

# 励磁系统 PID 控制模型的选型探讨

李明强

(陕西渭河发电有限公司, 陕西 咸阳 701208)

**摘要:** 发电机励磁系统在电力系统静态及动态稳定性方面发挥巨大作用。如何根据励磁方式选择合适的励磁系统 PID 模型, 基于励磁系统方式控制模型选型的盲目性及经济性考虑, 从现行的自并励和励磁机励磁系统分别对励磁系统串联的 PID 控制模型进行比较, 研究选用一级超前-滞后或选用两级超前-滞后对于励磁系统的影响, 并分别对其进行仿真。结果表明, 自并励系统选择一级超前-滞后完全可以满足励磁系统要求, 励磁机系统更宜选择两级的超前-滞后模型。研究结果对发电机励磁系统控制设备选型给予一定的参考。

**关键词:** 励磁机系统; 自并励系统; PID; 控制模型

**Abstract:** Excitation system of generator plays a significant role in the static and dynamic stability of power system. How to choose the right PID model according to the excitation mode of excitation system, and considering the blindness and economy of control model selection based on excitation system modes, the PID control models series with excitation system are compared from the current self-shunt excitation system and exciter excitation system. The influence of selecting first-order lead-lag and second-order lead-lag on excitation system is studied, and its simulation results show the self-shunt excitation system selecting first-order lead-lag can fully meet the requirements of excitation system, and exciter excitation system selects second-order lead-lag model, which gives a reference to control equipment selection for generator excitation system.

**Key words:** exciter excitation system; self-shunt excitation system; PID; control model

中图分类号: TM621 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)04-0087-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.04.019

## 0 引言

近年随着国家新建火电机组向大容量大参数发展, 自并励励磁系统、常规励磁机励磁系统及核电机组普遍采用的无刷励磁系统得到了长足发展<sup>[1-3]</sup>, 励磁系统稳定性对电网安全及其稳定性发挥巨大作用<sup>[4-5]</sup>, 因此选择一种经济可靠的发电机励磁系统设备显得更加的重要。励磁系统控制设备中, PID 直接影响励磁系统性能指标。针对电站励磁系统的方式的不同, 下面将以 IEEE 标准的串联 PID<sup>[6]</sup> 为例, 分别解析一级超前-滞后补偿器的 PID 和两级超前-滞后补偿器的 PID 特性, 并对其进行仿真计算, 在不同的励磁系统方式下为选择一种经济合理的励磁控制设备提供参考。

## 1 自并励励磁系统的 PID 控制模型

常用的自并励励磁系统闭环控制系统的模型如图 1 所示, 图中:  $K_A$  表示励磁系统稳态增益, 典型值

$K_A = 200$ ;  $\frac{1+T_3S}{1+T_4S}$  为 PID 自动励磁控制模型, 是一级超前滞后补偿器;  $T_R$  为可控硅整流器时间常数;  $T_G$  为发电机励磁绕组时间常数;  $\frac{1}{1+0.02S}$  为发电机端电压测量环节时间常数;  $U_{gd}$  为电压给定值;  $U_g$  为发电机端电压实际值, 这些参数都以标么值表示。

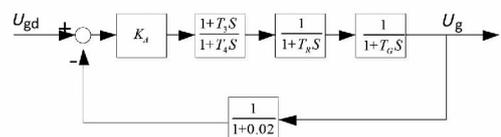


图 1 一级超前-滞后补偿器的自并励励磁系统的模型

取  $K_A = 200$ ,  $T_3 = 1$  s,  $T_4 = 4$  s,  $T_R = 0.02$  s,  $T_G = 6$  s, 利用 MATLAB<sup>[7]</sup> 软件对此自并励励磁系统的动态性能指标进行仿真计算。

图 2 为开环频率特性的 Bode 图, 图 3 为发电机单位阶跃响应特性图。

仿真结果见表 1, 可以得出在自并励励磁系统的自动调节器中, 只需一级超前-滞后补偿器, 就可以使励磁系统获得优良的性能指标。

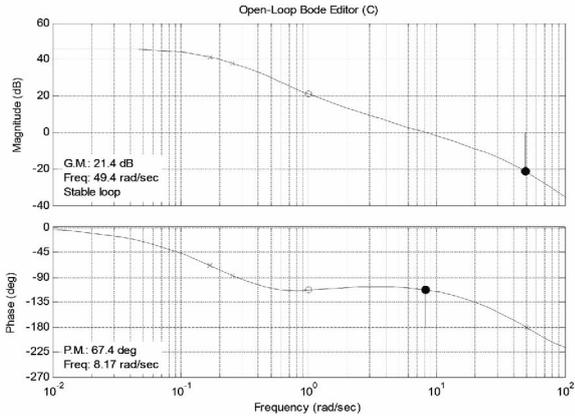


图2 一级超前-滞后补偿器自并励励磁系统 Bode 图

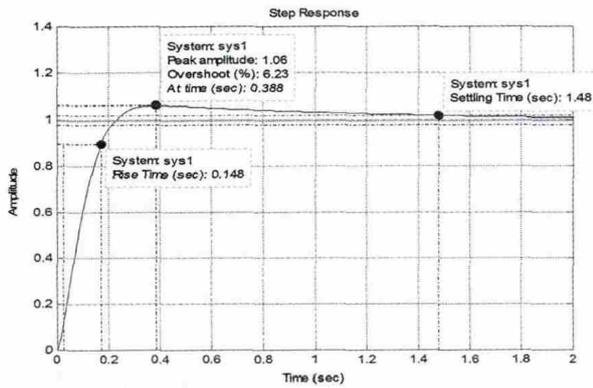


图3 一级超前-滞后补偿器下自并励发电机单位阶跃响应图

表1 一级超前-滞后补偿器自并励励磁系统仿真结果

参数	仿真数值	励磁标准
稳态增益	200	$\geq 200$
动态增益	$K_A \times \frac{T_3}{T_4} = 50$	$\geq 30$
发电机电空载阶跃响应特性		
超调量 / %	6	$\leq 30$
振荡次数	1	$\leq 3$
调整时间 / s	4	$\leq 10$
电压上升时间 / s	0.15	$\leq 0.8$
增益裕度 $G_m$	21.4	$\geq 6$
相角裕度 $\varphi_m$	67.4	$\geq 40$

## 2 励磁机励磁系统 PID 控制模型

2.1 励磁机励磁系统采用一级超前-滞后补偿器  
从控制系统结构上看,相比于自并励励磁系统,励磁机系统中多了励磁机环节,然而励磁机时间常数会对励磁控制系统的稳定运行和动态性能指标产生很大影响<sup>[8]</sup>,采用一级超前-滞后补偿器的励磁

机励磁系统闭环控制系统的简化模型框图见图4。

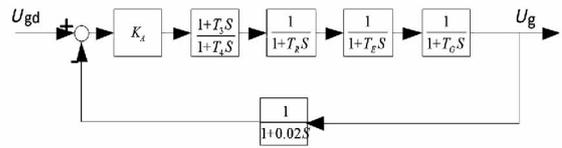


图4 一级超前-滞后补偿器励磁机励磁系统的模型框图

下面利用 MATLAB 软件,对此励磁机励磁系统的动态性能指标进行仿真计算。

取  $K_A = 200$ ;  $T_R = 0.02$  s;  $T_E = 1.5$  s;  $T_G = 6$  s。

在仿真计算中发现,对于  $\frac{1+T_3S}{1+T_4S}$  超前-滞后补偿器,

无法选择合适的参数来得到满足励磁系统要求的性能指标,经过多次仿真计算,挑选出一组典型的超前-滞后补偿参数:  $T_3 = 4$  s,  $T_4 = 60$  s。

图5为所选超前-滞后补偿参数下的开环频率特性的 Bode 图,图6为相应的发电机单位阶跃响应特性图,表2是仿真结果数据。

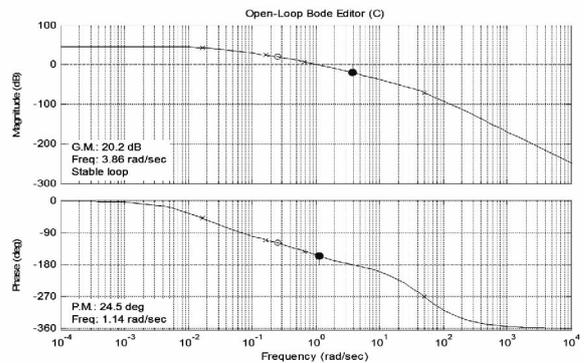


图5 一级超前-滞后补偿器下励磁机励磁系统 Bode 图

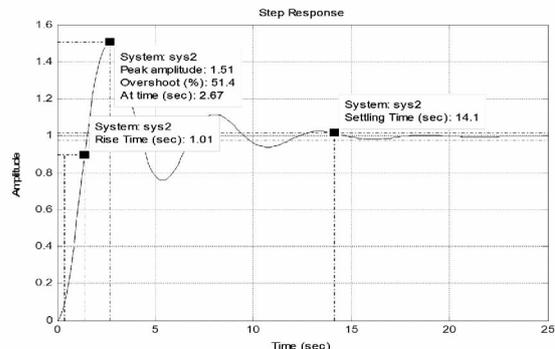


图6 一级超前-滞后补偿器下发电机单位阶跃响应图

显然,在励磁机励磁系统中,选用一级超前-滞后补偿器远不满足标准对励磁系统性能指标的要求,并且增益裕度和相角裕度数值较小,励磁系统稳定性较差<sup>[9]</sup>,因此在励磁机励磁系统中选用的两级

超前-滞后补偿器势在必行。

表2 一级超前-滞后补偿器励磁机励磁系统仿真结果

参数	仿真数值	励磁标准
稳态增益	200	$\geq 200$
动态增益	$K_A \times \frac{T_3}{T_4} = 13.33$	$\geq 30$
超调量/%	51	$\leq 30$
振荡次数	5	$\leq 3$
调整时间/s	16	$\leq 10$
电压上升时间/s	1	$\leq 0.8$
增益裕度 $G_m$	20.2	$\geq 6$
相角裕度 $\varphi_m$	24.55	$\geq 40$

### 2.2 励磁机励磁系统采用两级超前-滞后补偿器

采用两级超前-滞后补偿器的励磁机励磁系统的闭环控制系统的简化模型框图如图7所示。

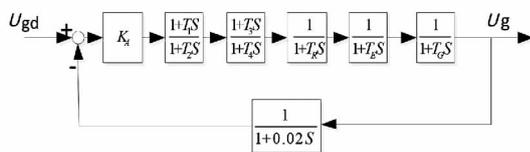


图7 两级超前-滞后补偿器励磁机励磁系统的模型框图

以同样的机组数据,利用 MATLAB 软件,对此励磁机励磁系统的动态性能指标进行仿真计算。

取  $K_A = 200$ ;  $T_R = 0.02$  s;  $T_E = 1.5$  s;  $T_G = 6$  s。

在仿真计算中发现对于励磁机系统,采用  $\frac{1+T_1S}{1+T_2S}$ ,

$\frac{1+T_3S}{1+T_4S}$  两级超前-滞后补偿器,很容易选择合适参

数来满足励磁系统的性能指标。下面举例一组典型的超前-滞后补偿参数:  $T_1 = 0.6$  s,  $T_2 = 0.08$  s,  $T_3 = 4$  s,  $T_4 = 25$  s。图8为此组两级超前-滞后补偿参数下的开环频率特性的 Bode 图,图9为此时发电机单位阶跃响应特性图,表3为仿真计算结果数据。

下面列举几组满足励磁标准的两级超前-滞后参数:

- 1)  $T_1 = 0.6$  s,  $T_2 = 0.08$  s,  $T_3 = 2$  s,  $T_4 = 10$  s;
- 2)  $T_1 = 0.6$  s,  $T_2 = 0.08$  s,  $T_3 = 3$  s,  $T_4 = 15$  s;
- 3)  $T_1 = 0.6$  s,  $T_2 = 0.08$  s,  $T_3 = 4$  s,  $T_4 = 20$  s;
- 4)  $T_1 = 0.6$  s,  $T_2 = 0.08$  s,  $T_3 = 6$  s,  $T_4 = 30$  s。

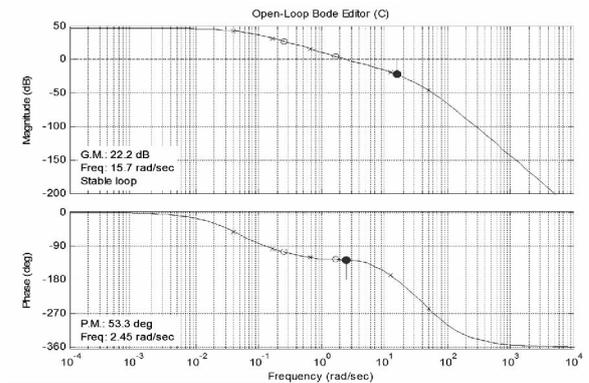


图8 两级超前-滞后补偿器下励磁机励磁系统 Bode 图

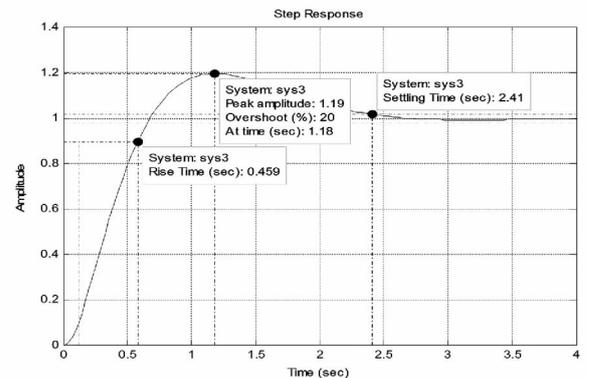


图9 两级超前-滞后补偿器下发电机单位阶跃响应图  
表3 两级超前-滞后补偿器励磁机励磁系统仿真结果

参数	仿真数值	励磁标准
稳态增益	200	$\geq 200$
动态增益	$K_A \times \frac{T_3}{T_4} = 32$	$\geq 30$
超调量/%	20	$\leq 30$
振荡次数	1	$\leq 3$
调整时间/s	3	$\leq 10$
电压上升时间/s	0.459	$\leq 0.8$
增益裕度 $G_m$	22.2	$\geq 6$
相角裕度 $\varphi_m$	53.3	$\geq 40$

综合以上分析,在励磁机励磁系统中,必须采用两级超前-滞后补偿器才可得到优良的励磁系统性能指标,总结选择两级超前-滞后补偿器参数原则如下:

- 1)  $\frac{T_1}{T_2} = 5 \sim 10$ ,  $T_1 < 0.8T_E$ ,  $T_2 \geq 0.05s$ ,  $\frac{1+T_1S}{1+T_2S}$  也称为微分环节;
- 2)  $\frac{T_3}{T_4} = 0.1 \sim 0.2$ ,  $T_4 > 1.5T_G$ ,  $\frac{1+T_3S}{1+T_4S}$  为积分环节。

可见在励磁机励磁系统中采用两级超前-滞后补偿器很容易选择合适参数满足系统要求。

### 3 结 语

通过对比不同结构的励磁系统及相应的励磁系统中的各环节物理量在传递函数中参数的意义,对其PID进行仿真计算。在自并励励磁系统中选择一级的超前-滞后补偿器完全可以满足励磁系统的各项性能指标;在励磁机励磁系统及无刷励磁系统中选择两级的超前-滞后补偿器,更易选择适合的参数来满足励磁系统性能指标。

#### 参考文献

[1] 薛学斌. 1 000 MW 机组发电机励磁方式的选择[J]. 电工技术, 2008(1): 59-60.

[2] 冯旭. 大型汽轮发电机制造中的励磁方式选型[J]. 科技创新与应用, 2013(7): 74.

[3] 张玫, 朱方, 刘增煌. 大型汽轮发电机采用自并励励磁系

统的可行性分析[J]. 电网技术, 1997, 12(21): 38-44.

[4] 刘取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

[5] 霍承祥, 刘增煌. 励磁系统静态放大倍数和发电机有功功率对调差的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(2): 93-96.

[6] IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies[S]. IEEE Power Engineering Society, IEEE 3 Park Avenue New York, NY 10016-5997, USA, 21 April 2006: 10-20.

[7] 张德丰. MATLAB 控制系统设计与仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.

[8] 郝正航, 陈卓, 邱国跃, 等. 励磁机时间常数对电力系统动态稳定性的影响[J]. 电工电能新技术, 2006, 25(1): 26-29.

[9] 方思立, 苏为民. 励磁系统动态性能指标有关标准的分析[J]. 电力设备, 2004, 5(7): 39-40.

#### 作者简介:

李明强(1983), 助理工程师, 主要研究方向为继电保护与励磁控制。  
(收稿日期: 2017-03-16)

(上接第81页)

右, 保持T输出电压稳定, 人工拉开机端电压TV二次侧a相空开后立即合上刀闸SQ, 发电机应该保持稳定运行。调节自耦调压器T降低输出电压, 电压表PV显示电压逐渐下降至52.90V左右(对应机端线电压允差定值5%)。励磁调节器应由A通道切换为B通道并且发电机保持稳定运行, 同时发出1TV断线故障及自动通道切换信号。参照图4接线, 可以分别进行机端1TV(2TV)一次侧熔断器B、C相慢速熔断模拟试验。

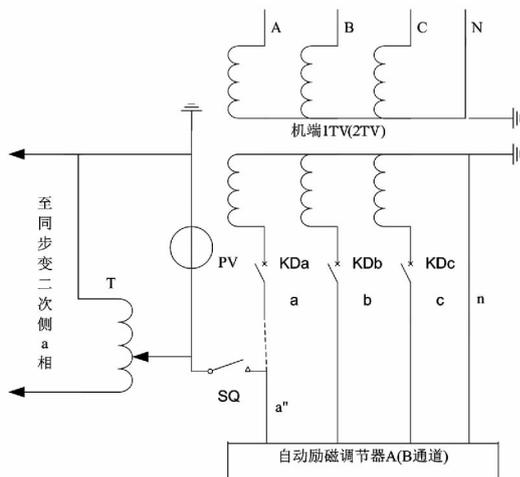


图4 模拟TV一次侧熔断器A相慢速熔断试验接线图

### 6 结 语

在保留原有TV断线判别逻辑的基础上, 增加负序电流判据, 修改机端线电压允差整定值, 完善TV断线判别逻辑, 并且经过现场试验确认, 增强机端TV一次熔断器慢熔断的判别能力, 对于提高大型汽轮发电机组自动励磁调节器安全可靠性的具有重要的现实意义。

#### 参考文献

[1] 翁思义. 自动控制理论[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.

[2] 竺士章. 发电机励磁系统试验[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

[3] 刘云, 李辉. 大型发电机励磁系统浅析与探讨[C]. 全国火电大机组(600 MW)竞赛第十二届年会论文集(下册), 2007.

[4] 桂国亮, 张旭昶, 戴申华, 等. 大型发电机励磁调节器闭环试验研究[J]. 安徽电力, 2011, 28(2): 28-32.

[5] 杜永斌. UNITROL 5000型励磁调节器在600 MW汽轮发电机组上的应用[J]. 中国新技术新产品, 2011(12): 116-117.

(收稿日期: 2017-03-02)