

DOI: 10.7667/PSPC152101

基于模糊控制的混合储能平抑风电功率波动

蒋小平¹, 彭朝阳¹, 魏立彬¹, 罗中戈²

(1. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083; 2. 国网北京市电力公司城区供电公司, 北京 100037)

摘要: 风电功率波动对电网造成不容忽视的影响。风电并网处加入混合储能系统可以有效地降低风电对电网的影响。首先按照风电并网波动量要求, 估算出某时刻的预估风电波动量。然后根据风电预估波动功率以及电池当前的能量状态建立模糊控制器, 输出平抑系数 K_1 , 并计算出混合储能系统的实际输出功率以及风储并网功率。最后利用需混合储能 SOE 变化量以及超级电容器当前能量状态, 建立模糊控制器, 输出分配系数 K_2 , 计算当前超级电容器和电池的实际输出功率, 并实时更新混合储能的能量状态。通过算例证明, 在混合储能容量充足和不足的情况下协调控制算法均可靠、有效, 并且能够充分解决混合储能使用寿命和风电功率波动平抑度之间的矛盾。

关键词: 风电有功功率波动; 混合储能; 模糊控制; 协调控制策略; 能量状态

Hybrid energy storage for smoothing wind power fluctuations based on fuzzy control

JIANG Xiaoping¹, PENG Chaoyang¹, WEI Libin¹, LUO Zhongge²

(1. School of Mechanical Electronic & Information Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. State Grid Beijing Urban District Power Supply Company, Beijing 100037, China)

Abstract: The influence of wind power fluctuations on the grid can not be ignored. Adding hybrid energy storage system to wind power grid system can effectively reduce the effects of wind power on the grid. First of all, according to the requirements of fluctuations in the amount of wind power network, this paper estimates the amount of forecast wind power fluctuations on a moment. Then, it establishes a fuzzy controller based on the wind power forecast fluctuations power and battery current energy state, outputs stabilizing coefficient K_1 , and calculates the actual output power of the hybrid energy storage system and grid power of the wind storage. Thirdly, it utilizes the hybrid energy storage SOE variation and super capacitor current energy state, establishes a fuzzy controller, outputs distribution coefficient K_2 , calculates the actual output power of the super capacitor and battery, and updates the energy state of hybrid energy storage in real time. Finally, an example proves that coordination control algorithms are reliable and effective in hybrid energy storage capacity under the condition of sufficient and insufficient, and is able to adequately resolve the contradiction between the service life of the hybrid energy storage and wind power fluctuation degree of ease.

This work is supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 00-800015G2).

Key words: wind active power variation; hybrid energy storage systems; fuzzy control; coordinated control strategy; energy state

0 引言

目前, 能源问题已经成为了世界各国所关注的重点问题。在未来, 新能源必定在能源结构中占有重要一席。风电功率的波动性造成对电网的冲击, 极大限制了其在电网中的渗透率^[1-3]。

国内外专家学者对此进行了大量的分析与研究。文献[4-6]说明利用储能系统可以有效地平滑风

电并网功率, 降低风电波动对电网的影响, 有效改善风电的电能品质, 有利于风电并网; 文献[7]利用电池储能系统平滑风电功率波动可以提高风力发电功率输出的稳定性; 文献[8-9]说明混合储能系统具有保护能量型储能, 且更加可靠、有效地平抑风电功率波动; 文献[10]为了平抑风功率波动, 提出了一种基于模型预测控制(MPC)原理的平抑风电功率波动的电池储能控制方法; 文献[11]提出一种蓄电池和虚拟储能的协调控制策略, 用于有效平抑微网联络线功率波动; 文献[12]改变平抑时间常数和电池储能系统充放电目标功率为目标的平抑风电功率

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(00-800015G2)

波动的自适应控制策略; 文献[13]提出了一种基于小波理论用于平抑风电功率波动的混合储能系统容量配置及协调控制方法; 文献[14]提出基于小波包模糊协调控制分配混合储能功率方法, 体现在频域上分配储能输出优化分配的控制方式; 文献[15]设计模糊神经 PID 控制器, 采用模糊神经网络算法对混合储能系统 PID 控制参数进行在线优化; 文献[16]对大规模风电并网的某区域电网负荷与风电出力的数据进行了统计分析, 得到负荷和风电出力的时域分布规律, 提出了利用储能系统协调风电场有功出力与其并网系统负荷功率波动的策略; 文献[17]提出了一种基于模糊控制策略的电池储能系统辅助 AGC 调频方法; 文献[18]通过建立负荷与储能装置的协调优化模型, 实现在微网可靠性评估中计及负荷与储能装置协调优化的影响。

从上述文献中可以看出, 风电有功功率波动量提取以及电池和超级电容器的功率分配是实现风储联合系统的重点。在频域上, 利用滤波原理(滤波器或是小波理论)分配储能功率, 体现了储能的特点并适度地保护了电池, 但存在各频段的分界频率难以界定、电池和超级电容器出现正负相反的输出功率、控制指令延时等问题。在时域上, 一般利用滑动平均等方法计算并网功率以及需储能输出功率, 再利用经验模态分解或检测电池或超级电容器 SOE 的状态分配各储能输出功率, 但在分配过程中仍存在如滑动平均法的窗口大小选择困难、储能的高低电位时充放电的保护等问题。

基于以上考虑, 本文提出一种基于模糊控制的混合储能系统用于平抑风电有功功率波动的方法。首先, 从实时控制角度出发, 根据风电并网有功功率波动要求计算预估混合储能出力功率, 并根据该功率与电池额定功率的比值(表征需储能出力情况)与电池当前时刻的 SOE 情况(表征储能接纳能力)计算储能实际出力; 然后, 以优先超级电容器充放电为前提, 根据其 SOE 状态和储能实际输出功率分配储能各自实际输出功率, 完成混合储能的协调控制。最后, 通过算例分析该控制方式简单, 具有实时性, 并解决了储能系统保护与风电功率平抑的矛盾, 合理、有效地完成平抑风电功率波动的目的。

1 抑风电功率波动系统结构

双馈风机与储能系统组成结构与模糊协调控制图如图 1 所示。其中实线表示能量传输、长虚线表示控制信号线、点虚线表示检测信号线。其中 P_w 为风电输出有功功率, P_g 经储能平滑的并网有功功率, P_c 表示超级电容器的输出功率, P_b 表示电池的输出功率, 显然可得式(1)。

$$P_g = P_w + P_b + P_c \quad (1)$$

式(1)中: P_w 是根据风力的不可控制量, 可测量得到; P_g 是并网功率, 需满足电网对有功功率的要求, 本文采用 30 min 内有功功率波动需在风场容量的 7% 以内; 储能系统输出 P_b 、 P_c 为可控输出功率, 使并网功率满足以上要求。

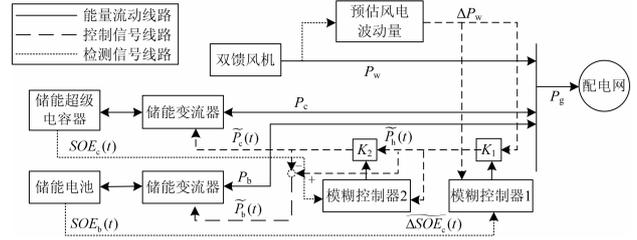


图 1 系统结构图

Fig. 1 System structure diagram

假设电池额定输出功率 P_b 、容量 Q_b , 电池额定输出功率 P_c 、容量 Q_c , 假设储能充电时, 输出功率为正; 放电时, 输出功率为负。如图 1 所示模糊控制器 1、2 是混合储能系统的控制部分, 其输入与输出参数如图 2 所示。根据实时的风电有功功率情况, 利用式(2)计算出 t 时刻风电功率的波动部分 $\Delta P_w(t)$; 由 $\Delta P_w(t)/P_b$ 和电池 $SOE_b(t)$ 作为模糊控制器 1 的输入, 得到比例系数 $K_1(t)$, 根据式(3)计算储能实际输出功率 $\tilde{P}_h(t)$; 由 $\tilde{P}_h(t)$ 在一个采样时间内的能量变换状态 $\Delta SOE_c(t)$ (假设 $\tilde{P}_h(t)$ 均交由超级电容器处理)和 $SOE_c(t)$ 作为模糊控制器 2 的输入, 得到比例系数 $K_2(t)$, 根据式(4)分配电池和超级电容器的实际输出功率 $P_b(t)$ 和 $P_c(t)$; 根据实际输出功率实时更新储能能量状态, 如式(5)。

$$\begin{cases} P_{wm}(t) = \max(P_w(t) - P_g(t-1), \dots, P_w(t) - P_g(t-N)) \\ \Delta P_w = P_{wm}(t) - \text{sign}(P_{wm}(t)) \times \Delta P \end{cases} \quad (2)$$

式中: N 表示 t 时刻之前的 N 个时刻点, $P_{wm}(t)$ 和 ΔP 分别表示在 $[t-N, t]$ 时段内, 风电有功功率波动最大值和允许并网有功功率波动的最大值, \max 表示取一组数据的最大值, $\text{sign}(x)$ 函数为符号函数, 表示 $\text{sign}(x) = x/|x|$ 。

$$\tilde{P}_h(t) = K_1(t) \times \Delta P_w(t) \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_c(t) = K_2(t) \times \tilde{P}_h(t) \\ P_b(t) = \tilde{P}_h(t) - P_c(t) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} SOE_c(t+1) = SOE_c(t) + P_c(t) \times T / Q_c \\ SOE_b(t+1) = SOE_b(t) + P_b(t) \times T / Q_b \end{cases} \quad (5)$$

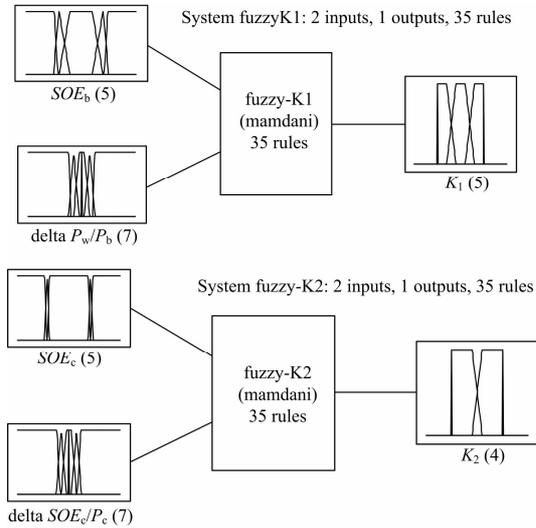


图 2 模糊控制器结构图

Fig. 2 Fuzzy controller structure diagram

2 模糊控制器设计

图 1 和图 2 说明了储能系统的结构和控制结构，其中模糊控制器是由对输入输出模糊化后，进行模糊推理运算，最后通过去模糊化建立。其中输入输出模糊化是由各变量的隶属度函数实现，模糊推理由模糊规则表实现，去模糊化由参数影响能力决定。

图 3 是模糊控制器 1 的输入输出隶属度函数，表 1 是相应的模糊推理规则。在本文中，模糊控制器 1 的输入 $\Delta P_w(t)/P_b$ 的模糊集采用 {NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB} 构成，范围是 $[-\infty, +\infty]$ ；输入电池 $SOE_b(t)$ 的模糊集采用 {Z, L, M, H, O} 构成，范围是 $[0, 1]$ ；输出比例系数 $K_1(t)$ 的模糊集采用 {L, LM, M, HM, H} 构成，范围是 $[0, 1]$ ；隶属度函数均由三角函数或是梯形函数构成。因为两个输入对输出的影响均很重要，直接影响储能是否能够容纳风电功率波动的能量，故去模糊化选择最大隶属度最小值法。

根据图 3 和表 1 分析：当 $\Delta P_w(t)$ 为负时，储能系统需要放电，当 $\Delta P_w(t)/P_b$ 为 NB，即大功率放电时：1) 电池 $SOE_b(t)$ 为 Z，即接近零电位，储能不能承担风电功率波动，故 K_1 为 L，即无法平抑风电波动；2) 电池 $SOE_b(t)$ 为 L，即处于低电位，储能可以平抑很小部分的风电功率波动，故 K_1 为 LM；3) 电池 $SOE_b(t)$ 为 M，即处于中等电位，但 $\Delta P_w(t)/P_b$ 较大，为保证储能安全，令 K_1 为 M；4) 电池 $SOE_b(t)$ 为 H 或是 O 时，储能可以大量放电，故 K_1 为 H。其他情况可以类似推出，得到模糊推理规则表 1。

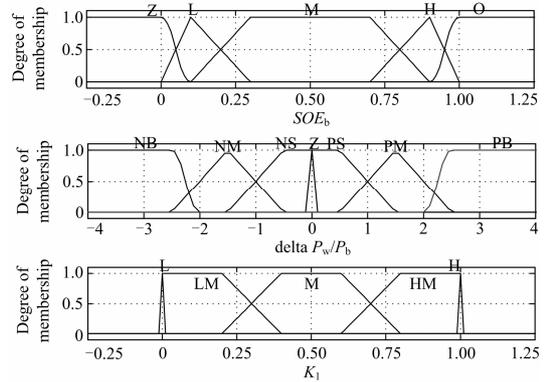


图 3 模糊控制器 1 的隶属函数图

Fig. 3 Membership function diagram of first fuzzy controller

表 1 模糊控制器 1 的控制规则

Table 1 Control rules of first fuzzy controller

K_1	SOE_b					
	Z	L	M	H	O	
ΔP_w	NB	L	LM	HM	H	H
	NM	L	M	H	H	H
	NS	L	H	H	H	H
	Z	H	H	H	H	H
	PS	H	H	H	H	L
	PM	H	H	H	M	L
	PB	H	H	HM	LM	L

类似模糊控制器 1 定义模糊控制器 2，输入 $\Delta SOE_c(t) = \bar{P}_h(t) \times T / Q_c$ 的模糊集采用 {NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB} 构成，范围 $[-\infty, +\infty]$ ；输入 $SOE_c(t)$ 的模糊集采用 {Z, LM, HM, O} 构成，范围是 $[0, 1]$ ；输出比例系数 $K_2(t)$ 的模糊集采用 {L, LM, M, HM, H} 构成，范围是 $[0, 1]$ ；模糊控制器 2 的隶属度函数仍由三角函数或是梯形函数构成，选择面积中心法实现去模糊，得到其隶属函数图与控制规则，如图 4、表 2 所示。

模糊推理规则表 2 与表 1 类似，但以超级电容器优先充放电以及保证减小电池充放电为原则。

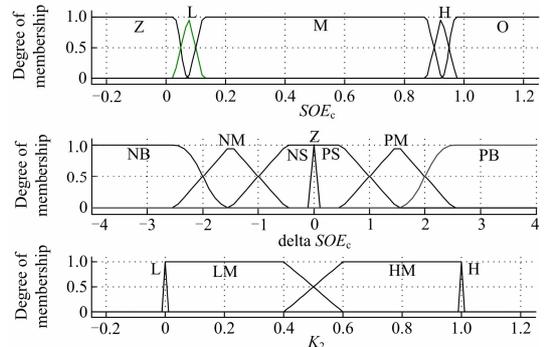


图 4 模糊控制器 2 的隶属函数图

Fig. 4 Membership function diagram of second fuzzy controller

表 2 模糊控制器 2 的控制规则

Table 2 Control rules of second fuzzy controller

K_2	SOE_c				
	Z	L	M	H	O
NB	L	L	H	H	H
NM	L	LM	H	H	H
NS	L	HM	H	H	H
ΔSOE_c	Z	H	H	H	H
PS	H	H	H	HM	L
PM	H	H	H	LM	L
PB	H	H	H	L	L

3 模糊协调控制算法

由图 2 模糊控制器结构、图 3、图 4 输入输出参数隶属度函数以及表 1、表 2 的模糊推理规则可以建立模糊控制算法, 并实现对风电有功功率波动地实时控制, 平抑风电功率过程如图 5 所示。

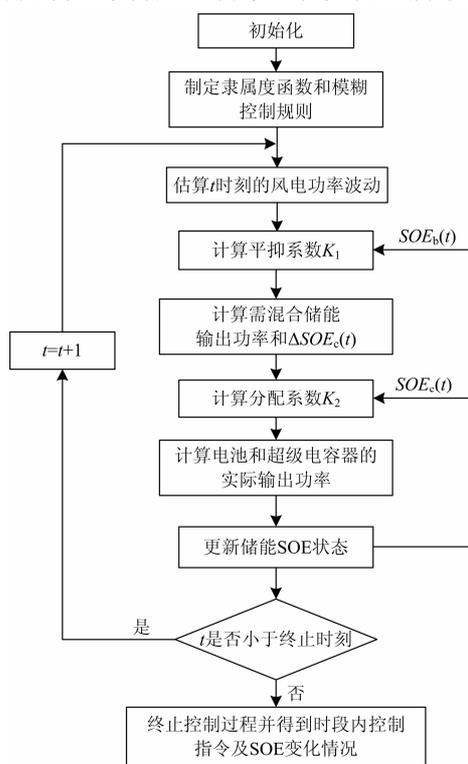


图 5 平抑风电功率波动控制流程图

Fig. 5 Flow chart of stabilizing wind power fluctuation control

步骤如下:

Step1 初始化各参数变量, 确定电池、超级电容器正常运行范围、 $SOE(0)$ 、风场容量、采样时间、并网有功功率波动要求 N 时段内有功功率波动在 ΔP 范围以内等, 进入 Step2;

Step2 根据电池和超级电容器正常运行范围利用第 2 小节方式制定隶属度函数以及模糊控制规则

表, 进入 Step3;

Step3 根据 t 时刻风电有功功率 $P_w(t)$ 以及 $t-N$ 时段内并网功率 (N 表示有功功率波动要求时段) 利用式(2)估计 t 时刻功率最大波动 $\Delta P_w(t)$ 进入 Step4;

Step4 根据电池的能量状态 $SOE_b(t)$ 以及 $\Delta P_w(t)$ 利用模糊控制规则 1, 输出比例系数 K_1 , 并得到需储能出力功率 $\tilde{P}_h(t) = K_1(t) \times \Delta P_w(t)$ 以及并网分量 $P_g(t) = P_w(t) - \tilde{P}_h(t)$, 进入 Step5;

Step5 根据超级电容器的能量状态 $SOE_c(t)$ 以及 $\Delta SOE_c(t) = \tilde{P}_h(t) \times T$, 利用模糊控制规则 2, 输出比例系数 K_2 , 并计算得到电池和超级电容器实际输出功率指令 $P_b(t)$ 和 $P_c(t)$, 进入 Step6;

Step6 利用式(5)实时估计(计算)电池和超级电容器的 SOE 情况, 进入 Step7;

Step7 若 $t < t_{end}$, $t=t+1$ 并进入 Step3; 否则, 进入 Step8;

Step8 过程结束, 得到时段内储能控制信号值、并网值及 SOE 变化曲线等。

根据上述模糊协调控制算法, 可以得到混合储能平抑风电功率波动过程的流程图如图 5 所示。

4 算例分析

根据以上所述, 采用某风电场的实际有功功率数据, 采用时间 1 s, 时长 1 天, 风电场装机容量 20 MW, 分析本文协调控制算法; 通过算例设计混合储能系统的模糊控制器平抑风电有功功率波动, 并分析实验结果。本算例分析在以下两种情况: 1) 储能额定功率和容量在较大, 即充足的情况下; 2) 储能额定功率和容量在较小, 即不充足的情况下, 电池和超级电容器实际输出功率以及 SOE 的变化情况, 说明基于模糊控制的混合储能协调控制解决平抑风电功率波动情况与对混能系统的保护的矛盾。

4.1 容量充足

假设电池的额定功率为 5 MW, 容量为 30 MWh; 超级电容器的额定功率是 1.5 MW, 容量是 0.25 MWh; $SOE_b(0)=0.5$, $SOE_c(0)=0.5$; 电池最佳运行 SOE 范围是 $[0.2, 0.8]$, 超级电容器运行范围是 $[0.1, 0.9]$ 。

从图 6(a)中可以看出电池 SOE 始终高于最佳运行范围, 故 K_1 持续等于 1, 充分完成平抑需求; 从图 6(b)中可以看出在 A 部分超级电容器在低能量区, 而需混合储能输出功率为正即充电, 优先超级电容器充电, 且 $K_2=1$, 电池不参与此处的充电过程; B 部分超级电容器在低能量区, 且需混合储能输出功率为负及放电, 优先超级电容器放电, 但为防止其过放, 调整 K_2 , 令电池同时放电满足平抑要求。

从图 7 和表 3 中可以看出, 混合储能系统确实实现了平抑风电有功功率波动的需要, 并且混合储能可以有效地减小电池的充放电改变次数, 达到保护电池的目的。

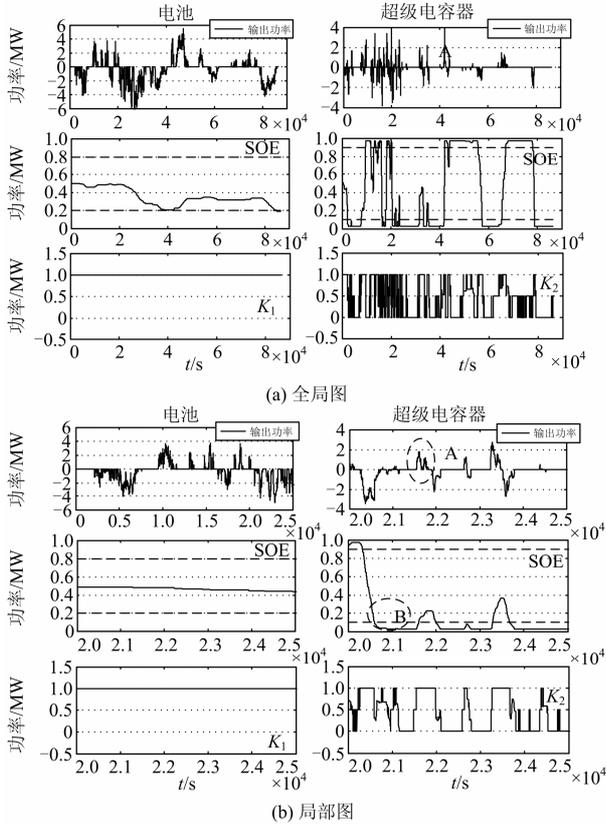


图 6 电池实际输出功率、 SOE_b 、 K_1 以及超级电容器实际输出功率、 SOE_c 以及 K_2

Fig. 6 Actual output power of battery, SOE_b , K_1 and actual output power of super capacitor, SOE_c and K_2

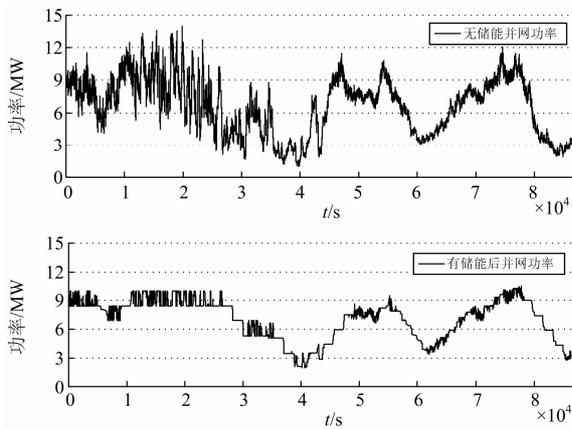


图 7 有无储能系统并网分量对比图

Fig. 7 Comparison chart with/without the energy storage system grid components

表 3 电池充放电次数与平抑效果对比

Table 3 Comparison between battery charge and discharge times and smooth effect

	不满足点/个	电池充放电改变次数/次
无储能	68 191	无
单一电池储能	0	95
混合储能	0	8

4.2 容量不足

假设电池的额定功率为 4 MW, 容量为 16 MWh; 超级电容器的额定功率是 2 MW, 容量是 0.1 MWh。

从图 8 和图 9(b)中 A 部分可以看出, 需平抑部分和电池能量状态产生矛盾, 即电池处于低能量状态, 而并网要求其继续出力。当需要输出功率较小时, 虽然电池 SOE_b 已经低于最佳运行范围, 但为尽量满足平抑需求, $K_1=1$, 当需要输出功率较大时, 为保护电池使用寿命, 故减小 K_1 值, 令电池小功率出力。在防止电池过度放电同时, 尽量减小并网风电功率波动。

从 B 部分可以看出需混合储能系统充电, 则 $K_1=1$ 并优先超级电容器充电, 降低电池充放电改变次数。

从 C 部分可以看出需混合储能系统放电, 但电池处于过低的能量状态, 不适合继续放电, 则 $K_1=0$ 无法平抑风电有功功率波动。其中过低能量状态的定义与隶属度函数设计有关。

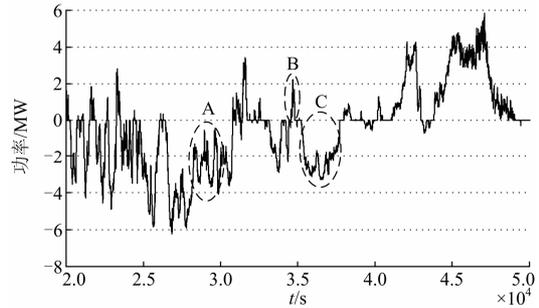
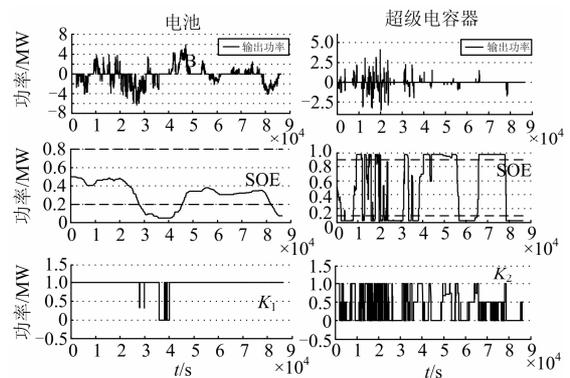


图 8 $\Delta P_w(t)$ 分量图

Fig. 8 $\Delta P_w(t)$ components chart



(a) 全局图

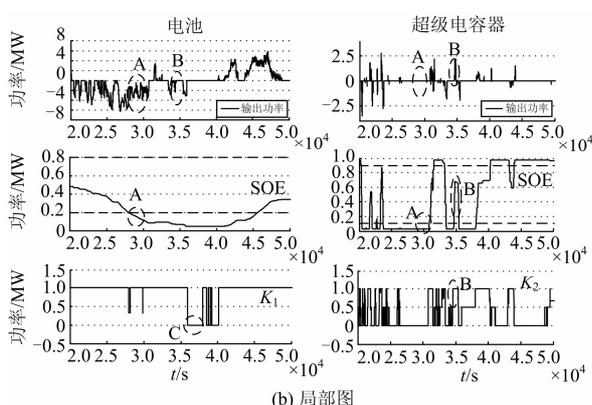


图9 电池实际输出功率、 SOE_b 以及 K_1 与超级电容器实际输出功率、 SOE_c 以及 K_2

Fig. 9 Actual output power of battery, SOE_b , K_1 and actual output power of super capacitor, SOE_c and K_2

从图10和表3、表4中可以看出,当混合储能容量不足时,虽然无法使并网功率始终满足并网要求。但是,仍通过合理分配仍可以大大减小不满足情况且保护电池减少其充放电改变次数。

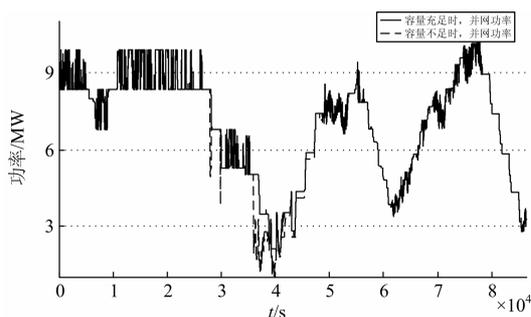


图10 储能系统容量充足、不足并网分量对比图

Fig. 10 Comparison chart of the grid components with the sufficient capacity energy storage system and not

表4 电池充放电次数与平抑效果对比

Table 4 Comparison between battery charge and discharge times and smooth effect

	不满足点/个	电池充放电改变次数/次
无储能	68 191	无
单一电池储能	5 372	101
混合储能	4 412	16

5 结论

本文提出了一种用于混合储能系统平抑风电功率波动的功率的协调控制方法。

1) 基于模糊控制器的协调控制策略可以根据混合储能的能量状态有效地平抑风电有功功率波动;

2) 通过合理地设置模糊控制器参数的隶属度函数、去模糊方法及控制规则可以防止混合储能过度或高倍率充放情况,保护储能系统,合理、有效地解决储能容量不足与风电波动过大的矛盾;

3) 模糊控制器参数、规则、去模糊方法可根据具体情况任意选择,适用性较高;

4) 混合储能系统,即引入功率型储能(超级电容器)可以高效地减少电池的充放电改变次数,有效地保护电池,延长其使用寿命;

5) 模糊协调控制策略仅依据当前时刻风电功率预估波动、混合储能能量状态分配混合储能功率平抑风电功率防止功率型储能和能量型储能充放电反冲现象以及滤波算法引起的延时问题。

参考文献

- [1] 李剑楠, 乔颖, 鲁宗相, 等. 大规模风电多尺度出力波动性的统计建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 7-13.
LI Jiannan, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. Research on statistical modeling of large-scale wind farms output fluctuations in different spacial and temporal scales[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 7-13.
- [2] 薛禹胜, 雷兴, 薛峰, 等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5029-5040.
XUE Yusheng, LEI Xing, XUE Feng, et al. A review on impacts of wind power uncertainties on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5029-5040.
- [3] 张建华, 于雷, 刘念, 等. 含风/光/柴/蓄及海水淡化负荷的微电网容量优化配置[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 102-112.
ZHANG Jianhua, YU Lei, LIU Nian, et al. Capacity configuration optimization for island microgrid with wind/photovoltaic/diesel/storage and seawater desalination load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 102-112.
- [4] ISLAM F, HASANIEN H, AI-DURRA A, et al. A new control strategy for smoothing of wind farm output using short-term ahead wind speed prediction and Flywheel energy storage system[C] // American Control Conference (ACC), 2012. IEEE, 2012: 3026-3031.
- [5] 马速良, 蒋小平, 马会萌, 等. 平抑风电波动的混合储能系统的容量配置[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 108-114.
MA Suliang, JIANG Xiaoping, MA Huimeng, et al. Capacity configuration of the hybrid energy storage system for wind power smoothing[J]. Power System

- Protection and Control, 2014, 42(8): 108-114.
- [6] RASMUSSEN C N. Energy storage for improvement of wind power characteristics[C] // PowerTech, 2011 IEEE Trondheim, IEEE, 2011: 1-8.
- [7] 陈跃燕, 李相俊, 韩晓娟, 等. 基于移动平均法和风电波动率约束的电池储能系统平滑风电出力控制策略[J]. 电力建设, 2013(7): 1-5.
CHEN Yueyan, LI Xiangjun, HAN Xiaojuan, et al. Control strategy of smoothing wind output using battery storage based on moving average method and wind power volatility rate constraint[J]. Electric Power Construction, 2013(7): 1-5.
- [8] 孙承晨, 袁越, 李梦婷, 等. 用于能量调度的风-储混合系统运行策略及容量优化[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2107-2114.
SUN Chengchen, YUAN Yue, LI Mengting, et al. The wind energy storage hybrid systems for energy dispatching[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2107-2114.
- [9] 于芑, 赵瑜, 周玮, 等. 基于混合储能系统的平抑风电波动功率方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 35-40.
YU Peng, ZHAO Yu, ZHOU Wei, et al. Research on the method based on hybrid energy storage system for balancing fluctuant wind power[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 35-40.
- [10] 罗毅, 李达. 电池储能平抑风电功率波动的预测控制方法[J]. 电力科学与工程, 2015, 31(11): 1-5.
LUO Yi, LI Da. A model predictive control method of battery energy storage for smoothing wind power fluctuation[J]. Electric Power Science and Engineering, 2015, 31(11): 1-5.
- [11] 王冉, 王丹, 贾宏杰, 等. 一种平抑微网联络线功率波动的电池及虚拟储能协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5124-5134.
WANG Ran, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. A coordination control strategy of battery and virtual energy storage to smooth the micro-grid tie-line power fluctuations[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5124-5134.
- [12] 李军徽, 高天宇, 赵冰, 等. 抑制风电功率波动的电池储能系统自适应控制策略设计[J]. 储能科学与技术, 2015, 4(3): 278-283.
LI Junhui, GAO Tianyu, ZHAO Bing, et al. Inhibition of wind power fluctuations of battery energy storage system adaptive control strategy design[J]. Energy Storage Science and Technology, 2015, 4(3): 278-283.
- [13] JIANG Q, HONG H. Wavelet-based capacity configuration and coordinated control of hybrid energy storage system for smoothing out wind power fluctuations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 28(2): 1363-1372.
- [14] 吴振威, 蒋小平, 马会萌, 等. 用于混合储能平抑光伏波动的小波包-模糊控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 317-324.
WU Zhenwei, JIANG Xiaoping, MA Huimeng, et al. Wavelet packet-fuzzy control of hybrid energy storage for PV power smoothing[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 317-324.
- [15] 卢芸, 赵永来. 基于模糊神经网络风电混合储能系统优化控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 113-118.
LU Yun, ZHAO Yonglai. Optimal control in a wind power hybrid energy storage system based on fuzzy neural network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 113-118.
- [16] 刘书铭, 李陈莹, 李琼林, 等. 电力系统串联谐波谐振的特性分析与灵敏度计算[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 21-27.
LIU Shuming, LI Chenying, LI Qionglin, et al. Characteristics analysis of power system series harmonic resonance and sensitivity calculation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 21-27.
- [17] 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.
- [18] 别朝红, 李更丰, 谢海鹏. 计及负荷与储能装置协调优化的微网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 64-73.
BIE Zhaohong, LI Gengfeng, XIE Haipeng. Reliability evaluation of microgrids considering coordinative optimization of loads and storage devices[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 64-73.

收稿日期: 2015-12-01; 修回日期: 2016-01-29

作者简介:

蒋小平(1966-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为自动控制理论及应用; E-mail: knowledge2010@sina.com

彭朝阳(1990-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 从事优化微网接入控制以及运行分析的研究; E-mail: pengcy778@163.com

魏立彬(1990-), 男, 硕士研究生, 从事电力电子拓扑建模与现代控制算法研究. E-mail: weilibin90@163.com

(编辑 魏小丽)