

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200251

考虑风电计划跟踪的储能调度模糊控制系统研究

李浩博¹, 邹海荣¹, 朱建红²

(1. 上海电机学院电气学院, 上海 201306; 2. 南通大学电气工程学院, 江苏 南通 226007)

摘要: 风储联合发电可在一定程度上确保风电功率并网计划的可靠实现, 其关键技术离不开有效的储能能量管理与控制。提出了一种储能双层模糊控制策略。首先, 利用改进的遗传算法优化自适应神经模糊推理系统, 以获得未来风电功率。然后, 结合实际储能荷电状态与风电功率并网计划动态跟踪调节需求, 经双层模糊控制规则反复修正储能系统吞吐功率, 确保储能系统的安全工作与功率计划跟踪目标的多任务执行。最后, 利用现有仿真平台, 采用风电场实际运行数据, 通过将仿真结果与传统模糊控制进行对比, 验证了所提策略的优越性。仿真结果表明, 双层模糊控制策略能够在降低储能荷电状态越限次数的同时, 进一步提高风电机组并网发电能力。

关键词: 风电场; 功率计划; 储能控制; 分层模糊算法; 跟踪

Research on a fuzzy control system of energy storage dispatch considering wind power plan tracking

LI Haobo¹, ZOU Hairong¹, ZHU Jianhong²

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China;

2. School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226007, China)

Abstract: Wind storage combined power generation can ensure the reliable realization of the wind power grid connection plan to a certain extent, but its key technology cannot be separated from effective energy storage energy management and control. A double-layer fuzzy control strategy for energy storage is proposed in this paper. First, an improved genetic algorithm is used to optimize the adaptive neural fuzzy inference system to obtain future wind power. Then, combined with the actual energy storage charge state and the wind power grid-connected plan dynamic tracking adjustment requirements, the huff and puff power of the energy storage system is repeatedly modified by double-layer fuzzy control rules to ensure the safe working of the energy storage system and the multi-task execution of the power plan tracking target. Finally, the existing simulation platform and the actual operation data of the wind farm are used. The advantages of the proposed strategy are verified by comparing the simulation results with traditional fuzzy control. The simulation results show that the double-layer fuzzy control strategy can further improve the grid-connected power generation capacity of wind turbines while reducing the number of times the energy storage charge state exceeds the limit.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61673226) and Project of Nantong Science and Technology Bureau (No. JC2018116).

Key words: wind farm; power planning; control of energy storage; hierarchical fuzzy algorithm; tracking

0 引言

风能作为一种环保清洁能源, 已经成为世界各国能源发展战略的首要选择。然而, 风电具有波动性和随机性, 大规模风电并网对电力系统的安全稳定运行构成威胁, 而现有风电场上报给电网调度部

门的数据直接来自风速预测, 风速预测的准确度直接影响了风电场并网计划预报的精度^[1-3]。总体来说, 风电预测平均绝对误差(MAE)在 10%~15%, 均方根误差(RMSE)在 7%~19%^[4]。预测误差客观存在, 组合算法的预测模型已经成为提升风功率预测准确度的重要途径^[5-8]。在另一方面, 储能技术的快速发展为减小风电计划预报偏差创造了条件, 但其成本较高、容量受限^[9-10]。因此, 研究有针对性的风储系统优化运行策略很有必要。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(61673226); 南通市科技局项目资助(JC2018116)

在风电场储能控制方面,有文献通过具有死区的滑动平均值滤波法对储能装置进行控制,虽然实现了储能系统小时级运行指令的滚动优化,但忽略了储能系统的荷电状态(State of Charge, SOC),增加了储能越限时间^[11]。为使储能系统 SOC 最大限度在限定区间内,文献[12]提出一种基于短期预测和情景分析的储能 SOC 反馈策略,而文献[13]采用一种零相角延迟低通滤波法监管储能的 SOC 状态,两种方法均造成储能跟踪风电计划能力的下降。此外,有文献把风电功率预测模型应用到储能优化控制中,采用奇异值功率标准谱对预测功率进行修正,使储能系统工作更加可靠、灵活,但忽略了储能 SOC 不确定的影响^[14]。文献[15-17]均采用了基于模型预测控制的储能系统运行机制,在满足储能系统 SOC 约束条件下,提前得到储能系统下一调度周期运行指令,使储能系统最大限度追踪调度指令,提升了风电场跟踪计划功率的能力,然而,模型预测控制中未考虑风功率预测误差的影响。文献[18-19]利用模糊控制理论,结合风电功率预测值和储能 SOC,避免了储能系统在调度周期内的 SOC 越限,但无法保证储能系统的输出功率。

针对上述问题,本文首先采用改进遗传算法(Improved Genetic Algorithm, IGA)优化的自适应神经模糊推理系统(Adaptive Neuro-fuzzy Inference System, ANFIS)进行风电功率预测,接着利用小波包分解技术对预测功率进行平抑得到计划功率;然后,针对目前储能模糊控制限于当前时段储能 SOC 运行指令,未考虑对后续储能系统输出能力影响的问题,提出一种双层模糊控制策略,对储能运行指令进行反复修正,不仅考虑了风功率预测值和储能 SOC 不确定的影响,还有效平衡风电并网计划偏差和储能越限的矛盾;最后,从风功率并网计划上报准确度和储能越限时间两个角度,证明了课题所提方法的优越性。

1 风储联合功率调度计划跟踪实现方案

1.1 风电场并网发电预测预报考核指标

平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)表明风功率预测误差的幅值特性,均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)表征预测误差的振幅特性。计算公式如式(1)和式(2)^[20]。

$$MAE = \frac{\sum_{K=1}^n |P_{MK} - P_{PK}|}{Cap \times n} \quad (1)$$

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{K=1}^n (P_{MK} - P_{PK})^2}}{Cap \times \sqrt{n}} \quad (2)$$

式中: P_{MK} 为 K 时段风场实际功率; P_{PK} 为 K 时段风场上报的预测功率; Cap 为风场开机容量; n 为预测样本数。

1.2 基于风电预测储能联合应用方案

利用风功率预测制定风场上报计划功率,通过储能系统减少上报计划功率与实际功率之间的偏差。在风电场运行期间,实时采集风场输出实际功率并计算上报偏差,将偏差值作为跟踪目标控制储能系统运行,系统整体框图如图 1 所示。

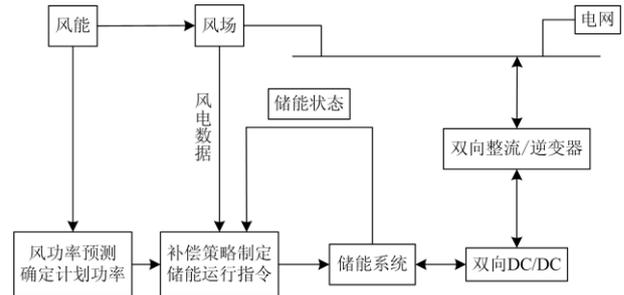


图 1 风储联合系统整体框图

Fig. 1 Block diagram of combined wind storage system

从图 1 可以看出,对于提高风储联合系统跟踪风电计划出力能力,风功率预测技术和储能控制策略均很重要。因此,本文在研究提高风功率预测精度的同时,制定了结合风功率预测与双层模糊控制的储能系统优化控制策略,在最大限度满足储能调度指令的同时,降低储能越限时间,提高储能寿命。

2 风电功率预测模型设计

ANFIS 系统是一种组合模型,是采用模糊控制优化的神经网络,能够有效改善常规神经网络局部极值的缺陷^[21-22]。而遗传算法 GA 是全局搜索算法中的一种,可用于优化减法聚类参数^[23-24],改进遗传算法优化自适应神经模糊推理系统 IGA-ANFIS 预测风功率的具体步骤如下。

(1) 数据处理。输入原始数据,采用主成分分析法对输入变量进行降维去噪。

(2) 生成网络。采用减法聚类生成最初 ANFIS,聚类参数由-1 到 1 的随机实数组成。

(3) 训练网络。选取训练集均方根误差的倒数为适应度函数,计算个体适应度值、选择、交叉和变异,寻求最佳聚类参数,确定网络结构。

(4) 预测功率。输入预测样本数据,利用训练后

的模型进行预测, 求得预测功率。

(5) 预报功率。采用小波包分解技术^[25]对预测功率进行平滑, 生成上报计划功率。

3 风电场功率计划跟踪目标的储能分层模糊控制策略

由于风力发电预测误差存在随机性和不确定性, 作为并网计划的数据也有相似特性, 储能系统跟踪目标指令时, 容量超过或低于安全阈值的情况会对储能寿命造成严重影响, 因此, 定义时间 T_e 表示储能系统运行过程中超过设定安全阈值的时间, 计算公式为^[26]

$$T_e = \Delta t \times \sum_{t=1}^n \left[y \left(\frac{E_{SOC}(t)}{E_{SOC,\min}} \right) \cup y \left(\frac{E_{SOC,\max}}{E_{SOC}(t)} \right) \right] \quad (3)$$

$$y(x) = \begin{cases} 1 & (x < 1) \\ 0 & (x \geq 1) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $E_{SOC,\max}$ 和 $E_{SOC,\min}$ 分别表示储能 SOC 最大和最小安全值; $E_{SOC}(t)$ 表示 t 时刻储能容量与额定容量 Q_N 的比值。

3.1 单层模糊控制策略

在储能调度周期内, 根据 t 时刻以及之前最新的风功率信息, 采用 IGA-ANFIS 模型预测未来两个小时内的风电功率, 根据式(5)在 t 时刻预估 $t+1$ 时刻储能将要跟踪的目标指令 $P_R(t+1)$ 。

$$P_R(t+1) = P_W(t+1) - P_p(t+1) \quad (5)$$

式中, $P_W(t+1)$ 和 $P_p(t+1)$ 分别为 $t+1$ 时刻风场的预测功率和上报计划功率, $P_R(t+1) > 0$, 储能吸收能量, $P_R(t+1) < 0$, 储能释放能量, $P_R(t+1) = 0$, 储能不动作。

如果直接将 $P_R(t+1)$ 作为储能下一时刻的运行指令, 不考虑储能当前时刻的剩余能量, 储能 SOC 可能会越限, 因此, 需要对 $P_R(t+1)$ 进行修正, 修正公式为

$$P'_R(t+1) = P_R(t+1) + \Delta K \times P_N D' \quad (6)$$

式中: $P'_R(t+1)$ 为 $t+1$ 时刻储能系统修正后的运行指令; ΔK 为修正系数; P_N 为储能额定功率, 利用模糊控制器求得 ΔK 。

设计模糊控制器为双输入单输出, 定义输入一为 $P_R(t+1)$, 输入二为 $E_{SOC}(t)$, 输出为修正系数 ΔK , 模糊控制器的模糊推理规则与隶属度函数分别如表 1 和图 2 所示。

表 1 单层模糊控制器模糊推理表

Table 1 Fuzzy reasoning of front fuzzy controller

ΔK	P_R				
	L	LM	M	MH	H
VS	PB	PB	P	Z	Z
S	PB	P	P	Z	Z
B	P	Z	Z	Z	N
VB	Z	Z	N	NB	NB

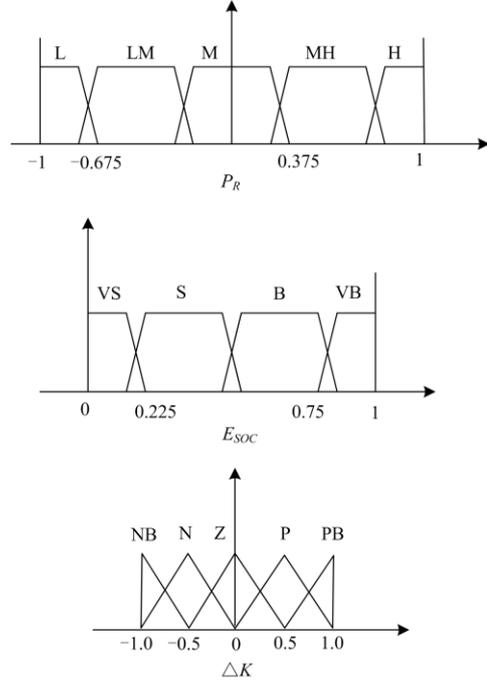


图 2 单层模糊控制器隶属度函数

Fig. 2 Membership function of front fuzzy controller

3.2 双层模糊控制策略

根据风电计划功率以及短时预测功率, 评估储能荷电状态, 预测储能在未来滚动优化时段内每个采样点储能的越限量 $W(t+i)$ 和计划功率偏差 $P_d(t+i)$, 计算公式如式(7)和式(8)所示。

$$W(t+i) = \begin{cases} (E_{SOC}(t+i) - E_{SOC,\max}) \times Q_N & (E_{SOC}(t+i) > E_{SOC,\max}) \\ (E_{SOC,\min} - E_{SOC}(t+i)) \times Q_N & (E_{SOC}(t+i) < E_{SOC,\min}) \end{cases} \quad (7)$$

$$P_d(t+i) = P_p(t+i) - P_W(t+i) + P'_R(t+i) \quad (8)$$

式中, $i=1,2,\dots,8$ 。通过历史数据计算 W 和 P_d 的协方差和相关系数均小于零, 说明两个变量呈现负相关。为了平衡越限量和计划功率偏差之间的矛盾, 即在保证储能寿命的前提下, 最大限度地减小计划功率偏差, 需要对储能运行指令进行再次修正。利用统计学因子分析理论, 通过式(9)一式(11)构造 H 矩阵。

$$h_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{q} \sum_{j=1}^q d_{ij}^2 + \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q d_{ij}^2 - d_{ij}^2 - I \right) \quad (9)$$

$$I = \frac{1}{q^2} \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q d_{ij}^2 \quad (10)$$

$$d_{ij}^2 = \sum_{k=1}^l (z_{ik} - z_{jk})^2 \quad (11)$$

式中： d_{ij}^2 为矩阵 \mathbf{Z} 中第*i*个对象与第*j*个对象的欧式距离的平方； z_{ik} 代表矩阵 \mathbf{Z} 中第*i*行第*k*列元素。矩阵 \mathbf{Z} 由越限量和计划功率偏差组成，是一个行数为2，列数为8的矩阵，即 $q=2$ ， $l=8$ ， h_{ij} 是矩阵 \mathbf{H} 中的元素。

将矩阵 \mathbf{H} 进行特征值分解得到

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{V}\mathbf{U}^T \quad (12)$$

式中： \mathbf{V} 是矩阵 \mathbf{H} 的特征值生成的对角矩阵； \mathbf{U} 是对应特征向量作为列的矩阵。

通过式(13)提取反映 W 和 P_d 两个变量的矛盾因子 F 。

$$F = \mathbf{U}\sqrt{\mathbf{V}} \quad (13)$$

式中： F 越大，说明储能越限时间越长，储能过度出力； F 越小，说明计划功率偏差越大，储能未得到有效利用； F 适中，说明储能调度合理。将矛盾因子 F 作为第二层模糊控制器的一个输入，定义另一个输入为 $P'_R(t+1)$ ，输出为修正系数 $\Delta K'$ ，其隶属度函数如图3所示。

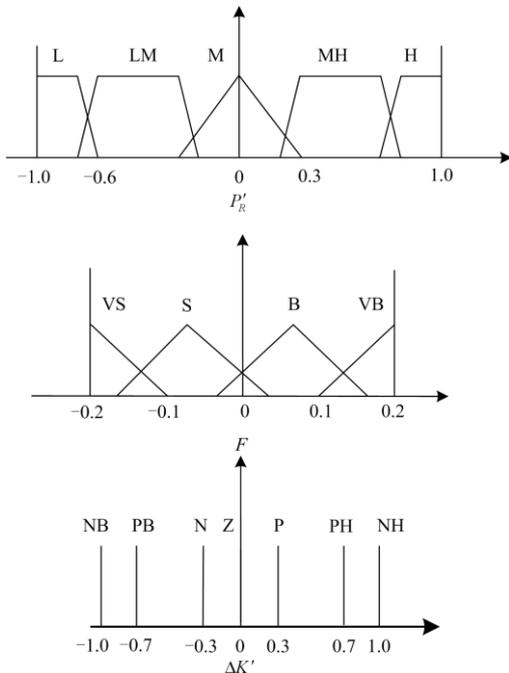


图3 第二层模糊控制器隶属度函数

Fig. 3 Membership function of second-layer fuzzy controller

模糊推理原则如下：

- (1) 如果 F 很大，说明储能 E_{SOC} 严重超出 $E_{SOC,max}$ ，需提前进行放电；
- (2) 如果 F 很小，说明储能 E_{SOC} 严重低于 $E_{SOC,min}$ ，需提前进行充电；
- (3) 如果 F 适中，说明储能 E_{SOC} 适中，系统按照原有指令充/放电。

第二层模糊控制器模糊推理规则见表2。

采用式(14)对 $P'_R(t+1)$ 进行再次修正，求得储能运行指令 $P''_R(t+1)$ 。由于储能系统输出功率受其额定功率制约，根据式(15)确定储能最终运行指令 $P'''_R(t+1)$ 。

$$P''_R(t+1) = P'_R(t+1) + \Delta K' \times P'_R(t+1) \quad (14)$$

$$P'''_R(t+1) = \begin{cases} P_N & (P''_R(t+1) > P_N) \\ P''_R(t+1) & (-P_N \leq P''_R(t+1) \leq P_N) \\ -P_N & (P''_R(t+1) < -P_N) \end{cases} \quad (15)$$

表2 第二层模糊控制器模糊推理表

Table 2 Fuzzy inference table of second-layer fuzzy controller

$\Delta K'$	P'_R				
	L	LM	M	MH	H
VS	NB	PB	P	NH	P
S	PB	N	Z	PH	Z
B	P	PH	Z	N	PB
VB	PH	NH	PB	PB	NB

综上所述，考虑风电计划跟踪的储能调度模糊控制具体流程如图4所示，具体步骤如下。

- (1) 根据历史风电数据构建 IGA-ANFIS 预测模型，设置储能系统各项参数和初始状态，设计双层模糊控制器的隶属函数和模糊规则。
- (2) 根据风场短时预测功率 $P_w(t+1)$ 和计划功率 $P_p(t+1)$ ，由式(5)计算得到 $P'_R(t+1)$ 。
- (3) 结合当前 $E_{SOC}(t)$ 和 $P'_R(t+1)$ ，通过单层模糊控制器求得修正系数 ΔK ，利用公式(6)求得修正后的储能运行指令 $P'_R(t+1)$ 。
- (4) 根据 P_w 、 P'_R 和 E_{SOC} ，利用式(9)一式(13)求得矛盾因子 F ，采用第二层模糊控制器求得修正系数 $\Delta K'$ ，根据式(14)和式(15)确定储能运行指令 $P'''_R(t+1)$ 。

- (5) 判断是否到达运行调度停止时间 t_{end} ，若是，则停止运行；否则， $t=t+1$ ，返回步骤(2)。

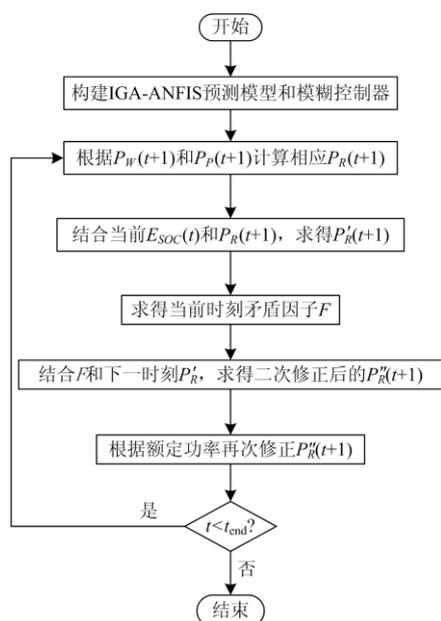


图4 储能系统跟踪风电计划流程图

Fig. 4 Flow chart of energy storage system tracking wind power plan

4 算例分析

本文以我国东部沿海某装机容量为 148.5 MW 的风电场实际运行数据为例, 选取 2017 年 1 月 1 日至 4 月 15 日风电数据为实验数据, 采样间隔为 15 min。选取前三个月 8 640 个数据作为预测模型训练数据, 后 15 天 1 440 个数据作为实验数据, 设置储能系统容量为 50 MWh, 额定功率为 30 MW, $E_{SOC,max} = 0.8$, $E_{SOC,min} = 0.2$, 初始 $E_{SOC} = 0.5$ 。

4.1 仿真结果与分析

风电功率预测精度将直接影响储能控制策略的效果, 课题基于 Matlab 平台和上述参数设计风储仿真系统, 对所提控制方法进行仿真分析, 证明算法有效性及可行性, 图 5 是不同方法^[27-29]的预测结果(其中一天数据), 相应预测结果指标见表 3。

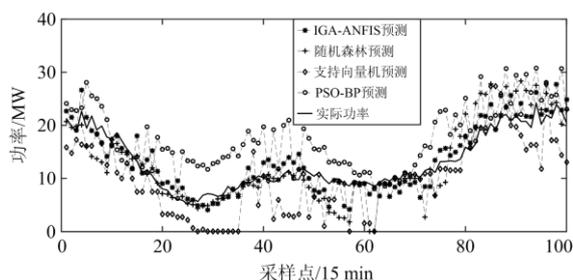


图5 不同模型风电功率预测结果图

Fig. 5 Prediction results of wind power in different models

表3 不同模型预测结果指标对比

Table 3 Comparison of prediction results of different models

预测方法	RMSE/%	MAE/%
IGA-ANFIS	9.872	7.516
随机森林	12.214	10.778
支持向量机	11.348	9.984
PSO-BP	12.805	10.872

从图 5 和表 3 可以看出, 四种预测模型中, 预测准确度: IGA-ANFIS > 支持向量机 > 随机森林 > PSO-BP, 说明了课题所提预测组合模型的可行性, 同时, 良好的预测结果有助于提升风功率并网计划预报的准确度。

基于 IGA-ANFIS 预测模型, 通过小波包分解技术对预测结果进行滤波, 得到计划预报数据, 结果如图 6 所示。

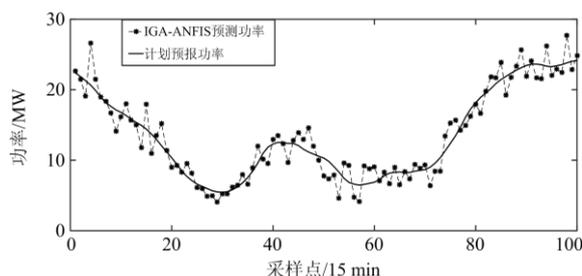


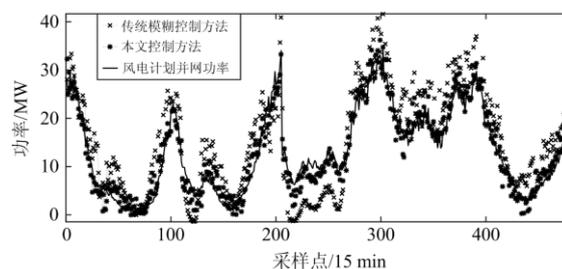
图6 预测功率与计划预报功率对比图

Fig. 6 Comparison of forecast power and planned forecast power

由图 6 可以看出, 预测功率的高频部分被有效滤除, 计划预报功率的波动率明显小于预测功率, 满足国家并网要求。

通过储能配置与调度控制, 对比传统模糊控制与本文所提双层模糊控制, 结果如图 7 所示(前 5 天数据), 表 4 是相应并网功率指标。

从图 7 和表 4 可以看出, 储能装置可有效提高风电计划预报功率的准确度。在相同储能配置下, 双层模糊控制比传统模糊控制的 RMSE 和 MAE 分别提高了 1.922% 和 1.248%, 且储能越限时间 T_e 降为 0。从图 7(b)可以清晰看出, 选用传统模糊控制储能系统存在越限情况, 而双层模糊控制不存在越限情况, 证明了本文所提控制策略的可行性。



(a) 并网功率

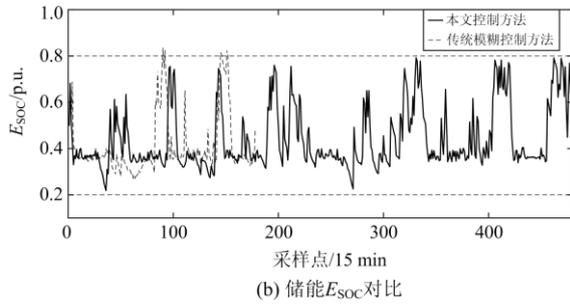


图 7 不同储能控制方式下并网功率和储能 E_{soc} 对比

Fig. 7 Comparison of grid-connected power and energy storage

E_{soc} under different energy storage control modes

表 4 不同储能控制方式指标对比

Table 4 Comparison of control indexes of different energy storage models

控制方式	RMSE/%	MAE/%	T_e /min
传统模糊控制	7.574	5.259	225
双层模糊控制	5.652	4.011	0

4.2 参数分析

从上述储能控制运行结果可知，风电功率的预测精度和储能系统容量会影响风电计划的跟踪效果。

首先，基于本文所提储能控制方式，在相同储能容量下，分别采用不同的四种预测模型，对比跟踪风电计划的效果，指标对比图如图 8 所示。

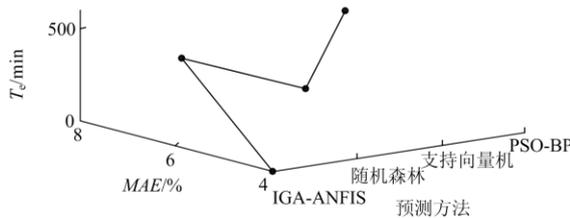


图 8 不同预测方法风电计划跟踪指标对比图

Fig. 8 Comparison of wind power plan tracking indicators for different forecasting methods

从图 8 可以看出，在相同储能容量和控制方式下，储能越限时间随着预测功率精度的降低而升高，说明在构建储能控制策略时，提升预测功率的精度很重要。虽然支持向量机的预测精度低于 IGA-ANFIS 预测模型，但采用本文所提控制策略时，储能越限时间仍然小于基于 IGA-ANFIS 预测模型的传统模糊控制方法，再次表明了所提储能控制策略的优越性。

然后，基于 IGA-ANFIS 预测模型，对比不同储能容量下，分别采用传统模糊控制和本文所提方法，对比跟踪风电计划效果，指标对比图分别如图 9 和

图 10 所示。

从图 9 和图 10 可以看出，当储能容量达到 60 MWh 以上时，两种控制方式都能达到很好的跟踪效果，但从计划功率准确度上可以看出，本文控制方式优于传统模糊控制。当储能容量不大于 60 MWh 时，本文控制方式的储能越限时间明显小于传统方法，即当储能容量不足或需要储能更多出力时，本文控制方法可以在提高风电场跟踪风电计划能力的同时，降低储能越限时间，延长储能寿命。

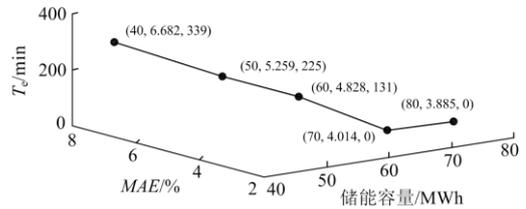


图 9 传统模糊控制风电计划跟踪指标对比图

Fig. 9 Comparison of traditional fuzzy control wind power plan tracking indicators

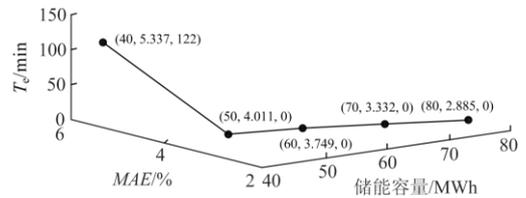


图 10 本文控制方法风电计划跟踪指标对比图

Fig. 10 Comparison of project control method wind power plan tracking indicators

5 结论

本文针对风电计划跟踪问题，提出了一种结合风电功率预测和双层模糊控制的储能系统控制策略，有效提高了计划并网功率的准确度，并得到如下结论：

(1) 相比于传统模糊控制策略，本文设计基于风功率预测的双层模糊控制策略，能够在提高风电计划跟踪能力的同时，显著减小储能越限时间，有利于延长储能寿命。

(2) 本文设计的双层模糊控制策略考虑了风功率预测值和储能 E_{soc} 不确定的影响，在保证储能寿命的同时，最大限度地减小了计划功率偏差。

(3) 本文所提储能控制策略的效果会受到预测功率精度和储能容量的影响，但跟踪风电计划的能力均优于相同条件下的传统方法，且有效平衡了储能越限和风电计划跟踪之间的矛盾。

如何降低储能容量、减少储能运行次数,是后续工作中的重点研究内容。

参考文献

- [1] 杨茂, 张罗宾. 基于数据驱动的超短期风电功率预测综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 171-186.
YANG Mao, ZHANG Luobin. Review on ultra-short term wind power forecasting based on data-driven approach[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 171-186.
- [2] YU Ruiguang, LIU Zhiqiang, LI Xuewei, et al. Scene learning: deep convolutional networks for wind power prediction by embedding turbines into grid space[J]. Applied Energy, 2019, 238: 249-257.
- [3] 唐程辉, 张凡, 张宁, 等. 基于风电场总功率条件分布的电力系统经济调度二次规划方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2069-2078.
TANG Chenghui, ZHANG Fan, ZHANG Ning, et al. Quadratic programming for power system economic dispatch based on the conditional probability distribution of wind farms sum power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2069-2078.
- [4] 朱建红, 黄琼, 孟棒棒. 基于智能组合算法风电场调度功率预报设计[J]. 计算机工程与设计, 2018, 39(10): 3284-3289.
ZHU Jianhong, HUANG Qiong, MENG Bangbang. Design of wind power dispatching power forecasting based on intelligent combination[J]. Computer Engineering and Design, 2018, 39(10): 3284-3289.
- [5] ZHENG Dehua, ESEYE A T, ZHANG Jianhua, et al. Short-term wind power forecasting using a double-stage hierarchical ANFIS approach for energy management in microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 136-145. DOI: 10.1186/s41601-017-0041-5.
- [6] 李永馨, 王鸿, 王致杰, 等. 基于 ISMC-PSO 的风电爬坡输出功率预测系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 115-120.
LI Yongxin, WANG Hong, WANG Zhijie, et al. Research on ISMC-PSO based wind uphill power output prediction system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 115-120.
- [7] 陈昊, 张建忠, 许超, 等. 基于多重离群点平滑转换自回归模型的短期风电功率预测[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 73-79.
CHEN Hao, ZHANG Jianzhong, XU Chao, et al. Short-term wind power forecast based on MOSTAR model[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 73-79.
- [8] WANG Xinyou, WANG Chenhua, CHANG Yanzhi. Short-term wind power prediction based on KPCA-KMPMR[J]. International Journal of Electrical Engineering, 2017, 24(1): 1-9.
- [9] 文乐, 张宝锋, 张恩享, 等. 并网型多能互补系统优化规划方法[J]. 热力发电, 2019, 48(11): 68-72.
WEN Le, ZHANG Baofeng, ZHANG Enxiang, et al. Optimized planning method for grid-connected multi-energy complementary system[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(11): 68-72.
- [10] 张伟明, 许德智, 颜文旭, 等. 基于自适应积分滑模约束控制的电池储能系统能量管理[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1282-1289.
ZHANG Weiming, XU Dezhi, YAN Wenxu, et al. Energy management of battery energy storage system based on adaptive integral sliding mode constrained control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1282-1289.
- [11] 贾成真, 王灵梅, 孟恩隆, 等. 基于风电场集中储能的风储柔性控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 31-37.
JIA Chengzhen, WANG Lingmei, MENG Enlong, et al. Research on flexible control strategy based on the centralized storage joint with wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 31-37.
- [12] ZHOU Yun, YAN Zheng, LI Naihu. A novel state of charge feedback strategy in wind power smoothing based on short-term forecast and scenario analysis[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(2): 870-876.
- [13] NGUYEN C L, LEE H H. Optimal power control strategy for wind farm with energy storage system[J]. Journal of Electrical Engineering Technology, 2017, 12(2): 726-737.
- [14] 赵巧娥, 郭敏, 贾新春, 等. 基于预测控制储能系统平抑风电场并网波动功率[J]. 电测与仪表, 2019, 56(5): 94-97.
ZHAO Qiao'e, GUO Min, JIA Xinchun, et al. Suppression of grid-connected power fluctuation in wind farm based on the prediction of energy storage system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(5): 94-97.
- [15] 肖斐, 艾芊. 基于模型预测控制的微电网多时间尺度需求响应资源优化调度[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 184-190.
XIAO Fei, AI Qian. Multiple time-scale optimal dispatch of demand response resource for microgrid based on model predictive control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 184-190.
- [16] MOGHADDAM I N, CHOWDHURY B H,

- MOHAJERYAMI S. Predictive operation and optimal sizing of battery energy storage with high wind energy penetration[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(8): 6686-6692.
- [17] 章竹耀, 郭晓丽, 张新松, 等. 基于滑动平均和模型预测控制的风储平抑策略[J]. 控制工程, 2019, 26(1): 114-119.
- ZHANG Zhuyao, GUO Xiaoli, ZHANG Xinsong, et al. Strategy of smoothing wind power fluctuation with storage battery based on moving average and model predictive control[J]. Control Engineering of China, 2019, 26(1): 114-119.
- [18] 刘世林, 禹威威, 姚伟. 用于风电场发电计划跟踪的复合储能控制策略[J]. 太阳能学报, 2018, 39(4): 1060-1066.
- LIU Shilin, YU Weiwei, YAO Wei. Control strategy of composite energy storage for wind farm power generation schedule tracking[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2018, 39(4): 1060-1066.
- [19] 雷勇, 林晓冬. 超导磁储能-蓄电池混合储能系统在平抑风电场功率波动中的应用[J]. 高电压技术, 2019, 45(3): 983-990.
- LEI Yong, LIN Xiaodong. Application of hybrid energy storage system based on SMES and BESS in smoothing the power fluctuations of wind farms[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 983-990.
- [20] 风电功率预测功能规范: Q/GDW 10588—2015[S]. 北京: 国家电网公司, 2016.
- Function specification of wind power forecasting: Q/GDW 10588—2015[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2016.
- [21] MAJID M, MOJTABA K, RUPP C, et al. Power production prediction of wind turbines using a fusion of MLP and ANFIS networks[J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(9): 1025-1033.
- [22] KHOSRAVI A, KOURY R N N, MACHADO L, et al. Prediction of wind speed and wind direction using artificial neural network, support vector regression and adaptive neuro-fuzzy inference system[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2018, 25: 146-160.
- [23] 汪惟源, 乔颖, 窦飞, 等. 基于改进遗传算法的海上风电场集电系统拓扑优化[J]. 中国电力, 2019, 52(1): 63-68.
- WANG Weiyuan, QIAO Ying, DOU Fei, et al. Optimization of offshore wind farm collector systems based on improved genetic algorithm[J]. Electric Power, 2019, 52(1): 63-68.
- [24] ZHU Yongli, LIU Xuechun, DENG Ran, et al. Memetic algorithm for solving monthly unit commitment problem considering uncertain wind power[J]. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 2020, 31(2): 511-520.
- [25] SUN Sizhou, FU Jingqi, ZHU Feng, et al. A hybrid structure of an extreme learning machine combined with feature selection, signal decomposition and parameter optimization for short-term wind speed forecasting[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2020, 42(1): 3-21.
- [26] 刘颖明, 王维, 王晓东, 等. 结合风功率预测及储能能量状态的模糊控制策略平滑风电出力[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2535-2543.
- LIU Yingming, WANG Wei, WANG Xiaodong, et al. A fuzzy control strategy combined with wind power prediction and energy storage SOE for smoothing wind power output[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2535-2543.
- [27] 孙莹, 赵萌萌, 沈美娜, 等. 基于 CEEMD 和模糊熵的随机森林风力发电功率预测[J]. 智慧电力, 2019, 47(10): 36-43.
- SUN Kun, ZHAO Mengmeng, SHEN Meina, et al. Wind power forecasting with random forest based on CEEMD and fuzzy entropy[J]. Smart Power, 2019, 47(10): 36-43.
- [28] 黄昕宇, 张栋良, 李帅位. 基于改进模糊支持向量机的汽轮机热耗率预测模型[J]. 热力发电, 2019, 48(3): 22-27.
- HUANG Xinyu, ZHANG Dongliang, LI Shuaiwei. Prediction model of steam turbine heat consumption based on improved fuzzy support vector machine[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(3): 22-27.
- [29] 金璐, 钟鸣, 张景霞, 等. 基于 PSO-LSSVM 的海水淡化负荷预测[J]. 智慧电力, 2019, 47(2): 49-55.
- JIN Lu, ZHONG Ming, ZHANG Jingxia, et al. Seawater desalination load forecasting based on PSO-LSSVM[J]. Smart Power, 2019, 47(2): 49-55.

收稿日期: 2020-03-11; 修回日期: 2020-05-22

作者简介:

李浩博(1996—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: 1191802920@qq.com

邹海荣(1971—), 女, 博士, 教授, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: zouhr@sdju.edu.cn

朱建红(1971—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电工技术与新能源发电。

(编辑 许威)