

DOI: 10.7667/PSPC160504

基于改进模糊控制的发电系统频率调节研究

鲁尔洁¹, 陈 峦¹, 李 坚¹, 姚 亮¹, 郑 彬², 莫 槿滔¹

(1. 电子科技大学能源科学与工程学院, 四川 成都 611731; 2. 国网四川省电力公司
天府新区供电公司, 四川 成都 610041)

摘要: 在传统的电网频率控制系统中, 常采用 PI 控制方式进行频率的调节, 但存在调节时间较长、超调量较大等缺点, 引入模糊控制理论对其进行改进。以常规发电机组为研究对象, 为了提高频率调节性能, 设计出具有模糊 PID 复合结构的控制器, 根据频率偏移的幅度自适应调节其控制参数。通过在 Simulink 中搭建水-火多机组仿真模型, 加入模糊 PID 控制器进行改进, 对该系统频率调节进行仿真实验分析。仿真结果及数据分析验证了该方案的可行性, 与传统的频率调节相比, 改进模糊控制的发电系统提高了频率调节的动态响应, 减小了稳态误差。

关键词: 电网频率; PI 控制; 频率调节; 模糊 PID 控制; 仿真模型

Research on power system frequency regulation based on improved fuzzy control

LU Erjie¹, CHEN Luan¹, LI Jian¹, YAO Liang¹, ZHENG Bin², MO Bintao¹

(1. School of Energy Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 2. Electric Power Company of Sichuan Province Tianfu Power Supply Company, State Grid Corporation of China, Chengdu 610041, China)

Abstract: In the traditional power grid frequency control system, PI control is often adopted to adjust the frequency, while it causes some problems such as long settling time and over-shoot, so the fuzzy control theory is introduced. Taking conventional generator as the research object, to improve frequency regulatory performance, a composite structure controller of the fuzzy PID is designed which can adjust the parameters of the PID controller by itself according to the range of the frequency offset. The models of water and fire units are built in Simulink and fuzzy PID controller is joined to improve the system frequency regulation and make simulations. The result of the simulations and data analysis verify the feasibility of the plan, compared with the traditional frequency control, the fuzzy PID controller can improve the dynamic response and reduce error of the system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61304177) and Scientific Research of Sichuan Education Department (No. 15ZB0345).

Key words: grid frequency; PI control; frequency regulation; fuzzy PID control; simulation model

0 引言

在电能的生产和运送过程中, 为保证发电功率与负荷平衡, 对电力系统频率的稳定性调节至关重要, 它是保证电能质量可靠、电网安全必不可少的因素。传统的电力系统调频控制广泛采用 PI 调节, 它具有控制结构简单、调节方便等优点^[1], 但由于电网结构体系的复杂性和时变性, 当系统在正常运

行时, 其性能指标和精确度往往并不能满足要求。目前提高系统调频能力最有效的手段之一是将智能算法应用到 AGC 控制中^[2]。智能控制器自身具有较强的自适应性以及快速处理非线性关系等优点, 在处理可变条件下的控制问题方面, 它比传统的比例积分控制器性能更好。文献[3]介绍了电力系统中 AGC 的控制原理和几种常见工作方式。文献[4]提出了将模糊控制理论引入电力系统的机组调速器上以改善频率特性。在此基础上, 本文设计了模糊 PID 复合结构的控制器, 它是一种新型控制策略, 运用模糊数学的理论, 能在线调整其量化因子以适应控

基金项目: 国家自然科学基金(61304177); 四川省教育厅科研项目(15ZB0345)

制系统动态特性的变化^[5], 可以有效改善电力系统的频率调节性能。本文以常规火力机组为研究对象建立仿真模型, 分析了模糊 PID 控制参数对系统性能的影响, 并通过建立水-火多机组仿真模型进行对比实验, 验证了该控制器对系统频率调节的有效性和优越性。

1 发电系统的频率调节

1.1 电网的频率调节

频率是衡量电能质量的三大指标之一^[6], 电力系统运行时, 电网频率必须保持在 50 Hz 附近的允许范围内。为了维持频率的稳定, 确保发电与负荷的平衡, 需要对生产和消耗的有功功率进行调节。根据调节机制和达到的效果不同, 将其分为一次调频、二次调频和三次调频。

在电力系统中, 当频率偏离额定值时, 发电机组通过调速器的自动作用, 调整有功出力使频率维持在稳定值, 这种调节称为一次调频, 优点是调节速度快, 缺点是不能进行无差调节^[7]。一次调频系统主要由调速器、原动机、发电机-负荷等组成, 其模型如图 1 所示。

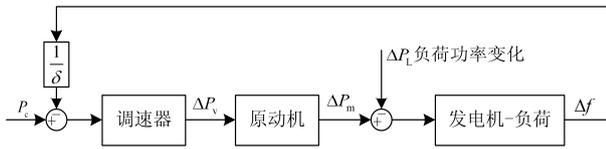


图 1 一次调频模型

Fig. 1 Primary frequency regulation model

其中 δ 为机组的调差系数, 也称为速度变化率, 它是发电机组调频能力的重要指标, 反映了频率调节能力的强弱(调差系数越小, 在负荷变化一定时, 频率偏移量越小, 说明该系统频率的稳定性越好, 反之亦然), 一般汽轮机调差系数为 4%~5%, 水轮机的调差系数为 2%~4%^[8]。

二次调频是指在一定的调节速率和可调容量下, AGC 控制策略实时跟踪频率进行调节, 维持系统频率在允许范围内。在一次调频仿真模型中加入积分环节即为二次调频模型, 如图 2 所示。

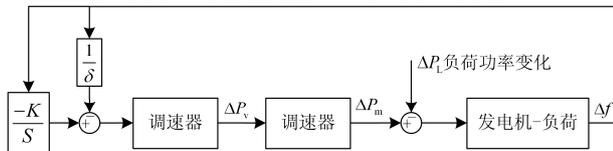


图 2 二次调频模型

Fig. 2 Secondary frequency regulation model

三次调频主要针对气象、生产等外界条件改变所引起的负荷变化, 除了对当前负荷变化进行调整

外, 还要预计未来的负荷变化并对发电功率作相应调整, 同时也要兼顾经济效益等问题。因此, 三次调频所考虑的问题和控制参数更多, 算法也更复杂。

这 3 种频率调节必须做到相互配合、协调工作, 才能保证电力系统的正常运行。

1.2 火力发电机组的频率调节

近几年, 虽然新能源的发电量比重越来越大, 但火力发电仍为总发电量的 80% 以上。火力发电的基本原理是利用燃料在锅炉中加热产生的热量, 使水形成蒸汽产生动力推动汽轮机旋转产生机械能, 发电机再将机械能转化为电能。图 3 为火力机组的频率调节模型。

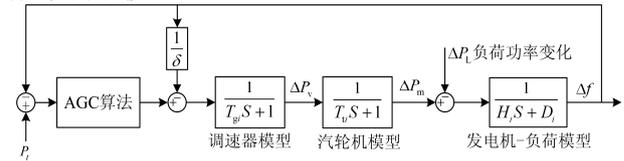


图 3 火力机组的频率调节模型

Fig. 3 Frequency regulation model of thermal unit

当外界负荷功率 ΔP_L 发生变化时, 调速器能根据负载的变化自动增减燃料供应量(调节范围有一定限制), 确保机组转速在一定范围内维持稳定。其中 T_{gi} 为调速器时间系数, 一般为 0.05~0.25 s, T_{ii} 为原动机的时间系数, 一般为 0.2~2 s, H_i 为机组的惯性时间常数, 一般为 5~10 s, D_i 为负荷频率特性系数, 一般为 1~3。

在当今的电力系统中, 为实现无差调节, 各控制区由调度中心的控制软件发出命令通过改变调速器来实现频率调整, 即自动发电控制。如图 2 中, AGC 算法采用的是积分控制, 积分控制的特点是消除剩余误差^[9]。因为积分控制器的输出与输入偏差对时间的积分成正比, 所以只要偏差存在, 输出就会一直累积, 直到偏差为零时才会停止。但是单一的积分存在控制不及时等缺点, 积分输出产生的控制作用会落后于偏差的变化, 所以一般加入比例构成比例积分 (PI) 控制。这样就能及时迅速地消除系统误差, 比例积分控制器是目前应用最为广泛的一种控制器。

在频率为 50 Hz 的火力机组控制区内, 装机容量为 1000 MW, 负荷为 900 MW, 备用容量为 100 MW, 在 5 s 时负荷增加 10 MW 容量, 我们采用三种频率调节方式进行仿真对比, 取火力机组的 $H_i = 5$, $D_i = 1$, 其他参数如表 1 所示。

按照表 1 中的数值设置模型参数, 得到相同负荷扰动下火电机组一次调频、二次调频和 PI 调频的

频率偏差曲线如图 4 所示。

表 1 发电系统的仿真模型参数

Table 1 Power generation system simulation model parameters

火力发电机组	数值	水力发电机组	数值
δ_1	4.17%	δ_2	4.17%
T_{g1}	0.1	T_{g2}	0.05
T_{r1}	0.3	T_{r2}	0.1

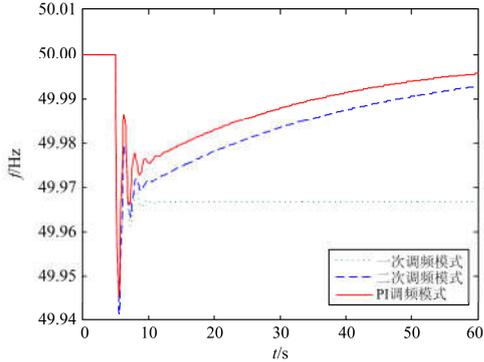


图 4 火力机组传统控制的频率变化曲线

Fig. 4 Frequency variation curve of thermal unit under traditional control modes

从图 4 中可以明显地看出，发电机组只采用一次调频(无差调节)，频率偏差幅度大。加入了二次调频后，发电机组的频率调节性能得到明显改善，能实现无差调节，但调节时间仍较长。与一次调频、二次调频相比，PI 调频响应速度更快。但以上三种调频效果不够理想，存在频率偏差幅度大、振荡次数多、响应速度慢等缺点，其调节性能仍需改进。

1.3 水力发电机组的频率调节

水力发电机组的工作原理是：位于高处的河流流经低处时产生势能，水轮机将其转化为机械能，发电机再将机械能转换成电能。水力机组的调频原理与火力机组较为相似，其调频模型如图 5 所示。

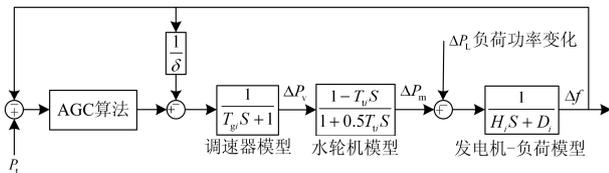


图 5 水力机组的频率调节模型

Fig. 5 Frequency regulation model of hydraulic unit

T_{gi} 为调速器时间系数，一般为 0.05~0.25 s， T_{ti} 为原动机(水轮机)的时间系数，一般为 0.05~2 s。这里，我们取水力机组的 $H_i = 5$ ， $D_i = 1$ ，5 s 时负荷增加 10 MW 容量，其他参数如表 1 所示，对其进

行一次调频、二次调频以及 PI 调频的频率偏差曲线如图 6 所示。

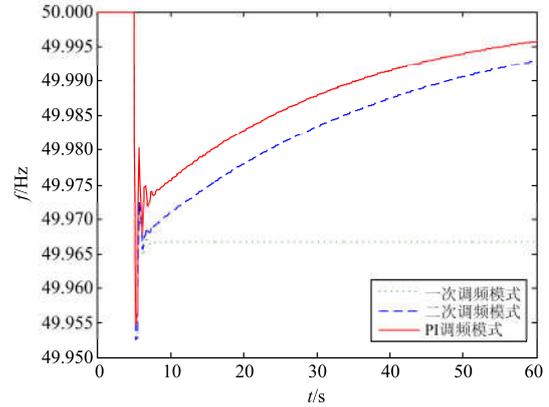


图 6 水力机组传统控制的频率变化曲线

Fig. 6 Frequency variation curve of hydraulic unit under traditional control modes

从图 6 可以看出水力机组在一次调频、二次调频和 PI 调频模式下的频率变化效果与火力机组大致相同，所以对于传统发电机组的频率调节，仍有待改进。

1.4 水-火多机组的频率调节

在实际的电力系统中，一个区域里含有许多机组，这里我们将控制区里的所有机组等效为一台火力机组与一台水力机组并联运行的模式来进行频率的调节，其模型如图 7 所示。

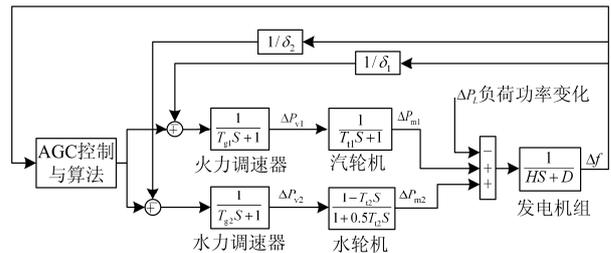


图 7 水-火多机组调频模型

Fig. 7 Frequency regulation model of water and fire units

在 5 s 时负荷增加 10 MW 容量，参数如表 1 所示，我们取 $H = 10$ ，在 PI 调频下分别对火力机组模型(图 3)、水力机组模型(图 5)和多机组模型进行仿真对比，得到频率变化曲线如图 8 所示。

从图 8 中可以看出，在 PI 调频模式下，火力机组与水力机组在一定时间范围内都能实现无差调节，在此基础上，水-火多机组控制区域的频率在偏差幅度、响应速度以及频率振荡方面都有明显的改善，说明多机组比单机组的调节效果更好。

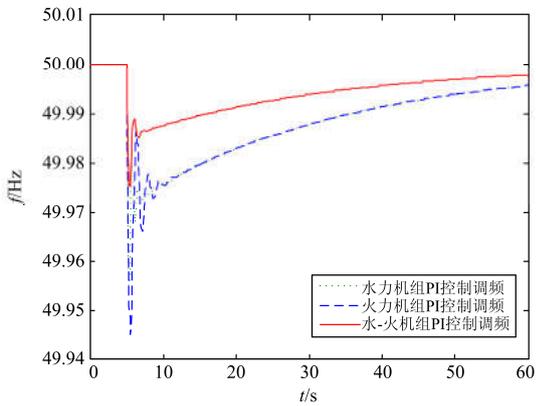


图 8 PI 调节的频率对比图

Fig. 8 Frequency comparison figure of PI regulation

2 基于模糊 PID 的自动发电控制系统

2.1 常规 PID 控制器的原理

设 $e(t)$ (误差信号)、 $u(t)$ 分别为控制器的输入和输出, 那么常规 PID 控制器可表示为

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (1)$$

其中: K_p 为比例系数; T_i 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数^[10], 经离散化后, 得到 PID 控制器的离散算法公式为

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{i=0}^k e(i) + K_d [e(k) - e(k-1)] \quad (2)$$

调节器输出 $u(k)$ 与过去所有偏差信号有关, 导致运算工作量很大, 可能使 $u(k)$ 出现大幅度振荡, 严重时还会引发执行机构产生很大变化, 实际情况中应避免采用这种方法。

2.2 基于模糊推理的 PID 控制结构

模糊控制器的原理是通过应用模糊数学的理论思想和经验方法^[11], 把控制器所需的规则条件和相关操作模糊集表示出来, 并把这些信息存入到计算机知识库中, 计算机就会根据控制系统的实际动态响应状况以及模糊控制规则表中的有关规则进行模糊推理^[12]。通过自动在线调整控制器参数使其达到最优配置, 从而有效提高了控制器的适应性, 改善了控制效果, 模糊控制原理结构如图 9 所示。

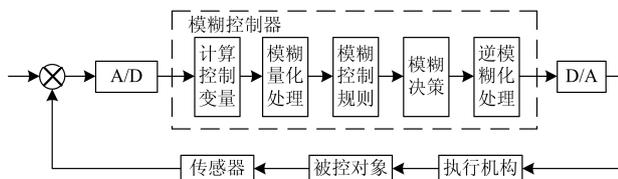


图 9 模糊控制原理图

Fig. 9 Fuzzy control principle diagram

针对本文所要设计的模糊 PID 控制器, 我们选用二维模糊控制器, 其系统结构如图 10 所示。

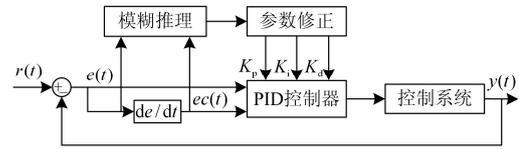


图 10 模糊 PID 系统结构图

Fig. 10 Fuzzy PID system structure diagram

输入量为偏差 e 和偏差变化 ec , 输出为 PID 控制器参数的调节量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ ^[13]。

模糊 PID 控制器设计步骤:

1) 将输入量误差 e 和误差微分 ec , 输出量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 分为 7 个模糊集^[14], 即

$$\begin{cases} e, ec = \{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\} \\ \Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d = \{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\} \end{cases} \quad (3)$$

2) 对各输入输出变量实际论域作如下规定:

$$\begin{cases} e, ec = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\} \\ \Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\} \end{cases} \quad (4)$$

设 k 为采样时间, 通过模糊理论推导 PID 参数的整定算法用公式表示为

$$\begin{cases} K_p(k) = K_{p0} + \Delta K_p(k) \\ K_i(k) = K_{i0} + \Delta K_i(k) \\ K_d(k) = K_{d0} + \Delta K_d(k) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, K_{p0}, K_{i0}, K_{d0} 为经典 PID 控制器的初始参数^[15]。

3) 输入变量采用高斯型隶属函数(gaussmf), 输出变量采用三角形隶属函数(trimf), 根据 e 和 ec 的不同变化状态及 PID 参数自整定原则, 设计模糊 PID 控制器的模糊控制规则分别如表 2、表 3 及表 4 所示。

本文选择的模糊推理方法为 Mamdani 模糊模型(迈达尼型), 解模糊控制采用重心平均法, 为了将系统的输入输出参数都能映射到论域内, 根据实验经验, 取模糊化因子 $k_e = k_{ec} = 0.1$, 解模糊因子 $k_1 = 0.5, k_2 = k_3 = 0.01$ ^[16]。

表 2 ΔK_p 模糊规则表

Table 2 Fuzzy rule table of ΔK_p

e	ec						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	Z	Z
NM	PB	PB	PM	PS	PS	Z	NS
NS	PM	PM	PM	PS	PS	Z	NS
Z	PM	PM	PS	Z	NS	NM	NM
PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
PM	PS	Z	NS	NM	NM	NM	NB
PB	Z	Z	NM	NM	NM	NB	NB

3 基于模糊控制的发电系统频率调节仿真

首先利用 Matlab 的模糊逻辑工具中的模糊编辑器对隶属函数和模糊规则进行编辑, 然后将模糊控制器的输出信号 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 作为新的参数传给经典 PID 控制器, 再将其封装成子系统, 作为 AGC 算法连入图 3 模型系统中。我们取 $H_i = 5$, $D_i = 1$, 在 5 s 时负荷增加 10 MW 容量, 仿真模型参数见表 1, 得到 3 种模式下的频率变化如图 11 所示。

表 3 ΔK_i 模糊规则表

Table 3 Fuzzy rule table of ΔK_i

e	ec						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	Z	Z
NM	NB	NB	NM	NS	NS	Z	Z
NS	NB	NM	NS	NS	Z	PS	PS
Z	NM	NM	NS	Z	PS	PM	PM
PS	NM	NS	Z	PS	PS	PM	PB
PM	Z	Z	PS	PS	PM	PB	PB
PB	Z	Z	PS	PM	PM	PB	PB

表 4 ΔK_d 模糊规则表

Table 4 Fuzzy rule table of ΔK_d

e	ec						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	Z
NS	Z	NS	NM	NM	NS	NS	Z
Z	Z	NS	NS	NS	NS	NS	Z
PS	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

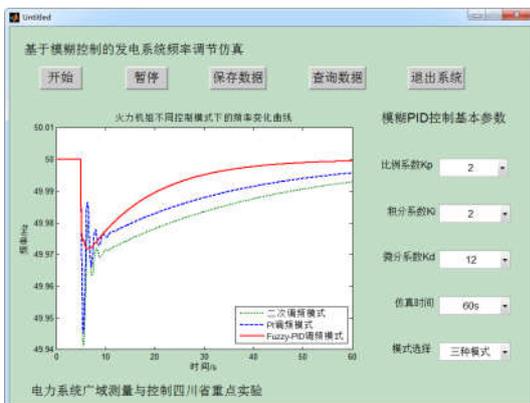


图 11 火力机组不同控制模式下的频率变化曲线
Fig. 11 Frequency variation curve of thermal unit under different control modes

通过搭建 GUI 界面, 我们可以实时地观察仿真效果, 从而得出 PID 的不同参数对系统控制性能的影响:

1) 比例系数 K_p 对系统性能的影响

比例作用主要控制系统灵敏度, K_p 增大时, 响应速度加快, 超调量减小, 但振荡次数增多; K_p 减小时响应变慢, 超调量变大, 振荡次数减少。

2) 积分系数 K_i 对系统性能的影响

积分作用主要调节频率的超调量, K_i 较小时能消除稳态误差, 同时提高系统的精确度, 但 K_i 太小又使得超调量增大。

3) 微分系数 K_d 对系统性能的影响

微分作用主要调节频率的振荡性, K_d 偏小时振荡次数较多, 适当增大 K_d 可以消除振荡, 提高动态性能。

从图 11 的仿真图形可以看出, 相比于二次调频和 PI 调频, 改进后的模糊 PID 调频方式其超调量很小, 控制在 0.056% 以内, 频率恢复时间缩短了一半, 振荡效果也明显提升, 说明该控制方式对频率调节有显著改善。

对于水-火多机组, 我们取 $H = 10$, $D = 1$, 在 5 s 时负荷增加 10 MW 容量, 参数如表 1 所示, 分别对其采用二次调频、PI 调频及改进的模糊 PID 调频进行仿真对比, 得到频率变化曲线如图 12 所示。

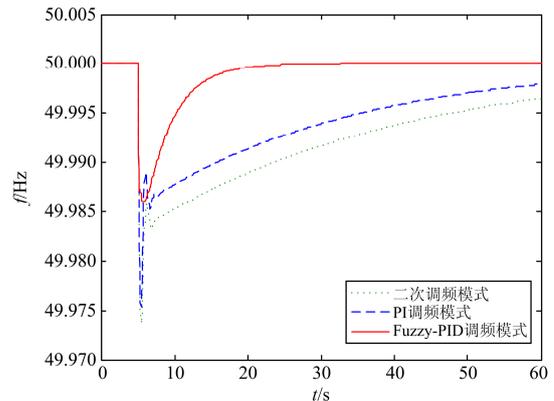


图 12 水-火多机组不同控制模式下的频率变化曲线
Fig. 12 Frequency variation curve of water and fire units under different control modes

在 3 种调频模式下, 我们得到了水-火多机组频率对比的仿真数据结果, 如表 5 所示。

从仿真图和仿真数据表可以看出, 对于水-火多机组而言, 相比于二次调频, PI 调频的比例控制作用使得系统的响应速度更快, 但频率偏移幅度差异不大, 振荡次数相同。在模糊 PID 控制器调频模式

下, 频率的最大偏移量更小, 恢复时间远远小于其他两种调频方式, 且频率只有一次很微小的振荡。因此, 当负荷变化引起电网频率发生变化时, 改进后的模糊 PID 调频方式在频率的偏移量、恢复时间以及振荡次数方面都要明显优于传统二次调频和 PI 调频性能。

表 5 水-火多机组频率的对比仿真结果

Table 5 Frequency comparison simulation results of water and fire units

控制模式	水-火机组最低频率/Hz	水-火机组频率恢复时间/s	水-火机组频率振荡/次
二次调频	49.973 6	124.5	3
PI 调频	49.975 2	98.4	3
Fuzzy-PID 调频	49.986 0	20.3	1

4 结论

本文以常规机组(火力机组、水力机组)为研究对象, 介绍了一次调频、二次调频以及 PI 调频原理。为提高频率调节性能, 在经典 PID 控制器原理的基础上设计出模糊 PID 控制器, 并将其分别用于常规机组及多机组发电系统的频率调节模型中。在相同负荷下, 分别采用二次调频、PI 调频和模糊 PID 调频的方式进行仿真对比分析。

本文提出的模糊 PID 控制器是一种结合智能算法的控制策略。针对本文设计的模型方案, 对常规机组和多机组在频率最大偏移量、恢复时间和频率振荡次数各方面进行分析研究。验证了该控制器在频率调节上的可行性和优越性, 比传统的控制方式具有更高的控制精度和稳定性。本文的仿真模型中没有考虑互联电网中的区域电网 AGC 控制模式以及调频性能对各区域 CPS 指标的影响, 这些都将是今后大规模发电系统并网研究的重要方向^[17-18]。

参考文献

[1] 王凌, 刘卫国. 基于模糊 PI 控制的无刷直流电机调速系统仿真[J]. 计算机仿真, 2009, 26(10): 186-189.
WANG Ling, LIU Weiguo. Simulation of BLDCM speed control system based on fuzzy-PI control method[J]. Computer Simulation, 2009, 26(10): 186-189.

[2] 李章文. 智能控制算法在电力系统 AGC 控制中的应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
LI Zhangwen. The application of intelligent control in ACG control of power system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.

[3] 颜伟, 赵瑞峰, 赵霞, 等. 自动发电控制中控制策略的研究发展综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 149-155.

YAN Wei, ZHAO Ruifeng, ZHAO Xia, et al. Review on control strategies in automatic generation control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 149-155.

[4] 于文俊. 变论域模糊控制算法在电力系统中的应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
YU Wenjun. Variable universe fuzzy learning and application to power system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.

[5] 赵菁, 刘敏. 模糊-PI 控制在自动发电控制中的应用[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2008, 37(2): 58-62.
ZHAO Jing, LIU Min. Application of fuzzy-PI control in the AGC[J]. Journal of Guizhou University of Technology (Natural Science Edition), 2008, 37(2): 58-62.

[6] 张少康, 李兴源, 王渝红. HVDC 附加控制策略对频率稳定性的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 100-103, 109.
ZHANG Shaokang, LI Xingyuan, WANG Yuhong. Research on the effect of HVDC additional control strategy on frequency stability[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(19): 100-103, 109.

[7] 宋海华, 刘武林, 刘复平. 火电机组一次调频动作特性对网频稳定的影响[J]. 湖南电力, 2013, 33(3): 29-31, 34.
SONG Haihua, LIU Wulin, LIU Fuping. Influence of operating characteristics of primary frequency regulation to frequency stability of power grid for thermal power units[J]. Hunan Electric Power, 2013, 33(3): 29-31, 34.

[8] 王蕊, 刘肇旭, 宋新立, 等. 基于 Matlab 的大型火电机组一次调频特性仿真[J]. 电网技术, 2009, 33(14): 42-46.
WANG Rui, LIU Zhaoxu, SONG Xinli, et al. Matlab-based simulations of primary frequency control for large thermal generating unit[J]. Power System Technology, 2009, 33(14): 42-46.

[9] 叶健忠, 邹俊雄, 龙霏, 等. 地区电网火电机组孤网运行频率控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 123-128.
YE Jianzhong, ZOU Junxiong, LONG Fei, et al. Research on frequency control strategy for isolated grid operation of thermal power unit in regional power network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 123-128.

[10] 王述彦, 师宇, 冯忠绪. 基于模糊 PID 控制器的控制方法研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(1): 166-172.
WANG Shuyan, SHI Yu, FENG Zhongxu. A method for controlling a loading system based on a fuzzy PID controller[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(1): 166-172.

- [11] 揭海宝, 郭清滔, 康积涛, 等. 基于模糊自调整 PID 控制的同步发电机励磁研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 89-92.
JIE Haibao, GUO Qingtao, KANG Jitao, et al. Simulation of synchronous excitation controller based on fuzzy self-regulation PID control[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 89-92.
- [12] 李瑾鸿. 应用模糊控制原理在差频并网下的自动准同期算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(2): 96-98, 105.
LI Jinhong. Algorithm research of the automatic synchronization under difference frequency power grid using fuzzy control principle[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(2): 96-98, 105.
- [13] 李蓓智, 吴雪逊, 杨建国, 等. 模糊 PID 控制器在穿梭车控制系统的应用[J]. 控制工程, 2012, 19(5): 804-808.
LI Beizhi, WU Xueti, YANG Jianguo, et al. Application of fuzzy-PID controller of intellectual shuttle's control system[J]. Control Engineering of China, 2012, 19(5): 804-808.
- [14] 丁冬, 刘宗岐, 杨水丽, 等. 基于模糊控制的电池储能系统辅助 AGC 调频方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 81-87.
DING Dong, LIU Zongqi, YANG Shuli, et al. Battery energy storage aid automatic generation control for load frequency control based on fuzzy control[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 81-87.
- [15] 王晶, 徐玲玲, 徐爱亲, 等. 无串联变压器型 DVR 模糊控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 56-60, 65.
WANG Jing, XU Lingling, XU Aiqin, et al. Study of fuzzy logic control for transformerless dynamic voltage restorer[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 56-60, 65.
- [16] 支长义, 王瑞玲, 唐道奎, 等. 无刷直流电动机模糊自适应 PID 控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 35-37, 42.
ZHI Changyi, WANG Ruiling, TANG Daokui, et al. Study on fuzzy self-adaptive PID control strategy for brushless DC motor[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(8): 35-37, 42.
- [17] 黎静华, 文劲宇, 潘毅, 等. 面向新能源并网的电力系统鲁棒调度模式[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 47-54.
LI Jinghua, WEN Jinyu, PAN Yi, et al. Robust dispatching mode of electrical power system to cope with renewable energy power[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 47-54.
- [18] 颜伟, 王聪, 毛艳丽, 等. 基于 OPF 的互联电网 AGC 优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 35-40.
YAN Wei, WANG Cong, MAO Yanli, et al. AGC optimal model based on OPF technology for interconnected power grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 35-40.

收稿日期: 2016-04-11; 修回日期: 2016-05-16

作者简介:

鲁尔洁(1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析、运行及控制; E-mail: 549008743@qq.com

陈 雷(1973-), 男, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事计算智能及其应用、电力系统自动化方面的研究;

李 坚(1984-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事遥操作系统稳定性控制、电力系统广域测量与控制方面的研究。

(编辑 葛艳娜)