \end{cases} \quad (7)$$

结合式(1)、式(7)可得频率偏差和负荷扰动变化率的关系式为

$$\frac{\Delta f(s)}{\Delta P_L(s)} = \frac{1}{-K \cdot G_g(s) + \beta \cdot (K_p + K_I/s) [(1 - \alpha) \cdot G_g(s) + \alpha \cdot G_e(s)] - (sM + D)} \quad (8)$$

对式(8)求储能分配系数 α 的偏导数如下:

$$\frac{\partial \Delta f(s)}{\partial \alpha} = \left(\frac{\Delta f(s)}{\Delta P_L(s)} \right)^2 \cdot \Delta P_L(s) \cdot \left[\beta \left(K_p + \frac{K_I}{s} \right) G_e(s) - G_g(s) \right] \quad (9)$$

由式(9)推导出基于 ARR 控制方式的无量纲灵敏度^[14], 如式(10)所示。

$$S_{\alpha 2} = \frac{d\Delta f(s)/\Delta f(s)}{d\alpha/\alpha} = \frac{\partial \Delta f(s)}{\partial \alpha} \cdot \frac{\alpha}{\Delta f(s)} = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot (G_e(s) - G_g(s))}{\Delta P_L(s)} \left(K_p + \frac{K_I}{s} \right) \Delta f(s) \quad (10)$$

同上, 由式(10)可知, 频率偏差经 PI 环节的值将增大或减小并逐渐稳定。又由于 $G_e(s)$ 的时间常数小于 $G_g(s)$ 的时间常数, 且频率偏差和负荷增量始终异号, 所以 $S_{\alpha 2}$ 在整个暂态过程中一直为负, 并且绝对值先增大后逐渐减小。

基于 ARR 信号的控制方式, 储能电池的控制信号首先经过 PI 环节, 其出力的快速特性被部分抑制, 并和机组二次调频量一样保持稳步增长, 由于积分环节的存在, 储能电池参与调频量不会逐渐恢复至零, 其对稳态频率偏差的恢复起到较好的改善作用。

1.3 综合控制方式

对比两种分配模式, 通过分别对其参与因子灵敏度的分析, 可知:

1) 引入储能电池可以在一定程度上改善调频效果。

2) 基于 ACE 信号的控制方式, 充分利用了储能电池的快速响应特性, 因而对暂态频率偏差的改善效果显著, 但对稳态频率偏差不起作用, 且要求更高的功率备用。

3) 基于 ARR 信号的控制方式, 储能电池对暂态和稳态频率偏差均能起到一定的改善作用, 储能电池对频率偏差的改善作用较为持续, 尤其在稳态频率偏差上作用明显, 但要求更多的容量备用。

为最大限度利用基于 ACE 信号的控制方式在

前期改善暂态频率偏差和基于 ARR 信号的控制方式在改善稳态频率偏差的显著效果^[16]，并避免后期基于 ARR 控制方式对暂态频率偏差恢复的阻碍作用，以更好地改善电网频率特性，本文提出储能电池的综合调节模式示意图如图 3 所示。

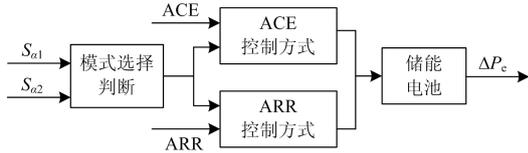


图 3 储能电源综合控制方式

Fig. 3 Integrated control mode of battery energy storage

模块选择判断，即实时计算 ACE 和 ARR 的灵敏度 S_{a1} 和 S_{a2} 后，当 $S_{a1}/\Delta f > S_{a2}/\Delta f$ 时选择 ACE 控制方式，当 $S_{a1}/\Delta f < S_{a2}/\Delta f$ 时切换到 ARR 控制方式，从而确定储能的控制方式和切换时刻。

2 储能电源出力策略

在正常调节区域内当储能处于不同的荷电状态 SOC 时，引入模糊控制对其对充放电功率予以限制。当系统状态良好时，为使得电网能够感知储能电源的需求，引入储能荷电状态自恢复策略，从而使得电网和储能状态能够相互感知。储能出力策略如图 4 所示。

判别系统状态的标准，本文以系统二次调频调节区间的 30% 作为判别标准，即 $abs(\Delta f) \leq 30\% \times 0.15 \text{ Hz}$ 才考虑进行 SOC 恢复。

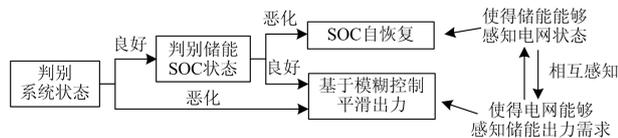


图 4 储能出力策略图

Fig. 4 Energy storage contribution strategy

2.1 基于模糊控制器的出力策略

当系统频率偏差状态恶化时，充分利用储能电池快速响应的特性，储能以平抑 ARR 或 ACE 信号中分配给储能的部分为第一目标，基于模糊控制理论考虑储能 SOC 来平滑出力。

2.1.1 输入模糊化和输出清晰化

正常工作状态下，当储能 SOC 值很低时，需减少储能放电功率，当储能 SOC 值很高时，需减少储能充电功率，本文采用模糊控制器根据储能的 SOC 状态对充放电功率加以限制。

本文设计的模糊控制器具有双输入和单输出。两个输入分别为 ARR 或 ACE 信号中分配给储能的

功率信号和储能电池的荷电状态 SOC，输出为经过模糊控制器平滑后的储能出力深度。

模糊控制器采用 Mamdani 型隶属度函数^[17]，首先确定输入 SOC、 P_{int} 的量化因子和输出 P_{out} 的比例因子 k_1 、 k_2 和 k_3 。

$$\begin{cases} k_1 = 1 \\ k_2 = \begin{cases} \frac{1}{P_{cm}} \cdot \eta\%, & P_{int} < 0 \\ \frac{1}{P_{dm}} \cdot \frac{1}{\eta\%}, & P_{int} > 0 \end{cases} \\ k_3 = \begin{cases} P_{cm} \cdot \eta\%, & P_{int} < 0 \\ P_{dm} \cdot \frac{1}{\eta\%}, & P_{int} > 0 \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

式中： P_{cm} 、 P_{dm} 分别为储能电池的额定充放电功率； $\eta\%$ 为储能的充放电效率。

经过量化因子归一化后，储能 SOC 和 P_{int} 的论域分别为 $[0,1]$ 和 $[-1,1]$ ，如图 5 所示。

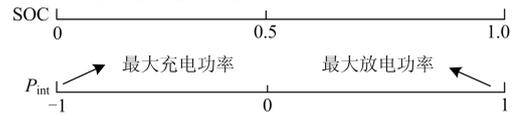


图 5 SOC 和 P_{int} 的论域

Fig. 5 Fuzzy universe of SOC and P_{int}

2.1.2 输入和输出隶属度函数

将经过归一化后的 $SOC(t)$ 和 $P_{int}(t)$ 作为模糊控制器的两个输入量，其模糊均集为 {NB(负大), NM(负中), NS(负小), ZO(零), PS(正小), PM(正中), PB(正大)}。输出量为修正功率 $P_{out}(t)$ ，由输入量和模糊控制规则共同决定，其论域为 $[-1,1]$ ，模糊集为 {NB(负大), NM(负中), NS(负小), ZO(零), PS(正小), PM(正中), PB(正大)}。模糊控制输入量和输出量的隶属度函数分别如图 6 和图 7 所示，模糊控制规则如表 1 所示。

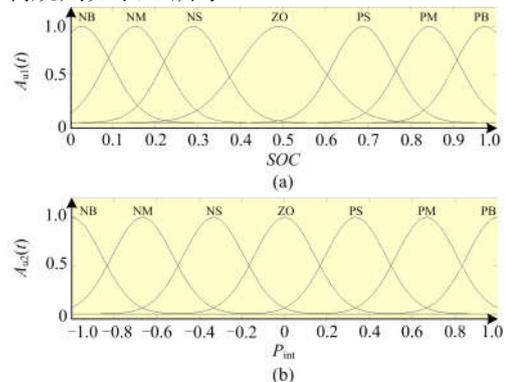


图 6 输入隶属度函数

Fig. 6 Membership function of input

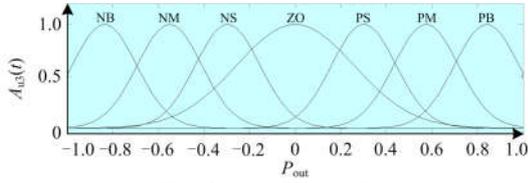


图 7 输出隶属度函数

Fig. 7 Membership function of output

表 1 模糊控制器控制规则表

Table 1 Control rules of fuzzy controller

| P_{int} \ SOC | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|
| NB | NB | NM | NS | ZO | ZO | ZO | ZO |
| NM | NB | NM | NS | ZO | ZO | ZO | ZO |
| NS | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
| ZO | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
| PS | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
| PM | ZO | ZO | ZO | ZO | PS | PM | PB |
| PB | ZO | ZO | ZO | ZO | PS | PM | PB |

2.1.3 修正后的实时输出功率

采用面积中心(重心)法(centroid)对输出的模糊集合进行清晰化, 得到实时的修正功率为

$$P_{out}(t) = \frac{\int \int A_{u_1}(t) \cdot u_1(t) \cdot A_{u_2}(t) \cdot u_2(t) du_1 du_2}{\int \int A_{u_1}(t) \cdot A_{u_2}(t) du_1 du_2} \quad (12)$$

式中: u_1 、 u_2 分别为量化后的 $SOC(t)$ 和 $P_{int}(t)$; $A_{u_1}(t)$ 和 $A_{u_2}(t)$ 分别为 $SOC(t)$ 和 $P_{int}(t)$ 的隶属度函数。

实时修正功率经过比例因子得到经过模糊控制修正后的实时输出功率 $P_{out}(t)$, 如图 8 所示。

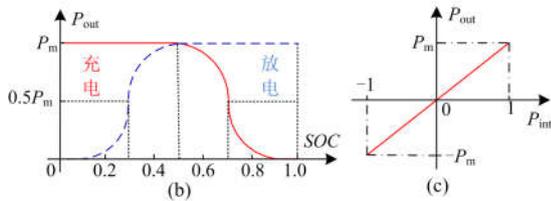
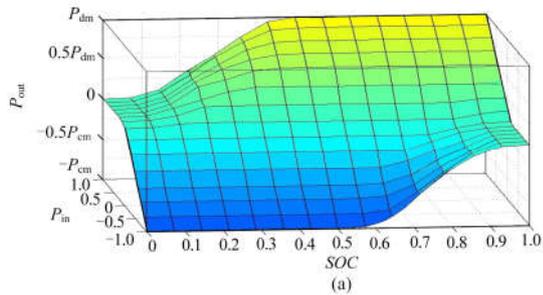


图 8 修正后的实时输出功率

Fig. 8 Modified real-time output power

储能电池的输出功率经过模糊控制器修正后, 使得储能出力能够根据 SOC 状态进行自我调整, 既保证了储能电池具有平滑的出力效果, 同时能防止储能在 SOC 越限时停止出力造成对电网的二次扰动, 使得电网能够感知储能的调频能力。

2.2 储能电池 SOC 自恢复策略

当储能 SOC 状态恶化(即 $\Delta f < 0$ 时 $SOC < SOC_{low}$ 或 $\Delta f > 0$ 时 $SOC > SOC_{high}$), 且系统状态较为良好($abs(\Delta f) \leq f_1$ Hz, $f_1 = 30\% \times 0.15$ Hz), 可以充分利用传统机组的二次调频爬坡剩余容量, 引入储能自恢复策略, 适当反向增加储能的出力, 使储能的 SOC 向较好的方向转化, 同时应保证储能反向出力不会使频率偏差 Δf 超出正常调节区域 ($abs(\Delta f) \geq f_1$ Hz), 其出力限制如图 9 和式(13)、式(14)所示。

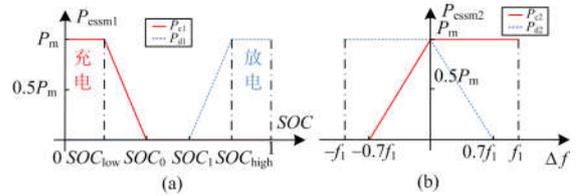


图 9 储能自恢复出力限制

Fig. 9 Restriction of output from energy storage in self-recovery

$$P_{cl} = \begin{cases} P_m & SOC \leq SOC_{low} \\ P_m \cdot (2 - SOC/0.2) & 0.2 < SOC \leq SOC_0 \\ 0 & SOC > SOC_0 \end{cases} \quad (13)$$

$$P_{dl} = \begin{cases} 0 & SOC \leq SOC_1 \\ P_m \cdot (5 \cdot SOC - 3) & 0.6 < SOC \leq SOC_{high} \\ P_m & SOC > SOC_{high} \end{cases}$$

式中: P_{cl} 、 P_{dl} 为储能自恢复出力的大小; P_m 为储能的额定功率; SOC_{low} 、 SOC_0 、 SOC_1 、 SOC_{high} 分别为 SOC 较低值、低中间值、高中间值和较高值, 如图 9 中(a)所示。

$$P_{c2} = \begin{cases} 0 & \Delta f \leq -0.7f_1 \\ P_m(1 + \Delta f/0.7f_1) & -0.7f_1 < \Delta f \leq 0 \\ P_m & \Delta f > 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$P_{d2} = \begin{cases} P_m & \Delta f \leq 0 \\ P_m(1 - \Delta f/0.7f_1) & 0 < \Delta f \leq 0.7f_1 \\ 0 & \Delta f > 0.7f_1 \end{cases}$$

式中: P_{c2} 、 P_{d2} 为储能不越过正常调节区域所加的

充放电限制; f_1 为正常调节区间大小, 如图 9(b)所示。

综上, 当储能电池 SOC 恶化, 且系统状态良好时, 储能进行 SOC 自恢复的出力如图 10 所示。

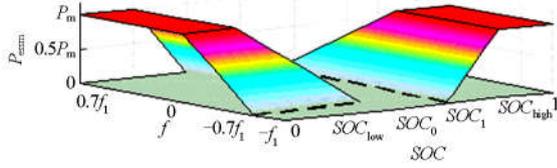


图 10 储能自恢复出力图

Fig. 10 Diagram of energy storage output in self-recovery

$$P_{\text{ess}} = \begin{cases} -\min\{|P_{c1}|, |P_{c2}|\}, & \text{SOC} < \text{SOC}_{\text{low}} \\ \min\{|P_{d1}|, |P_{d2}|\}, & \text{SOC} > \text{SOC}_{\text{high}} \end{cases} \quad (15)$$

储能自恢复出力策略, 使得储能能够感知电网状态, 当电网状态良好, 且储能 SOC 状态恶化时, 进行自恢复出力, 使得储能具有良好的 SOC 保持效果, 储能可为后续调频任务提供更多的调频容量。

3 考虑切换时机与出力深度综合控制策略

本节基于 1.3 节中储能参与二次调频的综合控制方式, 确定储能电池的切换时机, 融合模糊控制和 SOC 自恢复策略确定相应模式下对应的出力深度, 并定义评估指标, 进而形成储能电池参与二次调频的综合控制策略。

3.1 储能电池切换时机

ACE 控制信号经过 PI 环节形成 ARR 控制信号。暂态时区域控制偏差 ACE 信号量明显高于区域需求 ARR 信号; 而稳态时基于 ACE 信号的储能逐渐减少出力, 基于 ARR 信号的储能由于积分环节存在, 储能持续出力, 有利减少稳态频率偏差。本节定义储能电池的控制方式和时刻如下。

1) 开始时刻: 当区域偏差 ACE 信号越过死区设定的限值时, 储能电池开始参与二次调频。

2) 切换时刻: 根据系统状态计算 ACE 和 ARR 的灵敏度 S_{a1} 和 S_{a2} , 选择控制方式。

3) 结束时刻: 当区域偏差信号或区域需求信号跌回各自的死区内时, 储能停止出力。

3.2 综合控制策略流程

综合前述分析, 结合模糊控制和 SOC 自恢复策略形成储能电池综合控制策略流程如图 11 所示。

具体步骤如下:

1) 根据设定的区域控制偏差 ACE 信号的死区设定值确定储能电池是否参与二次调频。

2) 储能电池参与二次调频后, 首先进入 ACE 控制方式, 再根据系统输入的区域控制偏差 ACE 信号得

到区域控制需求 ARR 信号, 实时计算 ACE 和 ARR 的灵敏度 S_{a1} 和 S_{a2} 。当 $S_{a1}/\Delta f > S_{a2}/\Delta f$ 时选择 ACE 控制方式, 当 $S_{a1}/\Delta f < S_{a2}/\Delta f$ 时切换到 ARR 控制方式, 从而确定储能的控制方式和切换时刻。

3) 再根据系统频率偏差 Δf 和储能荷电状态 SOC, 判断储能和系统状态, 当系统状态良好且 SOC 较差时进行储能 SOC 自恢复, 否则根据模糊控制平滑出力, 从而确定储能的出力深度。

4) 最后实时判断 ACE 信号和 ARR 信号是否回落到死区内, 来确定储能电池的退出时刻。

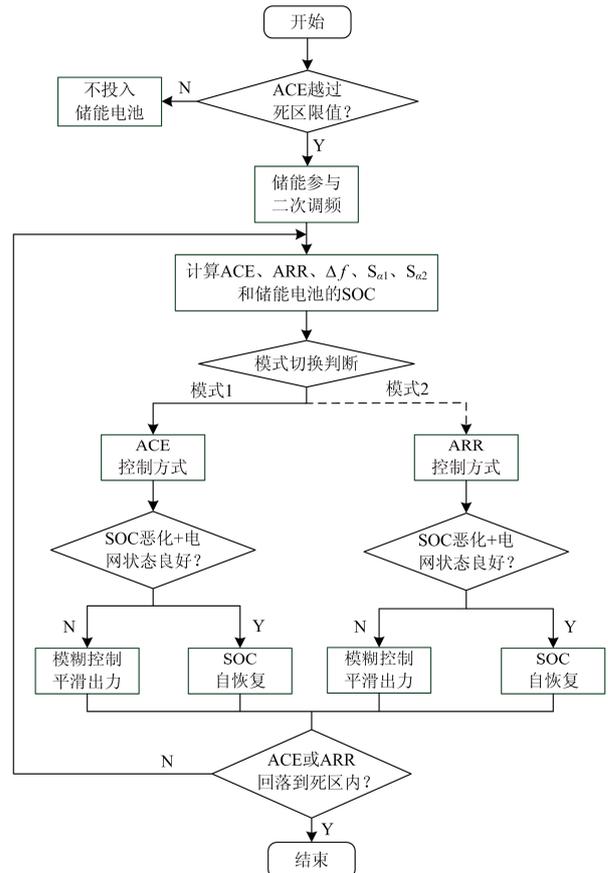


图 11 储能参与二次调频综合控制策略流程图

Fig. 11 Integrated control strategy flowchart of energy storage participated in the secondary frequency modulation

采用基于 ACE 和 ARR 的综合控制方式, 充分利用了 ACE 恢复暂态频率偏差和 ARR 恢复稳态偏差二者的优点, 并融合模糊控制平滑出力和 SOC 自恢复两种控制策略, 使得储能电池和电网能够相互感知各自的状态, 充分利用传统机组二次调频剩余的爬坡容量, 更好地保持储能的荷电状态, 储能电池能为后续的调频任务提供更多的调频容量。

3.3 评价指标

二次调频过程的评估指标与频率和调频电源相关^[10], 本节定义如下:

1) Δf_0 、 Δf_m 、 Δf_s 和 t_0 、 t_m 、 t_s 分别为初始频率偏差、最大频率偏差和稳态频率偏差及各自对应的时刻; SOC_{rms} 和 Δf_{rms} 为 SOC 和频率偏差的均方根值, 基准值分别取 0.5 和 0; V_m 为频率下滑速度, 即 $V_m = (\Delta f_0 - \Delta f_m) / (t_m - t_0)$; V_r 为频率恢复速度, 即 $V_r = (\Delta f_s - \Delta f_m) / (t_s - t_m)$ 。这些指标与电网频率相关, 可反映频率扰动大小和储能调频能力。

2) W_{ess} 、 W_f 和 W_s 分别为储能电池的贡献电量、常规电源参与一次和二次调频的贡献电量, 通过在 $t_0 \sim t_s$ 时段内积分得到; 二次调频总贡献电量 W_{gen} 为 W_{ess} 和 W_s 之和。这些指标与调频电源相关, 可反映储能和常规机组在参与调频时对电网的支撑作用。

4 仿真验证

4.1 仿真参数

本文采用单区域典型系统模型, 采用定频率 (FFT) 控制方式, 对储能电源协调电网参与二次调频, 与基于 ACE 和基于 ARR 的控制方式进行对比仿真, 以验证本文所提出的控制策略有效性。仿真系统的参数设置如表 2、表 3 所示。

表 2 仿真系统模型参数

Table 2 Model parameters of simulation system

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|-----------------------|-----------|---------------|--------|
| 功率基准/MW | 1 000 | $M/p.u.$ | 10 |
| 频率基准/Hz | 50 | $D/p.u.$ | 1 |
| 储能容量/MW·h | 2.5 | 储能功率/MW | 10 |
| $K/p.u.$ | 20 | $B/p.u.$ | 21 |
| T_g/s | 0.08、0.06 | $K_p/p.u.$ | -0.822 |
| a | 0.1 | $K_i/p.u.$ | -0.16 |
| T_{CH} 、 T_{RH}/s | 0.3、10 | $F_{HP}/p.u.$ | 0.5 |

表 3 控制策略的相关参数

Table 3 Relevant parameters of the control strategy

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|-------------|-------|--------------|------|--------------|------|
| SOC_{min} | 0.1 | SOC_{low} | 0.2 | SOC_0 | 0.4 |
| SOC_{max} | 0.9 | SOC_{high} | 0.6 | SOC_1 | 0.8 |
| f_i/Hz | 0.045 | ACE_{dead} | 1.05 | ARR_{dead} | 1.05 |

4.2 仿真验证结果分析

设基于 ARR 信号的控制方式为“ARR 控制”, 基于 ACE 信号的控制方式为“ACE 控制”, 本文所提出的综合控制方式为“本文方法”。

选取 2014 年某地区 48 h 典型连续负荷扰动工况(如图 12 所示), 在“ARR 控制”、“ACE 控制”和“本文方法”以及无储能情况下进行对比仿真, 并对结果进行分析。

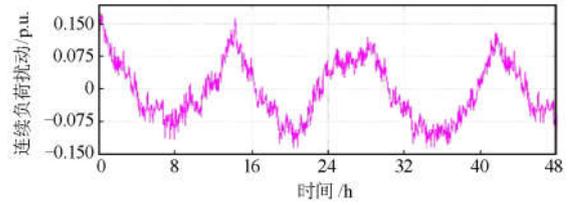


图 12 48 h 连续负荷扰动

Fig. 12 48-hour continuous load disturbance

不同控制方式下, 对应的频率偏差、分配给储能的 ACE 和-ARR 信号(ARR 取反)、储能和常规机组的出力情况以及储能电池的 SOC 状态分别如图 13—图 16 所示, 调频效果指标如表 4 所示。

由图 13—图 16 和表 4 可知:

1) 储能电源参与调频后, 无论采用哪种控制方式, 系统最大频率偏差和频率下降速度均减小, “本

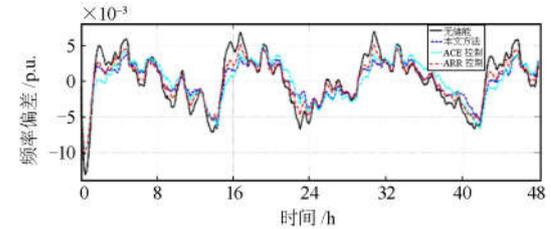


图 13 系统频率偏差

Fig. 13 System frequency deviation

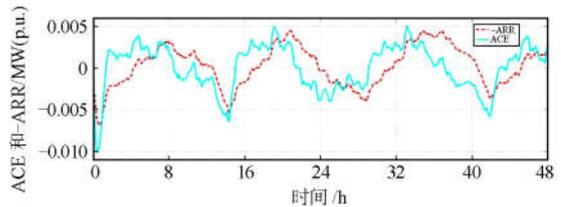


图 14 分配给储能的 ACE 和-ARR 信号

Fig. 14 ACE and -ARR signal distributed to energy storage

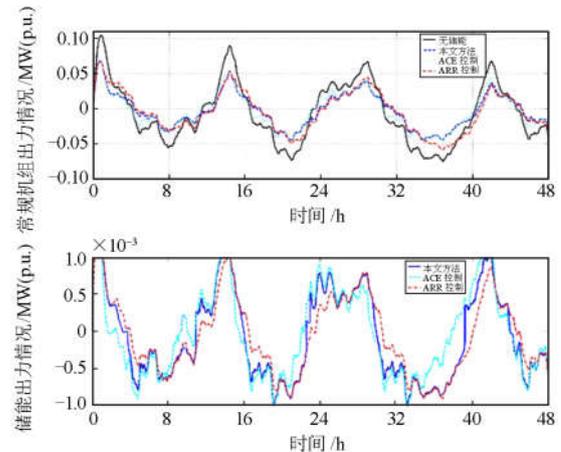


图 15 储能电池和常规机组的出力

Fig. 15 Output of energy storage battery and conventional unit

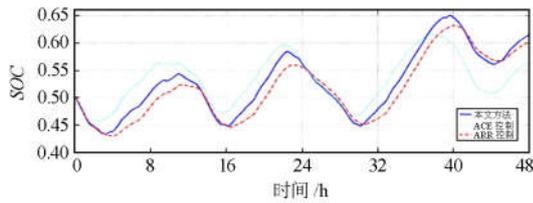


图 16 储能电池 SOC 状态

Fig. 16 SOC state of energy storage battery

表 4 调频效果指标

Table 4 Effectiveness index of frequency adjustment

| 评价指标 | 无储能 | 本文方法 | ACE 控制 | ARR 控制 |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $\Delta f_m/p.u.$ | -0.013 1 | -0.009 68 | -0.009 68 | -0.010 2 |
| $\Delta f_{rms}/p.u.$ | 0.003 72 | 0.002 61 | 0.002 9 | 0.002 84 |
| $V_m/(p.u./s)$ | 0.001 8 | 0.001 3 | 0.001 3 | 0.001 4 |
| $V_r/(p.u./s)$ | 8.58×10^{-6} | 1.12×10^{-5} | 6.57×10^{-6} | 1.61×10^{-5} |
| W_{gen}/MW | 10.524 | 8.958 | 9.213 | 8.634 |
| W_{ess}/MW | — | 0.906 | 0.417 | 0.873 |
| SOC_{rms} | — | 0.024 3 | 0.018 5 | 0.0251 |

文方法”和“ARR 控制”的频率恢复速度加快，但“ACE 控制方式”频率恢复速度减慢；

2) “本文方法”采用综合控制方式同时结合了“ACE 控制”模式快速恢复频偏和“ARR 控制”持续恢复稳态频偏的优势，具有更好的频率调节效果；

3) 由于 SOC 自恢复策略的存在，“本文方法”在更大的储能出力情况下，却比“ARR 控制”方式拥有更好的 SOC 保持效果，充分利用了常规机组剩余的二次调频爬坡余量。

从总体来看，基于“本文方法”的控制方式在减少最大频偏和持续减少稳态频偏方面具有明显优势，在调频效果更好的情况下，其容量需求介于二者之间，相较于“ARR 控制”方式对储能电池的容量和功率需求更小，相较于“ACE 控制”方式其调频效果更优且对常规机组的利用率更高，提升了储能电池参与二次调频的调频性能。

5 结论

本文分析了储能电源参与二次调频两种常见控制方式的优点，提出了一种基于模糊控制和 SOC 自恢复理论的综合控制模式。并与传统基于“ACE 控制”和“ARR 控制”对储能电源常规机组参与二次调频在连续扰动下进行了对比仿真，仿真结果表明：

1) 基于 ACE 信号的控制方式有利于快速恢复暂态频率偏差，基于 ARR 信号的控制方式在持续恢复稳态频率偏差具有优势；

2) 本文提出的综合控制方式，确定了储能的投

入、切换和结束的时刻，并在工作时提出了模糊控制出力和 SOC 自恢复两种工作模式。

3) 算例的验证结果，表明了本文控制策略的有效性，可同时改善储能和常规机组的运行性能，提高调频效果。

参考文献

- [1] 李建林, 田立亭, 米小康. 能源互联网背景下的电力储能技术展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 15-25.
LI Jianlin, TIAN Liting, LAI Xiaokang. Outlook of electrical energy storage technologies under energy internet background[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 15-25.
- [2] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 163-170.
LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. Survey on frequency regulation technology in high wind penetration power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 163-170.
- [3] MAGDY G, MOHAMED E A, SHABIB G, et al. Microgrid dynamic security considering high penetration of renewable energy[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 236-246. DOI: 10.1186/s41601-018-0093-1.
- [4] 李保恩, 李献伟, 毋炳鑫. 基于储能 SOC 状态的微电网能量优化调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 108-114.
LI Bao'en, LI Xianwei, WU Bingxin. Research on energy optimal dispatching strategy for microgrid based on battery SOC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 108-114.
- [5] 吕志盛, 闫立伟, 罗艾青, 等. 新能源发电并网对电网电能质量的影响研究[J]. 华东电力, 2012, 40(2): 251-256.
LÜ Zhisheng, YAN Liwei, LUO Aiqing, et al. Impact of new energy power grid-integration on grid power quality[J]. East China Electric Power, 2012, 40(2): 251-256.
- [6] MAKAROV Y V, DU P, KINTNER M C W, et al. Sizing energy storage to accommodate high penetration of variable energy resources[J]. IEEE Transactions Sustainable Energy, 2012, 3(1): 34-40.
- [7] 丛晶, 宋坤, 鲁海威, 等. 新能源电力系统中的储能技术研究综述[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(3): 53-59.
CONG Jing, SONG Kun, LU Haiwei, et al. Review of energy storage technology for new energy power system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2014, 33(3): 53-59.
- [8] 杨水丽, 李建林, 李蓓, 等. 电池储能系统参与电网调频的优势分析[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(2): 43-47.
YANG Shuli, LI Jianlin, LI Bei, et al. Advantages of

- battery energy storage system for frequency regulation[J]. *Power System and Clean Energy*, 2013, 29(2): 43-47.
- [9] 胡泽春, 夏睿, 吴林林, 等. 考虑储能参与调频的风储联合运行优化策略[J]. *电网技术*, 2016, 40(8): 2251-2257.
HU Zechun, XIA Rui, WU Linlin, et al. Joint operation optimization of wind-storage union with energy storage participating frequency regulation[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(8): 2251-2257.
- [10] 刘世林, 文劲宇, 孙海顺, 等. 风电并网中的储能技术研究进展[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(23): 145-153.
LIU Shilin, WEN Jinyu, SUN Haishun, et al. Progress on applications of energy storage technology in wind power integrated to the grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(23): 145-153.
- [11] 赵学顺, 甘德强, 文福拴, 等. 计及联络线功率偏差处罚的 AGC 容量获取与调节策略[J]. *电力系统自动化*, 2003, 27(23): 17-21.
ZHAO Xueshun, GAN Deqiang, WEN Fushuan, et al. Determination of AGC capacity requirement and regulation strategies considering penalties of tie-line power flow deviations[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(23): 17-21.
- [12] SANDULEAC M, TOMA L, EREMIA M, et al. Primary frequency control in a power system with battery energy storage systems[C] // 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), 2018, Palermo, Italy: 1-5.
- [13] 黄亚唯, 李欣然, 黄际元, 等. 电池储能电源参与 AGC 的控制方式分析[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2017, 29(3): 83-89.
HUANG Yawei, LI Xinran, HUANG Jiyuan, et al. Analysis of control methods for AGC with battery energy storage system[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2017, 29(3): 83-89.
- [14] 柯飞, 李欣然, 黄际元, 等. 储能系统参与电网调频服务的动态分配系数研究[J]. *电器与能效管理技术*, 2016(14): 41-45, 84.
KE Fei, LI Xinran, HUANG Jiyuan, et al. Study on distribution coefficient in frequency regulation services with energy storage system[J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2016(14): 41-45, 84.
- [15] 鲁尔洁, 陈峦, 李坚, 等. 基于改进模糊控制的发电系统频率调节研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(8): 46-52.
LU Erjie, CHEN Luan, LI Jian, et al. Research on power system frequency regulation based on improved fuzzy control[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(8): 46-52.
- [16] 吕超贤, 李欣然, 户龙辉, 等. 基于小波分频与双层模糊控制的多类型储能系统平滑策略[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(2): 21-29.
LÜ Chaoxian, LI Xinran, HU Longhui, et al. A smoothing strategy for hybrid energy storage system based on wavelet frequency allocation and two-level fuzzy control[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(2): 21-29.
- [17] HUANG H, LI F. Sensitivity analysis of load-damping characteristic in power system frequency regulation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(2): 1324-1335.
- [18] 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.
- [19] 蔚东晓, 贾霞彦. 模糊控制的现状与发展[J]. *自动化与仪器仪表*, 2006(6): 4-7.
WEI Dongxiao, JIA Xiayan. Present situation and development of fuzzy control[J]. *Automation & Instrumentation*, 2006(6): 4-7.
- [20] 李达. 风电场中混合储能系统的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
LI Da. Research on application of hybrid energy storage in wind farm[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [21] 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.

收稿日期: 2018-12-15; 修回日期: 2019-05-31

作者简介:

崔红芬(1984—), 女, 工程师, 从事柔性直流输电技术、分布式新能源并网技术研究; E-mail: cuihongfen@epri.sgcc.com.cn

杨波(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统储能应用、新能源发电技术研究; E-mail: yangbo@epri.sgcc.com.cn

蒋叶(1995—), 女, 硕士, 研究生, 从事电力系统稳定性分析与控制、电力系统储能应用研究。E-mail: 164341438@qq.com

(编辑 葛艳娜)