

# 基于模糊神经网络风电混合储能系统优化控制

卢芸, 赵永来

(沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110780)

**摘要:** 采用风电储能系统来平抑风电波动功率在当今是一个有效的措施, 然而储能系统控制策略的好坏直接影响风电系统的技术性能和经济性能。根据超级电容器和蓄电池在功能上的互补性, 将其应用在基于双馈电机的风电场中, 风电场采用分布整流集中逆变拓扑控制结构, 并对其设计模糊神经网络PID控制器, 采用模糊神经网络算法对混合储能系统PID控制参数进行在线优化。基于Matlab/Simulink平台搭建控制系统仿真模型, 并进行仿真分析, 验证了混合储能系统能够提高储能装置的使用寿命。根据储能系统补偿功率和其荷电状态的波动范围, 以及对风电波动功率的平滑程度, 验证了该控制系统的有效性。  
**关键词:** 风力发电; 双馈电机; 混合储能; 模糊神经网络PID控制; 功率平滑

## Optimal control in a wind power hybrid energy storage system based on fuzzy neural network

LU Yun, ZHAO Yong-lai

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110780, China)

**Abstract:** The use of wind power energy storage system is an effective measure to stabilize fluctuations in wind power today, however, the energy storage system control strategy has a direct impact on the wind power system's technical and economic performance. Based on the complementary in function of super-capacitor and battery, its application in wind farms based DFIG and the topology control structures for wind farm with distributed rectifier and centralized inverter are adopted, fuzzy neural PID controller is designed, and fuzzy neural network algorithm is used to optimize PID control parameters for hybrid energy storage system on line. Based on MATLAB / SIMULINK platform, the control system simulation model is established and analyzed. Simulation results show that the hybrid energy storage system can improve the life of the energy storage device. According to the compensate power and the fluctuation range of the state of charge of the energy storage systems, as well as wind power fluctuations in the degree of smoothing, the effectiveness of the control system is verified.

**Key words:** wind power; doubly-fed machine; hybrid energy storage; fuzzy neural network PID control; smooth power

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)12-0113-06

## 0 引言

风速的变化使风机输出功率具有波动性, 严重影响风电并网的电能质量<sup>[1-2]</sup>。采用储能技术可以改善风力资源间歇性引起的负面影响<sup>[3]</sup>。将一定容量的储能装置应用到风电系统中, 能够平抑风电波动功率, 实现风力发电系统安全、稳定、优质运行<sup>[4-6]</sup>。然而储能系统控制策略的好坏直接影响储能系统的经济性能和技术性能。本文以超级电容器和蓄电池的双馈式风电储能系统为研究对象, 基于混合储能系统的电流变化率和其荷电状态, 设计一种模糊神

经网络自适应控制策略, 对混合储能装置的PID控制参数进行在线优化。经过仿真验证该控制策略能够实现平抑风电波动功率, 储能装置荷电状态转变适中, 从而有利于提高储能装置的使用寿命。

## 1 基于双馈电机的风电混合储能系统

### 1.1 单台双馈电机含混合储能系统的结构

基于双馈电机的风力发电混合储能系统的结构如图1所示。该系统结构使控制风电功率输入输出更具有灵活性。

### 1.2 风电场含混合储能系统的结构及控制策略

风电混合储能系统拓扑结构采用分布整流集中逆变的方式, 其控制框图如图2所示。采用直流母

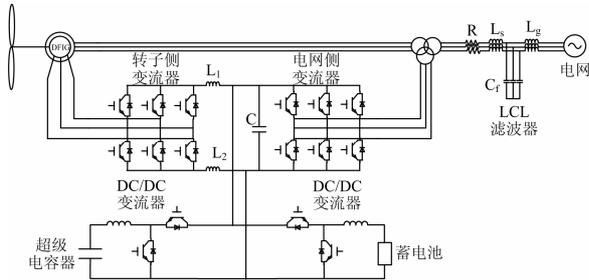


图 1 基于双馈电机的风电混合储能系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of wind power hybrid energy storage system based on a double-fed generator

线并联的结构不仅降低控制系统复杂性，并且可以有效降低风速波动对直流环节电压的影响，也改善了风电场的负载特性，可以将各种变流装置置于地面，便于日常维护。混合储能系统主要用于吸收和补偿风机输出的波动功率  $P_{fl}$  与并网目标参考功率  $P_g^*$  的差值  $P_H$ ，超级电容器功率调节迅速且适于频繁充放电，将其用于补偿  $P_H$  中的高频分量，蓄电池储能容量较大功率调节速度慢，将其用于补偿  $P_H$  中的低频分量。

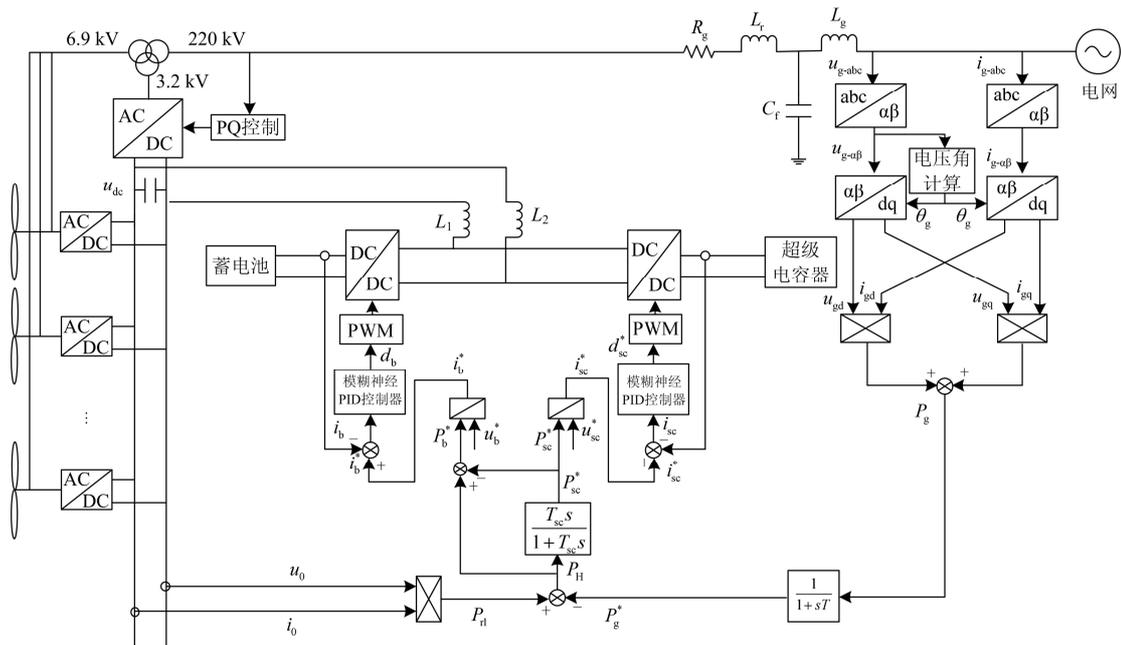


图 2 风电场储能系统控制框图

Fig. 2 Control block diagram of wind energy storage system

变流器直流侧串联电感  $L_1$ 、 $L_2$  用来滤除系统纹波。逆变器侧采用 LCL 滤波器，为抑制系统可能产生的谐振，采用滤波电容电流反馈的方法，其有源阻尼控制的 LCL 滤波器系统框图如图 3 所示。

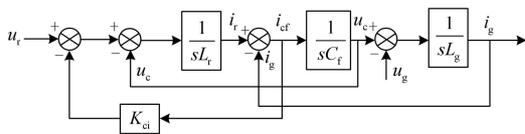


图 3 LCL 滤波器传递函数控制框图

Fig. 3 Control block diagram of transfer function for LCL filter

## 2 混合储能模糊神经 PID 控制器的设计

模糊神经 PID 控制器是由改进粒子群算法、模糊神经网络、PID 控制器和被控对象所构成的。其

结构如图 4 所示。

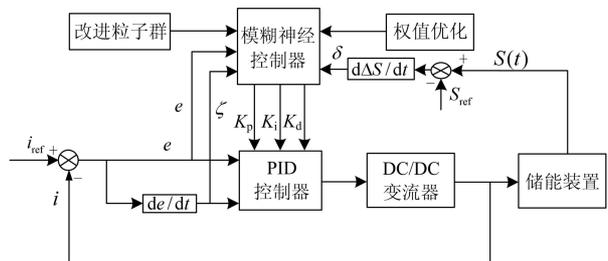


图 4 模糊神经 PID 控制器

Fig. 4 Fuzzy neural PID controller

### 2.1 模糊神经网络系统基本原理

图 5 为模糊神经网络控制器的结构图，其采用五层基于 Mamdani 模型<sup>[7-13]</sup>。

第一层主要有三个输入量，分别为电流误差  $e$ ，

误差变化率  $\zeta$  和储能装置荷电状态变化率  $\delta$ 。第二层对输入量进行模糊化, 其中每个节点代表一个模糊语言值, 第三层每个节点代表一个模糊规则, 第四层主要是进行归一化计算, 第五层输出量分别为 PID 的三个参数  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$ 。它主要是对系统进行反模糊化计算。

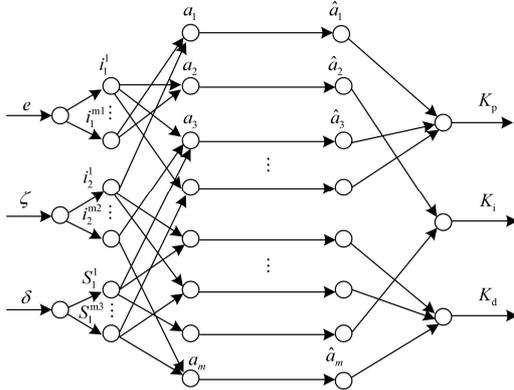


图5 模糊神经网络控制器结构图

Fig. 5 Structure of fuzzy neural network controller

## 2.2 模糊神经网络控制算法

### 2.2.1 系统输入模糊化

荷电状态与储能电流关系如式 (1) 所示。

$$S = \lambda \left( C_1 + \int_0^{t_{ch}} \eta_{ch} i_{ch} dt - \int_0^{t_{dis}} \frac{1}{\eta_{dis}} i_{dis} dt \right) \frac{1}{C} \quad (1)$$

式中:  $S$  为储能设备额定荷电状态;  $C_1$  为储能设备初始荷电量;  $C$  为储能设备额定荷电容量;  $\eta_{ch}$ 、 $i_{ch}$  分别为储能设备充电效率和电流;  $\eta_{dis}$ 、 $i_{dis}$  分别为储能设备放电效率和电流;  $t_{ch}$ 、 $t_{dis}$  分别为充放电时间;  $\lambda$  为储能设备荷电状态限制系数 ( $0 < \lambda < 1$ )。

采用电流变化差值和其变化率作为系统第一个和第二个输入。采用储能设备电流的第  $t$  时刻荷电状态与其初始荷电状态的差值与荷电状态参考值的比值作为第三个输入。超级电容器或蓄电池两输入值  $\delta_{s-x}$  与  $\zeta_{i_x^*}$  的表达式如式 (2) 所示。

$$\begin{aligned} e_x &= i_x - i_{x-ref} \\ \zeta_{i_x^*} &= \frac{de_x}{dt} \\ \delta_{s-x} &= (S_x(t) - S_{x-in}) / S_{x-ref} \end{aligned} \quad (2)$$

其中:  $S_x(t)$  为超级电容器或蓄电池  $t$  时刻荷电状态;  $S_{x-in}$  为超级电容器或蓄电池初始荷电状态;  $S_{x-ref}$  为超级电容器或蓄电池荷电状态参考值。

依据超级电容器和蓄电池组成混合储能设备的特点, 设计模糊控制规则如下:

(1) 当储能设备荷电状态处于中间值时, 则按照功率参考值进行补偿; (2) 当储能设备荷电状态较小时, 如此时功率参考值仍未放电, 则适当调小功率输出值, 以避免荷电状态枯竭; (3) 当储能设备荷电状态较高时, 如此时功率参考值仍未充电, 则适当调小充电功率, 以避免荷电状态饱和。

### 2.2.2 隶属函数优化

模糊神经网络控制器输入隶属函数的中心值和宽度属于全局性的参数, 为提高系统运行速度, 需要对输入隶属函数进行迭代优化。标准粒子群优化算法的粒子位置更新如式 (3) 所示。

$$\begin{cases} V_{ij}^{k+1} = V_{ij}^k + c_1 r_1 (P_{ij}^k - X_{ij}^k) + c_2 r_2 (P_{gj}^k - X_{gj}^k) \\ X_{ij}^k = V_{ij}^k + V_{ij}^{k+1} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $j=1, 2, \dots, n$ ;  $i=1, 2, \dots, m$ ;  $k$  为当前迭代次数;  $V_{ij}$  为第  $i$  个粒子的速度;  $X_{ij}$  为第  $i$  个粒子的位置;  $c_1$  和  $c_2$  为学习因子;  $r_1$  和  $r_2$  为  $[0, 1]$  之间的随机数。

标准的粒子群算法的粒子在演化过程中对目标搜索能力逐渐减弱。因此在标准粒子群算法中引入收敛因子  $\xi$ , 通过大量的实验证明了此算法具有更好的收敛性。其速度更新式如式 (4) 所示。

$$V_{ij}^{k+1} = \xi (V_{ij}^k + c_1 r_1 (P_{ij}^k - X_{ij}^k) + c_2 r_2 (P_{gj}^k - X_{gj}^k)) \quad (4)$$

$$\xi = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|} > 4, \quad \varphi = c_1 + c_2$$

### 2.2.3 权值优化

模糊神经网络控制器的权值部分大部分存在局域性, 因此神经网络在线调整需要耗费较长时间。其具体优化过程如式 (5) 所示。

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (r_i - y_i)^2 \\ \Delta w_{ji}(k) &= \varepsilon \frac{\partial E}{\partial w_{ji}} = \varepsilon (r_i - y_i) \frac{\partial y_i}{\partial \Delta d} \frac{\partial \Delta d}{\partial f_i^{(5)}} \frac{\partial f_i^{(5)}}{\partial w_{ji}} = \\ &= \varepsilon (r_i - y_i) \frac{\partial y_i}{\partial \Delta d} \cdot a(j) f_i^{(4)} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial y_i}{\partial \Delta d} = \begin{cases} 1 & z \geq 0 \\ -1 & z < 0 \end{cases}$$

$$\text{其中, } z = \frac{y_i(k) - y_i(k-1)}{\Delta d(k) - \Delta d(k-1)}$$

改进后权值更新式如式 (5)。

$$w_{ji}(k) = w_{ji}(k-1) + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial w_{ji}} + \beta (w_{ji}(k-1) - w_{ji}(k-2)) \quad (5)$$

其中:  $\varepsilon$  为训练速率;  $\beta$  为动量因子。

为防止神经网络对于高维数样本有较长的训练

时间或陷入局部极小值，对训练速率和动量因子进行优化改进，调整式如式(6)、式(7)所示。

$$\varepsilon^{(t+1)} = \begin{cases} 1.25\varepsilon^{(t)} & e_{s,(t)} < e_{s,(t-1)} \\ 0.89\varepsilon^{(t)} & e_{s,(t)} > e_{s,(t-1)} \\ \varepsilon^{(t)} & e_{s,(t)} = e_{s,(t-1)} \end{cases} \quad (6)$$

$$c = \begin{cases} 0 & e_{s,(t)} > e_{s,(t-1)} \\ 0.98 & e_{s,(t)} < e_{s,(t-1)} \\ c & e_{s,(t)} = e_{s,(t-1)} \end{cases} \quad (7)$$

式中： $e_{s,(t)}$ 为神经网络在  $t$  时刻输出误差和； $\varepsilon^{(t)}$  为  $t$  时刻的学习速率。

### 3 模糊神经 PID 控制器验证

通过模糊神经网络改进前后的训练比较，由图 6 可知改进后的控制运算效果要明显优于改进前的，改进后算法迭代次数明显减少，运行时间较短，误差和接近目标值 0.001 1。图 7 为模糊神经 PID 控制系统阶跃响应对比曲线，在 0.25~0.27 s 时刻施加扰动信号，可知采用模糊神经控制方式具有较小的超调量，并且动态响应恢复较快，具有较强的抗干扰能力。

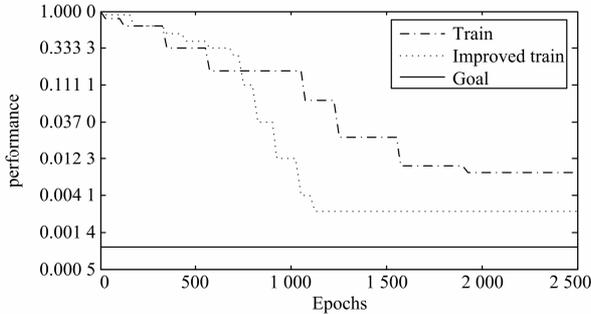


图 6 模糊神经网络优化前后训练比较

Fig. 6 Training comparison of fuzzy neural network before/after optimization

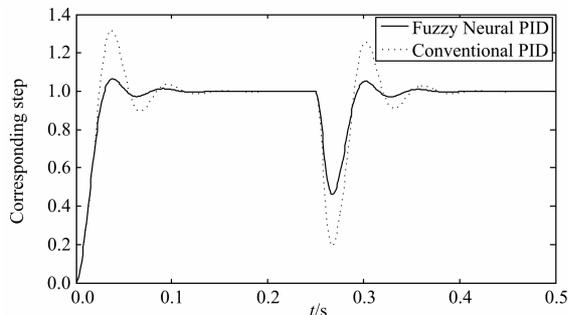


图 7 控制系统含扰动信号阶跃响应对比曲线

Fig. 7 Contrast curve of control system with disturbance signal step response

### 4 参数设定及系统仿真

在 Matlab/Simulink 平台根据图 2 拓扑结构搭建含有混合系统风电场仿真模型，并对其进行仿真验证。该风电场仿真模型由 10 台额定功率为 2 MW 的双馈风机组成。具体参数设置如下：风电场发电指令目标设为 10 MW；仿真时间设定为 3 000 s；双馈机频率为 50 Hz，定子侧额定电压为 690 V，额定转子电压为 320 V； $T$  值为 3 500， $T_{sc}$  值为 15；蓄电池额定容量为 5.04 MWh，荷电状态  $S$  取值范围为 10%~90%，初始荷电状态  $S$  取值为 60%，蓄电池充电效率  $\eta_{b-ch}$ =75%，放电效率  $\eta_{b-dis}$ = 85%；超级电容器额定容量为 0.82 MWh，荷电状态取值范围为 2%~99%，荷电状态  $S$  初值取为 60%，超级电容器充电效率  $\eta_{sc-ch}$  和放电效率  $\eta_{sc-dis}$  均为 95%；变流器的直流侧额定电压值为 3 200 V，开关管器件 IGBT 频率均设为 5 kHz；混合储能装置的双向 DC/DC 变换器的升压电感均为 0.09 mH，双馈电机变流器的直流侧电容为 25 mF，并网滤波电感为  $L_g$ =1.8 mH，等效电阻  $R_g$ =0.04  $\Omega$ 。

图 8 验证了混合储能系统有较好的平抑风电波动功率的效果。图 9 为超级电容器蓄电池补偿的有功功率。可以看到超级电容补偿了风电波动功率中高频部分，而蓄电池则补偿了低频部分，蓄电池充

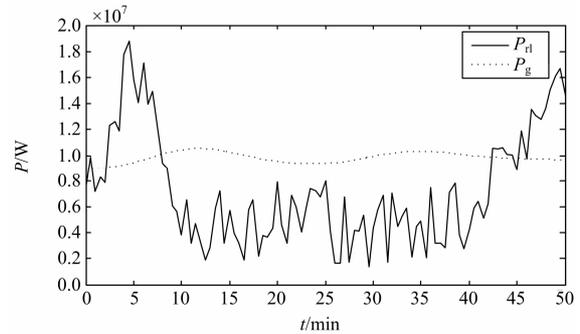


图 8 风电机组输出功率  $P_t$  和风电并网功率  $P_g$

Fig. 8 Wind turbine output power  $P_t$  and grid power  $P_g$

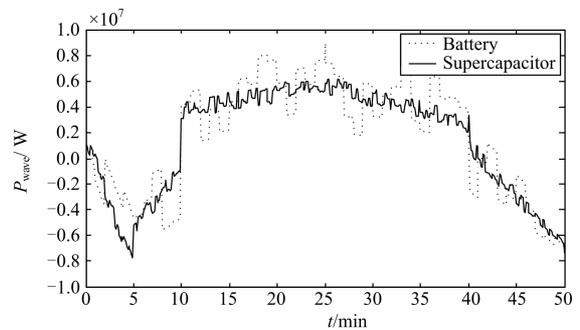


图 9 超级电容器和蓄电池的功率波动

Fig. 9 Power fluctuation of super-capacitors and battery

放电次数明显减少,从而延长了蓄电池的使用寿命。图 10 为超级电容器和蓄电池的荷电状态,其波动范围均在可控范围内。

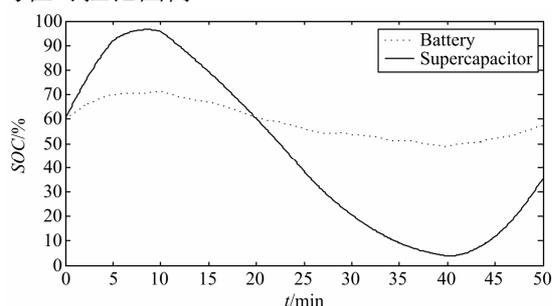


图 10 超级电容器和蓄电池的荷电状态

Fig. 10 State of charge for super-capacitor and battery

## 5 结语

本文将蓄电池和超级电容器协调配合应用到基于双馈电机的风电场发电系统中。采用模糊神经网络算法对混合储能系统 PID 参数进行在线优化,并对模糊神经网络控制算法进行改进,经过仿真验证,该控制方式不仅提高了储能装置的使用寿命,而且更好地实现了平抑风电波动功率,从而验证了该控制策略的高效性。

## 参考文献

- [1] 熊传平, 张晓华. 考虑大规模风电接入的系统静态电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 133-137.  
XIONG Chuan-ping, ZHANG Xiao-hua. Analysis on static voltage stability of system with large-scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 133-137.
- [2] 高文祥, 王明渝. 光伏微型逆变器研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 148-155.  
GAO Wen-xiang, WANG Ming-yu. Review of research on photovoltaic micro-inverter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 148-155.
- [3] 丁明, 徐宁舟, 林根德. 电池储能电站静态功能的研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 242-248.  
DING Ming, XU Ning-zhou, LIN Gen-de. Static function of the battery energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 242-248.
- [4] 尚志娟, 周晖, 王天华. 带有储能装置的风电与水电互补系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 99-105.  
SHANG Zhi-juan, ZHOU Hui, WANG Tian-hua. Research of complementary system for wind power with energy storage devices and hydro power[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 99-105.
- [5] 于芑, 赵瑜, 周玮, 等. 基于混合储能系统的平抑风电波动功率方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 35-40.  
YU Peng, ZHAO Yu, ZHOU Wei, et al. Research on the method based on hybrid energy storage system for balancing fluctuant wind power[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 35-40.
- [6] 刘其辉, 谢孟丽. 双馈式变速恒频风力发电机的空载及负载并网策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 60-78.  
LIU Qi-hui, XIE Meng-li. Strategies of grid-connection of doubly-fed variable-speed constant-frequency wind power generator with no-load and with load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 60-78.
- [7] 刘世林, 孙海顺, 顾明磊. 一种新型风力发电机与飞轮储能联合系统的并网运行控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 248-254.  
LIU Shi-lin, SUN Hai-shun, GU Ming-lei. A new wind turbine combined with fly wheel energy storage systems and network operation control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 248-254.
- [8] DICORATO M, FORTE G, PISANI M, et al. Planning and operating combined wind-storage system in electricity market[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2012, 3(2): 209-217.
- [9] 吴晋波, 文劲宇, 孙海顺, 等. 基于储能技术的交流互联电网稳定控制方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 261-267.  
WU Jin-bo, WEN Jin-yu, SUN Hai-shun, et al. Study of

- control method for improving AC inter connected grid stability based energy storage technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 261-267.
- [10] 武小梅, 白银明, 文福拴. 基于 RBF 神经网络的风电功率短期预测[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 80-83.
- WU Xiao-mei, BAI Yin-ming, WEN Fu-shuan. Short-term wind power forecast based on the radial basis function neural network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 80-83.
- [11] 李爽, 王志新, 王国强. 基于改进粒子群算法的 PIDNN 控制器在 VSC-HVDC 中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 15-21.
- LI Shuang, WANG Zhi-xin, WANG Guo-qiang. Application of an improved PSO-based PID neural network controller for VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 15-21.
- [12] 董海鹰, 魏占宏, 杨玺, 等. 基于自适应模糊神经网络的风速软测量[J]. 电力系统自动化学报, 2013, 25(1): 61-65.
- DONG Hai-ying, WEI Zhan-hong, YANG Xi, et al. Wind speed soft sensor based on adaptive fuzzy neural network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(1): 61-65.
- [13] CHOI M E, KIM S W, SEO S W. Energy management optimization in a battery/supercapacitor hybrid energy storage system[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2011, 3(1): 463-472.

---

收稿日期: 2013-08-31; 修回日期: 2013-10-22

作者简介:

卢芸 (1963-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统运行、优化与控制; E-mail: zxncg@163.com

赵永来 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行、优化与控制。