

基于稳定性和电压精度协调控制的 新型模糊励磁调节器

蔡 滨¹, 张鹏飞², 张恒旭³

(1. 山东省科学院 新材料研究所, 山东 济南 250014;

2. 河南电力调度通信中心, 河南 郑州 450052;

3. 山东大学 电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 在保持比例积分微分(PID)励磁调节器优良电压调节特性的基础上, 部分采取线性最优控制理论设计附加励磁调节通道, 并通过一模糊控制器动态协调电压调节通道和附加调节通道的作用权重, 设计了一种新型模糊励磁调节器。分析了电力系统各种典型运行状态及其对励磁调节的要求, 总结了不同状态下电压和稳定的协调控制策略, 以期对电压调节和增强阻尼进行动态协调。数值仿真结果表明, 该新型励磁调节器在稳态时具有同 PID 一样高的电压调节精度, 动态过程中则能明显提高系统阻尼特性, 具有满意的控制效果, 并对系统工况变化具有一定适应性。

关键词: 电力系统; 励磁调节器; 模糊控制; 协调控制

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)11-0008-04

本文将比例积分微分(PID)控制理论、线性最优控制理论与模糊控制理论相结合设计了一种新型模糊励磁调节器 FLEC(Fuzzy Logic Excitation Control): 电压调节通道和附加调节通道的初始整定仍基于常规数学方法, 而由一模糊控制器根据系统工况动态调整电压调节通道与附加调节通道的作用权重, 在保持良好稳态电压调节精度情况下, 增加系统阻尼特性, 提高动态稳定水平, 并对工况变化具有一定的鲁棒性。

1 新型励磁控制器结构设计

1.1 控制变量选择

励磁控制系统通常可用图 1 表示^[1], 其中 ΔU_t 为机端电压与参考值的偏差, 附加信号可能包括转速偏差 $\Delta\omega$ 、转速偏差的变化率 $\Delta\dot{\omega}$ 以及有功功率偏差 ΔP_e 等。

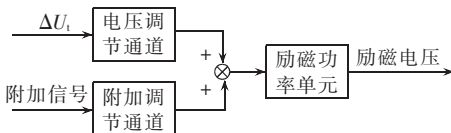


图 1 励磁系统示意图

Fig.1 Structure of excitation controller

在励磁控制系统设计中, 电压调节通道和附加励磁调节通道的处理方式是决定调节性能的关键因素。PID 调节器具有优良的电压调节性能和较高的稳态电压调节精度^[2-3], 但无法为系统动态过程提供足够阻尼。常规电力系统稳定器(PSS)在设计中

把电压调节通道确认为主调节通道, 并考虑了电压调节通道对动态稳定性的不利影响, 结果既保证了电压调节的要求, 又在一定范围内提高了动态稳定水平; 但在参数整定方面的困难、较差的鲁棒性和在多机协调方面的不足限制了其发挥最佳效果^[4]。线性最优励磁控制器 LOEC(Linear Optimal Excitation Controller)^[5]在设计中没有确定电压调节通道的主导地位, 只以权系数方式予以考虑, 其结果虽然能满足动态稳定性的要求, 但并不能很好地满足电压调节的要求。

通过改进电压调节通道和附加励磁调节通道的作用方式提高励磁调节器的性能是本文的研究重点。鉴于 PID 控制方式的优异性能, 电压调节通道仍采用以电压偏差为反馈量的 PID 调节方式; 附加信号采用 $\Delta\omega$ 和 ΔP_e , 增益采用 LOEC 整定; 并由一模糊控制器根据系统状态动态协调电压调节通道和附加调节通道的作用权重。为了反映当前系统状态, 模糊控制器的输入变量选为 ΔU_t 、 ΔP_e 和 $\Delta\omega$, 输出变量为电压调节通道的权系数 K_1 和附加励磁调节通道的权系数 K_2 。

1.2 电压调节通道设计

如前所述, 励磁调节器最主要、最基本的任务维持发电机电压水平, 此功能是通过电压调节通道实现。为最大限度抑制电压波动, 提高电压调节精度, 该新型励磁调节器的电压调节通道仍以 PID 方式设计, 即

$$U(s) = K_p E(s) + K_i E(s)/s + K_d E(s)s \quad (1)$$

式中 K_p 为比例放大倍数; K_i 为积分系数; K_d 为微分系数。

1.3 附加励磁调节通道设计

附加励磁调节通道的作用是为系统提供阻尼,改善系统的动态稳定性。设计中以 ΔP_e 、 $\Delta \omega$ 为输入变量,其系数由线性最优控制理论确定。

线性最优控制是比较成熟的现代控制技术,把它用于发电机励磁控制时,是将系统中可测量的状态量和非状态量适当地组合起来,根据变量偏差最小和控制代价最小(或适当)的原则,求得控制变量的一种控制方式。

通过适当变换和简化,可得到单机-无穷大母线系统在某状态点线性化后的三阶方程组^[6]:

$$\dot{X} = AX + BU \quad (2)$$

$$X = [\Delta P_e, \Delta \omega, \Delta U_t]^T, \quad U = \Delta E_{fd}$$

$$B = [R_{E'} / \tau'_{d0}, 0, R_{E'} / (\tau'_{d0} R_V)]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{S_{E'} - S_V}{\tau'_d S_V} & S_{E'} & -\frac{R_V S_{E'}}{\tau'_d S_V} \\ -\frac{\omega_0}{H} & -\frac{D}{H} & 0 \\ \frac{S_E - S_V}{\tau'_d R_V S_V} & \frac{S_{E'} - S_V}{R_V} & -\frac{S_E}{\tau'_d S_V} \end{bmatrix}$$

式中 X 为状态向量; A 为系统矩阵; B 为控制矩阵; U 为控制量; τ'_d 为定子闭路励磁绕组时间常数; τ'_{d0} 为定子开路励磁绕组时间常数。

对于凸极机

$$S_E = \frac{E_q U_s}{x_{d\Sigma}} \cos \delta + U_s^2 \frac{x_{d\Sigma} - x_{q\Sigma}}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \cos 2\delta$$

对于隐极机

$$S_E = \frac{E_q U_s}{x_{d\Sigma}} \cos \delta$$

无论对于凸极机或隐极机有

$$S_{E'} = \frac{E'_q U_s}{x'_{d\Sigma}} \cos \delta + U_s^2 \frac{x'_{d\Sigma} - x_{q\Sigma}}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \cos 2\delta$$

$$R_E = \frac{U_s}{x_{d\Sigma}} \sin \delta, \quad R_{E'} = \frac{U_s}{x'_{d\Sigma}} \sin \delta$$

$$R_V = \frac{R_E}{\partial U_t / \partial E_q}, \quad S_V = S_E - R_V \frac{\partial U_t}{\partial \delta}$$

式中 E_q 、 E'_q 分别为 q 轴电势与暂态电势; U_s 为无穷大母线电压; δ 为发电机内电势与机端电压 U_t 的相角差; $x_{d\Sigma}$ 、 $x_{q\Sigma}$ 分别为 d 轴、 q 轴同步电抗之和; $x'_{d\Sigma}$ 为 d 轴暂态电抗之和。

发电机模型的线性化详细推导过程见文献[6]。在设计中规定二次型性能指标为

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty (X^T Q X + U^T R U) dt = J_{\min} \quad (3)$$

式中 $Q = \text{diag}[q_1, q_2, q_3]$, 为 3×3 阶对角矩阵。

由最优控制理论可知最优反馈增益矩阵为

$$K = R^{-1} B^T P \quad (4)$$

此处 P 是下述黎卡梯方程的解。

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (5)$$

解方程(5)求出矩阵 P , 便可求得最优反馈向量为

$$K = [K_p, K_\omega, K_u]^T \quad (6)$$

由此得到最优控制量

$$U = \Delta E_{fd} = -K_p \Delta P_e - K_\omega \Delta \omega - K_u \Delta U_t \quad (7)$$

其中 K_p 、 K_ω 为附加调节通道 ΔP_e 、 $\Delta \omega$ 的系数。

1.4 新型模糊励磁调节器整体结构

电压调节通道输入量为 ΔU_t , 附加调节通道输入量为 $\Delta \omega$ 和 ΔP_e , 模糊控制模块输入量为 ΔU_t 、 $\Delta \omega$ 和 ΔP_e , 输出量为两通道的权系数。新型模糊励磁控制器结构如图 2 所示。

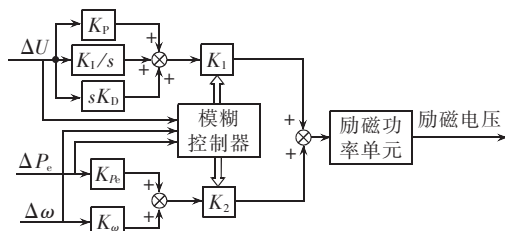


图 2 新型模糊励磁控制器结构示意图

Fig.2 Structure of fuzzy excitation controller

2 模糊控制器设计

2.1 协调控制规则

在运行中,当电压偏差较大时,控制器的主要任务是尽快消除误差,此时应给予电压调节通道较大的作用权重;当电压偏差较小时,控制器的主要任务是抑制系统振荡,此时应给予附加调节通道较大的作用权重。模糊调节模块的功能是根据系统运行工况,自动调整调节通道权系数 K_1 、 K_2 ,从而协调电压调节通道和附加控制通道在整个励磁控制中的作用。

在文献[7-10]基础上,进一步分析、总结两控制通道间的协调控制规则如下:

a. 在稳态时,各状态量都在允许范围内,此时主要任务是维持电压水平和提高电压调节精度,因此电压调节通道应正常工作,附加控制作用应减小或取消;

b. 在小干扰时,一般各变量偏差不会太大,此时主要任务是增大系统阻尼,尽快平息振荡,因此应增大附加控制的作用;

c. 在大干扰后的短时间内,由于电压波动很大,出于系统安全性考虑,此时控制重点应是使发电机机端电压尽快恢复到要求范围之内,为使附加控制输出不过多地影响发电机的电压调节,此时电压调节通道应充分发挥作用,应限制附加控制输出;

d. 在大干扰后的动态过程中,电压恢复到安全要求范围之内后,此时控制重点应是为系统提供足够的阻尼,使功率及频率振荡尽快平息,此时应充分发挥附加控制的作用。

2.2 模糊控制规则设计

模糊控制规则是设计模糊控制器的关键,一般包括 3 部分内容:选择描述输入、输出变量的词集,定义各模糊变量的模糊子集和建立模糊控制器的控制规则^[11]。

2.2.1 输入、输出变量词集

一般选择“大、中、小”3 个词汇描述模糊控制器的输入、输出变量的量化信息;附以正、负 2 个方向并

考虑变量的零状态,共有 7 个词汇,即

{负大,负中,负小,零,正小,正中,正大}

用英文字母表示为

{NB,NM,NS,O,PS,PM,PB}

在此, ΔU_i 、 ΔP_e 、 $\Delta \omega$ 的词集选择都如上所述。

K_1 、 K_2 为 2 个控制通道的动态作用权重,无负值要求;

{零,正小小,正小,正小中,正中,正中大,正大}

用英文字母表示为

{O,PSS,PS,PSM,PM,PMB,PB}

描述输入、输出变量的词汇都具有模糊特性,可用模糊集合表示。因此,模糊概念的确定问题就直接转化为求取模糊集合隶属函数的问题。

2.2.2 输入、输出变量论域

把模糊控制器的输入、输出变量变化的实际范围称为这些变量的基本论域。显然,基本论域内的量为精确量。由于变量变化区间往往不能精确确定,因而有时需要把变量实际变化区间映射到一合适的闭区间上,以方便计算和控制。

根据规程规定,正常运行时一般电压允许偏差为 $\pm 10\%$,频率允许偏差为 $\pm 1\%$ 。在此取发电机端电压偏差 ΔU_i 论域为 $[-0.15, 0.15]$,如果 $\Delta U_i > 0.15$ 或 < -0.15 ,分别按 0.15 和 -0.15 处理;取有功功率偏差 ΔP_e 的论域为 $[-0.30, 0.30]$,如果 $\Delta P_e > 0.30$ 或 < -0.30 ,分别按 0.30 和 -0.30 处理;取发电机转子电气角速度偏差 $\Delta \omega$ 论域为 $[-0.015, 0.015]$,如果 $\Delta \omega > 0.015$ 或 < -0.015 ,分别按 0.015 和 -0.015 处理。以上各变量均为标么值。取模糊控制模块的输出变量,即电压调节通道的权系数 K_1 和附加励磁调节通道权系数 K_2 的论域均为 $[0.0, 1.5]$ 。

为确保模糊集能较好地覆盖论域,避免出现失控现象,按照模糊集论域中所含元素个数为模糊语言词集总数的 2 倍以上的原则,在此取变量 ΔU_i 、 ΔP_e 、 $\Delta \omega$ 的模糊子集的论域均为

$\{-7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$

输出变量 K_1 、 K_2 模糊子集的论域均取为

$\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13\}$

2.2.3 各模糊变量的模糊子集

定义一个模糊子集,实际上就是要确定模糊子集隶属函数曲线的形状。将确定的隶属函数曲线离散化,得到有限个点上的隶属度便构成了一个相应的模糊变量的模糊子集。

由于模糊子集直接由隶属函数曲线确定,因此隶属函数曲线的形状不同会导致不同的控制特性。

本模糊控制器的设计中,采用的是三角形和梯形隶属函数曲线,并且曲线距离原点越近(误差越小)曲线越陡(分辨率越高),距离原点越远(误差越大)曲线越缓(分辨率越低)。由于变量 ΔU_i 、 ΔP_e 、 $\Delta \omega$ 所取得词集和模糊子集论域完全相同,在确定模糊子集时,其隶属函数曲线也相同,如图 3 所示; K_1 、 K_2 的隶属函数曲线如图 4 所示(图中横坐标 M 为模糊变量值, L 为隶属度)。

2.2.4 模糊控制规则

基于上述协调控制规则和输入、输出变量的模糊

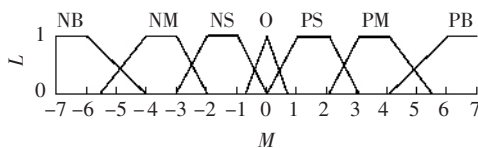


图 3 输入变量的隶属函数曲线

Fig.3 Membership function of input variables

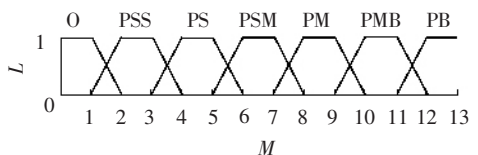


图 4 输出变量的隶属函数曲线

Fig.4 Membership function of output variables

化处理过程,制定了模糊控制规则集。限于篇幅,仅列出较有代表性的少数规则。

规则 1 类 稳态时附加控制退出。

IF $|\Delta U_i| = O$ AND $|\Delta P_e| = O$ AND $|\Delta \omega| = O$
THEN $K_1 = PM, K_2 = O$

规则 2 类 大干扰或故障后的短时间内减小附加控制作用以保证电压调节特性。

IF $|\Delta U_i| = PB$ AND $|\Delta P_e| = PB$ AND $|\Delta \omega| = PS$
THEN $K_1 = PB, K_2 = PM$
IF $|\Delta U_i| = PB$ AND $|\Delta P_e| = PM$ AND $|\Delta \omega| = PS$
THEN $K_1 = PB, K_2 = PSS$

规则 3 类 小干扰时增大附加控制作用。

IF $|\Delta U_i| = PS$ AND $|\Delta P_e| = PS$ AND $|\Delta \omega| = PS$
THEN $K_1 = PM, K_2 = PMB$
IF $|\Delta U_i| = O$ AND $|\Delta P_e| = PM$ AND $|\Delta \omega| = PM$
THEN $K_1 = PSS, K_2 = PMB$

由于本文中模糊控制器只需考虑各输入量偏离给定值的程度,因此只需考虑各变量偏差的绝对值,这就把模糊控制规则由 $7 \times 7 \times 7 = 343$ 条语句简化为 $4 \times 4 \times 4 = 64$ 条语句,减轻了控制过程的运算量。

3 数字仿真

仿真采用的系统如图 5 所示,发电机经升压变压器、双回线向无穷大系统送电,忽略线路电阻。其中 τ'_{d0} 为定子绕组开路时励磁绕组暂态时间常数 ($\tau'_{d0} = 5.0$), x'_d 为发电机 d 轴暂态电抗 ($x'_d = 0.13$), x_T 为变压器电抗 ($x_T = 0.1$), x_1 、 x_2 分别为 2 条线路的电抗 ($x_1 = x_2 = 0.4$),以上均为标么值。在发电机上分别装设 PID、LOEC 以 FLEC 控制规律的励磁调节器,考察它们对电压调节特性及对系统稳定性的不同影响。

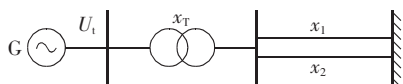


图 5 仿真系统接线图

Fig.5 Simulation system

发电机稳态运行: $\delta_0 = 55^\circ$, $P_e = 0.94$ p.u., $U_i = 1.03$ p.u.。分别做 2 种扰动情况下的对比实验。

- 扰动 A: 参考电压有 $+10\%$ 的跳变(见图 6、7)。
- 扰动 B: 变压器高压侧一回出线首端发生 0.2 s

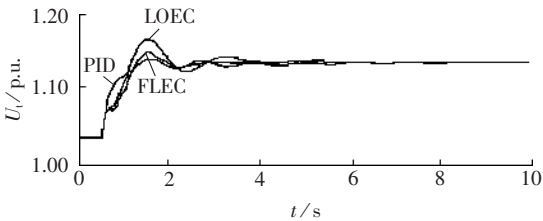


图 6 扰动 A 时机端电压响应曲线
Fig.6 Response of generator terminal voltage to disturbance A

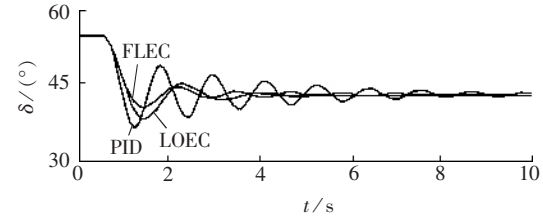


图 7 扰动 A 时发电机功角响应曲线
Fig.7 Response of generator angle to disturbance A

三相短路故障,故障后跳三相;故障时序为 0.5 s 发生故障,0.7 s 切除故障线路,单回线运行(见图 8、9)。

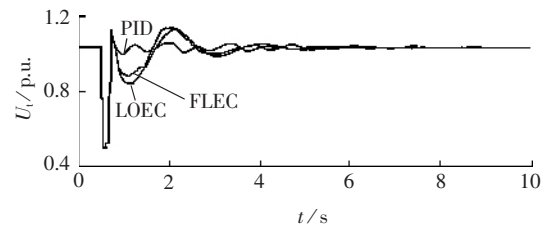


图 8 扰动 B 时机端电压响应曲线
Fig.8 Response of generator terminal voltage to disturbance B

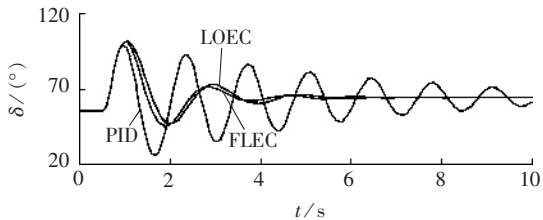


图 9 扰动 B 时发电机功角响应曲线
Fig.9 Response of generator angle to disturbance B

从仿真结果可以看出,通过模糊控制模块动态协调电压调节通道和附加调节通道的作用,优化了两者的控制效果,使其具有更强的抑制系统振荡的能力,并较 LOEC 具有更好的电压调节性能,在更大程度上保证了系统的安全运行。

4 结论

本文基于常规励磁控制方法与模糊控制理论,设计了一种根据系统状态动态调整电压调节通道与附加调节通道作用权重的新型励磁调节器。该励磁控制器由 3 部分组成:以 PID 方法为基础设计的电压调节通道,以 LOEC 为基础设计的附加调节通道,以及两者的模糊协调控制模块。

该控制器既保留了以精确数学模型解析结构为

基础的控制方法具有较强针对性、在一定范围内控制性能较好的特点,又用具有较强适应性的模糊控制技术在一定程度上改善了传统控制方法在系统运行状态改变或系统结构变化时具有较差适应性的不足,当系统运行状态改变时,该控制器能够根据运行工况自动调整电压调节通道和附加励磁调节通道的作用权重,通过两通道的动态协调提高控制性能,具有自适应能力和较强的鲁棒性。

仿真结果表明了所述方法的有效性,该新型励磁控制器在动态过程中能明显提高系统阻尼特性,在稳态时又具有同 PID 一样高的电压调节精度,具有满意的控制效果。

参考文献:

[1] 于尔谋. 发电厂励磁调节[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
[2] KIM K,SCHAEFER R C. Tuning a PID controller for a digital excitation control system [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2005,41(2):485-492.
[3] 吴光军. 三峡左岸电站励磁系统综述[J]. 大电机技术,2005(2): 47-51.
WU Guang-jun. Description of TGHP left bank excitation system [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine,2005(2): 47-51.
[4] LIU Qi-sheng,YONG Zhi-juan,HE Xiao-bo,et al. Study on the selection of PSS installing locations in power system [C] // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific. Dalian:IEEE,2005:1-4.
[5] MAO Cheng-xiong,MALIK O P,HOPE G S,et al. An adaptive generator excitation controller based on linear optimal control[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion,1990,5(4):673-678.
[6] 卢强,王仲鸿,韩英铎. 输电系统最优控制[M]. 北京:科学出版社,1992.
[7] 孙元章,黎雄,戴和平,等. 同时改善稳定性和电压精度的非线性励磁控制器[J]. 中国电机工程学报,1996,16(5):332-336.
SUN Yuan-zhang,LI Xiong,DAI He-ping,et al. A nonlinear excitation controller to improve both power system stability and voltage regulation accuracy[J]. Proceedings of the CSEE,1996, 16(5):332-336.
[8] 孙元章,黎雄,卢强. 发电机变结构模糊逻辑稳定器[J]. 电网技术,1996,20(4):11-13.
SUN Yuan-zhang,LI Xiong,LU Qiang. Variable structure fuzzy logic stabilizer for generator[J]. Power System Technology,1996, 20(4):11-13.
[9] 程远楚,漆为民,叶鲁卿,等. 发电机励磁的非线性解析模糊控制[J]. 中国电机工程学报,2003,23(9):121-125.
CHENG Yuan-chu,QI Wei-min,YE Lu-qing,et al. A nonlinear analytical fuzzy logic excitation controller of generator[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(9):121-125.
[10] LIANG Zhi-shan,PAN Kai-yan,ZHANG Hua-guang. Robust adaptive fuzzy excitation control of multi-machine [C] // Preceedings of POWERCON 98 International Conference on Power System Technology.Beijing:IEEE,1998:804-808.
[11] PASSINO K M,YUKOVICH S. Fuzzy control[M]. 影印版. 北京:清华大学出版社,2001.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

蔡 滨(1956-),男,山东济南人,副研究员,主要研究方向为新材料研制及电力系统自动控制(E-mail:caibin0619@sina.com)。

Fuzzy excitation controller based on coordinative control of voltage precision and system stability

CAI Bin¹,ZHANG Peng-fei²,ZHANG Heng-xu³

- (1. New Material Research Institute of Shandong Academy of Sciences, Ji'nan 250014, China;
2. Henan Electrical Power Dispatch and Communication Center, Zhengzhou 450052, China;
3. School of Electrical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: A new excitation controller design is proposed, which keeps the excellent features of PID (Proportional Integral Derivative) control for voltage regulation and adds linear optimal control in excitation regulation, with their weights dynamically coordinated by a fuzzy controller. Different operating conditions as well as their requirements for excitation regulation are analyzed and the control strategies dynamically coordinating voltage precision and system stability under all conditions are concluded for voltage and damping control. Numerical simulations show that, the designed excitation controller possesses the voltage regulation precision as that of PID controller in steady state, improves the system damping performance in dynamic state and obtains satisfying control effect.

Key words: power system; excitation controller; fuzzy logic control; coordinative control