

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201255

基于变论域模糊逻辑的互联电力系统负荷频率控制

李志军, 王硕, 张家安, 尹奇兵, 叶超

(河北工业大学人工智能与数据科学学院, 天津 300130)

摘要: 随着风电在电力系统中的渗透率不断提高, 其出力不确定性对系统频率稳定造成威胁。针对风电接入系统后的频率波动问题, 提出变论域模糊 PI 负荷频率控制策略。为克服传统模糊控制器由于论域固定导致自适应能力有限的缺点, 设计的变论域模糊 PI 负荷频率控制器通过变论域方法实现输入、输出论域的动态调整。为满足风电接入系统后复杂的论域调整需求, 基于模糊推理设计新型变论域伸缩因子。典型两区域互联系统仿真实验表明, 在不同形式的扰动下, 该新型控制器较 PI 控制器、模糊 PI 控制器有更好的控制表现, 能更好地处理风电出力不确定性对互联电力系统频率稳定的影响。

关键词: 负荷频率控制; 变论域; 模糊逻辑; 风电; 互联电力系统

Variable universe fuzzy logic-based load frequency control in an interconnected power system

LI Zhijun, WANG Shuo, ZHANG Jiaan, YIN Qibing, YE Chao

(School of Artificial Intelligence and Data Science, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: With the penetration of wind power in the power system constantly increasing, the uncertainty of its output poses a threat to the frequency stability of the system. Given this fluctuation problem of wind power connected to an interconnected power system, a variable universe fuzzy PI load frequency control strategy is proposed. To overcome the limitation in adaptive ability of the traditional fuzzy controller due to the fixed universe, a designed variable universe fuzzy PI load frequency controller realizes the dynamic adjustment of the input and output universes by the method of the variable universe. To satisfy the complex demands of universe adjustment after wind power is connected to the system, a new variable universe contraction-expansion factor based on fuzzy inference is designed. Simulation results of a typical two-area interconnected system show that the new controller has better control performance than the PI controller and the fuzzy PI controller under different forms of disturbance. It can better deal with the effect of the uncertainty of wind power output on the frequency stability of an interconnected power system.

This work is supported by the Foundation of the Hebei Provincial Technology Support Program (No. 15212105D).

Key words: load frequency control (LFC); variable universe; fuzzy logic; wind power; interconnected power system

0 引言

随着风电在电力系统中的渗透率不断提高, 其出力不确定性越来越不可忽视, 传统电力系统的运行与控制方式受到严重影响^[1-2]。风电大规模接入互联电力系统, 其出力不确定性将导致系统功率供需出现不平衡, 使系统频率出现偏差, 极端情况下可造成系统崩溃^[3-5]。因此, 如何在含高比例风电的互联电力系统中实现系统频率稳定, 进而提升风电等新能源电力的消纳水平具有迫切性。

风电大规模接入电网后的频率控制技术研究受到重视, 如: 风电机组以虚拟惯性控制方式参与系统调频^[6-7], 增加系统惯性并提供一次调频能力; 储能系统以快速响应能力参与系统调频^[8-9], 缓解了火电机组的调峰压力, 为大规模风电并网提供调节容量。负荷频率控制(Load Frequency Control, LFC)作为自动发电控制(Automatic Generation Control, AGC)的核心单元, 在维持系统频率稳定方面扮演着重要角色。传统负荷频率控制采用经典 PI/PID 控制, 高比例新能源接入后, 系统的不确定性进一步增加, 基于线性控制理论的 PI/PID 控制器难以满足具有强烈非线性特征的新型互联电力系统的控制要

求。新的负荷频率控制策略被不断被提出,如基于线性矩阵不等式设计的鲁棒控制方法^[10-11]、对系统参数摄动不敏感的滑模控制方法^[12-13]、采取滚动优化策略的模型预测控制方法^[14-15]以及基于人工智能的控制方法^[16-18]等;这些控制方法在一定程度上弥补了传统负荷频率控制存在的缺点,但存在对精确数学模型依赖、控制成本高以及设计实现困难等缺点。

模糊逻辑能对不确定性问题进行知识表达和逻辑推理;模糊控制作为经典的非线性控制方法,具有不依赖被控对象精确数学模型,易于实现等优点,在处理含不确定性的非线性控制问题时有明显优势,在系统频率控制中得到应用。模糊控制器在含电池储能系统的互联电力系统中被用来控制电池储能系统的输出功率,辅助火电机组调频,有效提升了电网的动态调频性能^[19]。这里必须指出,传统模糊控制论域固定,是一种粗糙的控制方法,本质上是一个插值器^[20],该插值器的基函数为模糊推理前件的模糊集合,要保证插值得到的控制函数充分接近真实的控制函数,就要求模糊集合峰值点间的距离足够小,也就要求控制规则足够多。这对于仅依赖专家知识和人工经验制定控制规则的模糊控制器而言是十分困难的。新能源大规模接入电力系统后,系统的非线性和不确定性得到进一步增强,传统模糊控制面临控制器设计困难,处理新能源不确定性能力不足等问题。

针对上述问题,本文引入变论域思想^[21],设计了一种新型变论域模糊 PI 负荷频率控制器。考虑到传统模糊控制由于论域固定导致模糊集合和控制规则僵化固定,通过变论域手段实现控制器输入与输出论域的动态调整,进而实现模糊集合与控制规则的动态变化,提升了控制器的自适应能力;制定的控制规则仅要求反应大致的控制规律,降低了控制器的设计难度。针对风电等新能源接入后复杂的论域调整需求,基于模糊推理设计了新型变论域伸缩因子。典型两区域互联电力系统仿真实验表明,该控制器较传统 PI、模糊 PI 负荷频率控制器有更好的控制表现。

1 多区域负荷频率控制模型建立

在传统负荷频率控制模型的基础上,建立含风电的互联电力系统负荷频率控制模型,首先分析风电场有功功率输出特性对系统频率的影响,之后确定风电在系统模型中的接入形式。

1.1 风电场有功功率输出特性分析

图 1 为某风电场单台风机及全体风机的有功功率输出。由图 1 可知,单台风机的有功功率输出具

有较强的随机性,含全体风机的风电场由于功率汇集效应^[22-23]在一定程度上可降低其有功功率输出的不确定性。考虑到风电机组叶片自身存在惯性,风电场有功功率输出波动频段主要集中于中频和低频部分^[24]。因此,本文将对系统频率影响较大的风电场有功功率的中、低频分量作为扰动项接入互联电力系统负荷频率控制模型中。

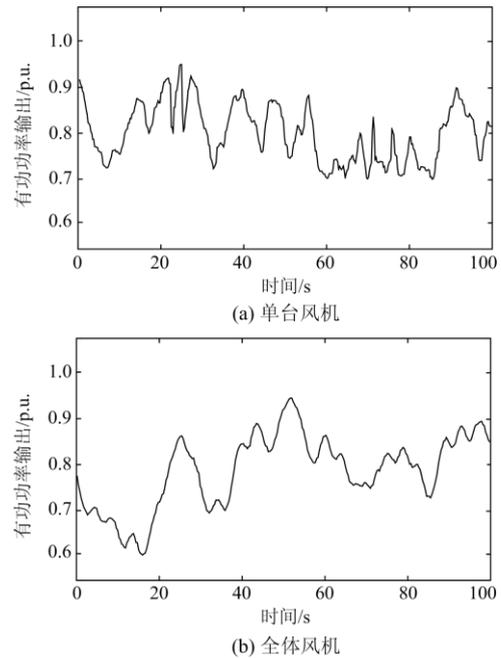


图 1 某风电场单台风机及全体风机的有功功率输出
Fig. 1 Active power output of a single and all wind turbines in a wind farm

1.2 考虑风电出力不确定性的互联电力系统负荷频率控制模型建立

在传统负荷频率控制模型中,风电接入电力系统时,通常将其整体看作一个扰动源;但随着风电在电力系统中的占比不断提高,并逐步与传统能源一同承担起调度任务,显然,将高比例风电整体上看作一个扰动源是不合理的。

风力发电与传统能源发电的不同在于风电出力具有不确定性,建立含风电的互联电力系统负荷频率控制模型,关键是在模型中考虑风电出力不确定性对系统频率的影响。风速的随机性和波动性使风功率预测成为难题,风电场实际输出功率与预测输出功率之间产生偏差,这是风电出力不确定性的具体影响。因此,本文将风电场实际输出功率与预测输出功率之间的偏差视为风电扰动并作为扰动项接入模型的负荷位置,建立含风电的互联电力系统负荷频率控制模型,互联电力系统区域 i 的 LFC 模型如图 2 所示。

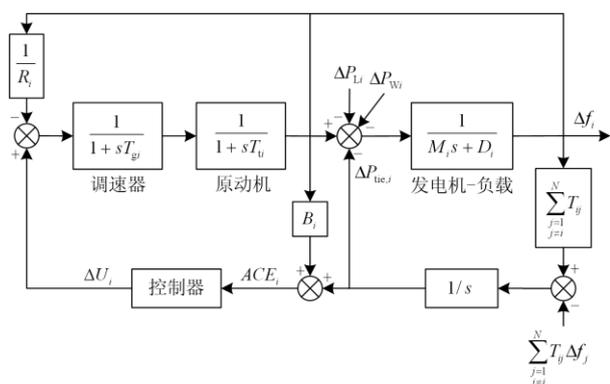

 图2 互联电力系统区域*i*的LFC模型

 Fig. 2 LFC model for area *i* of an interconnected power system

图中： R_i 为调速器调节系数； B_i 为频率偏差系数； T_{g_i} 为调速器时间常数； T_{t_i} 为原动机时间常数； M_i 为机组惯性系数； D_i 为负荷阻尼系数； T_{ij} 为区域*i*和*j*之间的同步系数； Δf_i 为频率偏差； $\Delta P_{tie,i}$ 为联络线功率偏差； ΔP_{L_i} 为负荷扰动； ΔP_{W_i} 为风功率偏差扰动。区域控制偏差(Area Control Error, ACE)被定义为

$$ACE_i = \Delta P_{tie,i} + B_i \Delta f_i \quad (1)$$

在传统PI负荷频率控制器中,控制变量 ΔU_i 为

$$\Delta U_i = K_p \cdot ACE_i + K_i \cdot \int ACE_i dt \quad (2)$$

式中： K_p 为比例增益； K_i 为积分增益。

2 基于变论域模糊逻辑的负荷频率控制器设计

在传统电力系统中,模糊负荷频率控制器的论域相对固定,新能源接入后,其不确定性使精确的论域难以确定,而不适宜的论域会导致模糊控制器可用规则数量与控制精度之间出现矛盾,使控制品质下降,因此新能源接入后论域调整是十分必要的。变论域模糊PI(Variable Universe Fuzzy PI, VUFPI)负荷频率控制器将变论域模糊控制与经典PI控制相结合,利用变论域模糊控制器调节PI控制器的控制参数。VUFPI控制器作为一种复合自适应控制器,兼具经典PI控制快速、无静差调节的优点和模糊控制的非线性处理的能力;变论域环节的加入使模糊控制器的论域实现动态调整,增强了模糊控制器处理不确定性的能力;另外,新能源接入后,其不确定性使模糊负荷频率控制器的设计难度增加,论域可调整特性降低了模糊集合划分和模糊规则制定的要求,同时也降低了控制器的设计难度。

首先,介绍了变论域自适应模糊控制理论;然

后,针对新能源接入后复杂的论域调整需求,基于模糊推理设计了新型变论域伸缩因子;最后,将变论域模糊控制与经典PI控制相结合设计了变论域模糊PI负荷频率控制器。

2.1 变论域自适应模糊控制理论

对于一个模糊控制器,设 $X_i = [-E_i, E_i]$ 为输入变量 x_i ($i=1, 2, \dots, n$)的基本论域, $Y = [-U, U]$ 为输出变量 y 的基本论域,其中 E_i 和 U 均为正实数; $\Phi_i = \{A_{ij}\}_{(1 \leq j \leq m)}$ 是 X_i 上的模糊集合划分,其中 $i=1, 2, \dots, n$, $\Omega_j = \{B_j\}_{(1 \leq j \leq m)}$ 是 Y 上的模糊集合划分, Φ_i 和 Ω_j 均视为语言变量,即可形成模糊推理规则: If x_1 is A_{1j} and x_2 is A_{2j} and \dots and x_n is A_{nj} then y is B_j 。

设 x_i 是 A_{ij} 的峰值点, y_j 是 B_j 的峰值点,其中 $i=1, 2, \dots, n$, $j=1, 2, \dots, m$ 。图3为变论域原理示意图,所谓变论域即输入论域 X_i 和输出论域 Y 可随着输入变量 x_i 和输出变量 y 变化而实现自适应调整,即

$$X_i(x_i) = [-\alpha_i(x_i)E_i, \alpha_i(x_i)E_i] \quad (3)$$

$$Y(y) = [-\beta(y)U, \beta(y)U] \quad (4)$$

式中, $\alpha_i(x_i)$ ($i=1, 2, \dots, n$)和 $\beta(y)$ 为论域的伸缩因子。

变论域模糊控制通过伸缩因子实现输入论域和输出论域的动态变化。在控制规则不变的情况下,从局部来看,论域收缩相当于控制规则增加,即模糊集合峰值点间的距离缩小,提高插值精度。

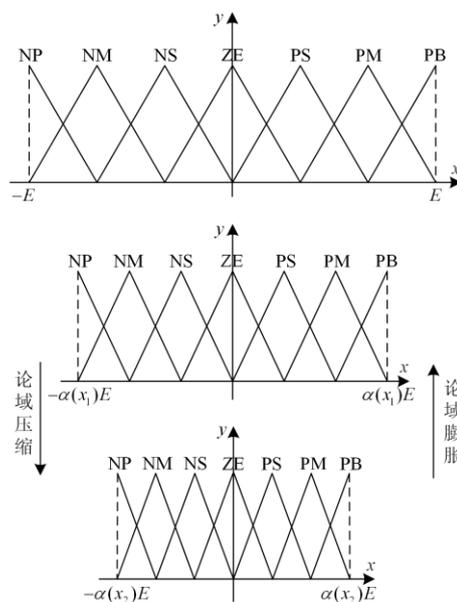


图3 变论域原理示意图

Fig. 3 Principle diagram of variable universe

2.2 变论域伸缩因子设计

变论域伸缩因子的形式直接决定了论域的调整规律,因此,伸缩因子的设计对于变论域模糊控制的控制效果是至关重要的。

新能源的不确定性使精确的论域难以确定,不适宜的论域会导致模糊控制器可用规则数量与控制精度之间出现矛盾,因此,新能源接入后的论域调整要求是要使不同误差等级下均有数量足够的控制规则可以使用,即要使模糊控制器的误差分辨率始终处于合理的范围内;此外,新能源接入后的论域调整过程存在不确定性,设计的伸缩因子要考虑变论域过程中的不确定性,即要具备一定的通用性。传统函数型伸缩因子^[25]需要构造函数,并设置参数,函数形式选取或参数设置不当会对变论域效果产生很大影响,因此通用性较差,且不具备不确定性处理能力;基于模糊推理设计的伸缩因子通过语言概念描述论域调整规律,只需知道大致的论域调整规律,无需构造精确的函数模型,从而避免了对函数模型及其参数的选择问题,具备一定的通用性,可适应具有不确定性的变论域过程。该模糊推理环节的输入量是ACE及其变化率,分别记为误差 e 和误差变化率 e_c ,将其划分为7个模糊集合:NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZE(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大),其隶属函数如图4所示;输出量为误差伸缩因子 α_e 和误差变化率伸缩因子 α_{ec} ,将其划分为4个模糊集合:PZ(正零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大),隶属函数如图5所示;为避免论域的反复调节,输出的伸缩因子 α_e 和 α_{ec} 由误差及其变化率共同决定,其模糊推理规则如表1所示,制定伸缩因子模糊推理规则的基本要求是:当误差及其变化率较大时,输出较大的伸缩因子以扩大论域,加快收敛速度;当误差及其变化率较小时,输出较小的伸缩因子以缩小论域,加密模糊划分,增加可用的控制规则,提高控制精度和稳定性。

输出伸缩因子采用文献[26]所提出的形式。

$$\beta(t) = K_I \int_0^t e^*(\tau) d\tau + \beta(0) = K_I \sum_{i=1}^n p_i \int_0^t e_i(\tau) d\tau + \beta(0) \quad (5)$$

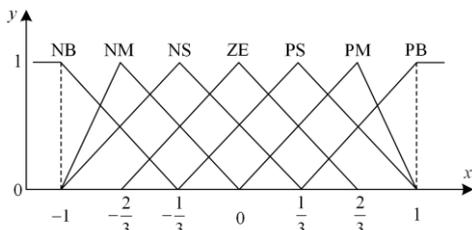


图4 误差 e 和误差变化率 e_c 的隶属函数

Fig. 4 Membership functions of error e and its rate of change e_c

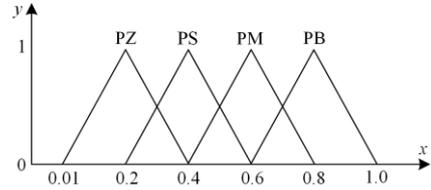


图5 输入伸缩因子 α_e 和 α_{ec} 的隶属函数

Fig. 5 Membership functions of input contraction-expansion factors α_e and α_{ec}

式中: $P_n = (p_1, p_2, \dots, p_n)^T$; K_I 以及 $\beta(0)$ 均为可调参数。

表1 输入伸缩因子 α_e 和 α_{ec} 的模糊推理规则

Table 1 Fuzzy reasoning rules for input contraction-expansion factors α_e and α_{ec}

α_e, α_{ec}	e_c						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PM	PB	PB
NM	PB	PM	PS	PS	PS	PM	PB
NS	PM	PS	PS	PZ	PS	PS	PM
e	ZE	PS	PS	PZ	PZ	PS	PS
PS	PM	PS	PS	PZ	PS	PS	PM
PM	PB	PM	PS	PS	PS	PM	PB
PB	PB	PB	PM	PM	PM	PB	PB

2.3 变论域模糊PI负荷频率控制器设计

变论域模糊PI负荷频率控制器的基本结构如图6所示,该控制器由经典PI控制器、模糊推理环节和论域调整(即变论域)环节三部分组成。VUFPI控制器的设计流程如下:

1) 设计PI控制算法,并确定初始比例系数 K_{p0} 和积分系数 K_{i0} ;

2) 确定误差 e 、误差变化率 e_c 、比例系数调节量 ΔK_p 和积分系数调节量 ΔK_i 的隶属函数。由于VUFPI控制器有论域可调整特性,所以隶属函数可

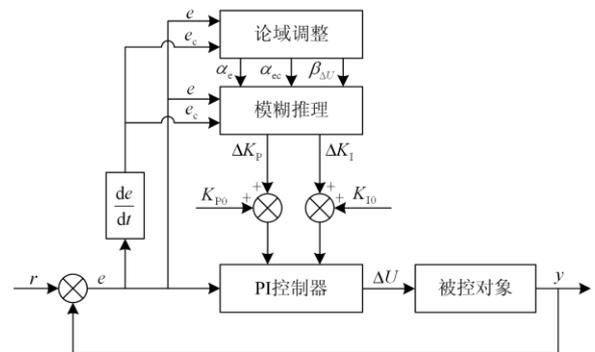


图6 变论域模糊PI控制器结构示意图

Fig. 6 Structure diagram of variable universe fuzzy PI controller

采用形式简单的三角型隶属函数, e 和 e_c 的隶属函数如图 7 所示, ΔK_p 和 ΔK_i 的隶属函数如图 8 所示;

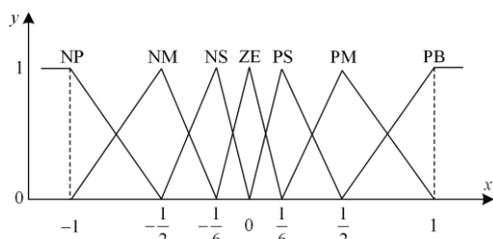


图 7 误差 e 和误差变化率 e_c 的隶属函数

Fig. 7 Membership functions of error e and its rate of change e_c

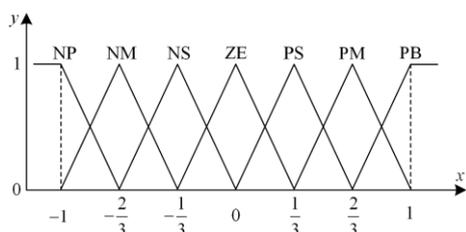


图 8 比例参数调节量 ΔK_p 和积分参数调节量 ΔK_i 的隶属函数

Fig. 8 Membership functions of proportional parameter adjustment ΔK_p and integral parameter adjustment ΔK_i

3) 制定模糊 PI 控制器的模糊推理规则。模糊推理规则反映了不同误差值和不同误差变化率下 PI 参数的整定规律, 由于 VUFPI 控制器可以实现模糊规则的动态调整, 所以模糊规则只需体现出大致的控制规律, 并不会因某几条模糊规则制定的不准确就导致控制品质的严重下降, ΔK_p 和 ΔK_i 的模糊推理规则分别如表 2、表 3 所示;

4) 设计变论域环节的论域调整规则, 即如 2.2 节所示设计变论域伸缩因子。

表 2 比例参数调节量 ΔK_p 的模糊推理规则

Table 2 Fuzzy logic rules for proportional parameter adjustment ΔK_p

ΔK_p	e_c						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZE	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NS
e ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZE	ZE	NM	NM	NM	NB	NB

表 3 积分参数调节量 ΔK_i 的模糊推理规则

Table 3 Fuzzy logic rules for integral parameter adjustment ΔK_i

ΔK_i	e_c						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	ZE
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZE	ZE
NS	NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
e ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZE	PS	PS	PM	PB
PM	ZE	ZE	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZE	ZE	PS	PM	PM	PB	PB

变论域模糊 PI 负荷频率控制算法如下:

1) 对误差 e 进行采样, 计算误差变化率 e_c , 并对二者进行归一化处理, 将二者映射到 $[-1,1]$;

2) 根据某一时刻的 e 和 e_c , 并通过模糊推理得到该时刻 e 的输入伸缩因子 α_e 和 e_c 的输入伸缩因子 α_{e_c} , 并根据式(5)得到控制量 ΔU 的输出伸缩因子 $\beta_{\Delta U}$;

3) 输入伸缩因子 α_e 和 α_{e_c} 分别以倒数形式乘以误差 e 和误差变化率 e_c ;

4) 通过模糊推理得到 ΔK_p 和 ΔK_i , 经反归一化后叠加到该时刻的 PI 控制参数上, 得到更新的 PI 控制参数 K_p 和 K_i ;

5) 经 PI 控制器输出的控制量乘以输出伸缩因子 $\beta_{\Delta U}$, 得到实际控制量 ΔU 。

3 仿真实验

3.1 仿真参数

为验证所提出的变论域模糊 PI 负荷频率控制器的有效性, 以典型的两区域互联电力系统进行仿真, 仿真参数如表 4 所示。传统机组采用非热式火电机组, 风电机组采用双馈式机组; 区域 1 火电容量为 700 MW, 风电容量为 700 MW, 负荷为 1 075 MW, 区域 2 火电机组容量为 1 410 MW, 负

表 4 仿真参数

Table 4 Simulation parameters

参数名称	区域 1	区域 2
$B/(p.u./Hz)$	0.343	0.428
$R/(Hz/p.u.)$	3.0	2.4
T_g/s	0.07	0.08
T_i/s	0.36	0.30
M/s	10	8.25
$D/(p.u./Hz)$	0.010	0.011
$T_{12}/(p.u./Hz)$	0.545	

荷为 960 MW；对频率敏感的负荷采用电动机模型，对频率不敏感的负荷采用电阻模型。利用 Matlab/Simulink 进行阶跃负荷扰动以及随机负荷扰动、风功率偏差扰动以及叠加扰动实验，并与采用相同初始控制参数的传统 PI 负荷频率控制器和采用相同控制规则的模糊 PI 负荷频率控制器进行对比。在以下仿真图例中，将变论域模糊 PI 控制器、模糊 PI 控制器、PI 控制器分别标记为“VU”、“FL”、“PI”。

3.2 阶跃负荷扰动实验

为测试 VUFPI 控制器的动态性能，进行如图 9 所示的阶跃负荷扰动实验，在第 1 s 时，区域 1 受到 0.015 p.u.的阶跃负荷扰动，在第 20 s 时，区域 2 受到 0.01 p.u.的阶跃负荷扰动。变论域模糊 PI、模糊 PI 和传统 PI 控制器在阶跃负荷扰动下的响应曲线如组图 10 所示。

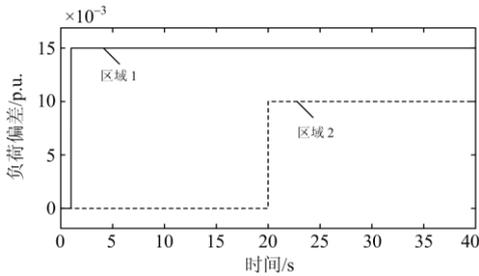


图 9 阶跃负荷扰动

Fig. 9 Step load disturbance

在阶跃负荷扰动下，采用不同控制器时区域 1 的频率偏差如图 10(a)所示，可以看到区域 1 在受到第一次负荷扰动后，采用 VUFPI 控制器时的频率偏差振荡次数是 4 到 5 次，采用模糊 PI 控制器时的频率偏差振荡次数是 9 到 10 次，而采用传统 PI 控制器的振荡次数则更多。区域 2 的频率偏差如图 10(b)所示，可以看到区域 2 在受到第二次负荷扰动后，采用 VUFPI 控制器时的频率偏差振荡次数是 2 到 3 次，采用模糊 PI 控制器时的频率偏差振荡次数是 5 到 6 次。从图 10(c)和 10(d)可以看到，当系统受到负荷扰动后，模糊 PI 控制器的超调量都比较大，这反映出所采用的模糊控制器的控制规则和模糊集合划分并不十分精确，而采用同样控制规则和模糊划分的 VUFPI 控制器的超调量明显小于模糊 PI 控制器，这体现出变论域策略的优势，变论域模糊控制器具有论域自适应调整能力，所以降低了对模糊集合划分精度和模糊规则数量的要求。传统的模糊控制器由于论域固定，很难同时兼顾超调量和调节时间这两大时域控制指标；而变论域模糊控制凭借变论域策略在超调量和调节时间上均表现良好，实现了误差的快速稳定收敛。

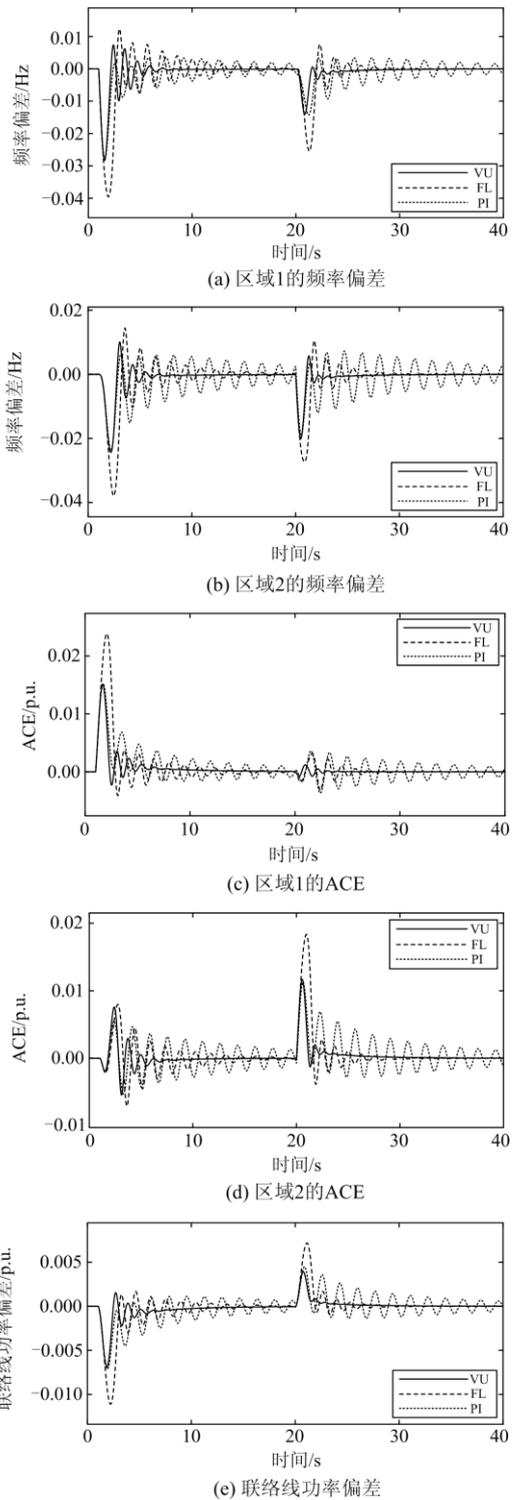


图 10 阶跃负荷扰动下不同控制器的响应曲线对比

Fig. 10 Comparison of respond curves with different controllers under step load disturbance

3.3 随机负荷扰动实验

为测试 VUFPI 控制器在随机负荷扰动下的控

制表现, 进行如图 11 所示的随机负荷扰动实验, 变论域模糊 PI、模糊 PI 和传统 PI 控制器在随机负荷扰动下的响应曲线如组图 12 所示。

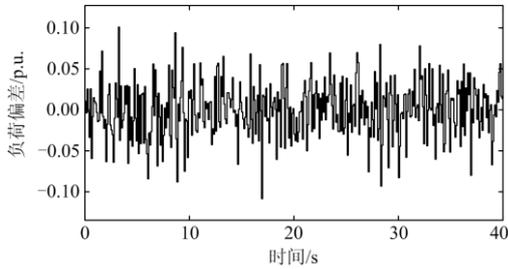
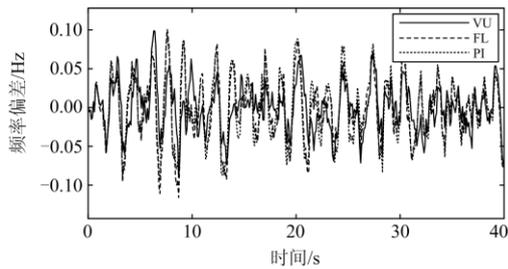
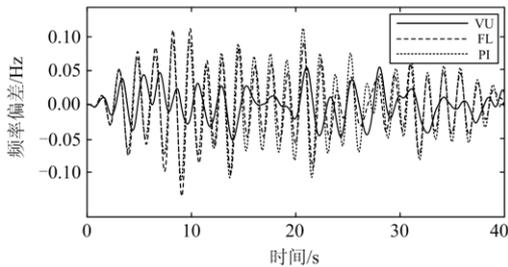


图 11 随机负荷扰动

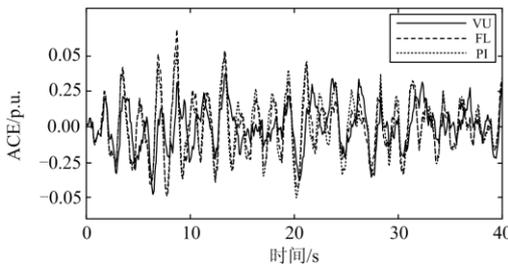
Fig. 11 Random load disturbance



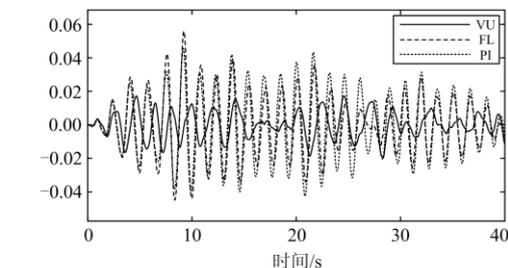
(a) 区域1的频率偏差



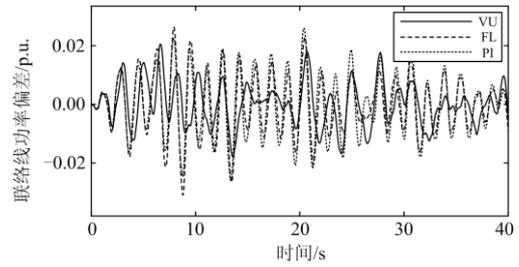
(b) 区域2的频率偏差



(c) 区域1的ACE



(d) 区域2的ACE



(e) 联络线功率偏差

图 12 随机负荷扰动下不同控制器的响应曲线对比

Fig. 12 Comparison of respond curves with different controllers under random load disturbance

由图(12)可知, 对比模糊 PI 控制器, 采用 VUFPI 控制器时区域 1 的频率偏差积分值被降低了 25.8%, 区域 2 的频率偏差积分值被降低了 50.8%, 区域 1 和区域 2 之间的联络线功率偏差被降低了 30.0%。可以看出, 在随机负荷扰动下, VUFPI 控制器与模糊 PI 控制器和 PI 控制器相比, 有更好的控制表现, 有效地抑制了系统频率波动, 并限制了联络线交换功率。

3.4 风功率偏差扰动实验

在两区域互联电力系统中, 区域 1 受到如图 13 所示的实际输出风功率与预测输出风功率的偏差扰动。变论域模糊 PI、模糊 PI 和传统 PI 控制器在风功率偏差扰动下的响应曲线如组图 14 所示。

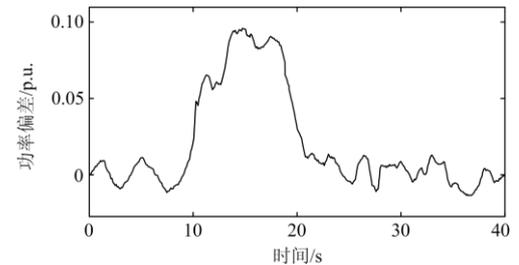


图 13 风功率偏差扰动

Fig. 13 Wind power deviation disturbance

由图 14(a)可知, 采用 PI 控制器和模糊 PI 控制器时区域 1 的最大频率偏差出现在第 13 s 和第 14 s 之间, 分别为 -0.090 Hz 和 -0.081 Hz; 而采用 VUFPI 控制器时区域 1 的最大频率偏差出现在第 10 s 附近, 只有 -0.045 Hz。这体现出 VUFPI 控制器具有快速响应调节能力。在第 20 s 后, 采用 VUFPI 控制器, 区域 1 和 2 的频率偏差基本被维持在 -0.01 Hz 到 0.01 Hz 之间; 而无论采用模糊 PI 控制器还是 PI 控制器, 在第 20 s 过后区域 1 和 2 的频率仍存在较大偏差。这体现出 VUFPI 控制器论域可调整的优势, 通过论域调整可以适应不同的误差等级, 保持误差分辨率始终处于合理的范围。变论域环节根据

误差及误差变化率实时调整输入论域和输出论域的大小，相当于实现了模糊集合的动态划分，模糊控制规则也可以根据需求变得“稠密”或“稀疏”，

提升了控制器的自适应能力，能更好地处理风电出力不确定性对互联电力系统频率稳定的影响。

3.5 叠加扰动实验

为测试 VUFPI 控制器在更复杂扰动工况下的控制表现,进行负荷和风功率偏差的叠加扰动实验:区域 1 在受到如图 13 所示的风功率偏差扰动的同时,在第 15 s 和第 30 s 时分别受到 0.05 p.u.和 -0.05 p.u.的阶跃负荷扰动;区域 2 在第 5、15、25、35 s 时分别受到 0.01 p.u.、0.03 p.u.、-0.02 p.u.、-0.02 p.u.的阶跃负荷扰动。变论域模糊 PI、模糊 PI 和传统 PI 控制器在叠加扰动下的响应曲线如图 15 所示。

由图 15(a)、(b)可知,区域 1、2 的最大频率偏差均出现在第 15 s 左右,采用 VUFPI 控制器,区域 1、2 的最大频率偏差分别为 -0.066 Hz、-0.092 Hz;采用模糊 PI 控制器,区域 1、2 的最大频率偏差分别为 -0.143 Hz、-0.138 Hz;采用 PI 控制器,区域 1 和 2 的最大频率偏差分别为 -0.172 Hz、-0.155 Hz。如图 15(e)所示,在叠加扰动下,采用 VUFPI 控制器的联络线功率偏差明显小于模糊 PI 控制器和 PI 控制器,基本维持在 -0.013 p.u.到 0.011 p.u.

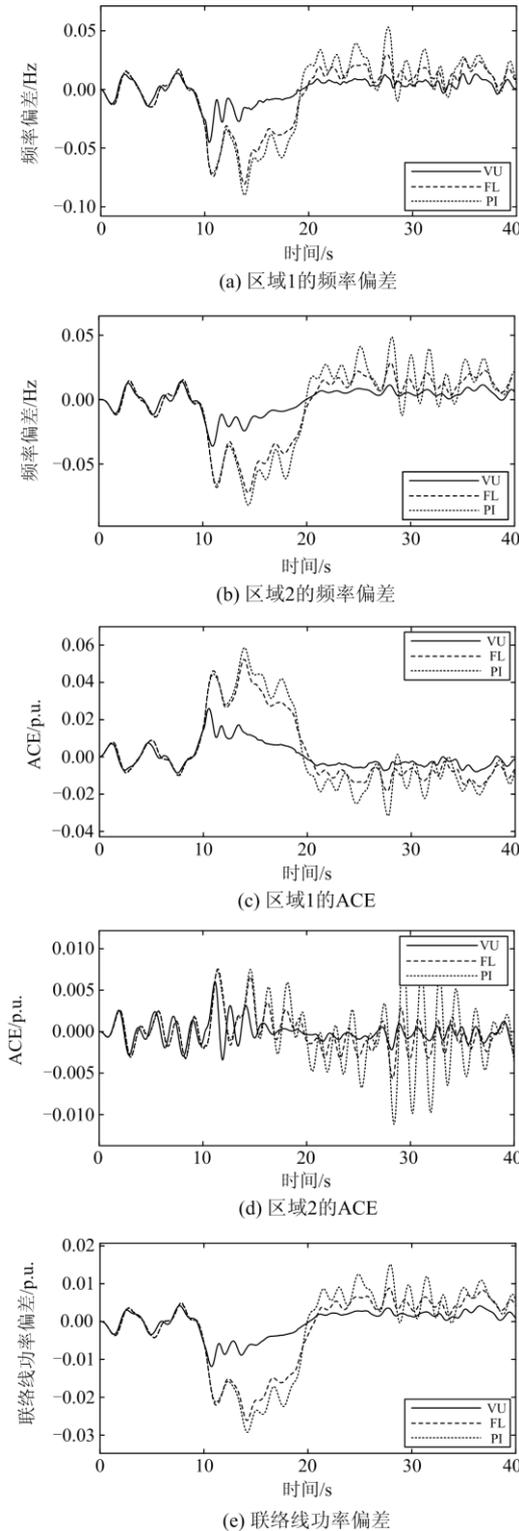
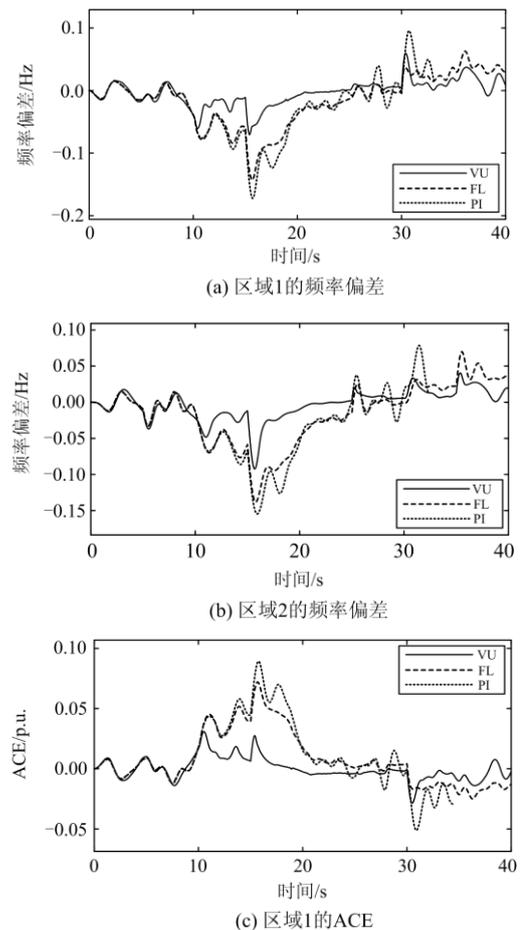


图 14 风功率偏差扰动下不同控制器的响应曲线对比

Fig. 14 Comparison of respond curves with different controllers under wind power deviation disturbance



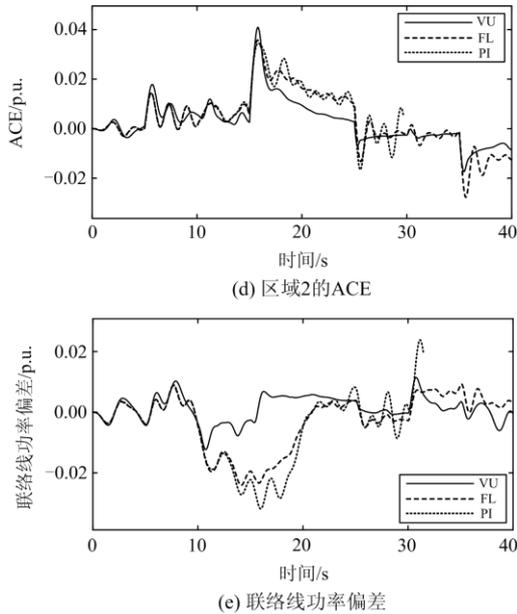


图 15 叠加扰动下不同控制器的响应曲线对比

Fig. 15 Comparison of respond curves with different controllers under superposition disturbance

之间。在负荷和风功率偏差的叠加扰动工况下，VUFPI 控制器可以很好地处理负荷不确定性和风电不确定性对互联电力系统频率稳定的影响。

4 结论

针对风电接入互联电力系统后其出力不确定性对系统频率的不利影响，本文提出一种新型变论域模糊 PI 负荷频率控制策略。基于该策略设计的控制器在经典 PI 控制和模糊控制的基础上，引入变论域思想，实现了论域的动态调整；为满足风电等新能源接入后复杂的论域调整需求，基于模糊推理设计了新型变论域伸缩因子，该伸缩因子适用于复杂的非线性控制过程，提升了控制器应对复杂扰动的能力。仿真结果表明，在阶跃负荷扰动、随机负荷扰动、风功率偏差扰动和叠加扰动下，新型变论域模糊 PI 负荷频率控制器较 PI 负荷频率控制器和模糊 PI 负荷频率控制器有更好的控制表现。为简化设计，本文未对新能源机组参与调频作单独考虑，其对频率控制的影响研究有待于进一步开展。

参考文献

[1] FERNÁNDEZ-GUILLAMÓN A, GÓMEZ-LÁZARO E, MULJADI E, et al. Power systems with high renewable energy sources: a review of inertia and frequency control strategies over time[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 115.

[2] 余希瑞, 周林, 郭珂, 等. 含新能源发电接入的电力系

统低频振荡阻尼控制研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21): 6278-6290.

YU Xirui, ZHOU Lin, GUO Ke, et al. A survey on low frequency oscillation damping control in power system integrated with new energy power generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21): 6278-6290.

[3] YAN R, SAHA T K, BAI F, et al. The anatomy of the 2016 South Australia blackout: a catastrophic event in a high renewable network[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5374-5388.

[4] 邓争, 刘国荣, 张真源, 等. 基于虚拟同步机的双馈风电机组自适应控制[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(8): 73-81.

DENG Zheng, LIU Guorong, ZHANG Zhenyuan, et al. Adaptive control of doubly-fed wind turbines based on virtual synchronizer[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(8): 73-81.

[5] 赵晟凯, 邹欣, 李旭霞, 等. 直驱风电系统自适应惯量和一次调频协调控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(9): 76-84.

ZHAO Shengkai, ZOU Xin, LI Xuxia, et al. Adaptive Inertia and primary frequency modulation coordinated control strategy of PMSG system[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(9): 76-84.

[6] 代林旺, 李少林, 秦世耀, 等. 含阻尼环节的电流源型风电虚拟同步发电机控制与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 20-27.

DAI Linwang, LI Shaolin, QIN Shiyao, et al. Control and analysis of current-source wind turbine virtual synchronous generator with damping coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 20-27.

[7] LEE J, MULJADI E, SRENSSEN P, et al. Releasable kinetic energy-based inertial control of a DFIG wind power plant[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 7(1): 279-288.

[8] 桑丙玉, 姚良忠, 李明杨, 等. 基于二阶锥规划的含大规模风电接入的直流电网储能配置[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 86-94.

SANG Bingyu, YAO Liangzhong, LI Mingyang, et al. Research on energy storage system planning of DC grid with large-scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 86-94.

[9] 武鑫, 滕伟, 柳亦兵. 电网调频型飞轮储能系统自适应鲁棒充电控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 56-61.

WU Xin, TENG Wei, LIU Yibing. Study on adaptive robust charge control of flywheel energy storage system for grid frequency adjustment[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 56-61.

- [10] OJAGHI P, RAHMANI M. LMI-based robust predictive load frequency control for power systems with communication delays[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 4091-4100.
- [11] XIONG L, LI H, WANG J. LMI based robust load frequency control for time delayed power system via delay margin estimation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 100: 91-103.
- [12] LÜ X, SUN Y, CAO S, et al. Event-triggered load frequency control for multi-area power systems based on Markov model: a global sliding mode control approach[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(21): 4878-4887.
- [13] MU C, TANG Y, HE H. Improved sliding mode design for load frequency control of power system integrated an adaptive learning strategy[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(8): 6742-6751.
- [14] LIU X, ZHANG Y, LEE K Y. Coordinated distributed MPC for load frequency control of power system with wind farms[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 64(6): 5140-5150.
- [15] 张虹, 杨杨, 王迎丽, 等. 基于 PDNN 的含风电互联网网负荷频率 Tube-RMPC 设计[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(12): 137-146.
ZHANG Hong, YANG Yang, WANG Yingli, et al. Tube robust model predictive control of load frequency for an interconnected power system with wind power based on PDNN[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(12): 137-146.
- [16] ZHANG X S, YU T, PAN Z N, et al. Lifelong learning for complementary generation control of interconnected power grids with high-penetration renewables and EVs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 33(4): 4097-4110.
- [17] 左剑, 谢平平, 李银红, 等. 基于智能优化算法的互联网网负荷频率控制器设计及其控制性能分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(3): 478-489.
ZUO Jian, XIE Pingping, LI Yinhong, et al. Intelligent optimization algorithm based load frequency controller design and its control performance assessment in interconnected power grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(3): 478-489.
- [18] ABDELAZIZ A Y, ALI E S. Cuckoo search algorithm based load frequency controller design for nonlinear interconnected power system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 73: 632-643.
- [19] 崔红芬, 杨波, 蒋叶, 等. 基于模糊控制和 SOC 自恢复储能参与二次调频控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 89-97.
CUI Hongfen, YANG Bo, JIANG Ye, et al. Strategy based on fuzzy control and self adaptive modification of SOC involved in secondary frequency regulation with battery energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 89-97.
- [20] 李洪兴. Fuzzy 控制的本质与一类高精度 Fuzzy 控制器的设计[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(6): 868-872.
LI Hongxing. The essence of fuzzy control and a kind of fine fuzzy controller[J]. Control Theory and Applications, 1997, 14(6): 868-872.
- [21] 李洪兴. 从模糊控制的数学本质看模糊逻辑的成功——关于“关于模糊逻辑似是而非的争论”的似是而非的介入[J]. 模糊系统与数学, 1995, 9(4): 1-14.
LI Hongxing. To see the success of fuzzy logic from mathematical essence of fuzzy control — on the paradoxical success of fuzzy logic[J]. Fuzzy Systems & Mathematics, 1995, 9(4): 1-14.
- [22] BANAKAR H, OOI B T. Clustering of wind farms and its sizing impact[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(4): 935-942.
- [23] 穆钢, 崔杨, 严干贵. 确定风电场群功率汇聚外送输电容量的静态综合优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 15-19.
MU Gang, CUI Yang, YAN Gangui. A static optimization method to determine integrated power transmission capacity of clustering wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 15-19.
- [24] LUO C, OOI B T. Frequency deviation of thermal power plants due to wind farms[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 708-716.
- [25] 李洪兴. 变论域自适应模糊控制器[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 1999(1): 3-5.
LI Hongxing. Adaptive fuzzy controllers based on variable universe[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 1999(1): 3-5.
- [26] LI H, MIAO Z, LEE E S. Variable universe stable adaptive fuzzy control of a nonlinear system[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2002, 44(5-6): 799-815.

收稿日期: 2020-10-17; 修回日期: 2021-01-08

作者简介:

李志军(1964—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: zhijun_li@263.net

王 硕(1996—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统稳定分析与控制。E-mail: 201832502006@stu.hebut.edu.cn

(编辑 姜新丽)