



## 基于递归模糊神经网络的风电平滑控制策略

杨彦飞 陈洁 廖跃洪 阿热帕提·艾尼瓦尔

### Wind Power Smoothing Control Strategy Based on Recursive Fuzzy Neural Network

YANG Yanfei, CHEN Jie, LIAO Yuehong, AINIWAER Arepati

引用本文:

杨彦飞, 陈洁, 廖跃洪, 等. 基于递归模糊神经网络的风电平滑控制策略[J]. 现代电力, 2022, 39(2): 228–235. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0089

YANG Yanfei, CHEN Jie, LIAO Yuehong, et al. Wind Power Smoothing Control Strategy Based on Recursive Fuzzy Neural Network[J]. *Modern Electric Power*, 2022, 39(2): 228–235. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0089

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0089>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于参数优化变分模态分解的混合储能功率分配策略

Hybrid Energy Storage Strategy Based on Parameter Optimized Variational Mode Decomposition

现代电力. 2021, 38(1): 51–59 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0193>

#### 基于实物期权的风力发电侧储能投资决策

Investment Decision of Energy Storage in Wind Power Generation Based on Real Options

现代电力. 2021, 38(4): 442–448 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0345>

#### 考虑蓄电池SOC安全范围的混合储能平抑风光功率波动策略

Strategy of Hybrid Energy Storage to Stabilize Wind-PV Power Fluctuation Considering Battery SOC Safety Range

现代电力. 2018, 35(3): 84–89 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2018/I3/84>

#### 考虑储能荷电状态平抑风电功率的抛物线规则变滤波时间常数方法

Parabola Regular Variable Filtering Time Constant Method Considering Energy Storage SOC State to Smooth Wind Power

现代电力. 2020, 37(5): 518–525 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0133>

#### 平抑风电波动的混合储能系统自适应控制策略

Adaptive Control Strategy of Hybrid Energy Storage System for Mitigating Wind Power Fluctuations

现代电力. 2020, 37(6): 646–653 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0949>

#### 考虑负载变化率的混合储能分频控制优化策略

An Optimal Frequency Division Control for Hybrid Energy Storage Considering the Change Rate of the Load

现代电力. 2018, 35(4): 80–86 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2018/I4/80>

# 基于递归模糊神经网络的风电平滑控制策略

杨彦飞, 陈洁, 廖跃洪, 阿热帕提·艾尼瓦尔  
(新疆大学电气工程学院, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830047)

## Wind Power Smoothing Control Strategy Based on Recursive Fuzzy Neural Network

YANG Yanfei, CHEN Jie, LIAO Yuehong, AINIWAER Arepati

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

**摘要:** 为实现风电平滑并网, 在满足风电波动要求的基础上, 以减少风电平滑输出时间延时和降低混合储能容量为目的, 设计了一个基于递归模糊神经网络与规则控制相结合的风电平滑并网策略。首先, 通过递归模糊神经网络对风电原始出力进行平抑, 获得符合国家 1 min/10 min 风电波动要求的并网功率。其次, 依据混合储能系统各自的约束条件(如功率、荷电状态等)建立基于规则控制的功率分配算法, 实现了功率在混合储能系统之间的合理分配。最后, 以新疆地区的风电历史数据为依据, 在 Matlab/Simulink 中进行仿真, 结果表明该平滑策略是合理和有效的。

**关键词:** 风力发电; 混合储能; 递归模糊神经网络; 功率分配; 能量管理

**Abstract:** To implement smooth grid-connection of wind power, on the basis of satisfying the demand on the fluctuation of wind power, taking decreasing the time delay of wind power smooth output and reducing the capacity of hybrid energy storage as the objective, a wind power smooth grid-connection strategy based on the recursive fuzzy neural network combined with rule control was designed. Firstly, by means of recursive fuzzy neural network the original output of wind power was leveled to obtain the grid-connected power met the national requirement on wind power fluctuation 1 min/10 min. Secondly, according to respective constraint conditions of hybrid energy storage such as power, state of charge, etc., a rule control-based power distribution algorithm was established to realize the rational distribution of power among hybrid energy storage systems. Finally, taking historical data of wind power in Xinjiang as basis, simulation calculation was performed by Matlab/Simulink. Simulation results show that the proposed smooth

strategy is reasonable and efficient.

**Keywords:** wind power generation; hybrid energy storage; recursive fuzzy neural network; power distribution; energy management

**DOI:** 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0089

## 0 引言

我国风力发电在局部地区的快速发展和风电本身的不确定性, 给电网的运行带来了巨大威胁。目前, 改变风电出力的方式有风电机组改进与储能系统辅助 2 大类<sup>[1]</sup>。然而, 基于风电机组改进的方法大多以减少风能捕获效率为代价, 进而降低风电机组运行的经济性。当前, 随着能源互联网的发展, 储能系统辅助风电场平滑并网正在逐渐成为研究热点<sup>[1]</sup>。但基于储能系统辅助控制的方法在理论研究方面仍然存在缺陷。所以, 基于储能系统辅助控制的风电平滑方法仍然有较大的研究价值。

现有的储能装置根据功能的不同可划分成能量型<sup>[2-3]</sup>和功率型<sup>[4-5]</sup>。前者的特点是能量密度大, 功率密度小(如蓄电池、氢气储能、深冷液化等); 后者的特点是能量密度小, 功率密度大, 可以实现高倍率充放电(如超级电容、飞轮储能、超导储能等)。为了加强储能系统平抑风电波动的整体性能<sup>[6]</sup>, 从清洁环保、大容量和大功率等方面考虑, 本文采用氢气储能和超级电容构成的混和储能系统(hybrid energy storage system, HESS)来实现风电的平滑出力。

文献<sup>[7]</sup>将 HESS 辅助风电平滑策略分为经典控制策略和智能控制策略 2 大类。其中经典控制

**基金项目:** 新疆维吾尔自治区自然科学基金(2019D01C078)。Project Supported by Natural Science Foundation of the Xinjiang Uygur Autonomous Region(2019D01C078)。

策略又包括规则控制 (rules based controller, RBC) 和滤波控制 (filtration based controller, FBC)。RBC 是按照预先定义的充放电规则, 将功率分配到各个储能设备上。例如文献 [8] 首先通过功率守恒由风机、光伏和并网的功率计算得出储能系统总出力, 然后制定相应的规则根据超级电容和储氢系统的传输电压来确定各储能的出力。而 FBC 采用滤波器 (如低通滤波和小波变换等) 将不平衡功率分解为高频和低频 2 部分。文献 [9] 利用滑动滤波和变分模态对风电场不平衡功率进行分解, 然后根据储能器件自身的特性进行功率分配。上述经典控制策略因结构简单和计算量小等优点, 被广泛应用于储能的能量管理中。然而, 经典的控制策略是预设和僵化的, 难以适应实时的系统条件 [10]。因此, 与经典控制策略相比, 智能控制策略 (如人工神经网络、模糊控制、强化学习等) 更加健壮和高效 [11]。文献 [12] 设计了一种具有灵活学习率的自适应线性神经网络, 以减轻风电平滑功率的波动; 文献 [13] 提出了使用模糊控制规则来调整卡尔曼滤波器的参数, 以平滑风电系统的输出功率。但是现有模糊神经网络 (fuzzy neural network, FNN) 的主要缺点是由于其固有的前馈网络而将应用领域限制为静态问题结构体。为了解决此类问题, 本文提出递归模糊神经网络 (recursive fuzzy neural network, RFNN) 与规则控制相结合的风电平滑并网策略。

本文以新疆某地区风电场历史数据为依据, 以减小混合储能系统容量为研究目的, 将递归模糊神经网络和低通滤波两种控制策略在 Matlab/Simulink 中进行仿真对比, 结果表明该平滑策略能够平抑风电波动和减少输出信号的时间延时。

## 1 储能系统模型

### 1.1 超级电容模型

本文中超级电容 (ultra capacitor, UC) 的剩余能量采用能量逐步积累的方法表示 [14], 并推导出  $t$  时刻的剩余能量  $E_{UC}(t)$  与荷电状态  $S_{OCUC}(t)$  的计算公式和约束条件

$$\begin{cases} E_{UC}(t) = E_{UC}(t-1) + P_{UCC}(t)\Delta t\eta_{UCC} + \frac{P_{UCD}(t)\Delta t}{\eta_{UCD}} \\ S_{OCUC}(t) = \frac{E_{UC}(t)}{E_{UCNESS}} \times 100\% \\ S_{OCUC.min} \leq S_{OCUC}(t) \leq S_{OCUC.max} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_{UCC}(t)$ 、 $P_{UCD}(t)$  表示  $t$  时段 UC 充放电功率, 其中  $P_{UCC}(t) > 0$ 、 $P_{UCD}(t) < 0$ ;  $\eta_{UCC}$ 、 $\eta_{UCD}$  为 UC 充、放电效率;  $\Delta t$  为系统的采样时间;  $E_{UCNESS}$  为 UC 总容量;  $S_{OCUC.max}$  和  $S_{OCUC.min}$  为 UC 荷电状态 (state of charge, SOC) 的上下限, 分别取 20% 和 80%。

### 1.2 氢气储能模型

氢气储能主要包括电解槽 (electrolytic cell, EC)、燃料电池 (fuel cell, FC) 和储氢罐 3 部分。其中 EC 产氢速率、FC 耗氢速率、功率之间满足如下关系 [14]

$$\begin{cases} N_{H_2C} = \eta_{EC} \frac{P_{EC}(t)}{2FU_{EC}(t)} \\ N_{H_2D} = \frac{1}{\eta_{FC}} \frac{P_{FC}(t)}{2FU_{FC}(t)} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $N_{H_2C}(t)$ 、 $N_{H_2D}(t)$  表示  $t$  时间段内 EC 的产氢速率和 FC 的耗氢速率;  $\eta_{EC}$ 、 $\eta_{FC}$  为 EC 电解效率、FC 发电效率;  $P_{EC}(t)$ 、 $P_{FC}(t)$  为  $t$  时间段内 EC 和 FC 的接收功率;  $U_{EC}$ 、 $U_{FC}$  为 EC 和 FC 的额定电压;  $F$  为法拉第常数。

本文储氢罐中的剩余能量采用气体压强来描述, 由此可得剩余能量及其荷电状态, 计算公式为

$$\begin{cases} P_{H_2G}(t) = P_{H_2G}(t-1) + \Delta P_{H_2C}(t) + \Delta P_{H_2D}(t) \\ \Delta P_{H_2C}(t) = \frac{N_{H_2C}(t) \cdot \Delta t \cdot RT}{V} \\ \Delta P_{H_2D}(t) = \frac{N_{H_2D}(t) \cdot \Delta t \cdot RT}{V} \\ S_{OCH_2}(t) = \frac{P_{H_2G}(t)}{P_{H_2GNES}} \times 100\% \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $P_{H_2G}(t)$  表示  $t$  时间段末储氢罐的压强剩余量;  $\Delta P_{H_2C}(t)$ 、 $\Delta P_{H_2D}(t)$  为  $t$  时段内储氢罐充入氢气增加的压强和释放氢气减小的压强;  $\Delta t$  为系统的采样时间;  $V$  为储氢罐的体积;  $R$  为通用气体常数;  $T$  为气体温度;  $S_{OCH_2}(t)$  为  $t$  时刻末储氢罐的 SOC;  $P_{H_2GNES}$  为储氢罐能承受的最大压强。

考虑到氢气储能的安全和寿命问题, 需要保证氢气储能设备的 SOC 和充放电功率满足式 (4)

$$\begin{cases} S_{OCH_2.min} \leq S_{OCH_2}(t) \leq S_{OCH_2.max} \\ P_{C-min} \leq P_C(t) \leq P_{C-max} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $S_{OCH_2.max}$  和  $S_{OCH_2.min}$  分别为储氢罐 SOC 的上下限;  $P_{C-max}$  和  $P_{C-min}$  为电解槽和燃料电池充放电功率的上下限。为了便于区分, 本文用下标 E 表示 EC, 下标 F 表示 FC (如  $P_{EC-max}$  和  $P_{EC-min}$ )

表示 EC 的约束范围,  $P_{FC-max}$  和  $P_{FC-min}$  表示 FC 的约束范围)。

## 2 风电波动平抑控制策略

### 2.1 风储联合系统及风电波动平滑指标

#### 1) 风储联合系统。

为实现对风电波动的实时平抑, 将混合储能系统加装在风电场中构成的风储联合系统如图 1 所示。其中:  $P_W(t)$  为风电场输出功率;  $P_{UC}(t)$  为超级电容平抑功率;  $P_{EC}(t)$  和  $P_{FC}(t)$  为氢气储能平抑功率;  $P_h(t)$  为混合储能平抑功率;  $P_e(t)$  为风储联合后并入电网的功率。根据功率守恒原则可得风储联合系统的平衡方程如式 (5) 所示

$$\begin{cases} P_e(t) = P_W(t) - P_h(t) \\ P_h(t) = P_{UC}(t) + P_{EC}(t) + P_{FC}(t) \end{cases} \quad (5)$$

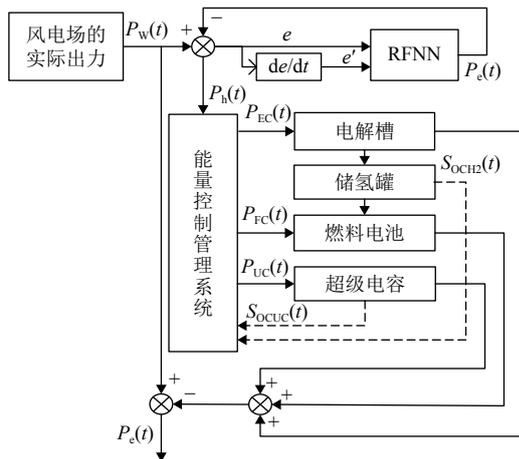


图 1 风储联合系统

Fig. 1 Integrated system of wind power and energy storage

#### 2) 风电波动平滑指标。

本文以国家 1 min/10 min 风电平滑并网标准为依据, 制定风电平滑指标。在  $t$  时刻, 风电并网的 1 min 或 10 min 波动量可通过式 (6) 进行计算。

$$\begin{cases} \Delta P_{e.xmin}^t = \max_{L \in [1, m]} P_e^{t-(L-1) \cdot \Delta t} - \min_{L \in [1, m]} P_e^{t-(L-1) \cdot \Delta t} \\ \gamma_{xmin} = \frac{\Delta P_{e.xmin}^t}{P_{w.rate}} \times 100\% \\ m = \frac{x \times 60}{\Delta t} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\Delta P_{e.xmin}^t$  为 1 min/10 min 分钟的功率波动;  $P_{w.rate}$  为风机容量;  $L$  表示不同时间尺度下的采样

点变量, 取值范围是 1 到  $m$ 。  $m$  的取值由系统采样时间  $\Delta t$  决定, 如果  $\Delta t=10$  s, 对于 1 min 的风功率波动量 ( $\gamma_{1 \min}$ ) 来说,  $m=6$ ; 对于 10 min 风功率波动量 ( $\gamma_{10 \min}$ ) 来说,  $m=60$ 。按照《风电场接入电力系统技术规定》中的风电并网要求,  $\gamma_{1 \min} \leq 10\%$ ,  $\gamma_{10 \min} \leq 30\%$ 。

### 2.2 平滑方法的对比指标

本文从混合储能系统总容量、混合储能系统功率容量和平滑率的标准差 3 个方面对平滑方法进行对比。计算方法如下:

#### 1) 混合储能系统总容量。

$$E_{HESS} = \max \left\{ \sum_{i=a}^{a+N} (|P_W(t_i) - P_e(t_i)|) \Delta t \right\} \quad (7)$$

$$P_W > P_e \quad \text{or} \quad P_W < P_e$$

式中:  $a$  和  $a+N$  是连续充电或放电的开始和停止时间;  $\Delta t$  是采样间隔。当  $P_W > P_e$  变为  $P_W < P_e$  时, 开始时间  $a$  确定,  $N$  重置为零。然后, 每隔 10 s 对  $N$  进行计数, 直到再次达到  $P_W > P_e$  时停止。

#### 2) 混合储能系统功率容量。

$$P_{HESS} = \max \{|P_W(t) - P_e(t)|\} \quad (8)$$

#### 3) 平滑率的标准差。

$$\sqrt{\sum_{i=1}^h (P_W(t_i) - P_e(t_i))^2 / h} \quad (9)$$

式中:  $h$  为 24 h 的采样总次数。

## 3 RFNN 功率平滑控制

由于 RFNN 具有很好的逼近性和在线训练能力, 使用 RFNN 对原始风电数据进行平滑, 可以获得时延非常有限的平滑功率, 进而减小储能容量。

RFNN 设计的核心是在模糊神经网络规则层中加入递归环节。其作用是及时动态地反馈相关信息并加以保存, 形成有效覆盖网络的递归单元结构。由此可知 RFNN 输出由 RFNN 现在及以往输入值和以往输出值共同决定。因此 RFNN 可以用于处理不精确和不确定性的问题, 且具有良好的鲁棒特性<sup>[15]</sup>。RFNN 的基本思想是将复杂的全局非线性问题通过 IF-THEN 规则转化成简单的局部线性问题, 再利用李雅普诺夫稳定性理论, 得到系统最终的输出结果<sup>[16]</sup>。下面将具体介绍 RFNN 网络。

### 3.1 RFNN

本文中 RFNN 的作用是对原始风电数据进行平滑。RFNN 的结构见图 2<sup>[17]</sup>。由图可知它有 4 层结构，分别为输入层 (*i*)、隶属度层 (*j*)、规则层 (*k*)、输出层 (*o*)。各层网络的输入输出关系如下<sup>[17]</sup>。

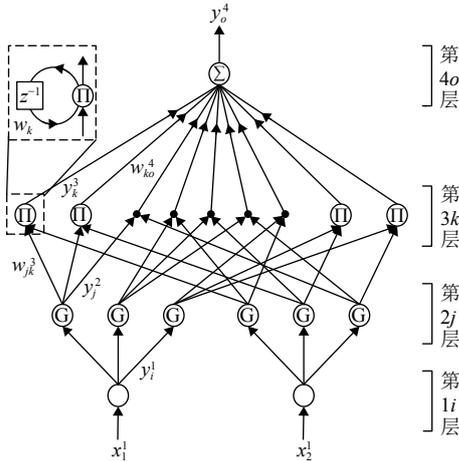


图 2 递归模糊神经网络结构

Fig. 2 Structural diagram of recursive fuzzy neural network

1) 输入层 (*i*)，层中各节点 *i* 的输入和输出关系可以表示为

$$\begin{cases} net_i^1(N) = x_i^1 \\ y_i^1 = f_i^1(net_i^1(N)) = net_i^1(N) \end{cases} \quad i = 1, 2 \quad (10)$$

式中： $x_i^1$ 、 $y_i^1$  为输入层的第 *i* 个输入和输出 (下同)；*N* 为迭代次数。本文中  $x_1^1=e(t)$ ； $x_2^1=e'(t)$ 。 $e(t)$  与  $e'(t)$  为 *t* 时间段内风电原始出力与平滑输出功率的误差及其导数。

2) 隶属度层 (*j*)，层中每个节点 *j* 表示一个隶属函数，本文选取高斯函数作为隶属函数。对于第 *j* 个节点的输入和输出关系可以表示为

$$\begin{cases} net_j^2(N) = -\frac{(x_i^1 - m_{ij})^2}{(\sigma_{ij})^2} \\ y_j^2 = f_j^2(net_j^2(N)) = \exp(net_j^2(N)) \\ i = 1, j = 1, 2, 3; i = 2, j = 4, 5, 6 \end{cases} \quad (11)$$

式中： $m_{ij}$ 、 $\sigma_{ij}$  为输入层第 *i* 个输出与隶属度层第 *j* 个输入之间的高斯函数的均值和标准差。

3) 规则层 (*k*)，层中各节点 *k* 用  $\Pi$  表示，意思是将输入信号相乘。对于第 *k* 个节点的输入和输出可以表示为

$$\begin{cases} net_k^3(N) = \prod_j w_{jk}^3 x_j^3(N) w_k y_k^3(N-1) \\ y_k^3 = f_k^3(net_k^3(N)) = net_k^3(N), k = 1, 2, \dots, 9 \end{cases} \quad (12)$$

式中： $w_{jk}^3$  是隶属度层与规则层之间的连接权值； $w_k$  为规则层的递归权值；本文中令所有的  $w_{jk}^3=1$  且采用完全连接时的规则数 (即  $k=9$ )。

4) 输出层 (*o*)，该层用  $\Sigma$  表示，意思是将所有的输入信号进行求和。该层的输入和输出关系为

$$\begin{cases} net_o^4(N) = \sum_k w_{ko}^4 x_k^4(N) \\ y_o^4 = f_o^4(net_o^4(N)) = net_o^4(N) \end{cases} \quad o = 1 \quad (13)$$

式中： $w_{ko}^4$  为规则层与输出层的连接权值； $x_k^4$  由所选隶属函数的大小决定且  $0 \leq x_k^4 \leq 1$ ； $y_o^4$  为 RFNN 的输出 (即目标并网功率  $P_e$ )。

### 3.2 在线学习算法及参数的调整

为了提高 RFNN 的在线学习能力，本文采用梯度下降法对 RFNN 的连接权值、递归权值和隶属度函数进行在线调整。首先，定义误差函数为

$$E(N) = \frac{1}{2} (y^*(N) - y(N))^2 = \frac{1}{2} e^2 \quad (14)$$

式中： $y^*(N)$  为期望输出； $y(N)$  为实际输出； $e$  为  $y^*(N)-y(N)$  的差值。本文中  $y^*(N)=P_w(t)$ ， $y(N)=P_e(t)$  详细的算法学习过程如下。

1) 输出层 (*o*)，误差信号和权值修正为

$$\begin{cases} \delta_o^4 = -\frac{\partial E}{\partial net_o^4} = -\frac{\partial E}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial y_o^4} \frac{\partial y_o^4}{\partial net_o^4} = e \\ \Delta w_{ko}^4 = -\frac{\partial E}{\partial w_{ko}^4} = -\frac{\partial E}{\partial y_o^4} \frac{\partial y_o^4}{\partial net_o^4} \frac{\partial net_o^4}{\partial w_{ko}^4} = \delta_o^4 x_k^4 \end{cases} \quad (15)$$

式中： $\delta_o^4$  为第 4 层误差信号； $\Delta w_{ko}^4$  为第 4 层权值修正 (下同)。

2) 规则层 (*k*)，误差信号和自反馈连接权值修正为

$$\begin{cases} \delta_k^3 = -\frac{\partial E}{\partial net_k^3} = -\frac{\partial E}{\partial y_o^4} \frac{\partial y_o^4}{\partial net_o^4} \frac{\partial net_o^4}{\partial y_k^3} \frac{\partial y_k^3}{\partial net_k^3} = \delta_o^4 w_{ko}^4 \\ \Delta w_k = -\frac{\partial E}{\partial w_k} = -\frac{\partial E}{\partial y_o^4} \frac{\partial y_o^4}{\partial net_o^4} \frac{\partial net_o^4}{\partial y_k^3} \frac{\partial y_k^3}{\partial net_k^3} \frac{\partial net_k^3}{\partial w_k} = \prod_j \delta_k^3 w_{jk}^3 x_j^3(N) y_k^3(N-1) \end{cases} \quad (16)$$

3) 隶属度层 (*j*)，误差信号和权值修正为

$$\left\{ \begin{aligned} \delta_j^2 &= -\frac{\partial E}{\partial net_j^2} = -\frac{\partial E}{\partial y_o^4} \frac{\partial y_o^4}{\partial net_o^4} \frac{\partial net_o^4}{\partial y_k^3} \frac{\partial y_k^3}{\partial net_k^3} \frac{\partial net_k^3}{\partial y_j^2} \\ \frac{\partial y_j^2}{\partial net_j^2} &= \sum_k \delta_k^3 y_k^3(N) \\ \Delta m_{ij} &= -\frac{\partial E}{\partial m_{ij}} = -\frac{\partial E}{\partial y_o^4} \frac{\partial y_o^4}{\partial net_o^4} \frac{\partial net_o^4}{\partial y_k^3} \frac{\partial y_k^3}{\partial net_k^3} \frac{\partial net_k^3}{\partial y_j^2} \frac{\partial y_j^2}{\partial net_j^2} \\ \frac{\partial net_j^2}{\partial m_{ij}} &= \delta_j^2 \frac{2(x_i^2 - m_{ij})}{(\sigma_{ij})^2} \\ \Delta \sigma_{ij} &= -\frac{\partial E}{\partial \sigma_{ij}} = -\frac{\partial E}{\partial y_o^4} \frac{\partial y_o^4}{\partial net_o^4} \frac{\partial net_o^4}{\partial y_k^3} \frac{\partial y_k^3}{\partial net_k^3} \frac{\partial net_k^3}{\partial y_j^2} \frac{\partial y_j^2}{\partial net_j^2} \\ \frac{\partial net_j^2}{\partial \sigma_{ij}} &= \delta_j^2 \frac{2(x_i^2 - m_{ij})^2}{(\sigma_{ij})^3} \end{aligned} \right. \quad (17)$$

则输出层连接权值、规则层连接权值、隶属度层的均值和标准差的更新规则如式(18)

$$\left\{ \begin{aligned} w_{ko}^4(N+1) &= w_{ko}^4(N) + \Delta w_{ko}^4 \\ w_k(N+1) &= w_k(N) + \Delta w_k \\ m_{ij}(N+1) &= m_{ij}(N) + \Delta m_{ij} \\ \sigma_{ij}(N+1) &= \sigma_{ij}(N) + \Delta \sigma_{ij} \end{aligned} \right. \quad (18)$$

### 4 混合储能电站的功率分配

根据各储能元件的自身优势,首先采用超级电容对风电波动进行平抑,但由于超级电容容量较小,易出现过充过放的现象,进而采用氢气储能辅助超级电容,当超级电容过充过放出现时,氢气储能系统启动或加大平抑力度,使超级电容回到正常状态。为保证储能系统满足下一时刻风

电出力需求,设UC的SOC上限、中间值、下限分别为20%、50%、80%。根据此范围本文设计了混合储能系统的12种运行模式,见图3。

1) 蓄能状态下 ( $P_h \geq 0$ , FC处于停机状态)。

模式1: 当系统满足  $P_h < P_{EC-min}$ 、 $S_{OC} < S_{OC-max}$  时, EC 停止运行, UC 充电, 吸收系统剩余功率为  $P_{UC} = P_h$ 。在 UC 充电期间, 当  $S_{OC}$  升高到  $S_{OC-max}$  时, 系统由模式1转换为模式2。

模式2: 当系统满足  $P_h < P_{EC-min}$ 、 $S_{OC} \geq S_{OC-max}$  时, EC 保持最小出力, 吸收的功率为  $P_{EC} = P_{EC-min}$ ; UC 放电, 补偿系统功率缺额为  $P_{UC} = P_{EC-min} - P_h$ 。在 UC 放电期间, 当  $S_{OC}$  降低到  $S_{OC-min}$  时, 系统由模式2转换为模式1。

模式3: 当系统满足  $P_{EC-min} \leq P_h \leq P_{EC-max}$ 、 $S_{OC} < 50\%$  时, EC 保持最小出力, 吸收的功率为  $P_{EC} = P_{EC-min}$ ; UC 充电, 吸收系统剩余功率为  $P_{UC} = P_h - P_{EC-min}$ 。

模式4: 当系统满足  $P_{EC-min} \leq P_h \leq P_{EC-max}$ 、 $S_{OC} \geq 50\%$  时, EC 消纳系统剩余功率为  $P_{EC} = P_h$ ; UC 停止运行。

模式5: 当系统满足  $P_h > P_{EC-max}$ 、 $S_{OC} < S_{OC-max}$  时, EC 在额定状态运行, 吸收的功率为  $P_{EC} = P_{EC-max}$ ; UC 充电, 吸收系统剩余功率为  $P_{UC} = P_h - P_{EC-max}$ 。

模式6: 当系统满足  $P_h > P_{EC-max}$ 、 $S_{OC} \geq S_{OC-max}$  时, EC 在额定状态运行, 吸收的功率为  $P_{EC} = P_{EC-max}$ ; UC 停止运行。

2) 释能状态下 ( $P_h < 0$ , EC处于停机状态)。

模式7: 当系统满足  $|P_h| < P_{FC-min}$ 、 $S_{OC} < S_{OC-min}$  时, FC 保持最小出力, 即  $P_{FC} = P_{FC-min}$ ; UC 充电,

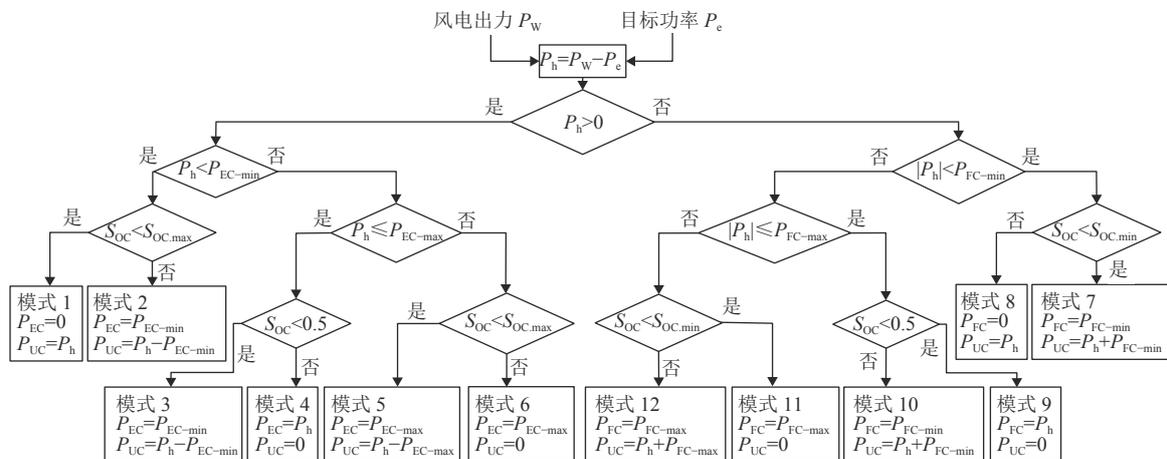


图3 混合储能系统的运行模式

Fig. 3 Operation mode of hybrid energy storage system

吸收系统剩余功率为  $P_{UC}=P_h+P_{FC-min}$ 。在 UC 充电期间，当  $S_{OC}$  升高到  $S_{OC-max}$  时，系统由模式 7 转换为模式 8。

模式 8：当系统满足  $|P_h|<P_{FC-min}$ 、 $S_{OC}\geq S_{OC-min}$  时，FC 停止运行；UC 放电，补偿系统功率缺额为  $P_{UC}=|P_h|$ 。在 UC 放电期间，当  $S_{OC}$  降低到  $S_{OC-min}$  时，系统由模式 8 转换为模式 7。

模式 9：当系统满足  $P_{FC-min}\leq|P_h|\leq P_{FC-max}$ 、 $S_{OC}<50\%$  时，FC 补偿系统的功率缺额为  $P_{FC}=|P_h|$ ；UC 停止运行。

模式 10：当系统满足  $P_{FC-min}\leq|P_h|\leq P_{FC-max}$ 、 $S_{OC}\geq 50\%$  时，FC 保持最小出力，即  $P_{FC}=P_{FC-min}$ ；UC 放电，补偿系统功率缺额为  $P_{UC}=P_{FC-min}-P_h$ 。

模式 11：当系统满足  $|P_h|>P_{FC-max}$ 、 $S_{OC}<S_{OC-min}$  时，FC 在额定状态运行，即  $P_{FC}=P_{FC-max}$ ；UC 停止运行。

模式 12：当系统满足  $|P_h|>P_{FC-max}$ 、 $S_{OC}\geq S_{OC-min}$  时，FC 在额定状态运行，即  $P_{FC}=P_{FC-max}$ ；UC 放电，补偿系统功率缺额为  $P_{UC}=|P_h|-P_{FC-max}$ 。

### 5 算例验证

以新疆某地区风电历史数据为例，风机容量为 2.6 MW，风电系统的采样时间是 10 s。超级电容充电和放电效率均为 95%，荷电状态初始值为 50%。电解槽电解效率为 80%，燃料电池放电效率为 80%，储氢罐初始荷电状态为 50%，体积是 27 m<sup>3</sup>。RFNN 的初始均值为 -1、0、1；标准差为 1；递归权值为 1；第 4 层连接权重为 300；其余权值为 0。风电场的历史出力曲线如图 4。

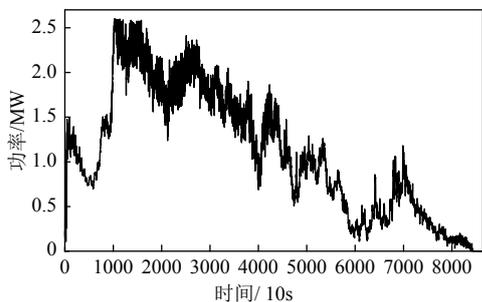


图 4 风电场输出功率

Fig. 4 Output power of wind farm

#### 5.1 控制策略的对比

由一阶低通滤波和 RFNN2 种不同平滑方法获得的风电并网期望功率如图 5。采用 2.2 节的公式 (7)、(8)、(9) 对 2 种方法作比较可得表 1。

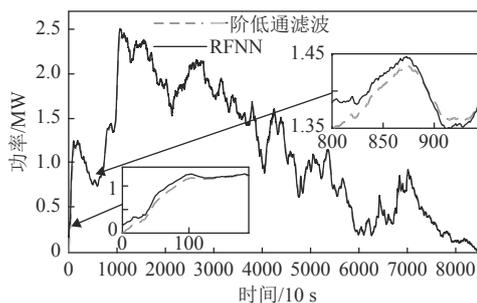


图 5 不同平滑方法的风电并网期望功率对比

Fig. 5 Comparison of expected grid-connected wind power adopting different smoothing methods

表 1 控制策略对比

Table 1 Comparison of control strategies

方法	储能容量/ kW·h	功率容量/ kW	标准差/ kW	1 min最大 波动/%	10 min最大 波动/%
低通滤波	88.57	925.1	116.9	5.00	29.27
RFNN	66.80	815.8	107.6	5.70	28.23

根据风电实时控制中平滑后的时间延时与储能容量成正比的关系 [18]。由表 1 可得，低通滤波平滑需要的储能和功率容量相比 RFNN 要大。由此可知 RFNN 平滑的延迟时间要小于低通滤波平滑。

#### 5.2 混合储能各储能容量的确定

由于超级电容和氢气储能的额定功率和容量受成本及平抑效果的限制，因此期望在相同平抑效果的基础上选取相对较小的储能额定功率和容量。按第 4 节提出的控制策略。氢气储能的额定功率在 0~900 kW 等量递增，且氢气储能的最小功率为额定功率的 10%；超级电容容量在 0~25 kW·h 等量递增。由仿真可得，不同储能功率与容量下的实际并网功率最大波动量如图 6 和图 7。由图可知，当储氢系统额定功率为 600 kW、超级电容最大容量为 15 kW·h 时，1 min 和 10 min 的最大并网波动已经满足国家要求，继续增加储能额定功率及容量时 2 者将不再减小，因此本文选取的超级电容额定功率、容量为 300 kW 和 15 kW·h，氢气储能的额定功率、最大压强分别为 600 kW 和 40 kPa。

经仿真分析，RFNN 平滑后 1 min 和 10 min 风电输出的最大波动量分别为 5.70% 和 28.23%。平抑前后 1 min/10 min 风电波动量对比如图 8。

各储能装置的 SOC 变化情况如图 9。从图 9 可以看出，各储能装置之间存在能量互补的特性，当氢气储能的 SOC 状态降低时，超级电容会对氢

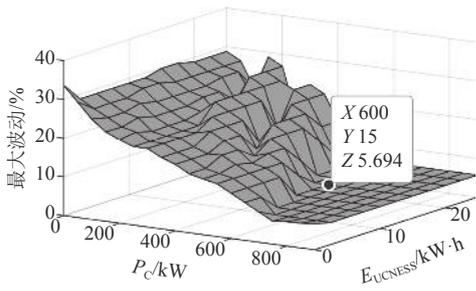


图6 1 min 风电最大波动量

Fig. 6 The maximum fluctuation of wind power within one minute

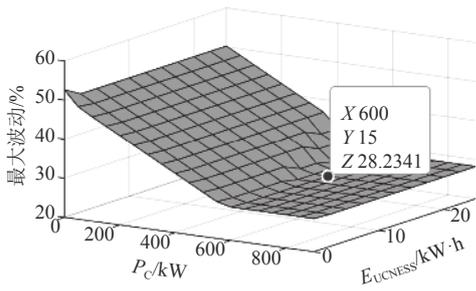
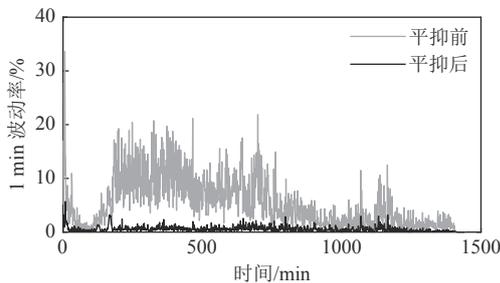
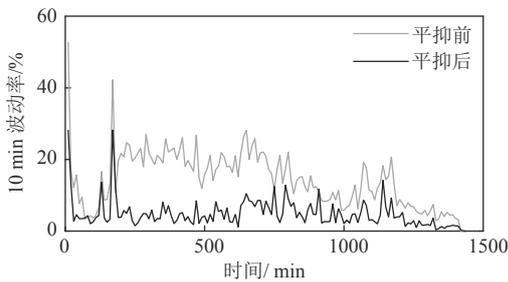


图7 10 min 风电最大波动量

Fig. 7 The maximum fluctuation of wind power within ten minute



(a) 平抑前后的 1 min 波动率



(b) 平抑前后的 10 min 波动率

图8 平抑前后风电功率波动对比

Fig. 8 Comparison of wind power fluctuation before and after leveling

气储能进行能量补充,反之亦然。另外,由于采样时间间隔的存在,可能会造成超级电容的SOC在个别时间段内超过设置的上下限。

两个储能装置的输出功率曲线如图10。由图

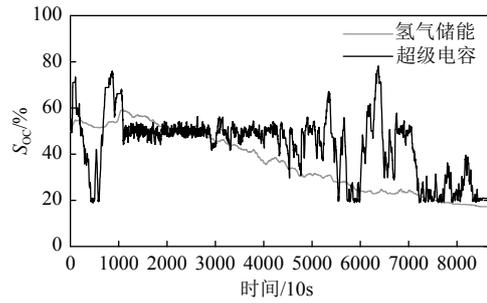


图9 不同储能设备SOC变化曲线

Fig. 9 Variation curve of SOC of different energy storage equipment

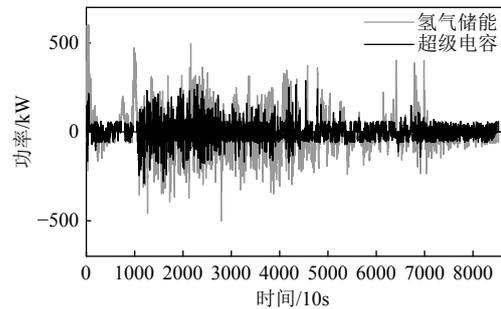


图10 各储能设备输出功率

Fig. 10 Output power of each energy storage device

可知每个储能装置都是根据自身的功能特点来存储能量的,而氢气储能吸收了大部分的剩余能量,符合能量型储能的特点。

## 6 结论

1) 采用 RFNN 对风电场有功功率进行平滑得到满足国家风电并网要求的目标功率。并与低通滤波平滑方法进行对比,验证了 RFNN 的时间延时要小于低通滤波。

2) 在基于规则控制的基础上,设计了一种功率分配策略。该策略可实现不同储能设备间的功率交换,提升系统响应时间,充分发挥各储能类型的优势。

3) 在 Matlab/Simulink 中建立风电混合储能系统数学模型,通过检测超级电容的 SOC,调整各储能设备之间的充放电功率大小,达到风电平滑并网的目的;通过仿真证明了该方法的正确性,对解决风电平滑并网具有一定的指导意义。

## 参考文献

[1] 江全元, 龚裕仲. 储能技术辅助风电并网控制的应用综述[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3360-3368.

- JIANG Quanyuan, GONG Yuzhong. Review of wind power integration control with energy storage technology[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(12): 3360–3368(in Chinese).
- [2] JIANG Q, WANG H. Two-time-scale coordination control for a battery energy storage system to mitigate wind power fluctuations[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2012, 28(1): 52–61.
- [3] LI X, HUI D, LAI X. Battery energy storage station (BESS)-based smoothing control of photovoltaic (PV) and wind power generation fluctuations[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2013, 4(2): 464–473.
- [4] ISLAM F, Al-Durra A, MUYEEN S M. Smoothing of wind farm output by prediction and supervisory-control-unit-based FESS[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2013, 4(4): 925–933.
- [5] CONTEH M A, NSOFOR E C. Composite flywheel material design for high-speed energy storage[J]. *Journal of Applied Research and Technology*, 2016, 14(3): 184–190.
- [6] 唐西胜, 武鑫, 齐智平. 超级电容器蓄电池混合储能独立光伏系统研究[J]. *太阳能学报*, 2007, 28(2): 178–183.  
TANG Xisheng, WU Xin, QI Zhiping. Study on a standalone PV system with battery / ultracapacitor hybrid energy storage[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2007, 28(2): 178–183(in Chinese).
- [7] CAO J, DU W, WANG H, *et al.* Optimal sizing and control strategies for hybrid storage system as limited by grid frequency deviations[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(5): 5486–5495.
- [8] 蔡国伟, 彭龙, 孔令国, 等. 光氢混合发电系统功率协调控制[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(1): 109–116.  
CAI Guowei, PENG Long, KONG Lingguo, *et al.* Power coordinated control of photovoltaic and hydrogen hybrid power generation system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(1): 109–116(in Chinese).
- [9] 焦东东, 陈洁, 方圆, 等. 基于变分模态分解下利用混合储能平滑风电出力波动的控制策略[J/OL]. *电测与仪表*: 1-7[2021-03-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200831.1702.027.html>.
- JIAO Dongdong, CHEN Jie, FANG Yuan, *et al.* Configuration of energy storage capacity for suppressing fluctuation of wind power[J/OL]. *Electrical Measurement&Instrumentation*: 1-7[2021-03-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200831.1702.027.html> (in Chinese).
- [10] CHONG L W, WONG Y W, RAJKUMAR R K, *et al.* Hybrid energy storage systems and control strategies for standalone renewable energy power systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 66: 174–189.
- [11] ZHANG L, HU X, WANG Z, *et al.* A review of super-capacitor modeling, estimation, and applications: A control/management perspective[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 1868–1878.
- [12] JANNATI M, HOSSEINIAN S H, VAHIDI B, *et al.* Mitigation of wind farm power fluctuation by adaptive linear neuron-based power tracking method with flexible learning rate[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2014, 8(6): 659–669.
- [13] LI X. Fuzzy adaptive Kalman filter for wind power output smoothing with battery energy storage system[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2012, 6(5): 340–347.
- [14] 王森, 蔺红. 基于变系数ES的混合储能平滑风电波动控制策略[J]. *太阳能学报*, 2019, 40(11): 3204–3212.  
WANG Sen, LIN Hong. Control strategy of hybrid energy storage to stabilize wind power fluctuation based on variable coefficient smoothing method[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2019, 40(11): 3204–3212(in Chinese).
- [15] 乔维德. 粒子群蛙跳模糊神经网络的PMSM转速控制器设计[J]. *微特电机*, 2019, 47(3): 66–69.  
QIAO Weide. Design for PMSM speed controller based on PSO-SFLA and FNN[J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2019, 47(3): 66–69(in Chinese).
- [16] 李晶, 赵轩. 基于递归神经网络的模糊控制算法研究[J]. *价值工程*, 2014, 33(21): 62–63.  
LI Jing, ZHAO Xuan. On fuzzy control algorithm based on recurrent neural network[J]. *Value Engineering*, 2014, 33(21): 62–63(in Chinese).
- [17] LIN F J, CHIANG H C, CHANG J K, *et al.* Intelligent wind power smoothing control with BESS[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2016, 11(2): 398–407.
- [18] 施啸寒, 赵雅文, 张恒旭, 等. 基于准零相位滤波器的电池储能系统平滑风电波动控制方法[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(4): 45–53.  
SHI Xiaohan, ZHAO Yawen, ZHANG Hengxu, *et al.* Control method of wind power fluctuation smoothing for battery energy storage based on Quasi-Zero phase filter[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(4): 45–53(in Chinese).

收稿日期: 2021-04-16

作者简介:

杨彦飞(1995), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为风电场储能技术, E-mail: 3264698057@qq.com;

陈洁(1975), 女, 教授, 主要研究方向为电能储存节电技术、电机及其系统, E-mail: xju\_cj@126.com;

廖跃洪(1996), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为风电场储能技术;

阿热帕提·艾尼瓦尔(1995), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为风电场储能技术。