

# 基于GrHDP模糊PI的风电电力系统频率控制

风电场接入系统后给电力系统频率控制带来了挑战,传统的频率调节依靠自动发电控制(AGC),控制方法上采用传统的PI控制,甚至模糊PI控制。但依然无法摆脱对运行状态变化中的电网适应性差的缺点。在模糊PI控制的基础上,引入自适应动态规划算法,设计一种基于目标导向的启发式动态规划(GrHDP)模糊PI控制器,使得带有专家策略的模糊PI控制对不同负荷变化的风电系统实现自适应的协调控制功能。通过含风电两区域的系统仿真证实了该方法的效果。

韩礼冬 隋先超 姜威达 慈建斌/大连供电公司

## 0 引言

风电目前已得到广泛应用,风电场出力随着风速的变化而变化,风速高于切出风速或低于切入风速都会让风机脱网,给电网的功率调节和频率控制带来了挑战。

近年来国内外开展了大量研究,为使风电机组有良好的频率相应特性并参与系统调频。风电机组本身的调频技术有模拟惯量控制、下垂控制<sup>[1]</sup>、转子转速控制<sup>[2]</sup>和直接桨距角控制<sup>[3]</sup>等。另外也有文献提出了与常规机组的协调控制以及储能元件的协调控制等,为风电系统频率调节实现的多元化提供了思路<sup>[4-5]</sup>。但是相关文献并没有考虑风电和负荷同时随机波动带来的影响。

模糊PI控制提供了专家控制策略,在特定工况下有效调节PI控制器 $K_p$ 、 $K_i$ 的参数可以获得不错的效果<sup>[6]</sup>。但传统的模糊PI控制方法,模糊集以及成员函数的类型和数量的设立、解模糊算法等仍然带有设计者的主观性。同时当实际系统

发生变化时,由于控制参数固定,控制器自身的参数无法做出适时调整,也无法实现风电和负荷波动情况下各机组之间的协调控制。

韦伯(Werbos)提出的自适应动态规划策略(ADP),带有增强学习和动态规划的概念,能够自适应地对控制策略进行在线调整,并且控制策略的调整也较为平滑。用评价网络来近似估计代价函数 $J$ 可以有效避免维数灾的问题,但是动作网络(Action Network)的初始化是随机的,控制器的性能也较依赖于初始化的好坏,需经历失败的控制过程,方能学习到正确的控制策略。将模糊神经网络和启发式动态规划(HDP)结合起来,可以达到两种控制器方法的优势互补。

基于以上考虑,设计一种新型控制器即自适应模糊PI控制器用于电力系统频率控制,自适应部分采用目标导向启发式动态规划(GrHDP)实现动态规划功能,该方法由Haibo He于文献[7]中提出。与传统两网络的动态规划算法相比,该方法引入一个新的目标网络(Goal Network),将外部激励信号转化为内部更平滑的评价网络学习信号,提高了控制器的学习能力。已在电力系统中有成功应用的先例<sup>[8]</sup>。本文在此基础上,创新性地将目标导向动态规划方法引入到模糊控制的自适应参数调整中去,并设计了调整算法。该控制器旨在运行工况变化时适时调整控制策略以优化机组出力并实现各个区域机组之间的协调控制。相对于固定策略的模糊PI



韩礼冬/工程师

### 关键词/Keywords

GrHDP ·  
模糊PI ·  
自动发电控制 ·  
频率控制 ·

控制, 本文提出的控制方法有更好的效果, 并在 Matlab/Simulink 中做了含风电的两区域系统仿真。

## 1 含风电两区域电力系统频率控制

### 1.1 两区域系统自动发电控制

本文研究一个两区域都包含了风电场的两区域电力系统, 如图1所示。

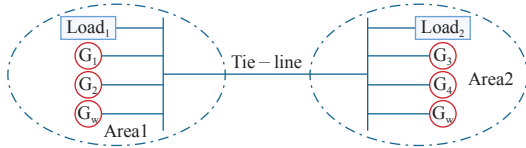


图1 含风电场的两区域电力系统

电力系统通过自动发电控制 (AGC) 来实现电能的发供平衡, 满足负荷波动下的电网功频稳定, 普遍采用的是区域偏差控制 (ACE)。在这个系统中, 风电接入后的 ACE 模型将风电场实际出力与预测出力的差值, 常规电厂实际出力与计划出力的差值引入。即 ACE 信号是风电场出力、常规电厂出力、频率偏移及联络线功率偏差的线性组合, 即

$$ACE = \beta \Delta f + \left( \sum P_{GEN}^{act} - \sum P_{GEN}^{sched} \right) + \left( \sum P_{wind}^{act} - \sum P_{wind}^{estim} \right) + \sum \Delta P_T \quad (1)$$

式中,  $P_{GEN}^{act}$  和  $P_{GEN}^{sched}$  为常规电厂的实际有功和计划有功出力;  $P_{wind}^{act}$  和  $P_{wind}^{estim}$  分别为风电场的实际有功和预测有功出力;  $P_T$  为联络线功率。

AGC 系统的控制器根据综合的 ACE 信号, 给各机组分配出力,  $\alpha_1 \sim \alpha_5$  为分配系数, 对此文献 [9] 考虑了在经济运行条件下风机和各机组之间出力的优化分配问题, 暂不考虑经济指标, 本文采取平均分配的策略, 即  $\alpha_1 \sim \alpha_5 = 0.2$ 。考虑 ACE 的风电模型如图2所示。

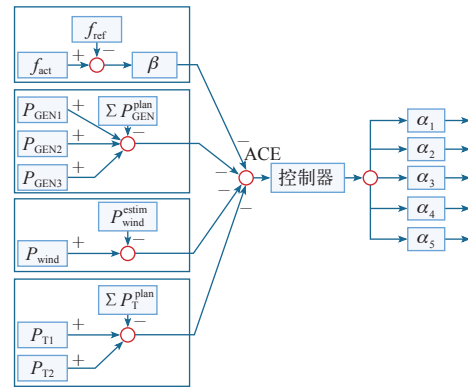


图2 考虑ACE的风电模型

### 1.2 频率响应模型建立

在误差允许的范围考虑仿真速度, 不计电压和功角的波动, 采用低阶线性模型。简化后的两区域负荷频率控制模型如图3所示。

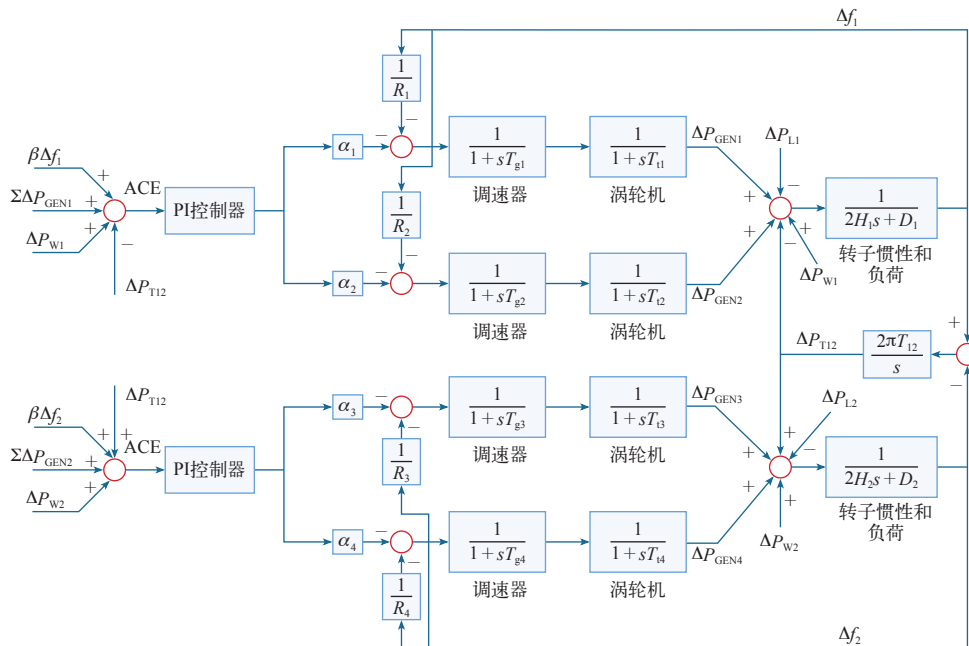


图3 简化后的负荷-频率模型

该频率响应模型包含了发电机—负荷、轮机—调速器以及联络线频率响应模型。

图3中的控制器包括现有传统的PI控制器、改进型模糊PI控制器以及本文设计的自适应模糊PI控制器。模糊PI控制器的设计方法在其他文献中已有讨论，本文不再赘述。

2 模糊神经网络PI控制器

本文选择模糊神经网络PI控制器以方便参数的适时调整，结构如图4所示。与文献[10]的三层动作网络不同，其结构含有模糊和解模糊算法。

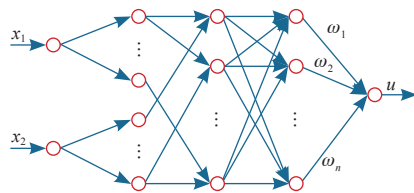


图4 模糊神经网络PI控制器的结构

下面介绍该网络的前向算法。

第一层的节点直接将输入值转到下一层

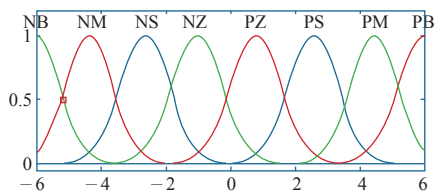
f\_i^{(1)} = x\_i^{(1)}
a\_i^{(1)} = f\_i^{(1)}
(2)

式中，f\_i^{(1)}为第一层的函数；a\_i^{(1)}为第一层的输出；x\_i^{(1)}为第一层的输出，x\_i(i=1,2)为ACE和ACE的变化率，其他类推。

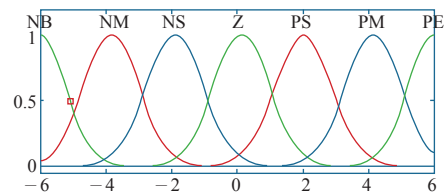
第二层的每一个节点都表示一个成员函数，即隶属于某个成员值的程度，即

f\_ij^{(2)} = -((x\_i^{(2)} - c\_ij)^2 / sigma\_ij^2) = -((a\_i^{(1)} - c\_ij)^2 / sigma\_ij^2)
a\_i^{(2)} = e^{f\_ij^{(2)}}
(3)

式中，c\_ij和sigma\_ij为第j个贝尔型成员函数的中心和宽度，是可以进行调整的控制参数。式(3)表示第i个语言变量x\_i^{(2)}的隶属程度。初始设置后的成员函数（模糊数字隶属度函数）如图5所示。



(a) ACE



(b) ACE变化率

图5 控制器FC1的隶属度函数

ACE的成员函数有9个，分别为负大（NB）、负中（NM）、负小（NS）、负零（NZ）、正零（PZ）、正小（NZ）、正中（PM）和正大（PB），ACE变化率的成员函数不再赘述。输出dKp的模糊规则如表1所示。

表1 输出dKp的模糊控制规则

Table with 9 columns (PB, PM, PS, PZ, NZ, NS, NM, NB) and 9 rows (PB, PM, PS, Z, NS, NM, NB) for ACE and dKp.

第三层表示模糊逻辑规则的契合程度，用与逻辑来表达

f\_m^{(3)} = min{x\_{1j}^{(3)}, x\_{2j}^{(3)}} = min{a\_{1j}^{(2)}, a\_{2j}^{(2)}}
a\_m^{(3)} = f\_m^{(3)}
(4)

第四层为归一化层

f\_m^{(4)} = x\_m^{(4)} / sum\_{i=1}^{56} x\_i^{(4)} = a\_m^{(3)} / sum\_{i=1}^{56} x\_i^{(4)}
a\_m^{(4)} = f\_m^{(4)}
(5)

第五层为解模糊化层

f^{(5)} = sum\_{m=1}^{56} omega\_m x\_m^{(5)} = sum\_{m=1}^{56} omega\_m a\_m^{(4)}
a^{(5)} = f^{(5)} = u
(6)

解模糊化的系数omega\_m即为如表1所示解模糊化规则，omega\_m模糊语言的初始量化指标如表2所示。

表2 输出变量dKp模糊语言的量化

Table with 8 columns (PB, PM, PS, Z, NS, NM, NB) and 2 rows (模糊语言, 数值).

输出 $dK_i$ 的方法与模糊规则不再赘述。

### 3 目标导向的启发式动态规划

目标导向的启发式动态规划（GrHDP）带有三个功能性网络即动作网络、评价网络和目标网络。评价网络用来估计贝尔曼方程的代价函数，动作网络学习产生最优控制策略以降低评价网络

产生的代价函数 $J(t)$ 。在本文中，动作网络为模糊PI神经网络，整个控制器的结构如图6所示，介绍如何根据GrHDP算法设计调整模糊神经PI控制器的参数。目标网络给评价网络提供一个自适应的内部增强信号 $s(t)$ 以提高控制器的学习能力。代价函数有如下定义

$$J[x(i), i] = \sum_{t=i}^{\infty} \gamma^{t-i} U[x(t), u(t), i] \quad (7)$$

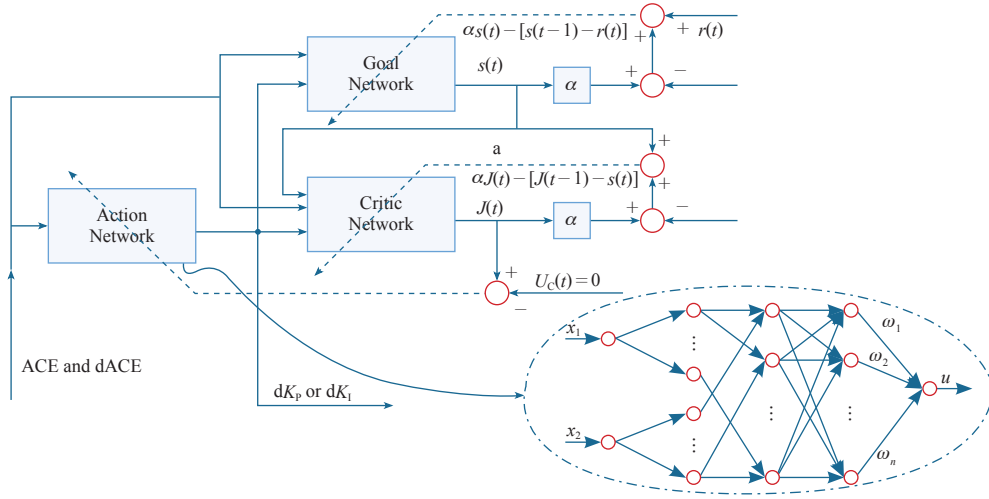


图6 目标导向的启发式动态规划模糊PI控制器结构

#### 3.1 目标网络训练

对于自适应动态规划控制而言，要消除的系统振荡或者频率偏差构成了代价函数，控制器的目标即是选择控制变量 $u(t)$ 来最小化代价函数

$$J^*[x(t)] = \min_{u(t)} \{U[x(t), u(t)] + \gamma J^*[x(t+1)]\} \quad (8)$$

通过最小化下面的误差来估计代价函数

$$\|E_h\| = \frac{1}{2} \sum_t [J(t) - r(t) - \alpha J(t+1)] \quad (9)$$

对于每个时刻而言 $E_h = 0$ ，即

$$J(t) = r(t) + \alpha J(t+1) \quad (10)$$

对于上一时刻而言

$$J(t-1) = r(t-1) + \alpha J(t) \quad (11)$$

目标网络要最小化的函数如下

$$\begin{cases} e_g(t) = \alpha J(t) - [J(t-1) - r(t-1)] \\ E_g(t) = \frac{1}{2} e_g^2(t) \end{cases} \quad (12)$$

概念性的误差反传路径如下

$$\frac{\partial E_g(t)}{\partial \omega_g(t)} = \frac{\partial E_g(t)}{\partial J(t)} \frac{\partial J(t)}{\partial s(t)} \frac{\partial s(t)}{\partial \omega_g(t)} \quad (13)$$

#### 3.2 评价网络训练

用目标网络输出的 $s(t)$ 来作为评价网络的输入，同时用来定义误差函数并对评价网络的权值调整，即

$$\begin{cases} e_c(t) = \alpha J(t) - [J(t-1) - s(t)] \\ E_c(t) = \frac{1}{2} e_c^2(t) \end{cases} \quad (14)$$

其反传路径如下

$$\frac{\partial E_c(t)}{\partial \omega_c(t)} = \frac{\partial E_c(t)}{\partial J(t)} \frac{\partial J(t)}{\partial \omega_c(t)} \quad (15)$$

从隐含层到输出层以及从输入层到隐含层的权值调整如下

$$\begin{cases} \Delta \omega_{ci}^{(2)} = \eta_c(t) \left[ -\frac{\partial E_c(t)}{\partial \omega_{ci}^{(2)}(t)} \right] \\ \Delta \omega_{ci,j}^{(1)} = \eta_c(t) \left[ -\frac{\partial E_c(t)}{\partial \omega_{ci,j}^{(1)}(t)} \right] \end{cases} \quad (16)$$

#### 3.3 动作网络训练

同经典ADP一样，动作网络的训练过程即回

传目标效用函数值 $U_c$ 与评价网络输出的估计值 $J$ 之间的差值, 因此对于动作网络而言其误差函数为如下

$$E_a(t) = \frac{1}{2} e_a^2(t) \quad (17)$$

因为动作网络和目标网络与评价网络都有联系, 所以其权值调整应包含两个部分

$$\begin{cases} \frac{\partial E_a(t)}{\partial u(t)} = P_{a,c}(t) + P_{a,g}(t) \\ P_{a,c}(t) = \frac{\partial E_a(t)}{\partial J(t)} \frac{\partial J(t)}{\partial u(t)} \\ P_{a,g}(t) = \frac{\partial E_a(t)}{\partial J(t)} \frac{\partial J(t)}{\partial s(t)} \frac{\partial s(t)}{\partial u(t)} \end{cases} \quad (18)$$

因而, 可以得出从函数 $J$ 到动作网络输出 $u$ 反传值为

$$\delta^{(5)} = -\frac{\partial E_a}{\partial f^{(5)}} = -\frac{\partial E_a}{\partial u} = -\frac{\partial E_a}{\partial J} \frac{\partial J}{\partial u} \quad (19)$$

$$\frac{\partial E_a}{\partial \omega_m} = \frac{\partial E_a}{\partial f^{(5)}} \frac{\partial f^{(5)}}{\partial \omega_m} = -\delta^{(5)} x_i^{(5)} = -\delta^{(5)} a_i^{(4)} \quad (20)$$

$$\delta_m^{(4)} = -\frac{\partial E_a}{\partial f_m^{(4)}} = -\frac{\partial E_a}{\partial f^{(5)}} \frac{\partial f^{(5)}}{\partial a_m^{(4)}} \frac{\partial a_m^{(4)}}{\partial f_m^{(4)}} = \delta^{(5)} \omega_m \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \delta_m^{(3)} &= -\frac{\partial E_a}{\partial f_m^{(3)}} = -\sum_{k=1}^9 \frac{\partial E_a}{\partial f_k^{(4)}} \frac{\partial f_k^{(4)}}{\partial a_m^{(3)}} \frac{\partial a_m^{(3)}}{\partial f_m^{(3)}} \\ &= \frac{1}{\sum_{m=1}^9 (x_m^{(4)})^2} (\delta_m^{(4)} \sum_{i=1}^9 x_i^{(4)} - \sum_{k=1}^9 \delta_k^{(4)} x_k^{(4)}) \quad (22) \\ &= \frac{1}{\sum_{m=1}^9 (a_m^{(3)})^2} (\delta_m^{(4)} \sum_{i=1}^9 x_i^{(4)} - \sum_{k=1}^9 \delta_k^{(4)} x_k^{(4)}) \end{aligned}$$

$$\delta_{ij}^{(2)} = -\frac{\partial E_a}{\partial f_{ij}^{(2)}} = -\frac{\partial f_k^{(3)}}{\partial a_{ij}^{(2)}} \frac{\partial a_{ij}^{(2)}}{\partial f_{ij}^{(2)}} \sum_{k=1}^9 \frac{\partial E_a}{\partial f_k^{(3)}} = -S_{ij} e^{-f_{ij}^2} \sum_{k=1}^9 \delta_k^{(3)} \quad (23)$$

$$S_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{如果 } a_{ij}^{(2)} \text{ 是第 } k \text{ 个规则节点的输入} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (24)$$

于是获得了如下的调整公式

$$\frac{\partial E_a}{\partial c_{ij}} = \frac{\partial E_a}{\partial f_{ij}^{(2)}} \frac{\partial f_{ij}^{(2)}}{\partial c_{ij}} = -\delta_{ij}^{(2)} \frac{2(x_i^{(2)} - c_{ij})}{\sigma_{ij}^2} \quad (25)$$

$$\frac{\partial E_a}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{\partial E_a}{\partial f_{ij}^{(2)}} \frac{\partial f_{ij}^{(2)}}{\partial \sigma_{ij}} = -\delta_{ij}^{(2)} \frac{2(x_i^{(2)} - c_{ij})^2}{\sigma_{ij}^3} \quad (26)$$

最后得到动作网络即模糊神经PI控制器的参数调整规则如下

$$\omega_m(k+1) = \omega_m(k) - l_a(t) \frac{\partial E_a}{\partial \omega_m} \quad (27)$$

$$c_{ij}(k+1) = c_{ij}(k) - l_a(t) \frac{\partial E_a}{\partial c_{ij}} \quad (28)$$

$$\sigma_{ij}(k+1) = \sigma_{ij}(k) - l_a(t) \frac{\partial E_a}{\partial \sigma_{ij}} \quad (29)$$

### 3.4 设置效用函数 $U_c(t)$

设置效用函数 $U_c(t) = 0$ , 即无偏差为成功。设置量化后区域控制偏差ACE和ACE的变化率的值为控制器的输入值, 使用两个GrHDP模糊PI控制器分别调整 $K_p$ 和 $K_i$ , 输出值为 $dK_p$ 和 $dK_i$ , 控制器的加强信号 $r(t)$ 取区域控制偏差的二次方值

$$r(t) = [\Delta P_T(t) - 10B\Delta f(t)]^2 \quad (30)$$

式中,  $\Delta P_T(t)$ 为联络线功率偏差;  $\Delta f(t)$ 为频率偏差。其动作网络部分为模糊神经网络, 整个控制系统的结构如图7所示, 两个区域均设置相同的控制器, 初始化策略一致, 分别以联络线功率偏差和本区域频率偏差最小为优化目标, 实现不同机组的协调控制。

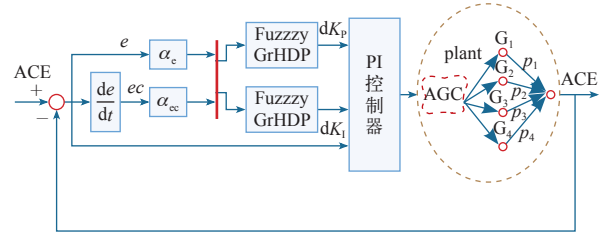


图7 基于GrHDP的模糊PI控制系统

## 4 仿真结果

### 4.1 不考虑负荷变化

区域1风电发生功率扰动, 先不计负荷变化, 分别采用传统的PI控制器、模糊PI控制器以及目标导向的神经网络PI控制器进行控制, 并采用积分平方误差ISE衡量频率控制效果, 两区域的积分平方误差值计算公式如下

$$ISE = \int_0^T (\Delta P_{tie}^2 + \Delta f_1^2 + \Delta f_2^2) dt \quad (31)$$

式中,  $\Delta f_1$  为区域1的频率偏移;  $\Delta f_2$  为区域2的频率偏移;  $\Delta P_{\text{tie}}$  为联络线功率偏移。

图8为模拟了风力暂降(即风力突然下降随后回升)情况下的风场功率输出变化情况。暂降前后风电场输出的功率为1.2(pu), 在400 s时暂降到0。

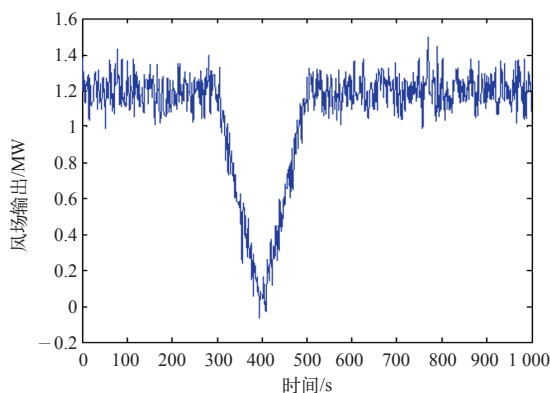


图8 风力暂降情况下风场功率输出变化

区域1、区域2的系统频率波动和联络线功率波动情况如图9~图12所示。由图9、图10可以看出模糊PI和基于GrHDP的模糊PI控制器均能对频率波动有较好控制效果且将频率波动限制在 $\pm 0.2$  Hz以内, 图12对区域2三种方法的频率波动作了统计。结果表明基于GrHDP的模糊PI控制器在限制频率波动方面效果最优。图11为联络线的功率波动, 基于GrHDP的模糊PI控制器在发生风电功率暂降时, 联络线功率波动最小。

## 4.2 考虑负荷变化

考虑在区域1或区域2风机所承担负荷发生如图13所示的波动, 考虑一种最严重的情况: 负荷波动跟风力暂降同步发生, 比较三种控制的控制效果。

区域1、区域2发生负荷变化时, 联络线功率如图14和图15所示, 与图11对比可以看出固定策略的模糊PI控制效果变差并有与传统PI控制靠拢的趋势。而GrHDP的模糊PI控制效果较为稳定, 表现出了一定的适应性。

图16和图17为在发生负荷波动时区域1、区域2三种控制下频率波动超过0.05 Hz的时间累计。从控制频率的指标来看, 采用基于GrHDP模糊PI的控制效果为最优。

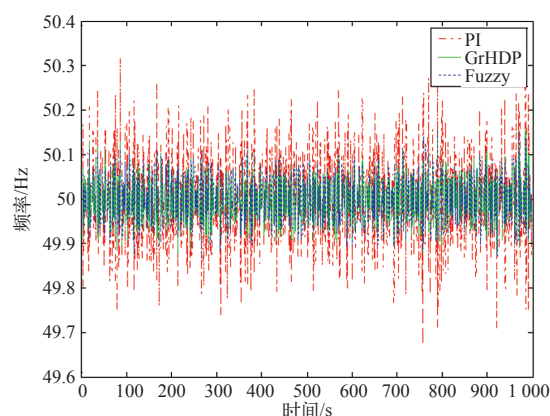


图9 区域1频率波动

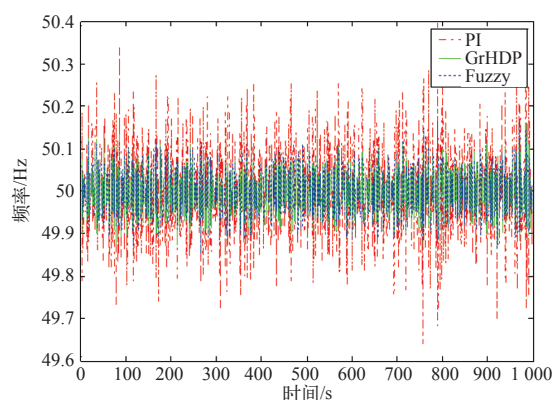


图10 区域2频率波动

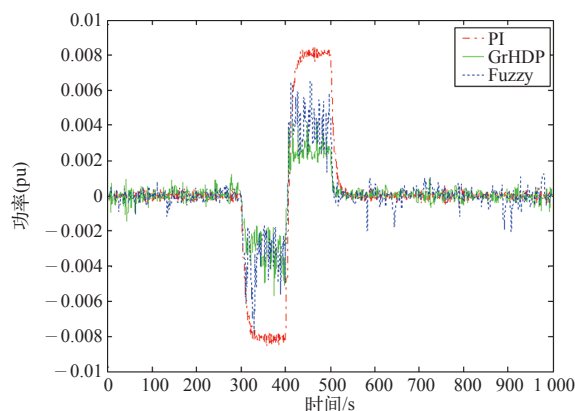


图11 联络线功率波动

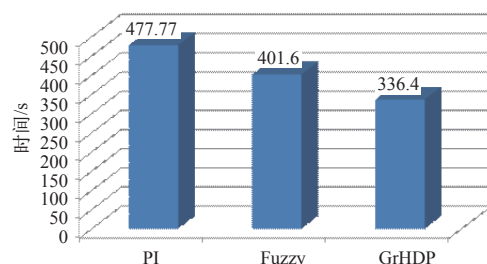


图12 三种控制下区域2频率波动超过0.05 Hz的时间

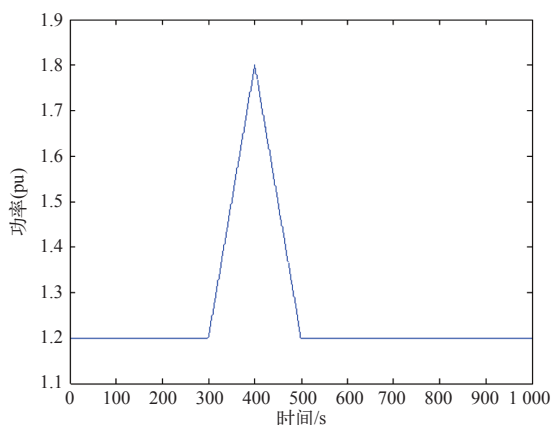


图13 区域1或区域2的负荷波动

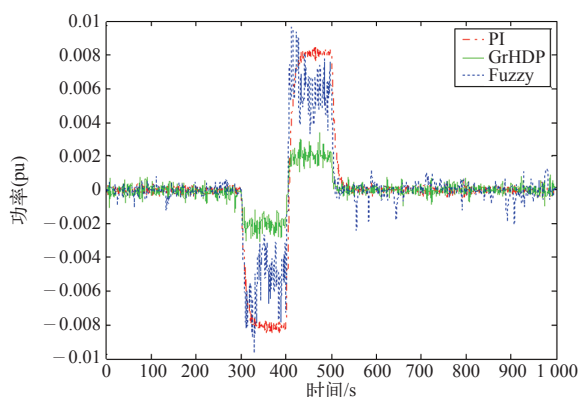


图14 区域1负荷变化下的联络线功率波动

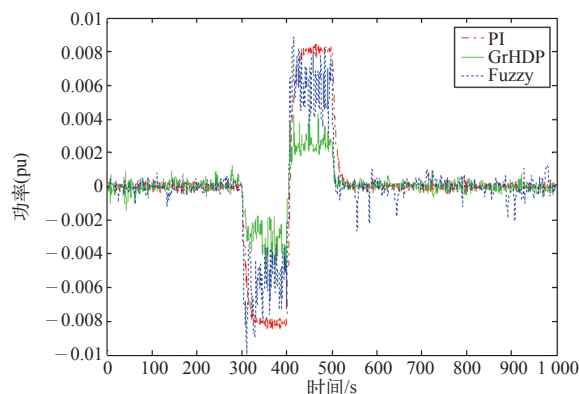


图15 区域2负荷变化下的联络线功率波动

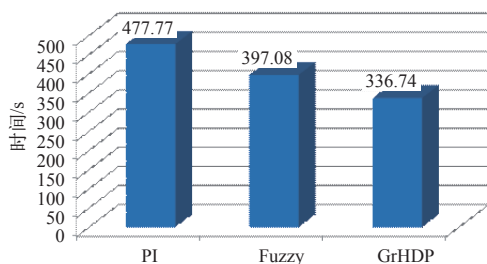


图16 三种控制下区域1频率波动超过0.05 Hz的时间

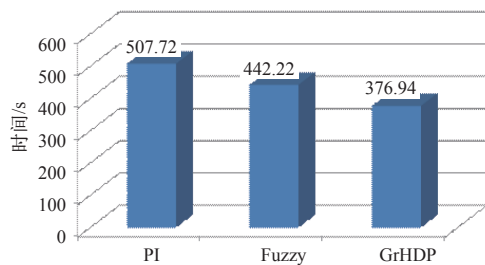


图17 三种控制下区域2频率波动超过0.05 Hz的时间

## 5 结束语

本文发明了基于GrHDP模糊PI控制器，并设计了模糊参数调整算法以达到自适应能力。与模糊PI控制器和AGC系统中传统的PI控制器效果作了比较，仿真结果表明，该方法不仅对风电出力的高频、大幅变化引起的电力系统频率波动具有较好的控制作用，对实际系统还有更好的适应性，对抑制负荷波动有稳定的效果。该控制器也可以扩展应用到其他有自适应和专家知识要求的电力系统控制问题中。

## 参考文献

- [1] Ramtharan G, Ekanayake J, Jenkins N. Frequency support from doubly fed induction generator wind turbines [J]. IET Transactions on Renewable Power Generation, 2007, 1 (1) : 3-9.
- [2] Morren J, de Haan W H, Kling Wil L, et al. Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (1) : 433-434.
- [3] Ullah N R, Thiringer T, Karlsson D, et al. Temporary primary frequency control support by variable speed wind turbines – potential and applications [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23 (2) : 601-612.
- [4] 刘巨, 姚伟, 文劲宇, 等. 大规模风电参与系统频率调整的技术展望 [J]. 电网技术, 2008, 36 (6) : 57-60.
- [5] 林俐, 李晓钰, 王世谦, 等. 基于分段控制的双馈风电机组有功频率控制 [J]. 中国电力, 2012,

(下转第52页)

## 参考文献

- [1] 李战鹰, 任震, 杨泽明. 有源滤波装置及其应用研究综述 [J]. 电网技术, 2004, 28 (11): 40-43.
- [2] 吴敬兵, 罗安, 马伏军, 等. 无功和谐波补偿装置的控制方法 [J]. 电力自动化设备, 2011, 31 (5): 43-48.
- [3] 王伟, 周林, 徐明. 有源电力滤波器控制方法综述 [J]. 继电器, 2006, 34 (20): 81-86.
- [4] 郭自勇, 周友庆, 刘宏超, 等. 一种基于电压空间矢量的有源滤波器滞环电流控制新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (1): 112-117.
- [5] 唐健, 王翔, 何英杰, 等. 三相四线制有源滤波器的新型无差拍控制 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (19): 59-63.
- [6] 唐健. 三相四线制三电平三桥臂APF关键技术及其控制研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2010: 81-105.
- [7] 王晓刚, 谢运祥, 帅定新. 智能控制方法应用于APF的综述与展望 [J]. 电网技术, 2008, 32 (8): 35-41.
- [8] 王晓涛, 曾成碧, 刘晨曦. 基于模糊控制的并网逆变器的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (9): 97-101.
- [9] 李帅, 李槐树, 李文艳, 等. 三相升-降压PWM整流器Fuzzy-PI控制算法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24 (4): 120-125.
- [10] Zha Xiaoming, Shi Feng, Chen Yunping. A repetitive learning boost converter control of neutral line active power filter based on FPGA and DSP [C]. International Power Engineering Conference, 2007: 1173-1178.
- [11] Hamadi A, Al-Haddad K, Rahmani S, et al. Comparison of fuzzy logic and proportional integral controller of voltage source active filter compensating current harmonics and power factor [C]. 2004 IEEE International Conference on Industrial Technology, 2004: 645-650.
- [12] 李翠艳, 张东纯, 庄显义. 重复控制综述 [J]. 电机与控制学报, 2005, 9 (1): 37-44.
- [13] 耿攀, 戴珂, 魏学良, 等. 三相并联型有源电力滤波器电流重复控制 [J]. 电工技术学报, 2007, 22 (2): 127-131.
- [14] 唐欣, 马迎召, 李红涛. 基于重复控制的有源滤波器双闭环控制 [J]. 电机与控制学报, 2009, 13 (1): 67-71.
- [15] 王汝田, 王建隼, 谭光慧, 等. 基于重复控制的新型三相变换器研究 [J]. 电力自动化设备, 2008, 28 (6): 11-16.
- (收稿日期: 2015-09-09) **EA**
- 
- (上接第30页)
- 45 (2): 49-53.
- [6] 倪琳娜, 罗吉, 王少荣. 含风电电力系统的频率控制 [J]. 电工技术学报, 2011, 26 (1): 235-241.
- [7] He H, Ni Z, Fu J. A three-network architecture for on-line learning and optimization based on adaptive dynamic programming [J]. Neurocomputing, 2012, 78 (1): 3-13.
- [8] Sui X, Tang Y, He H, et al. Energy storage based low frequency oscillation damping control using particle swarm optimization and heuristic dynamic programming [J]. IEEE Transactions Power Systems, 2014, 28 (5): 3174-3183.
- [9] 何成明, 王洪涛, 韦仲康, 等. 风电场与AGC机组分布式协同实时控制 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (2): 302-309.
- [10] Tang Y, He H, Ni Z, et al. Reactive power control of grid-connected wind farm based on adaptive dynamic programming [J]. Neurocomputing, 2014, 125 (1): 125-133.
- (收稿日期: 2015-12-08) **EA**