

# 风电场储能系统的模糊自适应控制策略

程世军, 张粒子, 李 丰, 王晓晖

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

## The Fuzzy Adaptive Control Strategy of Energy Storage System for Wind Power Generation

CHENG Shijun, ZHANG Lizi, LI Feng, WANG Xiaohui

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources

(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

**摘 要:** 为了平滑风电场的出力, 风电场常常配置一定容量的储能装置。但由于储能容量的限制, 储能系统的过度充放电会影响其使用寿命。本文首先提出了表征电池储能系统运行状况的两个性能指标, 并将模糊自适应控制引入到风电场储能系统的控制中。利用提出的模糊自适应控制策略, 实时调整储能系统的功率参考值, 在实现平抑风电场功率波动, 提高风电功率输出稳定性的同时, 还能避免储能系统出现深度放电或过度充电的状况, 有效地延长了储能系统的使用寿命。通过对有无模糊自适应控制两种情况进行仿真, 其仿真结果验证了所提控制策略的正确性和有效性。

**关键词:** 风电场; 电池储能系统; 低通滤波; 荷电状态; 模糊自适应控制

**Abstract:** In order to smooth the output of wind farms, energy storage devices with certain capacity are often configured in wind farms. However, due to capacity limit, the service life of energy storage system can be affected by excessive charge and deep discharge. In this paper, two performance indicators that characterize battery energy storage system operating conditions are presented, and the fuzzy adaptive control is introduced to optimally control the wind farm energy storage system. The proposed fuzzy adaptive control strategy is used to adjust power reference value of energy storage system. It does not only restrain wind power fluctuations and improve the stability of wind power output, but also avoids the occurrence of over charge and deep discharge of energy storage system, which effectively prolong the service life of the energy storage system. In the end, simulations of cases with or without the fuzzy adaptive control system have been made, and the correctness and effectiveness of the proposed control strategy are verified by the simulation results.

**Keywords:** wind farm; battery energy storage system (BESS); low-pass filtering; state of charge; fuzzy adaptive

control

## 0 引 言

近年来, 风力发电在全世界范围内取得了飞速发展。然而随着风电规模的不断扩大, 风能的随机性和间歇性使风电场输出功率波动很大, 这也给电力系统的安全稳定和经济运行带来了一系列问题<sup>[1]</sup>。为了抑制出力波动、平滑风电场输出功率, 常将储能设备接入作为提高系统稳定性和可靠性的方式。电池储能系统(battery energy storage system, BESS)作为新兴的风电场储能技术, 相比于其他储能技术<sup>[2-3]</sup>, 不仅具有能量密度高、安装地点灵活的特点, 还具有充放电效率高, 部分类型电池材料价格低廉的优势, 因而得到了广泛的应用<sup>[4-5]</sup>。

本文首先建立了电池储能系统模型, 提出了表征电池储能系统运行状况的两个指标, 采用一阶低通滤波器来确定风电并网功率参考值, 并将模糊自适应控制引入到风电场储能系统的控制中。基于上述储能系统的充放电能力指标和充放电强度指标, 提出了一种模糊自适应控制策略, 实时调整储能系统输出/吸收的功率, 在平滑风电场输出功率的同时, 也避免储能系统出现荷电状态越限的现象, 有效地延长了储能系统的使用寿命。最后通过对有无模糊自适应控制两种情况进行仿真, 其仿真结果验证了所提控制策略的正确性和有效性。

## 1 储能系统模型及相关指标

### 1.1 电池储能系统模型

荷电状态(SOC)指的是储能装置的剩余容量占

总量的比值,是制定储能装置控制策略的重要依据。荷电状态与储能装置充放电功率的关系<sup>[6-7]</sup>如下:

$$\begin{cases} \text{SOC}(t) = \frac{E_0(t) + \int_0^t (\eta_c u_c(t) p_c(t) - \frac{1}{\eta_d} u_d(t) p_d(t)) dt}{E_n} \\ 0 \leq u_c(t) + u_d(t) \leq 1 \\ u_c(t), u_d(t) \in \{0, 1\} \\ S_{\min} \leq \text{SOC}(t) \leq S_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $E_0(t)$  为第  $t$  时段储能装置初始能量;  $E_n$  为储能装置的额定容量;  $\eta_d$ ,  $\eta_c$  分别为储能装置的放电和充电效率;  $S_{\min}$  为储能装置的最小荷电状态值;  $S_{\max}$  为储能装置的最大荷电状态值。  $u_c(t)$ 、 $u_d(t)$  分别为第  $t$  时段的充放电控制标志。为避免充放电冲突,第  $t$  时段  $u_c(t)$ 、 $u_d(t)$  的取值只能为 0 或 1 的整数且不同时为 1 (即不可能同时工作在充电和放电状态), 这样可满足变量间互斥要求。当  $u_c(t)$  和  $u_d(t)$  均为 0 时表示储能装置运行在浮充状态。

## 1.2 表征电池储能系统运行状况的指标

为了更加全面地衡量电池储能系统的运行状态,实时控制 SOC 的取值范围,本文提出了表征电池储能系统运行状况的两个指标。

### 1.2.1 充放电能力指标

该指标用来表征储能系统某一时刻充电或放电的能力。其表达式为

$$S(t) = \frac{\text{SOC}(t) - \text{SOC}_{\text{mid}}}{(\text{SOC}_{\text{max}} - \text{SOC}_{\text{min}})/2} \quad (2)$$

式中:  $\text{SOC}_{\text{mid}}$  为储能装置荷电状态的中间值,  $\text{SOC}_{\text{mid}}$  通常取  $\frac{\text{SOC}_{\text{max}} + \text{SOC}_{\text{min}}}{2}$ 。  $S \in [-1, 1]$ ,  $S$

越接近于 1, 表示储能装置放电能力越强, 同时充电能力极差;  $S$  越接近于 -1, 表示储能装置充电能力越强, 同时放电能力极差;  $S=0$ , 表示充放电能力适中。

### 1.2.2 充放电强度指标

该指标用来表征储能系统某一时刻放出或吸收功率的大小。其表达式为

$$\epsilon(t) = u_c(t) \frac{P_{\text{br}}(t)}{P_{\text{cmax}}} + u_d(t) \frac{P_{\text{br}}(t)}{P_{\text{dmax}}} \quad (3)$$

式中:  $P_{\text{br}}(t)$  表示储能装置功率参考值;  $P_{\text{dmax}}$ ,  $P_{\text{cmax}}$  分别为储能装置的最大放电和最大充电功率, 文中假定  $P_{\text{dmax}} = P_{\text{cmax}} = P_n$  ( $P_n$  为储能装置的额定功率)。  $P_{\text{br}}(t) > 0$  表示放电,  $P_{\text{br}}(t) < 0$  表示充电;  $\epsilon \in [-1, 1]$ ,  $\epsilon$  取 1 表示储能装置功率参考值为

放电最大值, 取 -1 表示储能装置功率参考值为充电最大值, 取 0 表示功率参考值为 0。

## 2 储能系统的模糊自适应控制

储能系统发出/吸收有功功率对风电场输出功率进行补偿, 使得风电场输出功率  $P_w$  尽可能满足其并网功率参考值  $P_{\text{wr}}$ 。通常风电并网功率参考值  $P_{\text{wr}}$  由风电场输出的有功功率  $P_w$  经一阶低通滤波器得到<sup>[8-9]</sup>, 即

$$P_{\text{wr}} = \frac{1}{1+sT} P_w \quad (4)$$

式中:  $T$  为低通滤波器的平滑时间常数。

储能系统利用储能电池 (BESS) 发出/吸收的实时功率对风电场输出功率  $P_w$  中的波动部分进行补偿, 此时储能系统的功率参考值为

$$P_{\text{br}} = P_{\text{wr}} - P_w \quad (5)$$

由于储能装置是有容量限制的, 所以必须要考虑储能装置的荷电状态 (SOC), 尤其要考虑其接近容量限制时的运行控制方式。为了保证 SOC 能在合适的范围内取值, 本文提出一种模糊自适应控制, 实时监测储能系统的 SOC, 并及时修正储能系统的功率参考值, 避免储能装置因过度充放电而大大影响其使用寿命。

图 1 所示模糊控制器的作用就是根据储能系统的荷电状态以及其充放电功率的大小来给出合适的储能系统功率修正系数, 从而实时调节储能系统功率参考值, 以达到对储能系统荷电状态及其输出功率的实时控制。

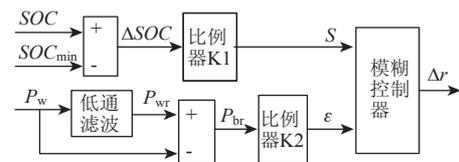


图 1 模糊控制器结构框图

根据对上述模糊控制器特性描述, 本文将标准化后的表征储能系统运行状况的充放电能力指标  $S$  和充放电强度指标  $\epsilon$  作为输入量, 储能系统功率修正系数  $\Delta r$  作为输出量, 形成两输入-单输出的二维结构形式。

输入 1: 充放电能力指标  $S$ , 取其语言变量为  $L_1$ , 其连续论域为:  $[-1, 1]$ , 对应的模糊子集为  $\{\text{NB}, \text{NS}, \text{ZO}, \text{PS}, \text{PB}\}$ 。

输入 2：充放电强度指标  $\epsilon$ ，取其语言变量为  $L_2$ ，其连续论域为： $[-1, 1]$ ，对应的模糊子集为  $\{NB, NS, ZO, PS, PB\}$ 。

输出：系统功率修正系数  $\Delta r$ ，其离散论域为： $[-1, -0.5, -0.2, 0, 0.2, 0.5, 1]$ ，对应的模糊子集为  $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。

输入隶属函数和输出隶属函数如图 2 所示。

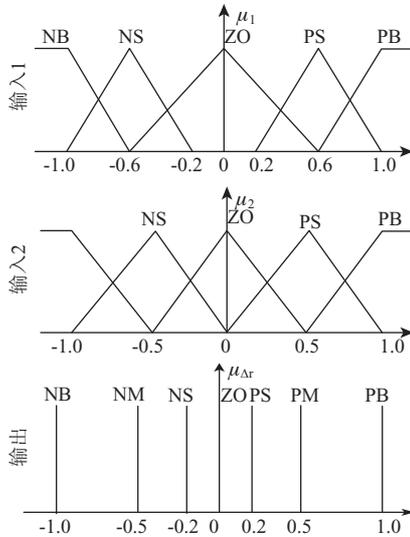


图 2 储能系统隶属函数

建立如表 1 所示的模糊控制规则，得到功率修正系数  $\Delta r$  的模糊集合。控制规则依据储能系统的充放电能力指标  $S$  和充放电强度指标  $\epsilon$  对功率修正系数加以修正，避免储能装置枯竭或饱和。

表 1 模糊控制规则

$L_1$	$L_2$				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	ZO	ZO	ZO	NM	NB
NS	ZO	ZO	ZO	NS	NM
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	PM	PS	ZO	ZO	ZO
PB	PB	PM	ZO	ZO	ZO

当储能系统充放电能力指标  $S$  接近于  $-1$  时，表明储能装置电量不足，如果充放电强度指标  $\epsilon$  接近  $1$ ，则此时功率修正系数接近  $-1$ ，适当修正储能系统参考功率，防止系统出现深度放电的状况。同理，当储能系统充放电能力指标  $S$  接近于  $1$  时，表明储能装置电量接近饱和，如果充放电强度指标  $\epsilon$  接近  $-1$ ，则此时功率修正系数接近  $1$ ，修正储能

系统参考功率，防止系统出现过度充电的状况，从而避免了储能装置因达到上限而发生功率畸变，有效延长储能系统的使用寿命。

采用加权平均法对输出模糊集合进行解模糊，得到  $t$  时刻储能系统的功率修正系数<sup>[10]</sup>  $\Delta r(t)$  为

$$\Delta r(t) = \frac{\sum_i \sum_j \mu_{1i}(L_1(t)) \mu_{2j}(L_2(t)) \Delta r_{ij}}{\sum_i \sum_j \mu_{1i}(L_1(t)) \mu_{2j}(L_2(t))} \quad (6)$$

式中： $\mu_{1i}(L_1(t))$  和  $\mu_{2j}(L_2(t))$  分别为输入量  $L_1$  的第  $i$  个和输入量  $L_2$  的第  $j$  个隶属值， $i$  的集合为  $\{NB, NS, ZO, PS, PB\}$ ， $j$  集合为  $\{NB, NS, ZO, PS, PB\}$ ， $\Delta r_{ij}$  为输入量  $L_{1i}(t)$  与  $L_{2j}(t)$  相对应的输出量。

储能装置的功率偏差为

$$\Delta P_b(t) = u_c(t) \Delta r(t) P_{cmax} + u_d(t) \Delta r(t) P_{dmax} \quad (7)$$

此时，修正后的储能装置的功率为

$$P_b(t) = P_{br}(t) + \Delta P_b(t) \quad (8)$$

### 3 仿真分析

本文采用 Matlab/Simulink 进行仿真分析，仿真研究时间设定为  $7\ 200s$ ； $T$  值选为  $1\ 500$ ，电池储能装置(BESS)参数设定如下：额定容量  $20MWh$ ，额定功率为  $50MW$ ，SOC 取值范围为  $[0.1, 0.9]$ ，SOC 初值选为  $0.6$ ，充放电效率均取  $0.8$ 。

如图 3 所示，储能电池能够有效地平滑风电场的输出功率，减少了波动频率，使得风电场输出功率更逼近于风电并网功率参考值。

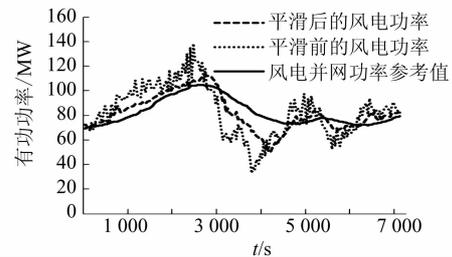


图 3 平滑前后风电场输出功率及风电并网功率参考值

图 4 为系统采用模糊控制后，储能电池实际输出/吸收的有功功率。

如图 5 所示，在系统没有采用模糊控制的情况下，储能电池在  $1\ 653 \sim 3\ 236s$  时，已经超过 SOC 最高限制，这段时间内一直处于过度充电的状态。而在  $2\ 823s$  时，其荷电状态更是达到  $100\%$ 。而储

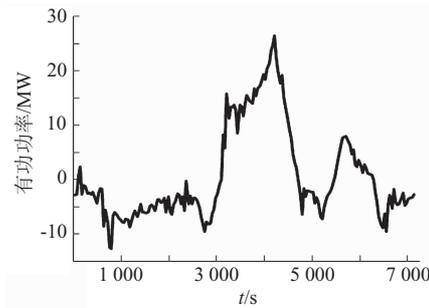


图4 储能电池的有功功率

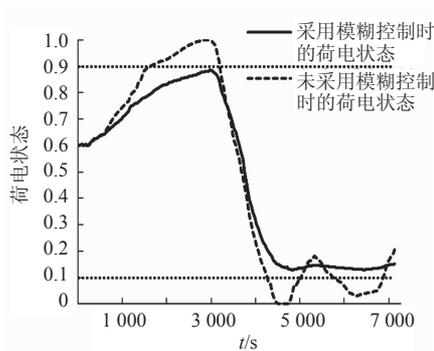


图5 有无模糊控制时的荷电状态趋势对比

能电池处于放电状态时,有多处超过SOC最低限制,而且变化幅度较大。

当系统采用本文提出的模糊控制策略时,储能电池荷电状态趋势如图5所示。当储能电池荷电状态较大时(即指标 $S$ 接近于1),若处于充电状态且储能功率参考值 $P_{br}(t)$ 较大(即指标 $\epsilon(t)$ 接近-1),则此时功率修正系数接近1,降低充电功率的大小,从而减缓其荷电状态增加的速率,防止出现过度充电的状况;反之,当储能电池荷电状态较小时(即指标 $S$ 接近于-1),若处于放电状态且储能功率参考值 $P_{br}(t)$ 较大(即指标 $\epsilon(t)$ 接近1),则此时功率修正系数接近-1,降低放电功率的大小,减缓其荷电状态减少的速率,防止出现深度充电的状况。在模糊控制作用下,SOC被有效控制且变化幅度较小,避免储能电池出现荷电状态越限的现象,有效地延长了储能系统的使用寿命。

## 4 结束语

本文使用电池储能系统平抑风电场输出的波动功率,采用一阶低通滤波器来确定风电并网功率参考值,并将模糊自适应控制引入到风电场储能系统的控制中。根据文中提出的储能系统的充放电能力指标和充放电强度指标,利用模糊自适应控制策略

来实时调整储能系统输出/吸收的功率,从而能够有效地平滑风电场输出功率,同时还可以较好地控制SOC,使其维持在一个合理水平,避免储能系统出现过度充放电的状况,具有一定的实用价值。

## 参考文献

- [1] 田春笋,李琼林,宋晓凯. 风电场建模及其对接入电网稳定性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 46-51.
- [2] 罗正远,丁明. 概率模拟中蓄能电站经济运行的判据[J]. 中国电机工程学报, 1993, 13(2): 43-38.
- [3] 丁明,刘友翔. 蓄能电站静态动态综合效益评估[J]. 电力系统自动化, 1994, 18(9): 30-35.
- [4] 张步涵,曾杰,毛承雄,等. 电池储能系统在改善并网风电场电能质量和稳定性中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 54-58.
- [5] 李强,袁越,谈定中. 储能技术在风电并网中的应用研究进展[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2010, 38(1): 115-119.
- [6] 丁明,徐宁舟,毕锐. 负荷侧新型电池储能电站动态功能的研究[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(5): 1-7.
- [7] 丁明,徐宁舟,毕锐. 用于平抑可再生能源功率波动的储能电站的建模及评价[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(2): 66-72.
- [8] 王虹富,曹军,邱家驹,等. 一种用于分布式发电系统的有功补偿模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 94-98.
- [9] Li Wei, Joos G, Abbey C. Wind power impact on system frequency deviation and an ESS based power filtering algorithm solution [C] //Power Systems Conference and Exposition. Atlanta, GA: IEEE, 2006: 2077-2084.
- [10] Ise T, Kita M, Taguchi A. A hybrid energy storage with a SMES and secondary battery [J]. IEEE Transactions on Superconductivity, 2005, 15(2): 1915-1918.

收稿日期: 2013-06-25

作者简介:

程世军(1988-),男,硕士研究生,主要研究方向为新能源发电中储能技术研究, E-mail: chengshijun11@163.com;

张粒子(1963-),女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统分析和电力经济, E-mail: lizizhang2000@sina.com.

(责任编辑:林海文)