

侯倩. 平抑风电出力的风储系统控制策略[J]. 水利水电技术, 2020, 51(12): 242-246.

HOU Qian. Control strategy of wind-storage system for suppressing wind power output[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(12): 242-246.

平抑风电出力的风储系统控制策略

侯倩

(南京信息职业技术学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 为了平抑风电出力, 采用了双层模糊控制优化策略的风储系统。首先, 利用小波包将风电场出力进行分解, 得到平抑目标功率和储能系统充放电初级参考指令。接着, 根据储能设备的荷电状态和充放电初级参考指令利用模糊控制对储能设备的荷电状态进行调节。然后, 利用第二层模糊控制实现储能设备之间的能量相互流动, 优化储能设备的充放电功率指令, 改善对风电功率波动的平抑效果。最后, 在 Matlab/Simulink 中搭建了风储系统模型, 通过仿真验证了双层控制优化策略的有效性。研究结果为风力发电储能系统设计提供参考。

关键词: 风电; 蓄电池; 超级电容; 混合储能系统; 双层模糊控制; 优化策略

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.12.030

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: TM614

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2020)12-0242-06



Control strategy of wind-storage system for suppressing wind power output

HOU Qian

(Nanjing Vocational College of Information Technology, Nanjing 210023, Jiangsu, China)

Abstract: In order to suppress wind power output, a double-layer fuzzy control optimization strategy-based wind-storage system is adopted. Firstly, the wind farm power output is decomposed with wavelet packet to obtain both the suppressing target-power and the charge discharge primary reference instructions for the energy-storage system, and then the state of charge (SOC) of the energy-storage device is regulated with fuzzy control in accordance with both the state of charge (SOC) of the energy-storage device and the charge discharge primary reference instructions. Afterwards, the energy mutual flow among the energy-storage devices is realized with the second-layer fuzzy control to optimize the charge discharge power instructions of the energy-storage device for improving the suppressing effect on wind power fluctuation. Finally, a wind-storage system model is built up with Matlab/Simulink for verifying the availability of the double-layer fuzzy control optimization strategy through the relevant simulation. The study results can provide certain references for the design of the wind power energy-storage system concerned.

Keywords: wind power; battery; supercapacitor; hybrid energy-storage system; double-layer fuzzy control; optimization strategy

0 引言

风电作用清洁能源在全球范围内被大力推广, 但是风资源具有随机性的特点, 将会给电网的安全运行

带来巨大的挑战^[1-2]。然而随着储能技术的出现, 利用储能设备能快速充放电的特点, 可有效的解决上述问题^[3-4]。

国内外学者针对风电储能系统的研究已取得了可

收稿日期: 2020-06-30

基金项目: 2018年度南京信息职业技术学院院级基金项目(YK2180701); 国家自然科学基金资助项目(51877039)

作者简介: 侯倩(1988—), 女, 讲师, 硕士, 从事电力系统自动化的研究。E-mail: 1706885266@qq.com

观的理论基础。文献[5]提出自适应小波包分解方法实现了对风电功率的自适应分解,利用模糊控制实现了对储能设备的荷电状态调节。文献[6-7]利用低通滤波的方法对原始风电场出力进行处理,接着利用模糊控制的优化方法对风储系统进行能量管理。文献[8]利用低通滤波算法对风电场出力进行分解,利用模糊控制结合储能设备的荷电状态优化指令功率。文献[9]采用小波包对风电场出力进行分解,得到并网目标功率和储能设备参考功率指令,利用模糊控制对储能设备的功率指令进行二次优化。文献[10]采用一阶巴特沃斯低通滤波的方法对风电场出力进行分解,得到了并网目标功率曲线和储能设备的初级充放电参考功率指令,接着利用模糊控制优化方法,实现了对风储系统中功率的优化。目前在混合系统中的荷电状态的管理中主要利用的模糊控制方法来修正储能系统的功率,虽然能有效的使储能设备的荷电状态运行在合理的范围内,但是同时也影响了风电的平抑效果。

因此为了解决上述问题本文采用了双层模糊控制优化策略的方法,通过第一层模糊控制实现储能设备荷电状态的调节,防止其储能设备过度充放电情况的发生,第二层模糊控制通过储能设备间的能量相互的流动,有利于改善平抑风电功率波动的效果。

1 风电功率的分解和储能系统内部功率的初级分配

1.1 小波包分解

小波包分解是在小包分析上演变而来,可以将信号的低频和低频分量同时进行分解^[11]。小波包对原始信号的分解过程如图1所示。

1.2 风电功率的小波包分解

国家规定了风电场正常情况下接入电网的有功功率变化的最大限值^[12],本文以装机容量为50 MW风电场为例,根据国家标准建立并网波动指标,若计算时间窗口取1 s,则其1 min波动区间 $[P_{o1,min}, P_{o1,max}]$ 表达式如下

$$P_{o1,min}(t) = \max_{\Delta t=1,2,\dots,59} P_o(t) - \frac{1}{10}P_w \quad (1)$$

$$P_{o1,max}(t) = \min_{\Delta t=1,2,\dots,59} P_o(t) + \frac{1}{10}P_w \quad (2)$$

式中, $P_o(t)$ 为风电并网功率; $P_w(t)$ 为原始风电功率。

10 min时间内风电波动区间 $[P_{o10,min}, P_{o10,max}]$ 表达式如下

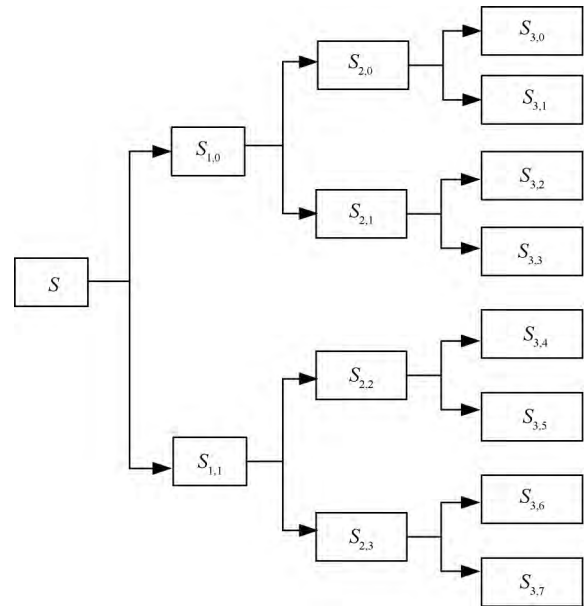


图1 小波包分解过程

$$P_{o10,min}(t) = \max_{\Delta t=1,2,\dots,599} P_o(t) - \frac{1}{3}P_w \quad (3)$$

$$P_{o10,max}(t) = \min_{\Delta t=1,2,\dots,599} P_o(t) + \frac{1}{3}P_w \quad (4)$$

则风电并网功率 $P_o(t)$ 应满足如下区间

$$P_o(t) \in [P_{o1,min}(t), P_{o1,max}(t)] = [P_{o1,min}(t), P_{o1,max}(t)] \cap [P_{o10,min}(t), P_{o10,max}(t)] \quad (5)$$

首先,将原始风电功率 $P_w(t)$ 代入风电并网波动标准进行判断,若其满足标准可直接并网。若不满足,则运用db6小波^[13]对其进行分解,若低频分量 $S_{1,0}$ 满足所提并网波动区间指标,低频分量 $S_{1,0}$ 可视作平抑目标功率;若低频分量 $S_{1,0}$ 不满足要求,循环加深分解层数,直到低频分量满足要求为止。

本文以装机容量为50 MW风电场为例,典型风电场出力场景下风电出力为 $P_w(t)$,通过小波包分解,其分解层数为6,其并网功率 $S_{6,0}$ 如图2所示。由图2可知,并网功率与原始风电功率曲线相比功率波动变小。

1.3 储能系统中功率的初级分配

在平抑风电功率波动的储能系统中采用的是混合储能系统,由蓄电池和超级电容器组成。由于蓄电池的特性决定了其要尽量的减少充放电次数,因此利用超级电容器承担风电功率中的高频部分。根据文献[14]可知,蓄电池和超级电容器的功率响应频率的分界点为 1.67×10^{-2} Hz,与1.2节中分解信号所对应的 $S_{6,1}$ 、 $S_{6,2}$ 和 $S_{6,3}$ 频率接近,将其作为蓄电池的

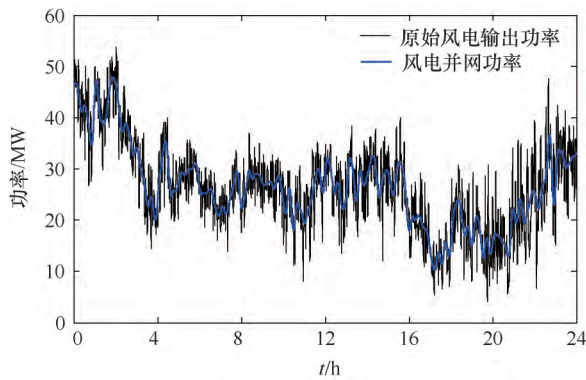


图2 风电原始功率和并网功率

充放电初级参考指令，余下分量作为超级电容器的充放电初级参考指令。混合储能系统的储能设备的初级参考指令表达式分别为

$$\begin{cases} P_b(t) = S_{6,1} + S_{6,2} + S_{6,3} \\ P_{sc}(t) = P_w(t) - P_o(t) - P_b(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中， $P_b(t)$ 为蓄电池的充放电初级参考指令； $P_{sc}(t)$ 为超级电容器的充放电初级参考指令。

图3所示为蓄电池和超级电容器的充放电参考指令，可知超级电容器的功率指令波动更加频繁，满足要求。

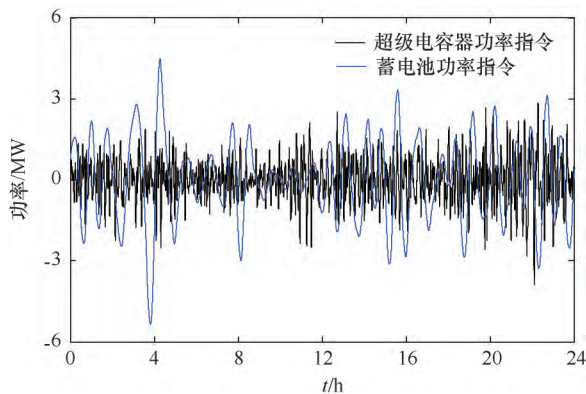


图3 储能设备初级参考指令

2 储能设备模型

SOC 表达式如下^[15]

$$S_x(t) = \frac{E_x^{ini} - \int_0^t (P_{x, ch}^t + P_{x, dis}^t) dt}{\hat{E}_x} \quad (7)$$

式中， E_x^{ini} 为开始时刻的容量状态； $P_{x, dis}^t$ 和 $P_{x, ch}^t$ 分别为放电指令和充电指令； \hat{E}_x 为额定容量。 $S_x(t)$ 为储 t 时刻的 SOC； x 为 b 时表示的是蓄电池，为 sc 时表示的是超级电容器。

储能设备的运行区间表达式为

$$S_{x, min} \leq S_x(t) \leq S_{x, max} \quad (8)$$

式中， $S_{x, min}$ 和 $S_{x, max}$ 分别为 SOC 的下限值和上限值。

归一化后的 SOC 平衡指标为

$$\varepsilon_x(t) = \frac{2(S_x(t) - S_{x, ref})}{S_{x, max} - S_{x, min}} \quad (9)$$

式中， $S_{x, ref}$ 为荷电状态的期望值。

归一化的功率饱和指标为

$$\eta_x(t) = \begin{cases} \frac{1}{\hat{P}_x^+} \min\{P_x^t, \hat{P}_x^+\}, & P_x^t \geq 0 \\ -\frac{1}{\hat{P}_x^-} \min\{|P_x^t|, \hat{P}_x^-\}, & P_x^t < 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中， \hat{P}_x^+ 和 \hat{P}_x^- 分别为储能设备运行功率的上下限值。

3 风储系统的双层模糊控制优化策略

3.1 第一层模糊控制设计

储能设备的容量和额定运行功率具有一定的范围，因此要保证储能设备的运行功率不超过其额定运行功率，其 SOC 不超过其上下限值。因此该层模糊控制主要是控制储能设备的充放电功率并且调节 SOC。其基本原则为：当 SOC 大于其期望值时，若储能设备充放电初级功率指令为充电状态，则应适减小充电功率指令；若为放电功率指令，则保持其不变。当 SOC 小于其期望值时，若储能设备充放电初级功率指令为放电状态，则应减小其放电功率指令；若为充电功率指令，则不改变其大小。当储能设备的 SOC 处于其期望值时，不改变其初级参考功率指令。

模糊控制器的两个输入量分别为 $\varepsilon_x(t)$ 和 $\eta_x(t)$ ，其连续论域均为 $[-1, 1]$ ，其模糊集均为 $\{VS, S, MS, M, MB, B, VB\}$ ，模糊控制器的输出量为 $\Delta k_x(t)$ ，离散论域为 $[-1, -0.7, -0.4, 0, 0.4, 0.7, 1]$ ，模糊集合为 $\{NB, NM, NS, ZO, PZ, PM, PM, PC\}$ 。输入输出隶属度函数分别见图4和图5，蓄电池和超级电容器的第一层模糊控制规则表分别如表1和表2所列。

采用加权平均法，模糊控制器的功率修正系数的计算公式为

$$k_x(t) = \frac{\sum_i \sum_j \mu_{\varepsilon_x}(t) \cdot i \mu_{\eta_x}(t) \cdot j \Delta k_x(t)}{\sum_i \sum_j \mu_{\varepsilon_x}(t) \cdot i \mu_{\eta_x}(t) \cdot j} \quad (11)$$

式中， i 和 j 可视为 VS, S, MS, M, MB, B, VB ； $\mu_{\varepsilon_x}(t)$ ， i 和 $\mu_{\eta_x}(t)$ ， j 为模糊控制器输入量所对第 i 和第 j 个隶属度值。

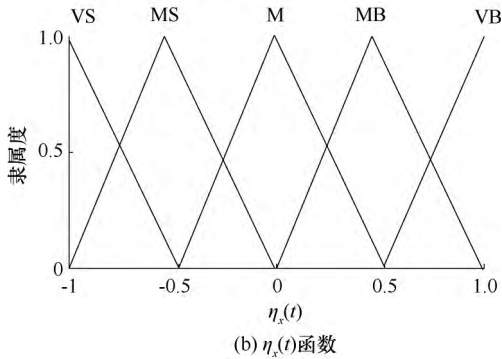
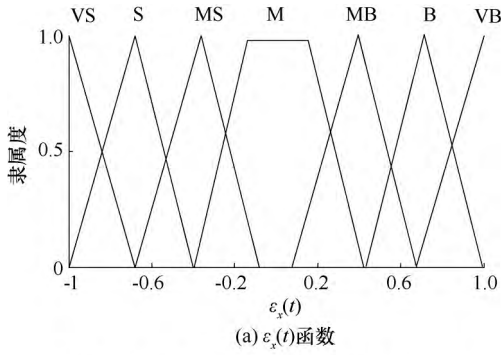


图 4 输入隶属度函数

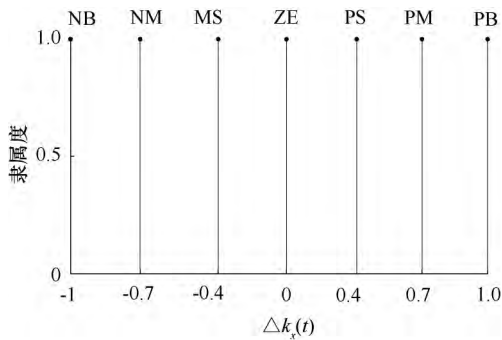


图 5 输出隶属度函数

表 1 蓄电池第一层模糊控制规则

$\varepsilon_b(t)$	$\eta_b(t)$				
	VS	MS	M	MB	VB
VS	ZE	ZE	ZE	NM	NB
S	ZE	ZE	ZE	NS	NM
MS	ZE	ZE	ZE	NS	NM
M	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
MB	PM	PS	ZE	ZE	ZE
B	PM	PS	ZE	ZE	ZE
VB	PB	PM	ZE	ZE	ZE

表 2 超级电容器第一层模糊控制规则

$\varepsilon_b(t)$	$\eta_b(t)$				
	VS	MS	M	MB	VB
VS	ZE	ZE	ZE	NM	NB
S	ZE	ZE	ZE	NS	NM
MS	ZE	ZE	ZE	NS	NM
M	PS	ZE	ZE	ZE	NS
MB	PM	PS	ZE	ZE	ZE
B	PM	PS	ZE	ZE	ZE
VB	PB	PM	ZE	ZE	ZE

模糊控制器所对应的修正功率为

$$\Delta P_x(t) = \begin{cases} k_x(t) \hat{P}_x^+ & P_x^t \geq 0 \\ k_x(t) \hat{P}_x^- & P_x^t < 0 \end{cases} \quad (12)$$

3.2 第二层模糊控制设计

由上文可知，储能设备的 SOC 主要是通过第一层模糊控制器进行调节，虽然保证了其 SOC 运行在安全的范围内，但是同时也降低了风电平抑效果，若此时储能设备之间可以实现能量的相互流动，通过能量的互补来保证平抑风电功率波动的效果。

第二层模糊控制器的输入量为荷电状态的平衡指标和第一层模糊控制器参数的功率修正系数。其输入输出隶属度函数如图 6 和图 7 所示。模糊控制器的输出量为 $\Delta y_x(t)$ 。模糊控制规则表如表 4 和 5 所列。

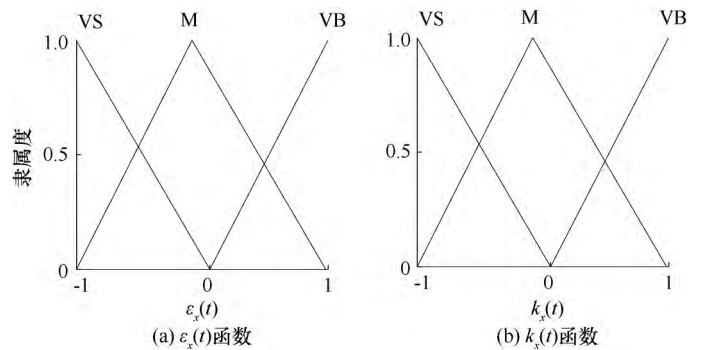


图 6 输入隶属度函数

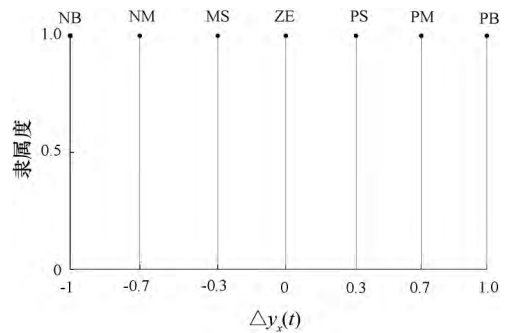


图 7 输出隶属度函数

表 3 蓄电池第二层模糊控制规则

$\varepsilon_b(t)$	$k_{sc}(t)$				
	VS(放)	VS(充)	M	VB(放)	VB(充)
VS	PS	PM	ZE	NM	MS
M	PS	PM	ZE	NM	MS
VB	NM	PS	ZE	PS	NM

表 4 超级电容器第二层模糊控制规则

$\varepsilon_{sc}(t)$	$k_b(t)$				
	VS(放)	VS(充)	M	VB(放)	VB(充)
VS	PS	PM	ZE	NM	MS
M	PS	PM	ZE	NM	MS
VB	NM	PS	ZE	PS	NM

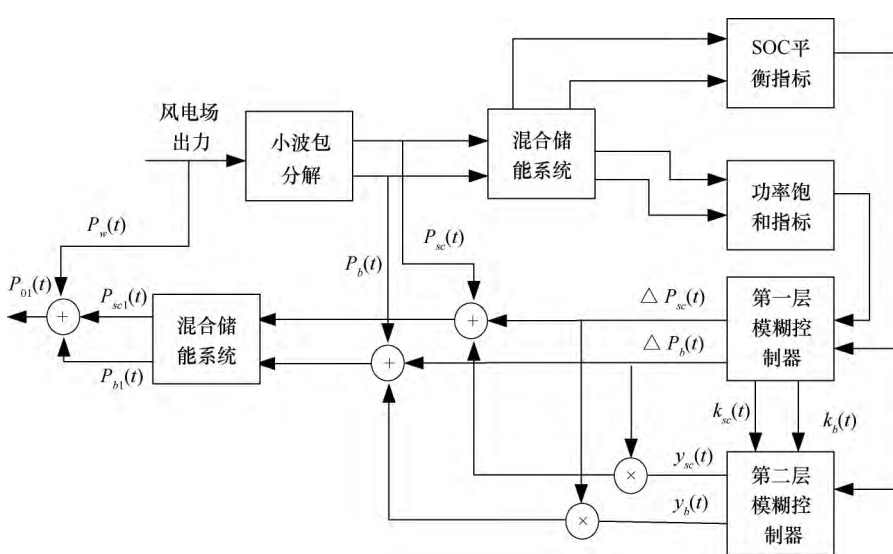


图8 风电混合储能系统的双层模糊控制优化策略

表3和表4中充和放表示的是蓄电池和超级电容器充放电运行状态。于是经过第二层模糊控制优化后的储能设备的充放电功率指令为

$$\begin{cases} P_{sc1}(t) = P_{sc}(t) + \Delta P_{sc}(t) - y_{sc}(t) \Delta P_b(t) \\ P_{b1}(t) = P_b(t) + \Delta P_b(t) - y_b(t) \Delta P_{sc}(t) \end{cases} \quad (13)$$

风电场最终输出功率为风电原始输出功率与蓄电池和超级电容器优化后功率之和，储能系统的双层模糊控制能够减弱单层模糊控制造成的平抑风电功率曲线偏离目标值的程度，能起到改善风电平抑效果的目的。最终合成的平抑目标功率为

$$P_{01}(t) = P_w(t) + P_{sc1}(t) + P_{b1}(t) \quad (14)$$

本文所采用的风电混合储能系统的双层模糊控制优化策略如图8所示。

为了更加直观的体现双层模糊控制的优化效果，则将对优化结果进行量化，本文将采用最终合成的平抑目标功率偏离理想目标功率的总和 $\sum \Delta P$ 来进行优化效果的评价，其表达式为

$$\sum \Delta P = \sum |P_{01}(t) - P_0(t)| \quad (15)$$

式中， $\sum \Delta P$ 为最终合成的平抑目标功率偏离理想目标功率的总和； $P_{01}(t)$ 为最终合成的平抑目标功率； $P_0(t)$ 为理想状态下的平抑目标功率。

4 仿真分析

在 Matlab/Simulink 搭建了数学仿真模型。其中储能设备的 SOC 的上下限均为 0.9 和 0.1，SOC 的初始值和其期望值均为 0.5。蓄电池的额定容量为 3 MW·h 其额定运行功率为 6 MW；超级电容器额

定容量为 0.5 MW·h 其额定运行功率为 4 MW。

为了验证模糊控制对储能设备的荷电状态调节作用的有效性图9和图10分别展示了蓄电池和超级电容器有无荷电状态调节时相对于的荷电状态变化曲线。

由图9和图10可知，在第一层模糊控制器的作用下储能设备的荷电状态能够安全稳定的运行在指定区间，能有效的避免储能设备的过度充放电。

风电场平抑目标功率与采用具有荷电状态调节的单层模糊控制和采用双层模糊控制调节的所得到的风电平抑功率如图11所示。

风电平抑功率如图11所示。

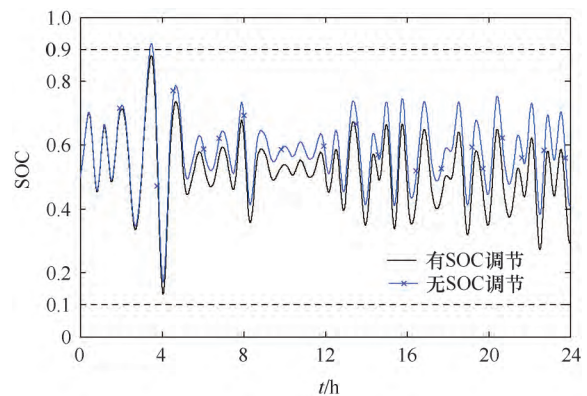


图9 SOC调节前后蓄电池SOC

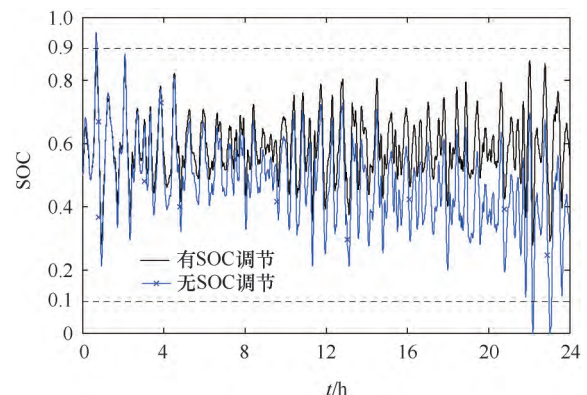


图10 SOC调节前后超级电容器SOC

表5展示了根据公式(13)得出的单层模糊控制与双层模糊控制方法所对应的功率偏离理想风电平抑目标功率的总和。

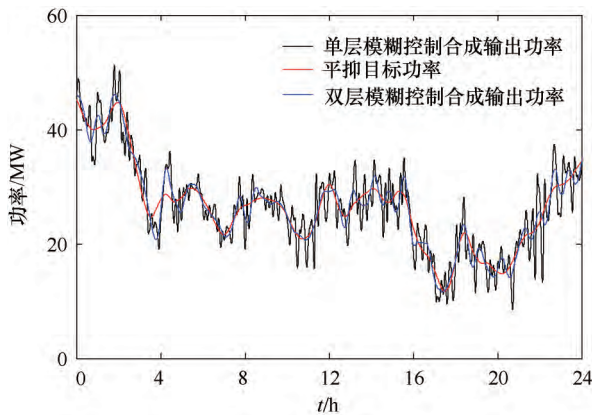


图 11 平抑目标功率与输出合成功率对比

表 5 单层/双层模糊控制所对应的输出功率偏离指标

模糊控制类型	偏离理想平抑目标值总和/MW
单 层	2 507.5
双 层	425.3

由图 11 和表 5 可知,单层模糊控制能够调节储能设备的荷电状态,但是会导致风电平抑效果的损失,通过双层模糊控制的方法,利用储能设备间能量的相互流动,可以减小单层模糊控制因储能设备的荷电状态的调节导致的风电功率平抑效果变差的影响,改善风电平抑效果。

图 12 展示了单层和双层模糊控制方法所对应的储能设备的荷电状态的曲线。

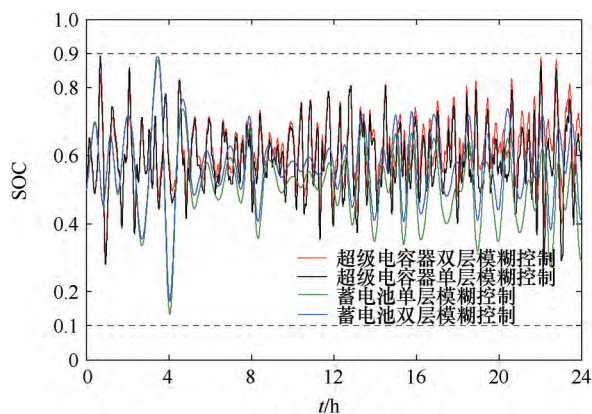


图 12 储能设备 SOC 对比

由图 12 可知,单/双成模糊控制均能使储能设备的荷电状态运行在合理的范围内。双层模糊控制策略能对储能设备的荷电状态进行调节,而且通过储能设备之间的能量相互流动,减小单层模糊控制对风电功率平抑效果的影响。

5 结 语

利用小波包变换的方法对风电场出力进行分解,得到了平抑目标功率和储能设备充放电初级功率参考指令,采用第一层模糊控制对储能设备的 SOC 进行调节,根据储能设备的 SOC 和功率修正系数利用第二层模糊控制对风储系统的平抑效果进行优化。仿真结果表明:风储系统的双层模糊控制优化策略能改善风电平抑效果,并且有效的提高风电消纳能力。

参考文献:

- [1] 陈波,吴政球. 基于约束因子限幅控制的双馈感应发电机有功功率平滑控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(27): 130-137.
- [2] 谭兴国,王辉,张黎,等. 微电网复合储能多目标优化配置方法及评价指标[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(8): 7-14.
- [3] 于梵,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.
- [4] 张步涵,曾杰,毛承熊,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] 吴杰,丁明. 采用自适应小波包分解的混合储能平抑风电波动控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 7-12.
- [6] 秦文萍,柳雪松,韩肖清,等. 直流微电网储能系统自动充放电改进控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1827-1834.
- [7] 董宜鹏,谢小荣,孙浩,等. 微网电池储能系统通用综合控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3310-3316.
- [8] 丁明,吴建峰,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.
- [9] 付菊霞,陈洁,邓浩,等. 平抑风电波动的混合储能系统控制策略[J]. 电测与仪表, 2020, 57(5): 57-66.
- [10] 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.
- [11] 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): 317-323.
- [12] 全国电力监管标准化技术委员会. 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963—2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [13] 何正友,钱清泉. 电力系统暂态信号分析中小波基的选择原则[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(10): 45-48.
- [14] CHEN H, CONG TN, YANG W, et al. Progress in electrical energy storage system: a critical review [J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(3): 291-312.
- [15] 吕超贤,李欣然,卢龙辉,等. 基于小波分解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.

(责任编辑 郭利娜)