

# AC-2 型励磁系统参数优化研究

屈艳萍, 房鑫炎

(上海交通大学电信学院电气工程系, 上海 200240)

**摘要:** 通过模型仿真与程序设计相结合的方法来研究 AC-2 型励磁系统参数优化问题。解决了利用 Matlab 语言中的 Simulink 软件包对单机 - 无穷大母线系统 (SMIB) 的励磁控制进行建模与仿真时, AC-2 型励磁系统与发电机接口的模型建立问题及模型中非线性环节处理的问题。分析了模型中的参数  $K_A$  (放大倍数) 和  $T_A$  (时间常数) 变化时, 系统的时域响应特性, 得出了励磁控制系统 (ECS) 参数对电力系统暂态性能影响的规律。以此为依据, 并通过程序设计, 求出了给定工况下 AC-2 型励磁系统参数的最优值。

**关键词:** AC-2 型励磁系统; 参数优化; 小干扰; 暂态性能; Simulink

**中图分类号:** TM31      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2004)16-0001-04

## 0 引言

励磁系统向发电机提供励磁功率,起着调节电压、保持发电机端电压或枢纽点电压恒定的作用,并可控制并列运行发电机的无功功率分配。它对发电机的动态行为有很大影响,而通过改变励磁调节器的参数可以改善发电机乃至电力系统的暂态性能指标。

对于一个控制系统来说,其暂态性能随扰动方式而异。电力系统经常遭受负荷变化、电压变化等小干扰,因此,考察系统在小信号干扰作用下的暂态响应,具有实际意义。

AC-2 模型是 IEEE 于 1981 年推荐的用于表达高起始响应无刷励磁系统的模型(见图 1)。该模型在现场实际中应用广泛,研究其性能有着重要的实际意义。

本文采用阶跃输入来模拟小信号干扰,考察简单电力系统在励磁调节器参数改变时的阶跃响应性能。通过仿真得出系统在不同参数下的时域响应曲线及其变化规律。以此为依据,确立了 AC-2 型励磁系统参数寻优算法,并编制了相应的程序,求出了给定工况下 AC-2 型励磁系统参数的最优值。

## 1 仿真模型的建立

### 1.1 AC-2 励磁系统模型

本文直接采用 IEEE 在 1981 年推荐的交流励磁系统的 AC-2 模型,其传递函数方框图如图 1 所示。对图 1 的传递函数,由于本文进行的是小扰动分析,采用的是线性化模型,故将限幅环节忽略,即认为系统受小扰动时各变量变化幅度很小不会引起限幅环节作用。同时,将原传递函数中的变量以相应变量的增量代替,以适应仿真需要。

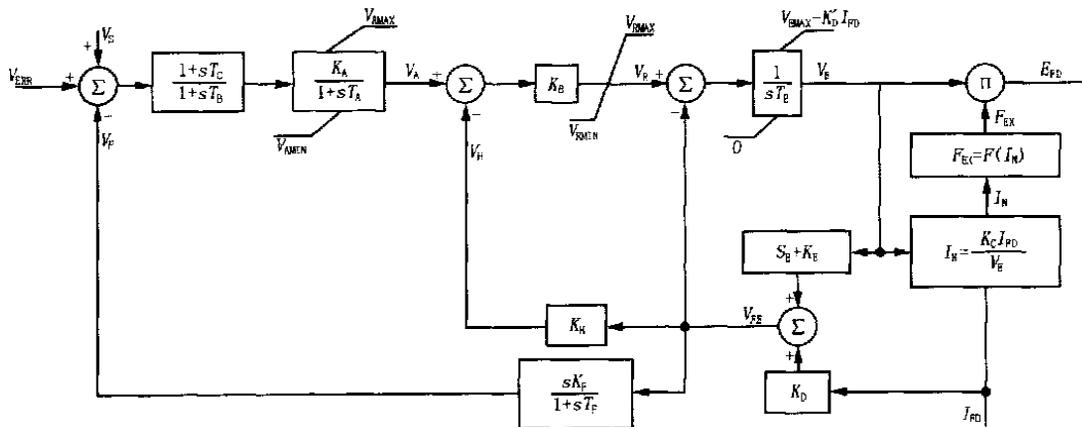


图 1 AC-2 模型方框图

Fig. 1 Block diagram of AC-2 model

图 1 中,  $F_{EX}$  是整流器负载因子(或整流系数), 是  $I_{FD}$  和  $V_E$  的非线性函数。如前述, 本文进行的是小扰动分析, 认为  $F_{EX}$  在扰动前后近似不变。这样, 利用扰动前求出的  $F_{EX}$  值, 可以将模型中该非线性环节线性化。经过上述处理, 并将模型进行适于 Simulink 仿真的等效变换, 得出用于仿真的模型(见图 2)。

1.2 单机 - 无穷大母线系统中发电机模型

计及励磁系统动态时, 单机 - 无穷大母线系统中发电机模型包括转子运动方程和计及励磁调节作用后的电动势变化方程。以  $\delta$ 、 $\omega$ 、 $E_q$  为状态变量, 可得发电机状态方程如下<sup>[1]</sup>:

$$s \cdot \delta = \omega \quad \text{即} \quad s \cdot \omega = -\omega_0 \cdot \delta \quad (1)$$

$$s \cdot E_q = -\frac{1}{T_j} P_e \quad \text{但} \quad P_e = K_2 \cdot E_q + K_1 \cdot \delta$$

$$\text{所以} \quad s \cdot E_q = -\frac{K_2}{T_j} \cdot E_q - \frac{K_1}{T_j} \cdot \delta \quad (2)$$

$$E_q = \frac{K_3}{1 + sK_3 T_{d0}} (E_{FD} - K_4 \cdot \delta) \quad (3)$$

$$\text{所以} \quad s \cdot E_q = \frac{1}{T_{d0}} E_{FD} - \frac{K_4}{T_{d0}} \delta - \frac{1}{K_3 T_{d0}} E_q \quad (4)$$

$$V_G = K_5 \cdot \delta + K_6 \cdot E_q \quad (5)$$

根据以上方程, 得到仿真中发电机的传递函数方框图(见图 2)。

1.3 励磁系统与发电机接口模型

计及自动调节励磁系统及发电机转子回路的电

磁暂态过程, 小扰动下励磁回路的方程为:

$$E_{FD} = E_q + sT_{d0} \quad E_q = I_{FD} \cdot x_{ad} + sT_{d0} E_q$$

$$\text{所以} \quad I_{FD} = \frac{E_{FD} - sT_{d0} E_q}{x_{ad}} \quad (6)$$

由式(3)可得:

$$sT_{d0} E_q = E_{FD} - K_4 \cdot \delta - \frac{1}{K_3} E_q \quad (7)$$

由式(6)、(7)可得:

$$I_{FD} = \frac{K_4}{x_{ad}} \delta + \frac{1}{K_3 \cdot x_{ad}} E_q \quad (8)$$

$$\text{又} \quad V_C = \frac{1}{1 + sT_R} \cdot V_G \quad (9)$$

式(8)、(9)即为励磁系统与发电机接口方程。

1.4 进行 Simulink 仿真的模型

综上所述, 得出用于仿真的完整的系统模型, 如图 2 所示。图中 scope 模块为仿真时观察机端电压变化的示波器。

2 研究系统暂态性能的仿真设计及结果分析

以文献[1]中所提供的例系统作为研究对象, 在 Simulink 集成仿真环境中, 采用图 2 的仿真模型进行仿真。

模型中参数按照系统正常稳态运行工况预先编制 Matlab 程序计算得到如下值:  $K_1 = 1.3179$ ,  $K_2 = 0.8874$ ,  $K_3 = 0.5156$ ,  $K_4 = 0.3194$ ,  $K_5 = -0.0789$ ,  $K_6 = 0.6896$ ;  $F_{EX} = 0.8216$ 。

影响电力系统暂态性能的励磁系统的重要参数是调节器放大系数  $K_A$  和时间常数  $T_A$ 。仿真中,  $K_A$

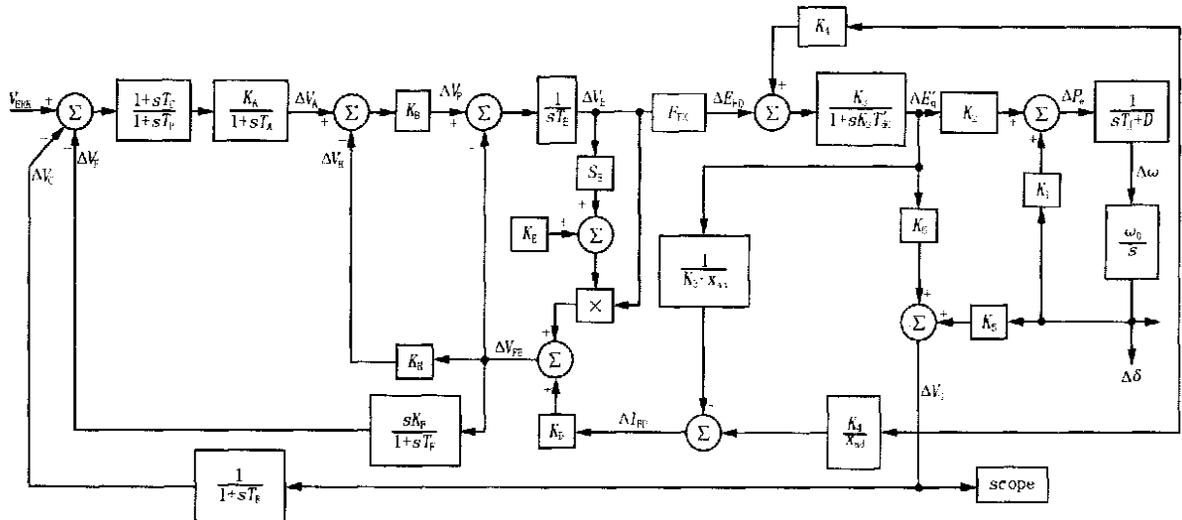


图 2 Simulink 环境中采用 AC-2 型励磁系统的简单电力系统的仿真模型

Fig. 2 Simulation model of AC-2 with SMIB based on Simulink

和  $T_A$  取不同的值,在  $V_{ERR}$  处输入阶跃信号得到在阶跃输入作用下以机端电压变化量  $V_G$  为输出的时域响应曲线,如图 3 和图 4。

### 2.1 放大系数 $K_A$ 对时域响应的影响

固定  $T_A = 0.02$  s,  $K_A$  分别取 10, 50, 100, 200, 300, 400 时得到如图 3 所示的仿真输出波形。

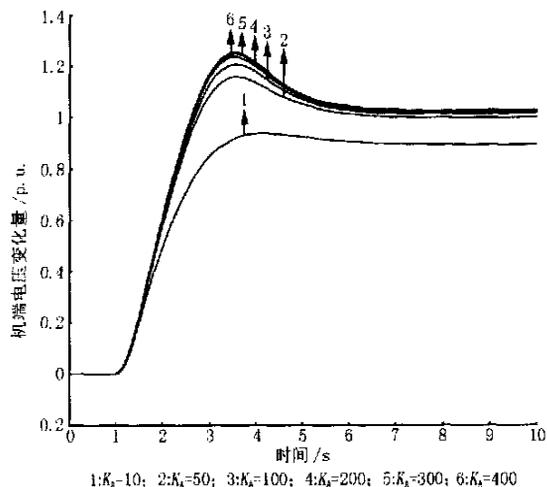


图 3 AC-2 型励磁系统在不同  $K_A$  下的时域响应

Fig. 3 Time response of AC-2 ECS with SMIB at various  $K_A$

由仿真输出,得出系统在不同  $K_A$  下的各项数值型性能指标:稳态值,稳态误差,超调量,上升时间,峰值时间,调整时间如表 1 所示。

表 1 AC-2 型励磁系统在不同  $K_A$  下的数值型性能指标

Tab. 1 Numerical performance values of AC-2

	ECS at various $K_A$						
	$K_A$	10	50	100	200	300	400
稳态值		0.863	0.969	0.984	0.992	0.995	0.996
稳态误差 / (%)		14.7	3.1	1.6	0.8	0.5	0.4
超调量 / (%)			12.2	17.1	20.0	21.0	21.6
上升时间 / s		2.82	2.72	2.69	2.67	2.66	
峰值时间 / s		3.59	3.53	3.51	3.52	3.51	
调整时间 / s			5.21	5.39	5.46	5.48	

从图 3 输出曲线和表 1 中数据可以看出:首先,  $K_A$  对系统稳态输出影响较大,尤其当  $K_A < 100$  时。如果  $K_A$  选得太小,系统将不能跟踪输入的变化而变化。随着  $K_A$  的增加,系统逐渐开始跟踪输入的变化而变化。当  $K_A > 100$  以后,  $K_A$  对系统稳态输出的影响不再明显。其次,  $K_A$  对系统超调量的影响作用类似其对系统稳态输出的影响。此外,随着  $K_A$  的增加,系统的上升时间和峰值时间都在减少,而调整时间却在增大。但当  $K_A > 100$  以后,这种减少和增加已不明显。

### 2.2 时间常数 $T_A$ 对时域响应的影响

当  $K_A = 150$  时,  $T_A$  分别取 0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 s 时,得到如图 4 所示的仿真输出波形。

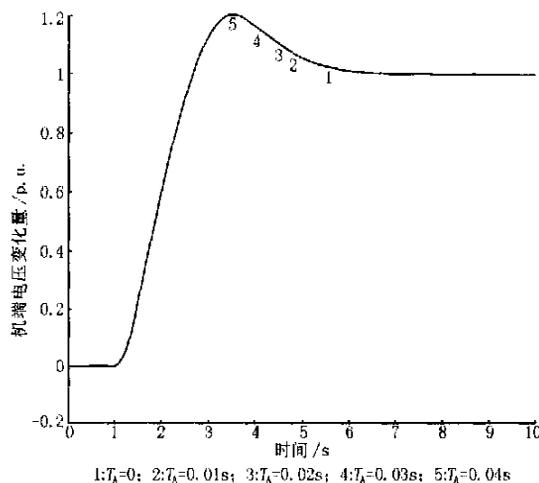


图 4 AC-2 型励磁系统在不同  $T_A$  下的时域响应

Fig. 4 Time response of AC-2 ECS with SMIB at various  $T_A$

从图 4 输出曲线可以看到,  $T_A$  对系统的时域响应并无实质性影响,仅仅对超调量有很细微的影响。

## 3 求解 $K_A$ 的最优值

如前所述,  $K_A$  对系统阶跃响应的影响是单方向的,因此本文采用一维搜索法来寻优。另一方面,系统阶跃响应随  $K_A$  的变化类似于饱和曲线,因此,在寻优过程中采用变步长进行迭代,以加速程序的运行。计算步骤如下:

- 1) 读入系统参数及指定工况的运行参数。
- 2) 计算常数  $K_1 \sim K_6$  及整流系数  $F_{EX}$ 。
- 3) 设定  $K_A$  初值及优化目标。
- 4) 进行仿真,判断输出是否满足优化目标,并计算二者之差。
- 5) 如满足,输出  $K_A$  值。
- 6) 如不满足,根据步 4) 的差值确定步长  $\Delta K_A$ 。置  $K_A = K_A + \Delta K_A$ ,返回步 4)。

按照以上步骤,计算得到本文所采用的例系统的  $K_A$  最优值为 158。

## 4 结论

解决了利用 Matlab/ Simulink 软件包对电力系统的励磁控制进行建模与仿真时,AC-2 型励磁系统与发电机接口的模型建立问题及模型中非线性环节处理的问题。通过模型仿真得出了励磁控制系统 (ECS) 参数对电力系统暂态性能影响的规律:励磁系统的放大倍数  $K_A$  对系统时域响应的各项数值型

性能指标的影响都是单方向且具有饱和特性的;时间常数  $T_A$  对系统的时域响应并无实质性影响,仅仅对超调量有很细微的影响。以此为依据,通过程序设计,求出了给定工况下 AC-2 型励磁系统参数的最优值。

#### 参考文献:

- [1] 李光琦(LI Guang-qi). 电力系统暂态分析(Power System Transient Analysis) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press),1995.
- [2] Rangnekar S. Development of State Space Model and Study of Performance Characteristics of Digital Based Excitation Control System ST4B with Single Machine Connected to Infinite Bus[J]. Proceedings of the IEEE,1999:1460-1465.

- [3] 李基成(LI Ji-cheng). 现代同步发电机整流器励磁系统(Rectifier Excitation System of Modern Synchronous Generator) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press),1987.
- [4] 陈宝林(CHEN Bao-lin). 最优化理论与算法(Optimization Theory and Algorithms) [M]. 北京:清华大学出版社(Beijing: Tsinghua University Press),1989.

收稿日期: 2003-12-05; 修回日期: 2004-01-01

#### 作者简介:

屈艳萍(1977 - ),女,硕士生,主要从事电力系统自动装置参数优化研究;E-mail: yanping-qu@sina.com  
房鑫炎(1963 - ),男,副教授,主要从事电力系统继电保护及自动化研究。

### Study of AC-2 parameters optimization of excitation control system

QU Yan-ping, FANG Xin-yan

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Combining with model simulation and procedure design, the AC2 parameters optimization of excitation control system has been studied. Detailed model of AC-2 with a single machine connected to infinite bus(SMB) has been developed to provide a complete description of the model so as to acquire simulation model which can analyze transient characteristics of power system with the software package Matlab Simulink. The chosen significant parameters of ECS, voltage regulator gained  $K_A$  and time constant  $T_A$  have been varied over a wide range, and time response characteristics have been derived through simulation and computation, and the best values of the parameters arrived at where frequency response characteristics have been derived.

**Key words:** AC-2 excitation control system; parameters optimization; small perturbations; transient characteristics; Simulink

## 灵宝(背靠背)换流站控制保护系统顺利通过业主总体功能和性能测试

日前,许继集团许继电气公司研制的灵宝(背靠背)换流站控制保护系统在北京顺利通过了业主主持的成套设备总体功能和性能测试。业主对控制保护系统的测试结果表示非常满意,认为系统的全部功能和性能完全达到了合同标书的要求。

“十五”期间,随着国家“西电东送”、“大区联网”、“南北互供”、“三峡外送”形势发展需求,国内一系列直流输电工程开始动工建设。为适应市场需求,近年来,许继电气不断加快直流输电控制保护技术的研制步伐。2002年5月,在国家的支持下,许继引进了西门子直流输电控制保护相关技术,在短短一年的时间内,许继就基本完成了技术引进、消化吸收、参与灵宝工程方案的制定等一系列工作。2002年底,许继电气与业主签订了灵宝直流输电工程控制保护设备供货合同。2003年,许继完成灵宝工程成套控制保护设备的设计、制造和试验任务。年底整套设备做出并完成了系统的启停试验。2004年1月至4月,在许继完成了成套控制保护设备厂内系统功能和性能试验。5月,业主组织专家组莅临许继参加了成套控制保护设备的见证试验。6月至7月,许继研制的成套控制保护设备在北京参加了由业主主持的灵宝工程成套设备总体功能和性能测试,控制保护系统的测试结果令业主非常满意。灵宝工程将在2005年6月正式投入商业运行。

据许继电气公司直流输电系统部经理张望介绍,做好灵宝工程,对许继具有重要意义。它是许继高压直流输电控制保护系统首次在国家大型直流输电工程上运用。通过灵宝工程国产化控制保护设备的研制,许继全面掌握了引进技术。引进的SIMADYN D和SU200硬件平台和成套控制保护设备实现了100%的国产化制造。同时,许继通过自主研发,对引进技术中不满足国内工程要求的部分和其它需要改进的部分做了比较全面的升级改进,取得了丰富的国产化成果。