

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.01.021

非线性励磁控制在解决电网送出 约束中的应用研究

赵 华¹, 谭亲跃¹, 朱建行², 朱宝慧¹

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2 华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 针对电网因风电接入引起输电阻塞、加剧系统振荡问题, 提出以 PID 为基础的模糊 PID 励磁控制方法。首先, 建立了同步发电机励磁控制系统数学模型。然后, 对单机-无穷大系统进行 MATLAB/Simulink 仿真, 将 PID 和 PID+PSS 仿真结果进行对比, 同时空载时, 将常规 PID 和模糊 PID 仿真结果对比分析, 得出结论: 使用模糊 PID 进行励磁控制风电接入引起的问题明显改善, 系统静态和暂态运行性能得到了显著提高, 验证了模糊 PID 控制的可行性和准确性。

关键词: 非线性; 励磁; PID; 电力系统稳定器; 模糊控制; 模糊 PID

中图分类号: TM331

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2015)01-0098-06

Application Research of Nonlinear Excitation Control Applied in Solving Constraints on Power Grid Output

ZHAO Hua¹, TAN Qin-yue¹, ZHU Jian-hang², ZHU Bao-hui¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: A Fuzzy-PID excitation control method based on PID was presented here, in order to solve the transmission congestion problems and system oscillation caused by wind power integration. At first, the mathematical model of synchronous generator excitation control system was built to simulate the single-infinite system by MATLAB/Simulink module. And then the results of PID and PID+PSS simulation were compared, as well as the results of conventional PID and Fuzzy-PID simulation under the condition of no loading. The analysis indicates that the application of Fuzzy-PID excitation control has greatly improved the problems caused by wind power integration, and the static and transient operation performance of the system has been significantly enhanced. This satisfying result verifies that Fuzzy-PID control is accurate and feasible.

Keywords: non-linear; excitation; PID; PSS; fuzzy control; fuzzy PID

随着我国电力事业的大力发展, 电网规模也相应扩大, 加之使用各种新型的输电技术, 产生越来越多样繁杂的电网结构, 这对电力系统安全、稳定、高效运行提出更高的要求。所以改善电力系统的稳定运行性能成为日益重要和紧迫的任务^[1]。

目前, 保证电力系统稳定运行有很多措施, 例如增加输电线路, 改善电网结构, 减小发电机和变压器

的电抗等^[2]。研究表明, 控制发电机的励磁系统是最直接、经济的措施。

发电机励磁系统对电力系统稳定性有重要影响。电力系统运行正常时, 电网电压和无功功率分配主要受发电机励磁电流的影响; 发生故障时, 机端电压降低导致电力系统稳定水平下降, 为使电网电压维持原来的稳定水平, 需要发电机迅速增大励磁

收稿日期: 2014-11-04

修稿日期: 2014-12-07

作者简介: 赵 华(1989-), 女, 河北保定人, 本科, 研究方向为电力系统稳定性。

通讯作者: 谭亲跃(1975-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 主要从事电力系统运行与控制、电能质量方面的教学与科研工作。

E-mail: qinyuetan@126.com

电流,所以发电机励磁自动控制在保证电能质量、无功功率的合理分配和提高电力系统运行的可靠性方面都起着十分重要的作用^[3]。

励磁调节器的控制技术发展经历了线性控制、非线性控制和智能控制三个阶段。PID 和 PSS 励磁控制器的设计,依据电力系统在某一特定状态下近似线性化的数学模型,缺点是当电力系统遭受大干扰使实际状态偏离设计平衡点较远时,会产生较大幅度的振荡,控制效果大大减弱^[4]。非线性励磁控制器(NEC)依据微分几何控制理论,适应性强,使系统干扰稳定问题得到明显改善,缺点是依赖于确切可知的系统参数,而且在可逆性质和动态反馈下的结构性质两方面表现为病态。而基于某种智能概念模型的智能控制,不需要确切可知的数学模型,将控制理论和人们的经验与直觉推理联系起来,在处理非线性、并行计算、自适应、自学习等方面能力非凡^[5]。

图 1 为某一电网接线图,该电网有 110 kV、330 kV 和 750 kV 三条不同电压等级的输电线路,且相互之间有联系,末端将多余的电量通过 L 处向外部的电网输送。一般情况下,负载具有较大的裕量,但是当发电功率升高时,线路故障跳闸或误动作,会出现暂态稳定的问题,使得机组不能同步运行,出现失稳问题。即受 E - F, E - G 两个断面的输出限制,发电机组不能全力发电将电量送出,造成资源浪费。

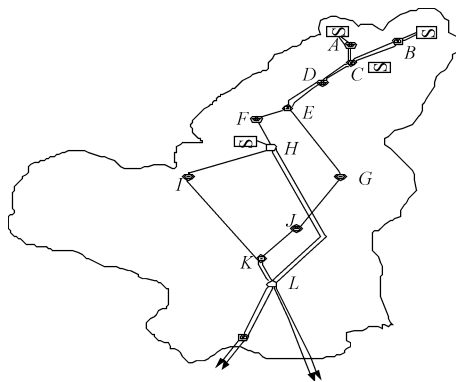


图 1 电网接线图

本文对单机—无穷大系统模型进行 Simulink 仿真,将 PID 和 PID + PSS 仿真结果进行对比;空载时利用模糊 PID 的算法进行控制,可使系统静态和暂态运行性能得到显著提高。

1 同步发电机励磁系统控制部分

1.1 同步发电机励磁系统的构成

向同步发电机提供励磁所有部件的总和,称为

同步发电机励磁系统,结构上分励磁功率单元和励磁调节器两部分,如图 2 所示。

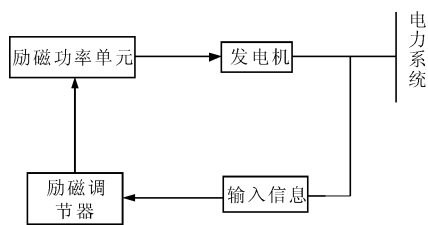


图 2 励磁系统组成结构

1.2 系统各单元的传递函数

由图 3 框图可知,励磁机、发电机、电压测量比较单元、综合放大单元、功率放大单元等共同构成励磁控制系统。

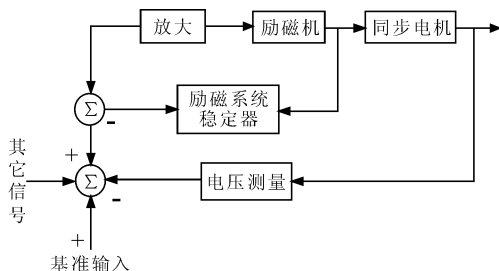


图 3 励磁控制系统组成结构

假定同步发电机励磁控制系统为单输入、单输出系统,则由此可得其传递函数的框图^[6]。

(1) 综合放大部分的传递函数为:

$$G_A(s) = \frac{K_a}{T_a s + 1} \quad (1)$$

式中: T_a 为放大器的时间常数; K_a 为电压的放大倍数。

(2) 同步发电机的传递函数为:

$$G_G(s) = \frac{K_g}{T_g s + 1} \quad (2)$$

式中: T_g 为发电机空载转子时间常数; K_g 为发电机放大倍数。

假设系统中同步发电机是理想电机,忽略其饱和现象。

(3) 电压测量比较单元传递函数为:

$$G_R(s) = \frac{K_r}{T_r s + 1} \quad (3)$$

式中: T_r 为电压测量回路的时间常数; K_r 为电压比例系数。

2 励磁系统控制设计

2.1 PID 控制原理

PID 调节器是按偏差的比例(Proportion)、积分

(Integration)和微分(Differentiation)进行控制。由图4的框图可知,PID控制器和被控对象构成PID控制器^[7]。

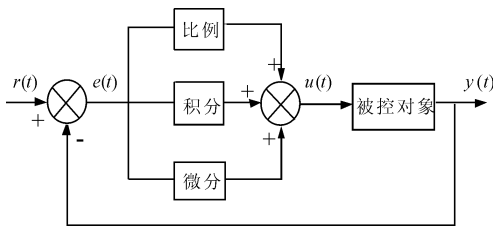


图4 PID结构框图

实际广泛应用于电网机组励磁系统的PID调节器传递函数为:

$$W(s) = K \frac{1 + sT_1}{K_V + sT_2} \frac{1 + sT_3}{1 + sT_4} \quad (4)$$

式中: K 为调节器增益; K_V 为积分选择因子; $(1 + sT_1)/(K_V + sT_2)$ 为滞后环节(积分环节),可提高稳态增益,保证电压精度; $T_3 > T_4$, $(1 + sT_3)/(1 + sT_4)$ 为超前环节(微分环节),可以提高励磁控制系统的稳定性^[8]。

2.2 电力系统稳定器(PSS)

电力系统稳定器(Power System Stabilizer)所采用的信号可以是发电机轴角速度偏差或机端电压频率偏差、电功率偏差和过剩功率及它们的组合等。其传递函数为:

$$G(s) = \frac{K_0 T_0 s}{1 + T_0 s} \left[\frac{(1 + sT_1)^n}{(1 + sT_2)^n} \right] \quad (5)$$

式中,各参数的选择范围为: $T_0 = 4 \text{ s} \sim 20 \text{ s}$, $T_1 = 0.1 \text{ s} \sim 0.2 \text{ s}$, $T_2 = 0.03 \text{ s} \sim 0.05 \text{ s}$ ^[9]。

2.3 模糊控制器原理

模糊系统是由模糊现象引起的不确定性系统。模糊控制是根据所建立的“自由模型”来实现非线性控制的一种有效算法。如图5所示^[10]。

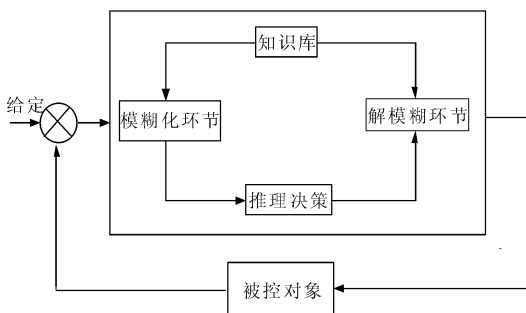


图5 模糊控制系统结构框图

由图5可知,模糊控制系统由模糊化环节、推理

决策环节、解模糊环节、知识库和被控对象这五个部分组成。

2.4 模糊控制器设计

2.4.1 隶属度函数确定

输入变量 e 和 ec 的论域都设定为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$,描述输入变量的词集为{负大,负中,负小,零,正小,正中,正大},用英文字母开头缩写为{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB},控制器输出论域设定为 $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$,描述输出变量的词集为{零,小,中,大},用字母表示为{Z, S, M, B}^[11],如图6、图7所示。

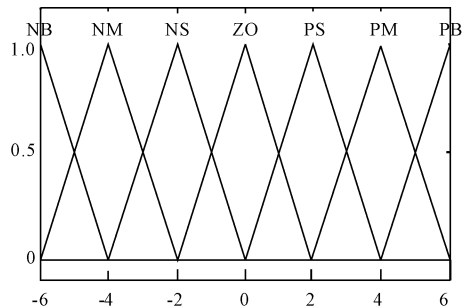


图6 e 和 ec 的隶属度函数

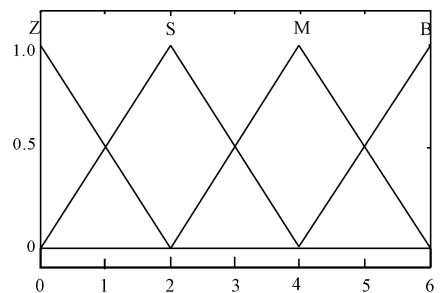


图7 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 的隶属度函数

2.4.2 量化因子和比例因子的确定

这里选择误差的绝对值小于30%,那么 $K_e = 6/0.3 = 20$;误差的变化率小于8,则 $K_{ec} = 6/8 = 0.75$ 。如果 K_p 的基本论域为 $0 \sim 120$, K_i 的基本论域为 $0 \sim 9$, K_d 的基本论域为 $0 \sim 24$,那么比例因子分别为 $20, 1.5, 4$ ^[12]。

2.4.3 模糊规则表的建立

根据PID参数整定原则、专家经验以及文献可以列出输出变量 K_p, K_i, K_d 和E,EC的控制规则,如表1、表2、表3所示^[13]。

3 仿真分析

3.1 励磁系统的仿真部分

单机-无穷大系统通常会用来进行对励磁系统的仿真研究,如图8所示^[14]。

表 1 K_p 的调整规则

EC	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PS
NB	B	S	M	M	M	S	B
NM	B	M	B	B	B	M	B
NS	B	M	B	B	B	M	B
Z	B	M	S	Z	S	M	B
PS	B	M	B	B	B	M	B
PM	B	M	B	B	B	M	B
PB	B	S	M	M	M	S	B

表 2 K_i 的调整规则

EC	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PS
NB	Z	S	M	B	M	S	Z
NM	Z	S	B	B	B	S	Z
NS	Z	Z	M	B	M	Z	Z
Z	Z	Z	M	B	M	Z	Z
PS	Z	Z	M	B	M	Z	Z
PM	Z	S	B	B	B	S	Z
PB	Z	S	M	B	M	S	Z

表 3 K_d 的调整规则

EC	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PS
NB	S	M	Z	Z	Z	M	S
NM	S	M	S	Z	S	M	S
NS	S	M	S	Z	S	M	S
Z	S	M	S	Z	S	M	S
PS	S	M	S	Z	S	M	S
PM	S	M	S	Z	S	M	S
PB	S	M	Z	Z	Z	M	S

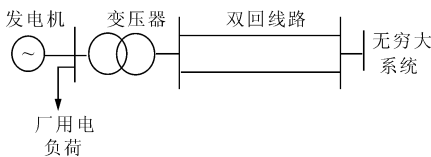


图 8 单机 - 无穷大系统

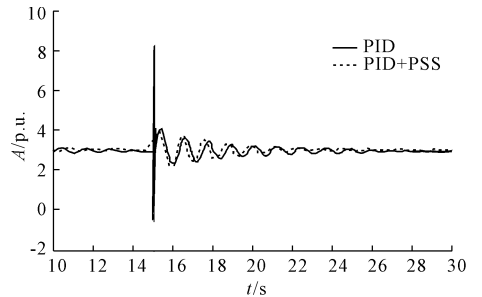
该系统由发电机、变压器、双回输电线路、厂用电负荷和无穷大系统组成。其中输电线路为 110 kV 线路,无穷大系统由 12 000 MVA 电源和 500 MVA 负荷复合而成。

同步发电机参数值(均为标么值): $X_d = 2.84$, $X_q = 2.7$, 其它的参数值为 $X'_d = 0.382$, $X''_d = 0.269$, $X'_q = 0.28$, $X''_q = 0.28$, $T'_{d0} = 9.9$, $T''_{d0} = 0.022$, $T''_{q0} = 0.04$ 。

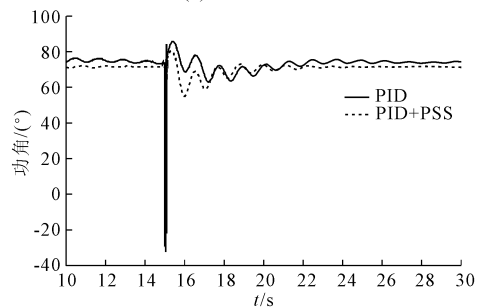
变压器 $R_1 = R_2 = 0.0027$, $L_1 = L_2 = 0.08$, $R_m = 500$, $L_m = 500$ 。输电线路电阻为 0.1Ω , 电感为 0.01 H, 电容为 1 nF。

3.2 仿真波形分析

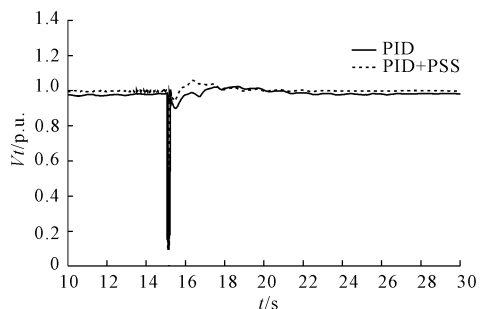
根据上述数据所进行的仿真结果如图 9 ~ 图 11 所示。



(a) 电流 I 仿真波形



(b) 功角 δ 仿真波形



(c) 电压 V 仿真波形

图 9 三相短路时的仿真波形

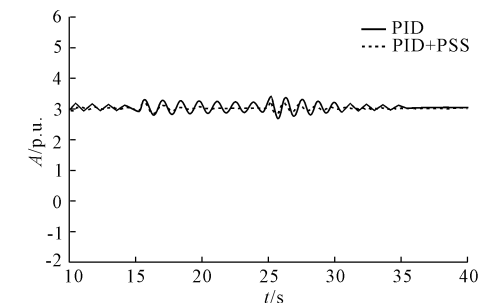
变压器三相短路故障时,短路电流迅速上升,功角迅速减小,极端电压迅速下降;在励磁调节作用下,产生较小的阻尼振荡;在 PSS 作用下,最终使电流稳定,功角、电压达到平衡,恢复稳定运行。

线路发生跳闸故障时,由于继电保护装置快速切除故障,励磁作用效果并不显著;一定条件下,也能改善发电机的暂态稳定性,而且在 PID + PSS 控制下效果明显。

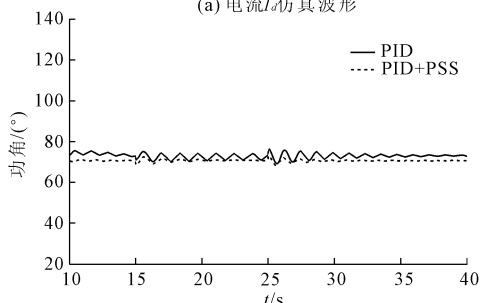
发电机负载阶跃变化,在励磁控制器作用下,电压迅速达到平衡,电流振荡趋稳,功角减小并渐稳。

图 12 为模糊 PID 同步发电机励磁控制系统模型图,图 13 为 PID 和模糊 PID 仿真结果。由图 13

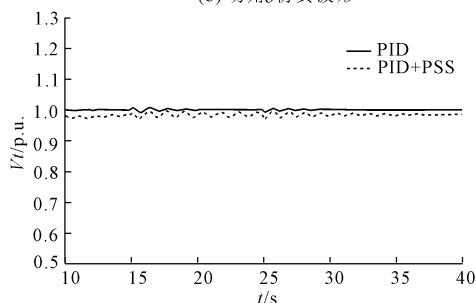
可知, PID + PSS 控制下较易达到平衡状态。



(a) 电流 I_a 仿真波形



(b) 功角 δ 仿真波形



(c) 电压 V 仿真波形

图 10 跳闸故障 (15 s ~ 25 s) 时的仿真波形

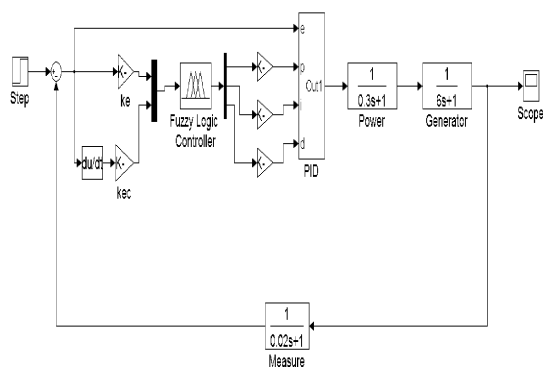
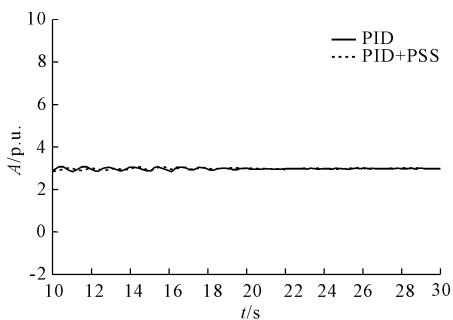


图 12 模糊 PID 同步发电机励磁控制系统模型图

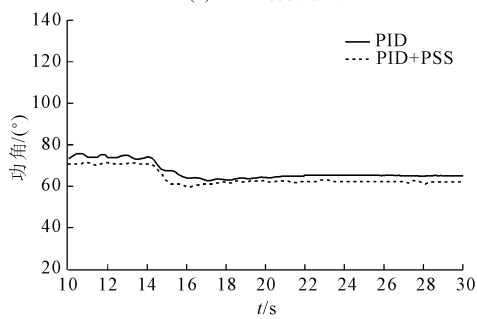
上述仿真结果表明,在 PID + PSS 的控制作用下,振荡幅度较小,在较短时间内即达稳定状态;模糊 PID 的超调量明显低于常规 PID 的控制,达到了预期的控制效果。

4 结 语

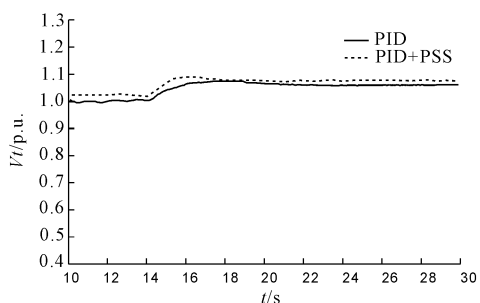
电力系统的规模随着区域性系统的互联而不断



(a) 电流 I_a 仿真波形



(b) 功角 δ 仿真波形



(c) 电压 V 仿真波形

图 11 机端电压阶跃 (14s) 时的仿真波形

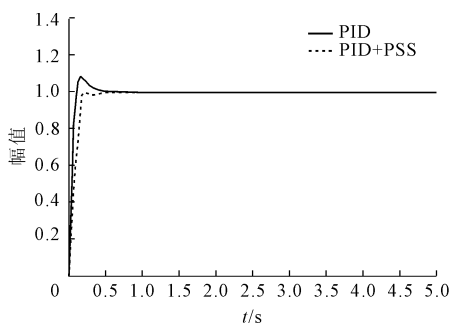


图 13 PID 和模糊 PID 仿真波形

增大,新技术的应用改变了系统的特性,这使得系统的稳定性问题更加突出。实践证明,励磁控制已成为全面提高电力系统稳定性的必要手段。因此,本文建立了同步发电机励磁控制模型,对单机-无穷大系统进行仿真,将 PID 和 PID + PSS 方法的仿真结果进行比较;对发电机空载模型进行 PID 和 Fuzzy - PID 的模拟仿真。由结果可知,模糊 PID 励磁控制有较好的鲁棒性与自适应能力,达到了预期的控制效果。

参考文献:

- [1] 卢 强,孙元章.电力系统非线性控制[M].北京:科学出版社,1993.
- [2] 卢 强,王仲鸿,韩英铎.输电系统最优控制[M].北京:科学出版社,1982.
- [3] 杨冠城.电力系统自动装置原理(第五版)[M].北京:中国电力出版社,2012.
- [4] 谢 郁,蓝小萌.线性最优控制微机励磁调节器的研究[J].电力自动化设备,1999,19(4):17-19.
- [5] 杨永灯.同步发电机模糊自调整 PID 励磁控制策略研究[D].西安:西安理工大学,2006.
- [6] 杨冠城.电力系统自动装置原理(第四版)[M].北京:中国电力出版社,2007.
- [7] 付瑞玲,乐丽琴.基于 MATLAB/Simulink 的 PID 参数整定[J].工业控制计算机,2013,26(8):75-76.
- [8] 方思立.发电机励磁系统 PID 调节及其仿真试验[J].电网技术,1995,19(5):46-50.
- [9] 鞠 平.电力系统建模理论与方法[M].北京:科学出版社,2010.
- [10] 王 润.基于模糊 PID 的同步发电机励磁控制研究[D].昆明:昆明理工大学,2012.
- [11] 姜学宝.基于模糊 PID 控制理论的双微机励磁调节器的研制[D].福州:福州大学,2002.
- [12] 郝加臣,余发山,王福忠,等.参数自适应模糊 PID 控制器在自动励磁调节系统中的应用[J].贵州工业大学学报:自然科学版,2003,32(1):54-57.
- [13] 梁宏柱,叶鲁卿,孟安波.参数自适应模糊 PID 控制器及其在水电机组调速器中的应用[J].水电自动化与大坝监测,2003,27(6):26-29.
- [14] 李 昂.同步发电机励磁系统的 PID 控制仿真[J].电子设计工程,2011,19(2):104-106,109.

~~~~~

(上接第 69 页)

- [7] Shady H S, Khalid M H, Tarek K H, et al. Experimental behavior of prestressed high strength concrete beams[J]. Scientific Research, 2013:26-31.
- [8] 蒲心诚,王志军,王 冲,等.超高强高性能混凝土的力学性能研究[J].建筑结构学报,2002,23(6):49-55.
- [9] 王永威,蒲心诚,王志军.单轴压力下 56.3~164.9MPa 混凝土应力-应变关系[J].建筑结构学报,2005,25(1):97-102.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部.中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB50010-2010.混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [11] 余志武,丁发兴.混凝土受压力学性能统一计算方法[J].建筑结构学报,2003,24(4):41-46.
- [12] 丁发兴,余志武.混凝土受拉力学性能统一计算方法[J].华中科技大学学报:城市科学版,2004,21(3):29-34.
- [13] 张 劲,王庆扬,胡守营,等.ABAQUS 混凝土损伤塑形模型参数验证[J].建筑结构,2008,38(8):127-130.
- [14] 梁兴文,钱 磊,谭丽娜.基于 ABAQUS 的混凝土损伤塑形模型本构关系研究[C]//全国地震工程学术会议论文集.重庆,2010.
- [15] 王 强,朱丽丽,李 哲,等.用于 ABAQUS 显示分析梁单元的钢筋本构模型研究[J].土木工程学报,2013,46(S2):100-105.