

多区域互联电网的分散式 模糊 PID 负荷频率控制

项雷军, 王涛云, 郭新华

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为了有效改善多区域互联电网的动态稳定性,提出一种分散式模糊 PID 负荷频率控制方法.该方法为互联电网每个区域设计一个模糊 PID 控制器,以区域频率偏差和联络线功率偏差为控制目标,根据区域控制偏差的变化量,运用模糊推理,在线修正 PID 调节参数,从而控制互联电网快速趋于动态稳定.针对三区域环型互联电网,考虑发电速率的限制,对其负荷扰动和模型参数摄动进行仿真.结果表明:与传统 PID 算法相比较,所提出的方法具有更强的适应性、鲁棒性及扰动抑制能力,能使系统取得更好的动态控制性能.

关键词: 互联电网; 多区域; 模糊 PID 控制; 负荷频率; 分散控制; 动态稳定性

中图分类号: TM 76

文献标志码: A

互联电网的负荷频率控制是保障互联电网安全、可靠、经济运行的重要手段^[1].互联电网在其发展初期,由于系统规模小和控制要求低,负荷频率控制主要采用集中式传统 PID 控制方法.随着现代社会对电能需求的不断提高,现代互联电网的发展规模越来越大,且构成大型互联电网的各个区域相互连接复杂^[2].尤其在解除管制后的电力市场背景下,集中式传统控制方法受到严重挑战,它不仅难以达到电网控制性能标准考核的要求,而且从互联电网地域分布广阔和计算复杂度角度考虑,不利于各子系统的实施维护和扩展.因此,有关互联电网负荷频率控制问题受到越来越多的关注,先后有诸多控制方法被提出,如滑模变结构^[3]、改进的 PID 控制^[4]、神经网络^[5-7]、粒子群算法^[8]、遗传算法^[9-10]和预测控制^[11-13]等.上述方法虽然在一定程度上解决了系统高度不确定性导致难以控制的问题,但均存在控制方法实现困难、复杂,受限制条件较多.而且,由于解除管制后的电网系统模型发生变化,各控制区域间的耦合关联特性增强,实际系统的结构变得更加复杂,因而系统通过上述方法往往并不能取得良好的动态稳定性,达不到预期的控制效果.目前,大多数互联电网是通过自动发电控制(automatic generation control, AGC)来调节系统频率和联络线交换功率的^[14].综合传统 PID 控制和模糊控制二者的优点,本文提出一种多区域互联电网 AGC 系统的分散式模糊 PID 负荷频率控制方法.

1 互联电网 AGC 系统动态模型

互联电网 AGC 系统大多主要由发电机、汽轮机、调速器及负荷等构成,包含主、辅两个频率控制回路^[2].再热式火电机组互联电网的 AGC 系统负荷频率控制原理,如图 1 所示.

在实际中,多区域互联电网通常呈现高度非线性与时变特征,需要控制各个区域的发电频率偏差和各联络线交换功率偏差,这是一个复杂的多变量被控对象.互联电网动态稳定性问题的研究通常是基于系统在某个合适的工作点下的线性化模型,其参数是固定的^[15].由于出现小干扰时,电网本身并没有远离线性化模型,只是在其附近波动,因此可忽略系统非线性成分,建立互联电网 AGC 系统简化后的低阶线性化模型.

收稿日期: 2013-07-29

通信作者: 项雷军(1979-),男,讲师,主要从事电力系统先进控制和复杂工业系统的建模与优化控制的研究. E-mail: ljxiang@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2013J01198);福建省泉州市科技计划项目(2013Z32)

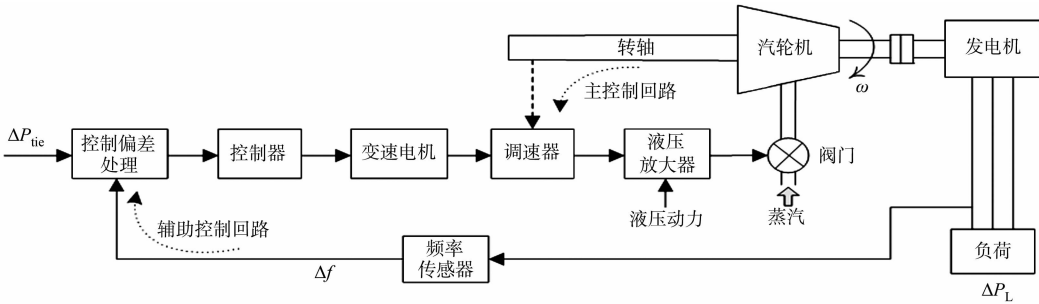


图 1 AGC 系统负荷频率控制原理图

Fig. 1 Schematic diagram of AGC system with load frequency control loops

互联电网的整个系统可以分解成多个控制区域,区域之间的联络线为各区域提供功率交换,而每个区域由众多的发电机和负荷组成.一个区域中所有的发电机可采用集中参数等效表示成单一的发电机组模型,对于所有的负荷可同样采用集中参数等效表示成单一的负荷,而每个区域视为由一台发电机组与一个阻抗负荷串联组成^[12].一般情况下,互联电网的 AGC 系统的某个控制区域 i 的连续时间线性动态模型,可用状态空间表达式综合描述为

$$\left[\begin{array}{c} \frac{d\Delta f_i}{dt} \\ \frac{d\Delta P_{m,i}}{dt} \\ \frac{d\Delta P_{v,i}}{dt} \\ \frac{d\Delta P_{tie}^{i,j}}{dt} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{cccc} -\frac{D_i}{T_{p,i}} & \frac{1}{T_{p,i}} & 0 & -\frac{1}{T_{p,i}} \\ 0 & -\frac{1}{T_{T,i}} & \frac{1}{T_{T,i}} & 0 \\ -\frac{1}{T_{G,i}R_{f,i}} & 0 & -\frac{1}{T_{G,i}} & 0 \\ 2\pi T_{i,j} & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \Delta f_i \\ \Delta P_{m,i} \\ \Delta P_{v,i} \\ \Delta P_{tie}^{i,j} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{cc} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ T_{G,i} & 0 \\ 0 & -2\pi T_{i,j} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \Delta P_{ref,i} \\ \Delta f_j \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} -\frac{1}{T_{p,i}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right] \Delta P_{L,i}, \quad (1)$$
$$y = ACE_i = [B_i \quad 0 \quad 0 \quad 1] \cdot [\Delta f_i, \Delta P_{m,i}, \Delta P_{v,i}, \Delta P_{tie}^{i,j}]^T.$$

式(1)中: Δf_i 表示发电机组输出电压频率偏差; $T_{p,i}$ 表示发电机组时间常数; D_i 表示负荷调节系数; $T_{T,i}$ 表示汽轮机时间常数; $T_{G,i}$ 表示调速器时间常数; $R_{f,i}$ 表示发电机组下垂特性系数; B_i 表示区域控制的频率偏差系数; $T_{i,j}$ 表示区域间联络线功率同步系数; $\Delta P_{m,i}$ 表示汽轮机输出功率变化量; $\Delta P_{v,i}$ 表示调速器位置增量; $\Delta P_{L,i}$ 表示受扰动前后区域负荷变化量即扰动负荷; $\Delta P_{ref,i}$ 表示区域负荷参考设定值的变化量; $\Delta P_{tie}^{i,j}$ 表示区域间联络线交换功率偏差.

2 AGC 系统模糊 PID 控制器设计

简单有效是设计工业过程智能控制器的基本策略.传统 PID 控制算法稳态控制精度高、容易实现,但对于参数不确定、非线性的被控对象,其 PID 控制参数难以整定,且振荡严重、响应速度慢、稳定性差,难以获得理想的控制性能^[16].模糊控制算法不需要被控对象精确数学模型,控制参数可在线自动调整,鲁棒性强,动态性能好,能有效削弱外界干扰和参数摄动对控制效果的影响,适合于时变时滞和非线性不确定性系统的控制^[17].

将传统 PID 控制与模糊控制相结合,为互联电网每个区域 AGC 系统设计一个二维模糊 PID 控制器,如图 2 所示.模糊 PID 控制器主要包括参数可调 PID 控制器和模糊控制器两部分,前者实现对系统的控制,后者实现包含模糊化、建立模糊控制规则、模糊推理、解模糊化四个过程.控制器以区域控制偏差 ACE_i 和区域控制偏差变化率 ΔACE_i 作为输入,而输出是 PID 调节参数的变化量即 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$.当有负荷扰动或系统参数偏移时引起输入量偏离设定值时,控制器将根据模糊控制规则,运用模

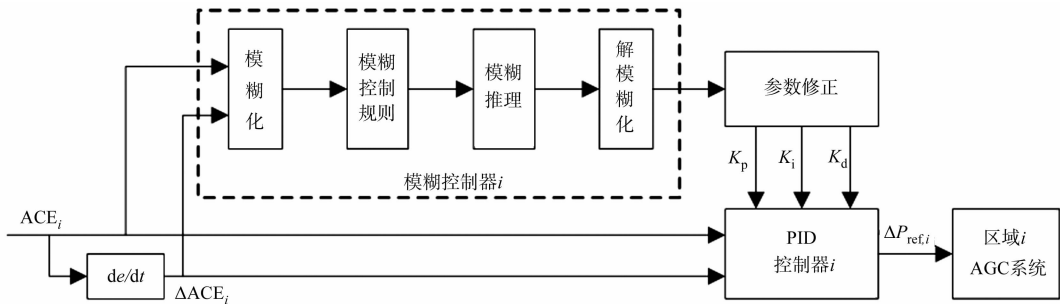


图 2 AGC 系统模糊 PID 控制器结构图

Fig. 2 Block diagram of fuzzy-PID controller in AGC system

糊推理,对 PID 参数 K_p, K_i 和 K_d 进行在线修正,以满足调节参数的不同要求,达到调整输出控制量 $\Delta P_{\text{ref},i}$,有效抑制负荷扰动或系统参数偏移对控制效果的影响,使互联电网 AGC 系统取得良好的动态稳定性能。

依据模糊 PID 控制器的控制规律,兼顾控制精度,将输入量 $ACE_i, \Delta ACE_i$ 和输出量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 的模糊子集均表示为 $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZE}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$ 。根据控制要求,将各个输入和输出变量的论域均量化为 13 个等级,即 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。结合互联电网 AGC 系统负荷频率控制特性,各输入变量采用高斯型隶属函数,各输出变量采用三角形隶属函数。

模糊控制规则的设计是系统取得良好控制性能的关键。根据 PID 调节参数 K_p, K_i, K_d 对系统输出特性的不同影响,归纳出对不同的 ACE_i 和 ΔACE_i ,以及系统在被控过程中参数 K_p, K_i, K_d 的自整定原则。然后,结合以往的电网负荷频率控制经验,制定出 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 的模糊控制规则,如表 1 所示。

表 1 参数模糊控制规则表

Tab. 1 Parameters fuzzy control rule table

ΔACE_i	ACE_i																							
	ΔK_p								ΔK_i								ΔK_d							
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB			
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	ZE	PS	NS	NB	NB	NB	NB	NM	PS		
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZE	NS	NB	NB	NM	NS	NS	ZE	ZE	PS	NS	NB	NM	NM	NM	NS	ZE		
NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NS	NB	NB	NS	NS	ZE	PS	PS	ZE	NS	NM	NM	NS	NS	ZE			
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM	ZE	NS	NS	NS	NS	NS	ZE			
PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM	NM	NM	ZE	PS	PS	PM	PB	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE			
PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NM	NB	ZE	ZE	PS	PS	PM	PB	PB	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB			
PB	ZE	ZE	NM	NM	NM	NB	NB	ZE	ZE	PS	PM	PM	PB	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB			

应用 Mamdani 模糊合成推理法进行模糊推理,并采用均值判决法解模糊。由输入区域控制偏差 ACE_i 和偏差变化率 ΔACE_i ,参照上述模糊规则表获得 PID 控制器调节参数的修正值 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$;然后,分别代入 $K_p = K_{p,0} + \Delta K_p, K_i = K_{i,0} + \Delta K_i, K_d = K_{d,0} + \Delta K_d$,对 PID 控制器调节参数进行在线实时修正。其中: $K_{p,0}, K_{i,0}, K_{d,0}$ 为传统 PID 控制器的初始参数。

最后,得到 AGC 系统模糊 PID 控制器的输入与输出控制量之间的关系表达式为

$$\Delta P_{\text{ref},1} = K_p (ACE_i) + K_i \int_0^t (ACE_i) dt + K_d \frac{d(ACE_i)}{dt}. \quad (2)$$

3 系统控制仿真分析

3.1 系统参数选取与仿真建模

系统仿真选用三区域环型互联电网,其接线如图 3 所示。图 3 中:区域 1,2,3 分别代表 3 个含有发电机组、输电网络和负荷的子系统。三区域环型互联电网 AGC 系统仿真模型

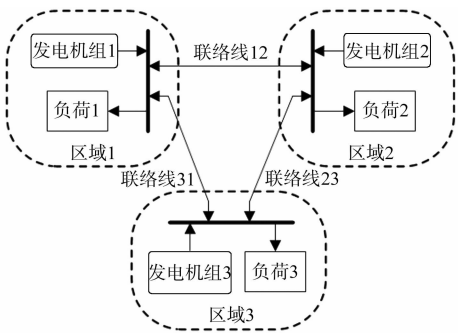


图 3 三区域环型互联电网接线图

Fig. 3 Block diagram of three-area ring interconnected power grid

参数,如表 2 所示^[15].表 2 中: P 为额定功率;参数全部采用标么值(pu),系统基准容量为 100 MW.

表 2 三区域互联电网系统模型参数表

Tab. 2 System model parameters table of three-area interconnected power grid

区域	P/MW	$T_{P,i}/\text{pu}$	D_i/pu	$T_{T,i}/\text{pu}$	$T_{G,i}/\text{pu}$	$R_{f,i}/\text{pu}$	B_i/pu	$T_{i,j}$
区域 1	120	0.161 7	0.018	0.41	0.081	2.98	0.347 0	$T_{1,2}=0.20$ $T_{1,3}=0.25$
区域 2	90	0.112 0	0.019	0.40	0.072	3.10	0.321 4	$T_{2,1}=0.20$ $T_{2,3}=0.12$
区域 3	150	0.231 1	0.015	0.44	0.083	2.86	0.389 8	$T_{3,1}=0.25$ $T_{3,2}=0.12$

在 Matlab/Simulink 仿真环境中,根据上述模型和参数,利用模糊逻辑工具箱和控制系统工具箱中的相应模块,构建三区域环型互联电网 AGC 系统仿真模型,如图 4 所示.限于篇幅,图 4 仅给出了一个代表性区域 AGC 系统的动态模型,其中 $i=1,2,3$. 系统的单步采样时间选为 0.01 s,同时在 3 个区域中考虑发电速率限制的影响,设发电速率 $v_{L,i}$ 的标么值变化范围为 $-4.5 \text{ pu} \leq v_{L,i} \leq 4.8 \text{ pu}$. 为公正比较与传统 PID 算法控制性能的差异,仿真中可将每个区域的模糊 PID 控制器切换为传统 PID 控制器,每个区域的控制器参数设置保持不变.

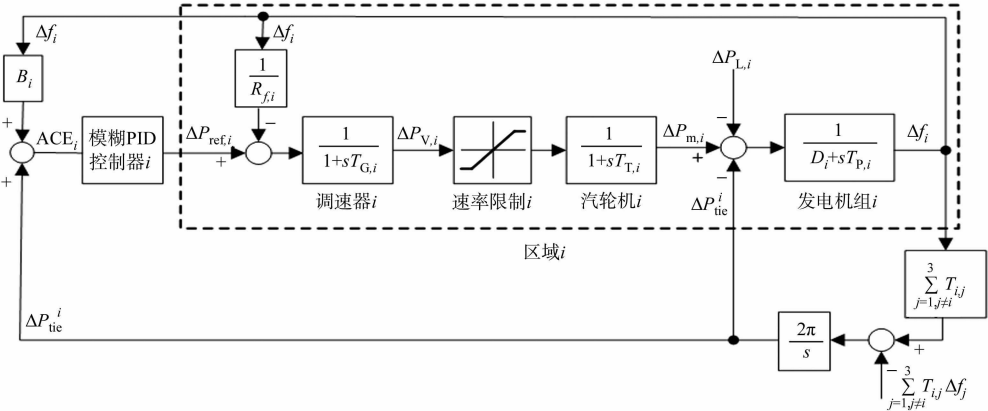


图 4 三区域环型互联电网 AGC 系统动态模型

Fig. 4 AGC system dynamic model of three-area ring interconnected power grid

3.2 仿真结果分析

3.2.1 区域负荷有较大扰动量时的情况 设系统区域 1,2,3 在 $t=5 \text{ s}$ 时,分别产生 15, $-15, 13 \text{ MW}$ 的阶跃负荷扰动并作用于各自子系统. 采用模糊 PID 算法和传统 PID 算法,分别对上述三区域环型互联电网进行仿真模拟,并比较二者动态性能差异. 针对系统各区域有较大负荷扰动,实施上述两种算法后,得到系统各区域频率偏差和联络线总交换功率偏差的对比响应曲线,分别如图 5,6 所示.

由图 5,6 可知:系统发生较大负荷扰动时,两种算法都能使系统各区域稳定,且实现对各区域频率偏差和联络线功率偏差信号的稳态无静差跟踪. 采用传统 PID 算法控制时,系统振荡剧烈,超调量较大,稳定调节时间较长;而采用模糊 PID 算法控制时,系统低频振荡被有效抑制,且动态响应时间较短,在 10 s 内恢复稳定,有更好的抗扰动性能和无静差快速稳定性,系统鲁棒性较强.

3.2.2 系统参数发生偏移时的情况 假设系统区域中发电机组参数发生偏移,即区域 1 偏移 $+10\%$,区域 2 偏移 -10% ,区域 3 无偏移,且三区域负荷在 $t=8 \text{ s}$ 时同时产生 5 MW 的较小阶跃扰动. 在系统各区域控制器参数整定值维持不变的前提下,在给定互联电网系统中,分别采用模糊 PID 算法和传统 PID 算法对系统动态特性进行仿真比较. 针对系统参数发生偏移,实施上述两种算法后,得到系统各区域频率偏差和联络线总交换功率偏差的对比响应曲线,分别如图 7,8 所示.

由图 7,8 可知:两种算法仍然都能使系统稳定,实现无静差稳态跟踪控制,且各区域频率偏差响应差异不大. 采用传统 PID 算法控制时,联络线功率偏差响应曲线存在长时振荡,过渡过程时间较长;而采用模糊 PID 算法控制时,系统振荡微小,动态调节时间较短,表现出更好的抗干扰能力,在 12 s 内系

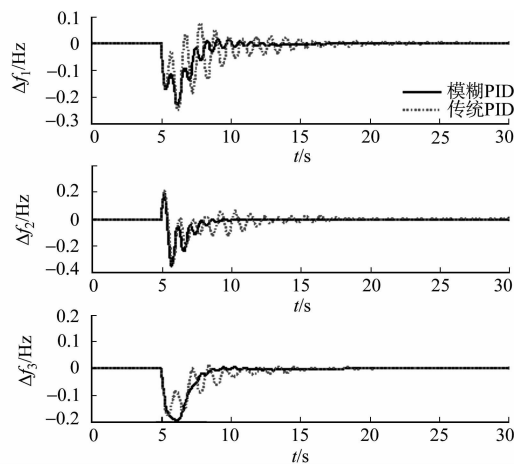


图5 负荷扰动时各区域频率偏差响应曲线

Fig. 5 Regional frequency deviation response curve at load disturbance

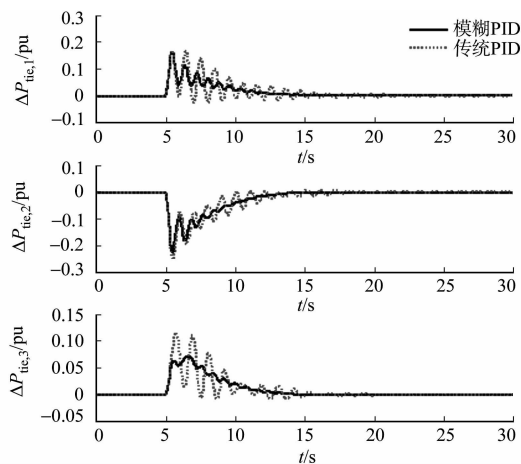


图6 负荷扰动时各区域联络线交换功率偏差响应曲线

Fig. 6 Regional tie-line exchange power deviation response curve at load disturbance

统各区域基本达到稳定,对系统参数摄动具有更好的适应性与鲁棒性。

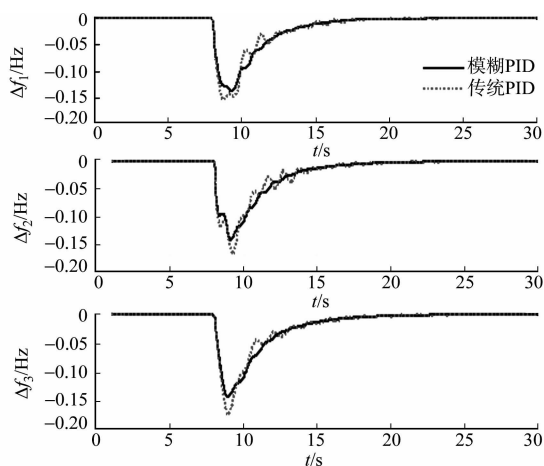


图7 参数偏移时各区域频率偏差响应曲线

Fig. 7 Regional frequency deviation response curve at parameter perturbation

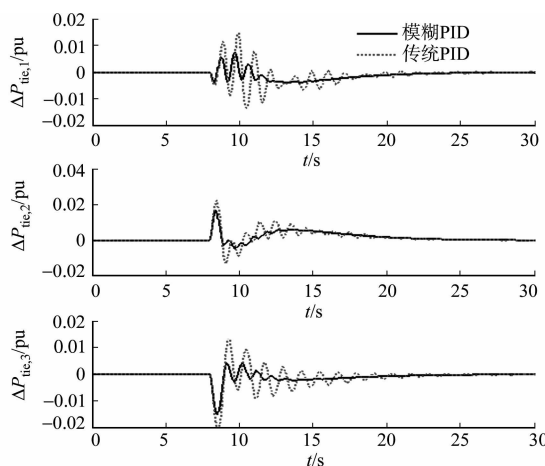


图8 参数偏移时各区域联络线功率偏差响应曲线

Fig. 8 Regional tie-line exchange power deviation response curve at parameter perturbation

4 结论

考虑发电速率限制的影响,建立了多区域互联电网 AGC 系统动态模型,并采用分散式模糊 PID 方法进行系统负荷频率控制。针对三区域环型互联电网系统,为系统每个区域设计一个模糊 PID 控制器,控制器参数设置相同,并与传统 PID 控制器一起进行了仿真模拟及比较分析。基于负荷扰动和模型参数摄动的仿真结果表明,两种控制方法均能使系统响应趋于稳定值,即频率偏差和联络线交换功率偏差为 0,进入无静差稳态运行。

相比于传统 PID 算法,分散式模糊 PID 方法能使互联电网系统具有更好的动态性能和抗干扰能力,对互联电网负荷扰动和参数摄动具有更强的适应性与鲁棒性。且所提出方法简单易于实现,有利于实际应用。因此,分散式模糊 PID 方法能满足多区域互联电网控制性能评价标准,是一种可有效提高互联电网频率控制质量的合适控制策略,具有较高的实际应用价值。

参考文献:

- [1] 高翔,严正,李端超,等. 现代电网频率控制应用技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010:12-17.
- [2] BEVRANI H. Robust power system frequency control[M]. New York:Springer,2009:8-19.

[3] 孟祥萍,薛昌飞,张化光. 多区域互联电力系统的 PI 滑模负荷频率控制[J]. 中国电机工程学报,2001,21(3):6-11.

[4] 孔繁锦,李啸骢,吴杰康,等. 基于尼科尔斯 PID 设计方法的负荷频率控制[J]. 中国电机工程学报,2012,32(22):79-85.

[5] 罗兵,章云,黄红梅. 小波神经网络与 PID 相结合的负荷频率控制[J]. 电力自动化设备,2006,26(1):25-28.

[6] 张建武,刘向杰,黄宏清. 电力市场环境下的新型负荷频率控制方法[J]. 电网技术,2008,32(12):64-69.

[7] SHAYEGHI H,SHAYANFAR H A,MALIK O P. Robust decentralized neural networks based LFC in a deregulated power system[J]. Electric Power System Research,2007,77(3/4):241-251.

[8] 刘向杰,闫冬梅. 微粒群优化负荷频率控制[J]. 电力系统及其自动化学报,2010,22(3):15-21.

[9] RERKPREEDAPONG D,HASANOVIC A,FELIACHI A. Robust load frequency control using genetic algorithms and linear matrix inequalities[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2003,18(2):855-861.

[10] DEMIROREN A,ZEYNELGIL H L. GA application to optimization of AGC in three-area power system after deregulation[J]. Electrical Power and Energy Systems,2007,29(3):230-240.

[11] 孔连芳,罗天祥,吴捷. 基于状态收缩约束的模型预测负荷频率控制[J]. 中国电机工程学报,2007,27(7):18-21.

[12] VENKAT A N,HISKENS I A,RAWLINGS J B,et al. Distributed MPC strategies with application to power system automatic generation control[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology,2008,16(6):1192-1206.

[13] 周念成,付鹏武,王强钢,等. 基于模型预测控制的两区域互联电网 AGC 系统研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(22):46-51.

[14] WOOD A J,WOLLENBERG B F. Power generation operation and control[M]. New York:Wiley,1996:486-495.

[15] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York:McGraw-Hill,1994:792-821.

[16] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2005:36-40.

[17] 李士勇. 模糊控制[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2011:50-53.

Decentralized Fuzzy-PID Based Load Frequency Control of
Multi-Area Interconnected Power Grids

XIANG Lei-Jun, WANG Tao-yun, GUO Xin-hua

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to effectively improve the dynamic stability of multi-area interconnected power grids, a load frequency control method based on decentralized fuzzy-PID algorithm is proposed in this paper. In this method, a fuzzy-PID controller is designed in each area of interconnected power grids. The control system takes the errors of the area frequency and tie-line power as control objectives. According to the variation of area control error, the PID regulating parameters are revised online by using fuzzy reasoning. And this method can make the interconnected power grid achieve dynamic stability quickly. Aiming at the three-area ring interconnected power grid, when considering generation rate limiting, load disturbance and model parameter perturbation are simulated. Simulation results show that the proposed method has stronger adaptability, robustness and disturbance rejection ability. And can make the system obtain better dynamic control performance in contrast with the traditional PID method.

Keywords: interconnected power grid; multi-area; fuzzy-PID control; load frequency; decentralized control; dynamic stability

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴逢铁)