

基于模糊控制的电池储能系统辅助 AGC 调频方法

丁冬¹, 刘宗歧¹, 杨水丽², 吴小刚¹, 李婷婷³

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192;
3. 华能北京热电有限责任公司, 北京 100023)

摘要: 针对 AGC 控制中火电机组响应时滞长、机组爬坡速率低的问题, 提出了一种基于模糊控制策略的电池储能系统(Battery Energy Storage System, BESS)辅助 AGC 调频方法。该方法以区域控制偏差(Area Control Error, ACE)及其变化率作为模糊控制器的输入量, BESS 的参考功率变化量作为输出量, 根据系统的运行状态调节 BESS 输出功率, 辅助火电机组改善电网的动态调频性能。基于 Matlab/Simulink 平台的仿真结果表明, BESS 能够迅速响应负荷扰动, 减小了系统频率偏差和联络线功率偏差, 降低了系统的超调作用, 有助于提高电网 AGC 调频能力和增强系统的稳定性。

关键词: 电池储能系统(BESS); AGC 控制; 模糊控制; 区域控制偏差(ACE); 两区系统模型

Battery energy storage aid automatic generation control for load frequency control based on fuzzy control

DING Dong¹, LIU Zongqi¹, YANG Shuili², WU Xiaogang¹, LI Tingting³

(1. School of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. Huaneng Beijing Thermal Power Co., Ltd., Beijing 100023, China)

Abstract: As the thermal power units often require a long time to response to load disturbance and have low unit ramp rate, a method of battery energy storage system assisted automatic generation control based on fuzzy control strategy is proposed. This fuzzy controller uses Area Control Error (ACE) and its rate of change as inputs and the reference power variation as output. BESS output power is adjusted according to the system's operating status, assisting to improve the dynamic performance of the grid frequency regulation. Simulation results based on Matlab/Simulink platform show that BESS responds quickly to load disturbance, thus reducing the system frequency deviation and tie-line power deviation, lowering the unit ramp rate requirements, and improving the stability power system.

Key words: battery energy storage system (BESS); AGC control; fuzzy control; area control error (ACE); two-area system model

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)08-0081-07

0 引言

自动发电控制(Automatic generation control, AGC)是电网中实现有功功率平衡和系统频率稳定的重要方式。互联电力系统通常采用联络线功率频率偏差控制(Tie line bias frequency control, TBC)的方式, 维持系统频率为额定值并控制联络线功率在

计划值, 使区域控制偏差(Area control error, ACE)为零或在正常范围内, 实现电网的稳定运行^[1]。目前, 我国的 AGC 电源主要为火电机组, 其缺点是响应时滞长、机组爬坡速率低, 不能准确跟踪调度 AGC 指令; 同时, 由于一次调频死区等非线性环节的存在, 传统的 AGC 线性模型控制方式不能实现良好的动态调节性能^[2]。另外, 随着风力、光伏等新能源发电大规模并网, 其快速波动性对电网频率调节的速度提出了更高的要求^[3]。根据 AGC 控制性能的考核标准, 提高电网 AGC 控制性能应做到改

基金项目: 国家电网公司科技项目资助 (DG71-14-032, DG71-13-031)

善 AGC 系统的动态响应能力, 减小超调量, 加快调节速度。因此, 亟需研究新技术以满足电网调频要求。

电池储能快速、准确的功率响应能力, 使其在调频领域的应用潜力巨大^[4-11]。研究表明, 持续充/放电时间为 15 min 的储能系统, 其调频效率约为水电机组的 1.4 倍, 燃气机组的 2.2 倍, 燃煤机组的 24 倍; 同时, 少量的储能可有效提升以火电为主的电力系统 AGC 调频能力^[12]。电池储能系统与电网的功率交换过程通过控制器实现, 如 PI 控制器、比例控制器、功率差额控制器^[13]等, 其中 PI 控制若采用固定参数则不能实现良好的调节效果, 而动态参数的整定又较为复杂; 比例控制在负荷波动干扰较大时, 不能体现出储能装置的优势; 功率差额控制应用简单, 但是控制性能受到系实际状况的影响较大。

针对上述问题, 本文提出一种基于模糊控制策略的电池储能系统辅助 AGC 调频方法。该方法以区域控制偏差及其变化率作为模糊控制器的输入量, BESS 的参考功率变化量作为输出量, 根据系统的运行状态调节 BESS 输出功率, 辅助火电机组改善电网的动态调频性能。基于 Matlab/Simulink 平台的仿真结果表明, 本方法能够迅速响应负荷扰动, 减小了系统频率偏差和联络线功率偏差值, 降低了系统的超调量, 缩短了调节时间, 有助于提高电网 AGC 调频的动态性能和增强系统的稳定性。

1 系统结构及其频率调节

本文以典型的两区域模型负荷频率控制为例进行研究, 并且在两个控制区中均配置电池储能装置, 如图 1 所示。系统频率调节过程为: 当电网中某区域的负荷突然增加时, BESS 以其快速的响应特性立刻向电网释放电能, 阻止 ACE 的继续增大; 同时随着火电机组功率的逐渐攀升, 并能完全补偿负荷波动时, BESS 逐渐退出运行。同理, 当区域中的负荷突减时, BESS 立刻吸收电网多余的电能, 并随着火电机组的减发功率, BESS 逐渐退出运行。

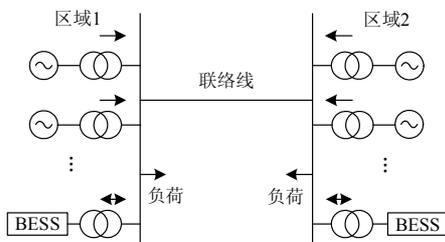


图 1 含 BESS 的系统示意图
Fig. 1 Demonstration of system with BESS

1.1 电池储能系统模型

电池储能装置主要包括电池组、变流器、控制器、变压器等部分, 其辅助调频作用主要是通过变流器与电网交换有功功率实现。通过对 BESS 的有功和无功功率进行解耦控制, 改变功率参考值, 即可实现控制目的^[14]。在本文中, 选择 BESS 辅助调频的参考功率变化量作为有功功率的控制信号。

BESS 用于辅助 AGC 控制时, 跟踪控制信号进行充、放电过程均需一定的响应时间, 可采用一阶惯性环节进行简化描述^[15-17]。设 BESS 的传递函数为 G_{BESS} , 其表达式为

$$G_{\text{BESS}} = \frac{1}{1 + sT_{\text{BESS}}} \quad (1)$$

式中, T_{BESS} 为 BESS 响应的时间常数, 本文取 $T_{\text{BESS}} = 1 \text{ s}$ 。

1.2 系统频率响应模型

电力系统在稳定运行时的负荷变化较小, 则可以在系统稳定运行点附近进行线性化, 构建线性模型进行动态分析。

根据文献[2]提出的建模方法, 建立含 BESS 辅助控制的两区域再热式火电互联调频动态模型, 并且将各区域分别等值为一台再热式火电机组, 互联动态模型如图 2 所示。图中: T_{BESS} 为 BESS 的时间常数; T_{g_i} 为调速器时间常数; T_{r_i} 为再热时间常数; T_{i_i} 为发电机时间常数; R_i 为机组调差系数; B_i 为系统偏差系数; K_{r_i} 为再热系数; T_{12} 为两区域间的联络线功率同步系数; K_{p_i} 为电力系统增益; T_{p_i} 为电力系统时间常数; a_{12} 为两系统的容量换算系数; Δf_i 为频率变化量; ΔP_{L_i} 为负荷变化量。

2 电池储能系统的控制策略

2.1 电池储能系统的控制策略

电池储能系统辅助 AGC 调频时, BESS 和火电机组均以 ACE 为控制目标。通常可将 ACE 划分为死区、正常调节区、紧急调节区等多个控制区, 在不同区域内采用不同的调节方式进行调频^[1], 而不同的控制区以阈值进行划分。文中, 设正常调节区、紧急调节区的 ACE 阈值分别为 $ACE_{\text{reg.set}}$ 和 $ACE_{\text{ea.set}}$, 超出紧急调节区的阈值为 $ACE_{\text{ea.end}}$ 。

针对 ACE 不同控制区, 设计 BESS 辅助 AGC 控制的方案如下。

当 $|ACE| \leq ACE_{\text{reg.set}}$ 时, BESS 出力为零, 火电机组调节功率为零, 即维持原出力值。

当 $ACE_{\text{reg.set}} < |ACE| \leq ACE_{\text{ea.set}}$ 时, 由 BESS 辅助火电机组进行调节, 即先由 BESS 快速出力,

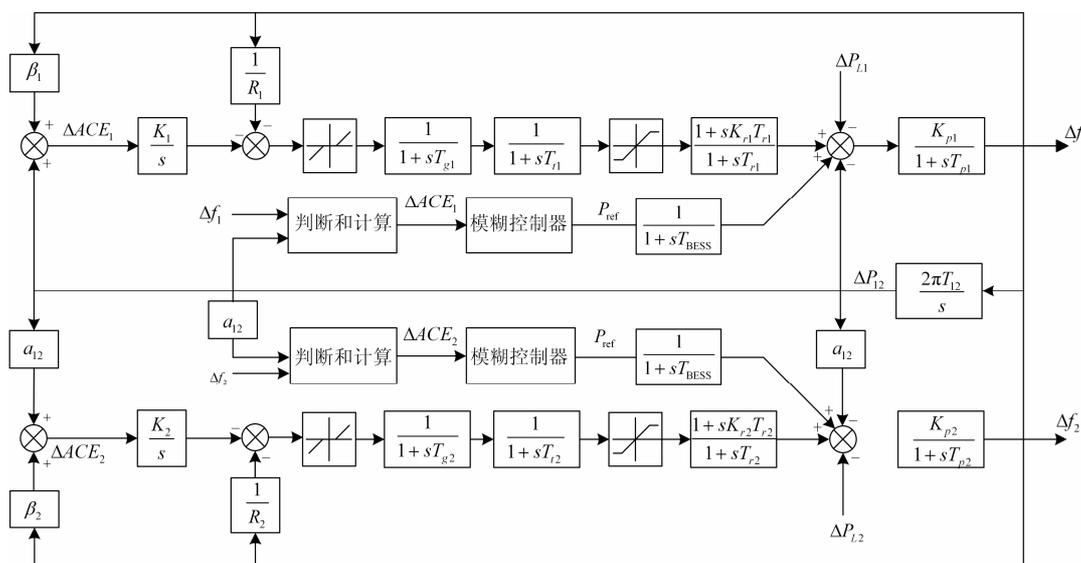


图 2 含 BESS 装置的两区系统调频模型图

Fig. 2 Frequency control model of two-area system with BESS

在火电机组逐渐增加出力的同时 BESS 减出力, 当火电机组出力满足负荷波动功率、系统逐渐达到新的平衡时, BESS 退出运行。

当 $ACE_{ea.set} < |ACE| \leq ACE_{ea.end}$ 时, 电网处于紧急调节区, BESS 应以最大输出功率进行调节。当 $|ACE| > ACE_{ea.end}$ 时, BESS 和 AGC 机组均不动作, 电网采用切负荷等其他手段使电网恢复稳定。

2.2 基于模糊控制的电池储能系统控制策略

模糊控制(Fuzzy Logic Control, FLC)属于智能控制范畴, 在电力系统中应用广泛。它不依赖于具体的数学模型即可根据系统实时动态情况实施控制, 非线性控制效果好^[18-19]。因此, 本文采用模糊控制的方法, 实现 BESS 辅助火电机组进行 AGC 调节的目的。

根据联络线功率频率偏差控制(TBC)方式的要求, AGC 控制的目标是维持控制区内 ACE 为零或在正常范围内, 其表达式为

$$ACE = B_i \Delta f_i + \Delta P_{tie} \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

式中: B_i 是控制区 i 的系统偏差系数; Δf_i 是其系统频率偏差; ΔP_{tie} 是区域 i 与其他区域的联络线功率偏差。

采用模糊控制调整出力大小, 其具体思想为: 在负荷波动初期机组功率尚在爬坡时, BESS 输出/吸收电能, 抵消部分的负荷变动, 缓解对系统的冲击; 当机组通过增发/减发功率使系统达到新的稳定状态时, BESS 退出运行。当 ACE 偏差量较大且其变化率较大时, BESS 的输出功率较大, 以使 ACE 尽快恢复至正常范围内; 当 ACE 偏差量较小且其变化率较小时, BESS 的输出功率较小。

基于模糊控制的 BESS 控制策略流程图如图 3 所示。图中, ΔP_{ref} 为 BESS 参考功率, $\Delta P_{BESS \cdot max}$ 为 BESS 的最大输出功率。

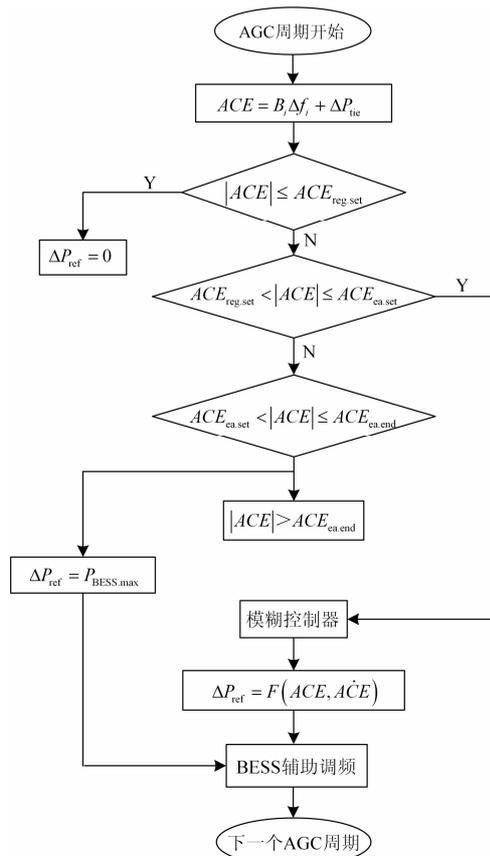


图 3 BESS 控制策略流程图

Fig. 3 Fuzzy logic control structure of BESS

2.3 模糊控制器设计

在 BESS 辅助 AGC 调频过程中,其有功功率参考信号由模糊控制器发出,并对电池的变流器进行控制,以实现按给定功率信号输出的目的。基于 ACE 及其变化率的大小给出电池储能系统的有功功率参考变化量,模糊控制器的设计框图如图 4 所示。 $(ACE \pm ACE_{reg.set})$ 和 $d\Delta ACE/d\Delta t$ ($ACE > 0$ 时取负, $ACE < 0$ 时取正)为模糊控制器的输入量,输出量 ΔP_{ref} 是有功功率参考变化量; α_1 、 α_2 为量化因子,用来调节模糊控制器,以期达到良好的动态性能。

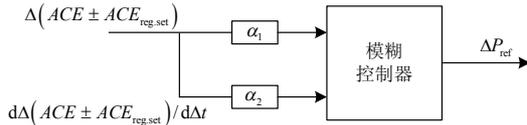


图 4 BESS 模糊控制结构图

Fig. 4 Fuzzy logic control structure of BESS

模糊控制器的控制过程分为三步:输入输出变量模糊化、模糊推理和解模糊化。

(1) 输入输出变量模糊化

将 ACE 及 $d\Delta ACE/d\Delta t$ 划分成不同的模糊集,通过隶属函数计算输入变量对各模糊集的隶属度,用 μ 表示。模糊集划分越细,控制越精确。故将 $(ACE \pm ACE_{reg.set})$ 和 $d\Delta ACE/d\Delta t$ 划分为 8 个等级的模糊子集,即 {NB}, {NM}, {NS}, {NZ}, {PZ}, {PS}, {PM}, {PB}, 分别表示 {负大}、{负中}、{负

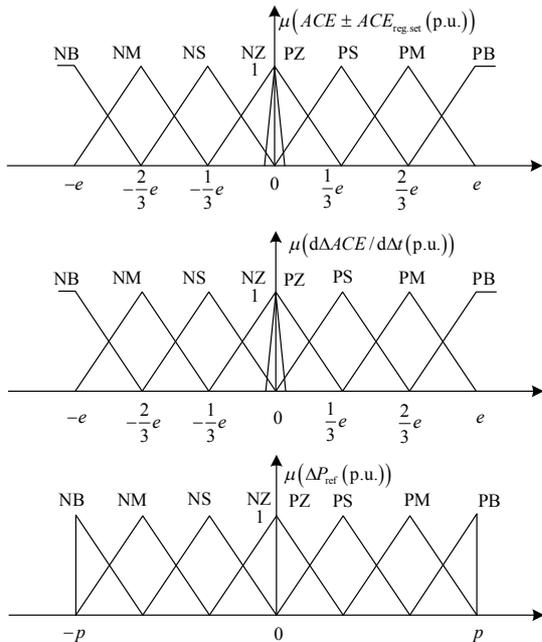


图 5 隶属度函数

Fig. 5 Fuzzy membership function

小}、{负零}、{正零}、{正小}、{正中}、{正大};输出 ΔP_{ref} 划分为 7 个等级,为 {NB}、{NM}、{NS}、{Z}、{PS}、{PM}、{PB}。本文采用三角形隶属函数,隶属度的取值范围为 [0, 1]。输入变量的论域范围依控制区域系统的实际情况而定,可根据系统长期的统计规律确定。设 $(ACE \pm ACE_{reg.set})$ 的论域范围为 $[-e, e]$, 其中 $e = ACE_{ea.set} - ACE_{reg.set}$; $d\Delta ACE/d\Delta t$ 为 $[-\dot{e}, \dot{e}]$, 其中 $\dot{e} = |\max\{d\Delta ACE/d\Delta t\}|$ 。输出变量的论域范围由 BESS 的额定功率 $P_{BESS,N}$ 和控制区的功率基值 P_B 的比例确定, 设为 $[-p, p]$, 其中 $p = P_{BESS,N}/P_B$ 。

(2) 模糊推理

根据 BESS 辅助 AGC 控制的策略要求,确定模糊控制规则, 具体如表 1 所示。

表 1 BESS 模糊控制规则表

Table 1 Fuzzy logic rules for BESS

$d\Delta ACE$ $d\Delta t$	ACE							
	NB	NM	NS	NZ	PZ	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	Z	Z	Z
NM	PB	PB	PB	PM	PM	Z	Z	Z
NS	PM	PM	PM	PM	Z	Z	NS	NS
NZ	PM	PM	PS	Z	NS	NS	NS	NS
PZ	PS	PS	PS	PS	Z	NS	NM	NM
PS	PS	PS	Z	Z	NM	NM	NM	NM
PM	Z	Z	Z	NM	NM	NB	NB	NB
PB	Z	Z	Z	NM	NB	NB	NB	NB

模糊蕴含关系采用 Mamdani^[20-21]最小规则求取。根据该控制规则, 可求得用模糊子集表示的输出量。

(3) 解模糊化

采用最大隶属度法进行解模糊计算, 由模糊子集表示的输出量得到精确的参考功率变化值。

3 仿真验证

为验证本文提出的基于模糊控制策略的 BESS 辅助 AGC 控制效果, 在 Matlab/Simulink 中搭建以联络线功率频率偏差为控制目标的含 BESS 两区域互联 AGC 系统仿真模型, 如图 2 所示。两区域均为再热式火电机组, 并考虑机组爬坡率和死区限制, 仿真模型参数^[22]选取如下: $f_N=60$ Hz, $T_{gr}=0.08$ s, $T_{ri}=10$ s, $T_{ti}=0.3$ s, $T_{pi}=20$ s, $K_{ri}=0.5$, $K_{pi}=120$ Hz/p.u., $R_i=2.4$, $B_i=0.425$, $T_{12}=0.086$ s。设两系统的装机容量均为 1 000 MW, 并选取基准功率为 1 000 MW。死区^[23]上限 $ACE_{reg.set}=0.001$ p.u., 正常调节区上限

$ACE_{ca.set}=0.03$ p.u., 则输入变量的论域范围为 $[-0.029, 0.029]$ p.u.。同时, 设置 $\max\{d\Delta ACE/dt\}=0.029$ p.u.(根据运行经验, ACE 变化率小于 ACE, 将输入变量 $d\Delta ACE/dt$ 的论域范围取与 $(ACE-ACE_{reg.set})$ 相同时, 满足模糊控制要求。输出变量的论域范围为 $[-0.01, 0.01]$ 。

为分析 BESS 的辅助控制作用及系统频率的动态响应, 在区域中加入负荷扰动进行验证。同时, 为验证 BESS 模糊控制方式的控制效果, 将其与传统的 AGC 控制方式和 BESS 采用 PI 控制方式进行辅助调频时的系统动态响应进行了对比分析。考虑到 BESS 在波动初期迅速响应, 机组与负荷波动平衡后 BESS 退出运行的辅助控制效果, PI 控制器的参数选取为 $K_p=0.15$, $K_i=0.001$ 。

负荷扰动方式 1: $t=5$ s 时, 区域一中加入阶跃负荷扰动, 并且 $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u., 如图 6(a)所示。电网动态响应曲线如图 6(b)~图 6(e)所示。

由图 6(b)~图 6(d)可以看出, 当区域一中加入阶跃负荷扰动后, 在传统的 AGC 控制方式下, 区域一的频率偏差最大值达到了 0.07 Hz, 联络线功率偏差最大值达到 0.008 p.u.; 同时, 区域一的 ACE 也产生较大偏差。BESS 辅助 AGC 调频的系统动态响应曲线偏离正常值的偏差量更小, 且恢复稳定的时间短。这是因为在负荷波动发生时, BESS 迅速、大功率的输出响应有效抑制了偏差量的继续增大。另外, 由图 6(d)可以看出, 在加入 BESS 辅助控制后, 大大缓解了区域间联络线的功率震荡, 联络线功率波动较小, 利于各控制区负荷更快速就地平衡。通过对比模糊控制和 PI 控制方式下的响应曲线可看出, 采用模糊控制方式时偏差量幅值进一步减小, 且几乎不产生超调。同时, 由图 6(e)所示的 BESS 功率响应曲线可看出, 在模糊控制方式下, 负荷产生波动的初期, BESS 输出功率迅速增大, 但随着 ACE 的减小 BESS 功率逐渐减少; 在 PI 控制下, BESS 的功率输出随时间的增加逐渐增大, 但调节作用延缓。因此, 模糊控制对辅助电网的 AGC 调频作用更有优势。

负荷扰动方式 2: 区域一中负荷连续波动。其波动范围设为 $[-0.01$ p.u., 0.01 p.u.] , 如图 7(a)所示。电网动态响应曲线如图 7(b)~图 7(e)所示。

由图 7(b)~图 7(d)可以看出, 当区域一中负荷连续波动时, 传统 AGC 控制方式下的系统频率、联络线功率及 ACE 均产生了大幅度的波动。而采用模

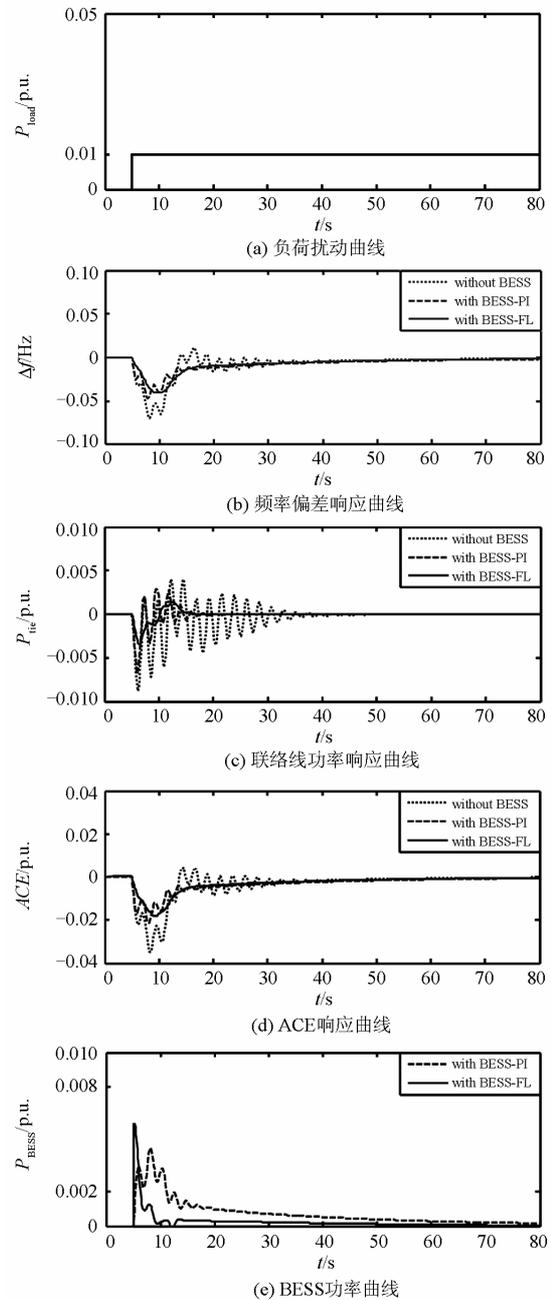


图 6 $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u.时的系统动态响应

Fig. 6 System dynamic performance for a step load increase $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u.

糊控制的 BESS 辅助调频作用使得电网频率偏差最大时减小了 0.05 Hz, 联络线功率偏差减小 0.004 p.u., 说明了本控制策略的可行性, 且通过与 PI 控制方式的对比发现, 其控制效果优于 PI 控制。由图 7(e)所示的 BESS 输出功率曲线可以看出, 与传统的 PI 控制相比, 模糊控制下 BESS 更早达到较大功率值, 因而调节效果更佳。

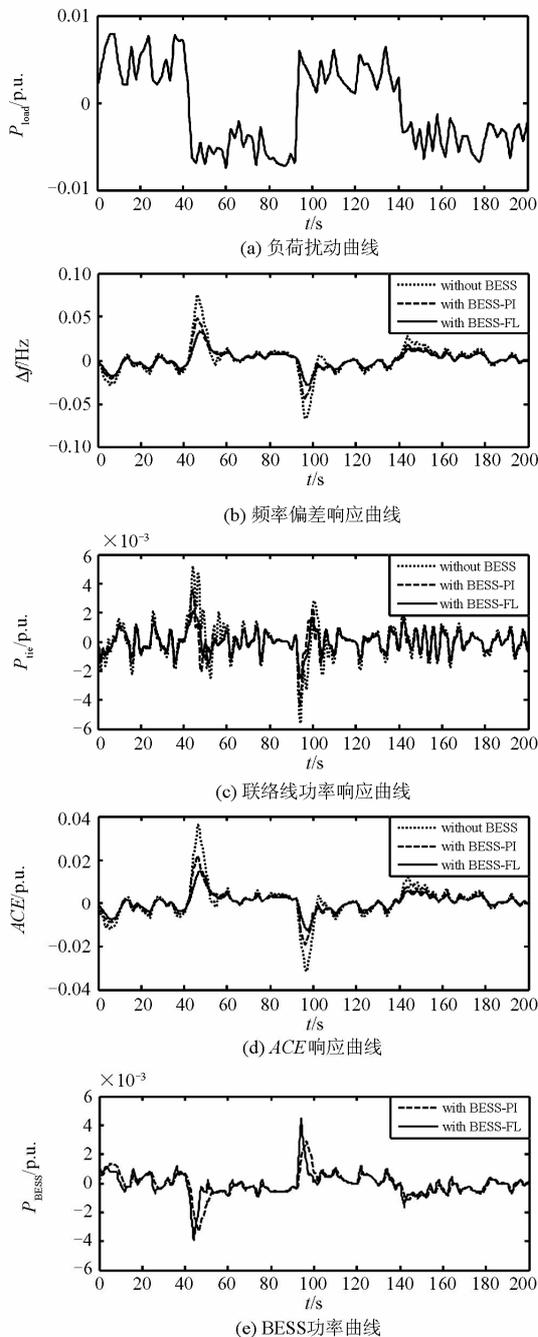


图7 负荷连续波动时的系统动态响应

Fig. 7 System dynamic performance for a successive load disturbance in area 1

4 结论

本文探究了BESS在辅助电力系统AGC控制中的应用。分析表明,采用模糊控制的方法,根据区域控制偏差ACE及其变化率的大小控制BESS的功率输出,对减少系统频率和联络线功率偏差及降低超调作用显著。借助BESS辅助互联电力系统AGC

控制,将大大改善系统调频的动态性能。

参考文献

- [1] 《电力系统调频与自动发电控制》编委会. 电力系统调频与自动发电控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 73-92.
- [2] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-hill, 1994.
- [3] ACKERMANN T. Wind power in power systems[M]. New York: Wiley, 2005.
- [4] 陈大宇, 张粒子, 王澍, 等. 储能在美国调频市场中的发展及启示[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 9-13. CHEN Dayu, ZHANG Lizi, WANG Shu, et al. Development of energy storage in fequency regulation of unite states and its enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 9-13.
- [5] 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 Shuili, 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.
- [6] KUNISCH H J, KRAMER K G, DOMINIK H. Battery energy storage, another option for load frequency control and instantaneous reserve[J]. IEEE Transactions on Energy Conversions, 1986, 1(3): 41-46.
- [7] TAYLOR J. Large scale Li-ion energy storage systems facilitate network integration of renewables[R]. Aberdeen: All Energy Conference, 2011.
- [8] 姚勇, 朱桂萍, 刘秀成, 等. 电池储能系统在改善微电网电能质量中的应用[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 85-89. YAO Yong, ZHU Guiping, LIU Xiucheng, et al. Feasibility study of region improvement of power quality of micro-grids by battery energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 85-89.
- [9] 邵明燕, 刘瑞叶, 吕殿君. 微网孤立运行时的调频策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 60-65. SHAO Mingyan, LIU Ruiye, LÜ Dianjun. Study on frequency regulation scheme for islanded microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 60-65.
- [10] 张文亮, 邱明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 1-9. ZHANG Wenliang, QIU Ming, LAI Xiaokang. Application of energy storage technologies in power grids[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 1-9.
- [11] 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.
- [12] Assessing the value of regulation resources based on their time response characteristics[M]. Pacific Northwest National Laboratory, 2008.
- [13] 赵静波, 雷金勇, 甘德强. 电池储能装置在抑制电力系统低频振荡中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 93-99.
ZHAO Jingbo, LEI Jinyong, GAN Deqiang. Application of battery energy storage devices in suppressing low-frequency oscillation of power system[J]. Power System Technology, 2008, 32(6): 93-99.
- [14] 王皓怀, 汤涌, 侯俊贤, 等. 提高互联电网暂态稳定性的大规模电池储能系统并网控制策略及应用[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 327-333.
WANG Haohuai, TANG Yong, HOU Junxian, et al. Grid-integration control strategy of large-scale battery energy storage system and its application to improve transient stability of interconnected power grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 327-333.
- [15] 孙建波, 赵娴, 李大虎, 等. 利用储能抑制互联电力系统联络线功率振荡的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 10-17.
SUN Jianbo, ZHAO Xian, LI Dahu. Study on energy storage in damping tie line power oscillations in power system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 10-17.
- [16] LI X J, HUI D, LAI X K, et al. Power quality control in wind/fuel cell/battery/hydrogen electrolyzer hybrid microgrid power system[J]. Applications and Experiences of Quality Control, 2011: 579-594.
- [17] LEE D J, WANG L. Small-signal stability analysis of an autonomous hybrid renewable energy power generation/energy storage system Part I: time-domain simulations[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 311-320.
- [18] ALI M, MURATA T, TAMURA J. A fuzzy logic-controlled superconducting magnetic energy storage for transient stability augmentation[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15(1): 144-150.
- [19] 赵书强, 丁峰, 侯子利. 自寻优模糊电力系统稳定器的设计[J]. 电工技术学报, 2004, 19(3): 94-98.
ZHAO Shuqiang, DING Feng, HOU Zili. Design of self-optimizing fuzzy power system stabilizer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(3): 94-98.
- [20] 石庆升, 张承慧, 崔纳新. 新型双能量源纯电动汽车能量管理问题的优化控制[J]. 电工技术学报, 2008, 23(8): 137-142.
SHI Qingsheng, ZHANG Chenghui, CUI Naxin. Optimal control of energy management in novel electric vehicles with dual-source energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(8): 137-142.
- [21] 李国栋, 丁宁, 徐永海. 基于 Mamdani 型模糊推理的电压暂降源识别[J]. 华北电力大学学报, 2010, 37(2): 43-48.
LI Guodong, DING Ning, XU Yonghai. Voltage sag disturbance recognition based on Mamdani fuzzy inference[J]. Journal of North China Electric Power University, 2010, 37(2): 43-48.
- [22] NANDA J, MANGLA A, SURI S. Some new findings on automatic generation control of an interconnected hydrothermal system with conventional controllers[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(1): 187-194.
- [23] 贾德香, 程浩忠, 马鸿杰, 等. 基于改进禁忌算法的区域控制偏差分区优化方法[J]. 电网技术, 2007, 31(7): 1-5.
JIA Dexiang, CHENG Haozhong, MA Hongjie, et al. Region partitioning optimization of area control error based on improved Tabu search algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 31(7): 1-5.

收稿日期: 2014-06-16; 修回日期: 2014-10-16

作者简介:

丁冬(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统可靠性与大规模电池储能技术; E-mail: dingdong_1130@sina.com

刘宗歧(1963-), 男, 教授, 研究方向为新能源发电与智能电网技术;

杨水丽(1979-), 女, 工程师, 硕士, 研究方向为电能存储与转换技术。

(编辑 姜新丽)