文章编号：1007-2322(2014)03-0007-05 文献标志码：A 中图分类号：TM614

平抑风电功率波动的电池储能系统模糊控制方法

贾鹏飞，李卫国，高兴军，曹文彬
（华北电力大学电气与电子工程学院，北京 102206）

Fuzzy Logic Control of Battery Energy Storage System for Smoothing Wind Power Fluctuation

JIA Pengfei，LI Weiguo，GAO Xingjun，CAO Wenbin
（North China Electric Power University，School of Electrical & Electronic Engineering，Beijing 102206，China）

摘 要：在应用储能系统平抑风电场功率波动的过程中，为有效增强功率波动平抑的效果，同时延长储能系统的工作寿命，提出了基于模糊控制的储能系统控制方法。该方法根据风电机组输出功率的变化值和储能系统的电池荷电状态，采用模糊控制方法，实时调节低通滤波器的滤波时间常数，在尽可能平抑风电机组功率波动的同时，有效地保证电池荷电状态维持在限定范围内，避免电池过度充电或过度放电。在 SIMULINK 环境下进行了采用和不采用模糊控制的仿真对比，结果表明采用模糊控制的储能系统控制方法可以有效降低风机输出功率的变化率，同时也能降低储能电池荷电状态的变化率。

关键词：风力发电；电池储能；功率平抑；荷电状态；模糊控制

Abstract：In the process of applying energy storage system to smooth the wind power fluctuation，the energy storage system control strategy based on fuzzy logic control is proposed for improving the smoothing effect and prolonging the work life of the energy storage system. This control strategy can real-time adjust filter time constant of low-pass filter by using of fuzzy logic control method according to the output variation of the DFIG and the SOC of the battery. This control strategy can also stabilize the power fluctuations as much as possible，and keep the SOC of the battery within limits so that it can prevent the battery from overcharge and excessive discharge at the same time. The simulation results under the environment of SIMULINK show that the control strategy with fuzzy logic control can effectively reduce the changing rate of wind power and the battery's SOC.

Keywords：wind power；battery energy storage；power smoothing；state of charge；fuzzy logic control

0 引 言

风力发电的波动性大、随机性强，并网运行后容易对电网的稳定性以及电能质量带来不利的影响。文献［1－2］的研究结果表明，在风电场的出口处集中配置一定容量的储能系统，可以有效平抑风电场的功率波动，而且集中接入方式便于管理，需要的容量也相对较小。文献［3］对可再生能源进行了频谱分析，进而确定了储能补偿范围，并提出了能够满足系统功率输出波动率、ESS 效率、SOC 限制的 ESS 功率及容量确定方法。

储能系统的并网控制策略非常重要，目前，工程界和学术界已经提出了多种平抑可再生能源功率波动的储能系统控制方法。文献［4］提出应用一阶低通滤波原理控制储能系统平抑风电功率波动，补偿高频分量，并建立了评价平抑效能的指标；但该方法没有考虑电池的荷电状态，容易造成电池过度充/放电。文献［5］给出的控制方法基于风电预测，考虑到了电池荷电状态以及寿命的约束，对每小时风电场输出功率进行定功率控制；但是该方法对储能系统的响应速率要求较高。文献［6－9］提出了基于蓄电池和超级电容器的混合储能系统，并设计了基于专家信息库的双层控制模型，应用于风电功率平抑时，可以有效控制储能系统吞吐功率，缩短控制时间；但专家信息库的建立涉及较多参数，调试繁琐，不利于推广应用。文献［10－11］针对锂离子储能系统，在基于低通滤波原理的储能控制方法基础上，提出了基于实测电池荷电状态的可变滤波时间常数控制方法，使电池的荷电状态稳定在一定的范围内；但此方法并没有充分利用电池充放电来尽可能地平滑功率波动。文献［12］提出了一种基于模糊算法的储能系统优化控制策略，在平抑风电功率波动时，综合考虑超级电容器的荷电状态和充放电状态，实时调节滤波时间常数，在平

抑风电功率波动的同时避免超级电容器出现过充和过放的状况；但是该方法的控制目标仅是将超级电容的荷电状态维持在某一固定值附近，不能充分利用超级电容的容量。文献［13］提出了一种加权移动平均滤波算法，该方法可根据风电功率的波动程度与当前储能系统的荷电状态实时改变权重与滤波带宽，可取得较好的功率平滑效果，同时保证储能系统维持在合理的运行范围内；但是该方法需要同时调节滤波带宽和权重，控制方法较为复杂。

在参考上述储能系统控制方法的基础上，本文考虑采用低通滤波原理作为基本滤波控制方法，并结合锂电池的荷电状态和风机输出功率的变化值，设计模糊控制器，调节滤波时间常数，逐渐改变电池输出功率，从而使荷电状态稳定在限定范围内，同时尽可能地平滑风机的输出功率。

1 风电功率平滑的基本原理

双馈风机与储能系统组成的系统结构如图 1 所示。储能系统连接到双馈风机并网的交流母线上。风机发出的有功功率为 P_W，储能系统吸收的功率为 P_{BAT}，风机经平滑后输出的功率为 P_{OUT}。监控系统采集风机输出的有功功率以及交流母线的三相电压和电流，由控制算法计算得到储能系统需吸收的参考功率 P_{BAT_ref}，由储能系统根据参考功率控制储能变流器吸收相应功率。

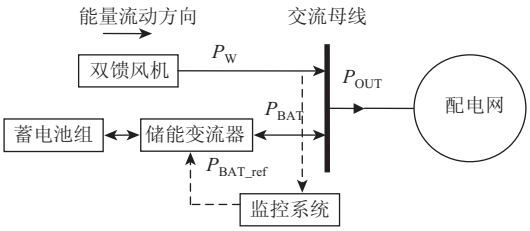

图 1 系统结构

本文以双馈风电机组为例，设计平滑控制策略。监控系统的采样周期 Δt 为 5s，在 5s 的时间内，可认为风机输出的功率是恒定不变的。风电功率平滑的控制原理图如图 2 所示。基本流程如下：

①由风机当前采样周期内的输出功率值 $P_W(t+\Delta t)$与上一采样周期内经平滑后输出功率 $P_{OUT}(t)$的值作差，得到功率变化值 $\Delta P(t+\Delta t)$；

②由储能系统采样得到当前锂电池的荷电状态 $SOC(t+\Delta t)$；

③将功率变化值 $\Delta P(t+\Delta t)$和锂电池的荷电状态 $SOC(t+\Delta t)$输入到模糊控制器中，由控制器计算出合适的滤波时间常数 $\tau(t+\Delta t)$；

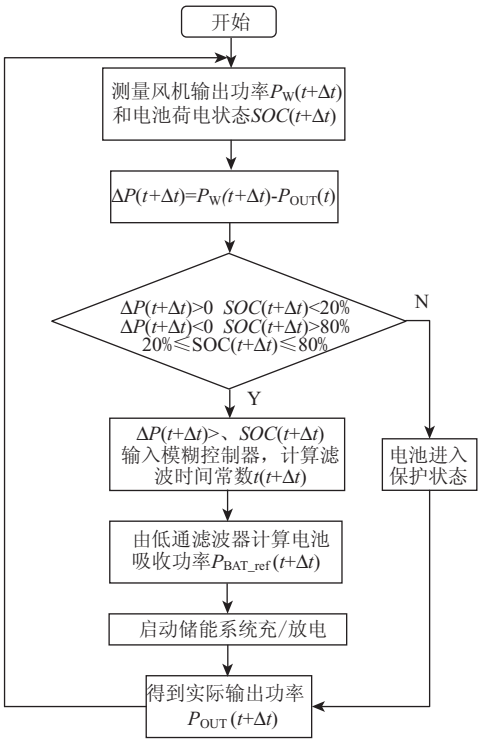

图 2 风电功率平滑控制原理图

④数字低通滤波器根据模糊控制器计算得到的滤波时间常数 $\tau(t+\Delta t)$，计算储能系统吸收功率的参考值 $P_{BAT_ref}(t+\Delta t)$，得到平滑后的功率输出 $P_{OUT}(t+\Delta t)$。

2 荷电状态计算及数字低通滤波器

2.1 荷电状态计算

储能系统中锂电池的荷电状态 SOC 与电池的温度、放电倍率、电池寿命和自放电等因素都有关，本文不考虑上述影响因素，仅假定锂电池在理想状态下，用电流积分法(安时法)计算荷电状态。

2.2 数字低通滤波器

低通滤波采用一阶巴特沃斯低通滤波器。参考信号分析与处理中的原理和方法，风电机组的输出功率波动包含高频部分和低频部分。其中，低频部分的波动较缓，功率变换率较小，注入电网后虽然对电力系统带来干扰，但电力系统有足够的时间进行响应。但是高频部分的功率变化率大，注入电网后带来短时间的较大冲击，电力系统无法及时响应，不利于电力系统的安全运行。因此，参考信号处理中的滤波原理，引入低通滤波器可以滤除风电

功率波动中的高频分量，减小功率变化率，平稳风电机组的功率输出。应用储能系统，通过其充放电来改变风电机组输出的功率，即可实现风电机组输出功率的低通滤波，达到平抑波动的目的。

将低通滤波器离散化后，得到

$$P_{\mathrm{OUT}}(k)=\frac{\tau}{\tau+T_{\mathrm{C}}}P_{\mathrm{OUT}}(k-1)+\frac{T_{\mathrm{C}}}{\tau+T_{\mathrm{C}}}P_{\mathrm{W}}(k) \tag{1}$$

式中：T_{C} 为采样周期。

储能系统吸收的功率为

$$P_{\mathrm{BAT_ref}}(k)=P_{\mathrm{W}}(k)-P_{\mathrm{OUT}}(k)=\frac{\tau}{\tau+T_{\mathrm{C}}}(P_{\mathrm{W}}(k)-P_{\mathrm{OUT}}(k-1)) \tag{2}$$

可见，改变 τ 值的大小可以改变功率平滑的效果，同时储能系统吸收的功率也会发生改变。

3　模糊控制器的设计

模糊控制器的作用就是根据功率变化值以及电池的荷电状态得出合适的滤波器时间常数 τ，从而实时动态平抑风电机组的输出功率，同时控制储能系统吸收的功率以及电池的荷电状态。

从功率变化值的角度看，当功率变化值为正时，若风电机组的功率变化值较大，则增大滤波时间常数，尽可能利用储能系统平抑功率波动；若风电机组的功率变化值较小，则在满足平抑要求的基础上，适当减小滤波时间常数，减轻储能系统的负担。功率变化值为负时亦相同。

从电池荷电状态的角度看，当电池的荷电状态偏高时，若处在充电状态下，则减小滤波时间常数，减弱储能系统的平抑作用，从而减少储能系统吸收的功率，避免电池荷电状态过快增长；若处在放电状态下，则增大滤波时间常数，增强储能系统的平抑作用，从而增大储能系统放出的功率，加快电池荷电状态下降；若电池荷电状态高于上限，则只允许电池放电，防止电池出现过充现象。反之亦然，当电池的荷电状态偏低时，若处在放电状态下，则减小滤波时间常数；若处在充电状态下，则适当增大滤波时间常数；若电池荷电状态低于下限，则只允许电池充电，防止电池出现过放现象。

根据储能系统模糊控制器的上述特性，本文设计了 1 个两输入、一输出的模糊控制器，其中两个输入分别为功率变化值 ΔP 和电池的荷电状态 SOC，输出为滤波时间常数 τ。

控制器的输入和输出必须经过模糊化后才能进行模糊推理运算，因此需首先建立输入和输出的模糊集和对应的隶属度函数。

在本文中，功率变化值 ΔP 的模糊集采用｛NB，NS，NZ，PZ，PS，PB｝，电池的荷电状态 SOC 和滤波时间常数 τ 的模糊集采用｛NB，NS，Z，PS，PB｝。输入输出量的隶属度函数如图 3、4、5 所示，主要由 S 函数、梯形函数和三角形函数组成。

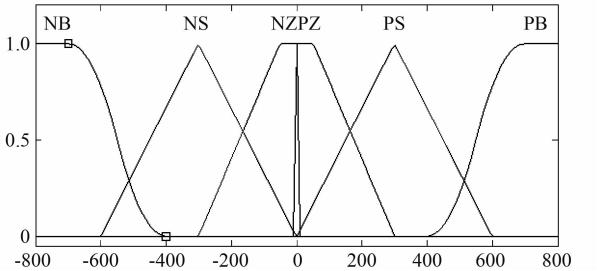

图 3　功率变化值的隶属度函数

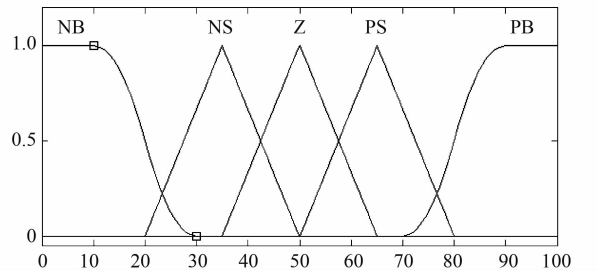

图 4　电池荷电状态的隶属度函数

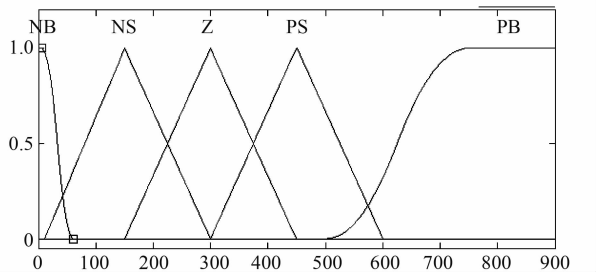

图 5　滤波时间常数的隶属度函数

本文所设计的模糊控制器的推理机采用 MAMDANI 型模糊推理，30 条模糊推理规则如表 1 所示，各个模糊语句之间是或的关系。

采用加权平均法进行解模糊，用输出量化因子乘以平均值可得到输出量的实际值。

4　仿真分析

本文以某地 1 台 3MW 的双馈风机 1d 内输出

的功率数据为例，进行了仿真计算，仿真模型如图 6 所示。双馈风机的输出电压为 575V，经过升压变压器升为 25kV。网侧额定电压为 120kV。采样周期为 5s，锂电池容量为 3kAh。设定的电池 *SOC* 范围为 20～80%，超过 80%时只允许放电，低于 20%时只允许充电。锂电池的初始 *SOC* 设为 60%。以下是未采用模糊控制和采用模糊控制时的仿真计算结果和分析。

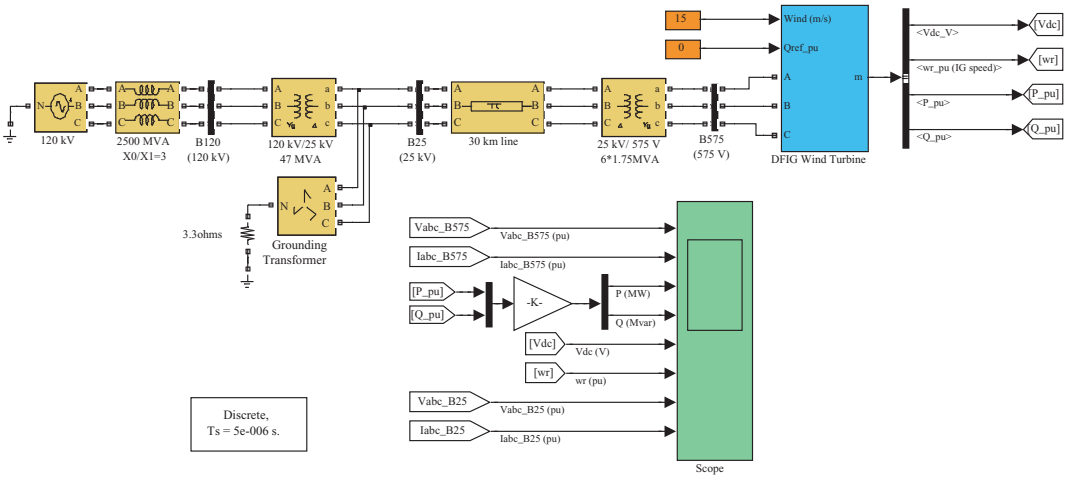

图 6 仿真模型图

未采用模糊控制时，滤波时间常数固定，$\tau=300$s。从图 7 中可以看出，采用模糊控制时，风电机组输出功率更为平滑，变化率较小，整体上平滑效果好于不采用模糊控制。

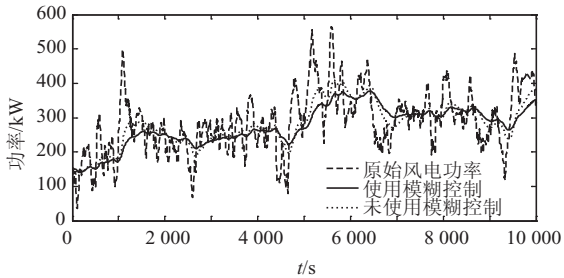

图 7 风电机组输出功率曲线

图 8 中，未采用模糊控制和采用模糊控制的电池荷电状态曲线相似，但数值相差较大，而且采用模糊控制后电池荷电状态的变化率相对较小。

图 9 中，采用模糊控制时，储能系统吸收功率的变换相对较缓，与电池荷电状态的变化规律相同。

由仿真结果可见，采用模糊控制时有以下优点：

① 相比于恒定滤波时间常数的控制方法，采用模糊控制可以更好地平抑功率波动，得到的输出功率变化较缓，充分利用了储能系统的平抑作用。

② 采用模糊控制，储能系统的电池荷电状态变化率也相对较小，有利于增加电池的使用寿命。

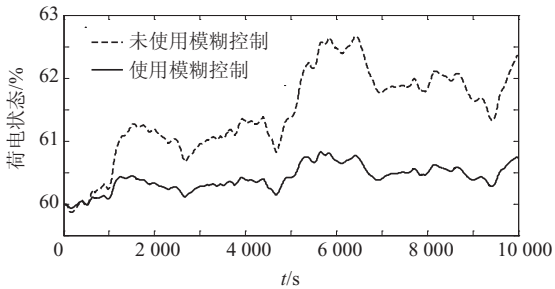

图 8 电池荷电状态曲线

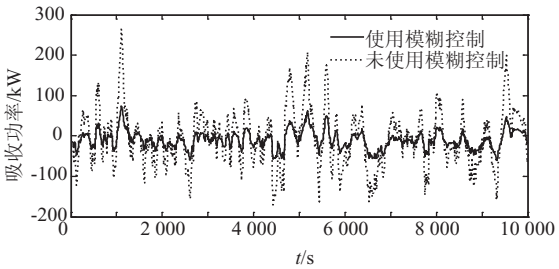

图 9 储能系统吸收功率曲线

5 结束语

储能系统在平抑风电功率波动中的控制优化在提高其技术性能和经济性方面有着至关重要的作用。本文采用模糊控制器，根据风电机组输出功率的变化值和电池荷电状态，实时调节低通滤波器的

滤波时间常数，在尽可能平抑风电机组功率波动的同时，有效地保证电池荷电状态维持在限定范围内，避免电池过度充电或过度放电。仿真分析的结果验证了本文控制方法的有效性。

参 考 文 献

[1] KOOK K S, McKENZIE K J, LIU Yilu. A study on application of energy storage for the wind power operation in power systems [C]// Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 18-20, 2006, Montrea, Canada: 5p.

[2] WEI Li, JOOS G. Comparison of energy storage system technologies and configurations in a wind farm [C]// Proceeding of IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 17-21, 2007, Orlando, FL, USA: 1280-1285.

[3] 王成山，于波，肖峻，等. 平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法 [J]. 中国电机工程学报，2012，32(16)：1-8.

[4] 宇航. 利用储能系统平抑风电功率波动的仿真研究 [D]. 吉林：东北电力大学，2008：20-30.

[5] TELEKE S, BARAN M E, HUANG A Q, et al. Control strategies for battery energy storage for wind farm dispatching [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2009, 24(3): 725-732.

[6] 于芃，周玮，孙辉，等. 用于风电功率平抑的混合储能系统及其控制系统设计 [J]. 中国电机工程学报，2011，31(17)：127-133.

[7] 张野，郭力，贾宏杰，等. 基于电池荷电状态和可变滤波时间常数的储能控制方法 [J]. 电力系统自动化，2012，36(6)：34-38.

[8] 赵艳雷，李海东，张磊，等. 基于快速储能的风电潮流优化控制系统 [J]. 中国电机工程学报，2012，32(13)：21-28.

[9] 张野，郭力，贾宏杰，等. 基于平滑控制的混合储能系统能量管理方法 [J]. 电力系统自动化，2012，36(16)：36-41.

[10] 张国驹，唐西胜，齐智平. 平抑间歇式电源功率波动的混合储能系统设计 [J]. 电力系统自动化，2011，35(20)：24-28.

[11] 谢俊文，陆继明，毛承雄，等. 基于变平滑时间常数的电池储能系统优化控制方法 [J]. 电力系统自动化，2013，37(1)：96-102.

[12] 张坤，吴建东，毛承雄，等. 基于模糊算法的风电储能系统的优化控制 [J]. 电工技术学报，2012，27(10)：235-241.

[13] 丁明，吴建锋，朱承治，等. 具备荷电状态调节功能的储能系统实时平滑控制策略 [J]. 中国电机工程学报，2013，33(1)：22-29.

收稿日期： 2013-06-16

作者简介：

贾鹏飞(1988—)，男，硕士研究生，研究方向为电池储能技术及其在电网中的应用，E-mail：pengfeij@sohu.com；

李卫国(1954—)，男，教授，博士生导师，研究方向为电气设备在线监测与故障诊断等，E-mail：871750666@qq.com。

（责任编辑：林海文）