

## 30 MW 汽轮发电机励磁系统参数测试与仿真

李学军<sup>1,2</sup>, 王 击<sup>1</sup>

(1. 中南大学信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 涟源钢铁集团有限公司, 湖南 娄底 417009)

**摘要:** 介绍了大中型企业中自备发电机组励磁系统建模的方法, 通过对华菱涟钢一期发电机组的励磁系统进行现场实测的波形和数据, 结合电力系统分析综合程序 PSASP 进行空载阶跃仿真计算, 并调整仿真计算中的参数, 得出了用于电网暂态稳定性计算中励磁系统的计算模型和参数。仿真实验验证了上述方法的正确性和实用性。为企业电网运行方式的安排及制定电网事故后的处理措施提供了依据。对建有大量分布式发电机组企业的电网稳定性计算具有参考价值。

**关键词:** 分布式发电; 暂态稳定; 励磁系统; 自动电压调节器 (AVR); 仿真; 电力系统分析综合程序 (PSASP)

## Simulation and measurement of excitation system parameters for 30 MW turbo generator

LI Xue-jun<sup>1,2</sup>, WANG Ji<sup>1</sup>

(1. School of Information Science &amp; Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Iron and Steel Company of Lianyuan, Loudi 417009, China)

**Abstract:** This paper introduces the way of modeling for excitation system of generators in large or middle scale enterprises. By means of on-site testing the wave graphics and parameters of excitation system for No.1 generating set in Hualing Lianyuan Iron and Steel Company, applying power system analysis software package (psasp) in no-load step simulation, the mathematical model of excitation system for power system transient stability calculation is built up and the parameters of the model are determined. Simulation results show that the presented method is correct and practicable. It provides the basis when making the grid operation modes or processing the grid faults. The establishment of excitation system is available for enterprise that power network containing many distribution generators.

**Key words:** distributed generation; transient stability; excitation system; automatic voltage regulator (AVR); simulation; PSASP

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)07-0051-03

## 0 引言

在分散电源兴起的初级阶段, 一般认为含分散电源的小系统运行不存在暂态稳定的问题<sup>[1]</sup>, 然而如果大量分散电源接入电网, 则应当考虑暂态稳定问题。钢铁企业中每一期发电项目的建设都是独立完成的, 很少顾及发电机组之间、发电机组与系统之间在扰动情况下电网暂态稳定性的问题。励磁系统模型和参数的准确性是进行电网稳定性仿真计算的基础。励磁系统生产厂家为了保护自己的技术, 大都不能给出比较精确的励磁模型和参数。本文在国家电网公司颁布的《同步发电机励磁系统建模导则》<sup>[2]</sup>基础上, 对华菱涟钢集团的一期项目两台发电机组励磁系统参数进行了测试与仿真。

## 1 发电机励磁系统原型模型及其数学模型

华菱涟钢集团的一期项目两台发电机组(为一型号)均采用常规三机无刷励磁系统<sup>[3]</sup>, 其原型模型如图 1 所示。主励磁机的励磁电源由永磁机的定子绕组经三相可控硅整流桥提供, 同时直流稳压单元的交流电源也取自永磁机。发电机端电压的变化通过调差单元、放大单元后去控制可控硅的导通角, 以此来调节主励磁机的磁场电流, 达到使发电机稳定运行的目的。另外, 为了提高主励磁机供电的可靠性还设有手动控制, 通过调整调压器来调节整流桥的输出直流电压达到调整磁场电流的大小的目的。

整个励磁控制部分包含有自动电压调节器、调差单元、强励限制、低励限制、过励限制和伏赫限

制。

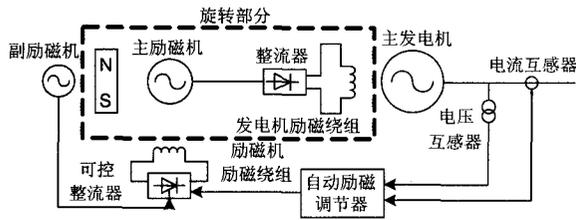


图 1 无刷励磁系统模型

Fig.1 Structural model of brushless excitation system

三机无刷励磁系统数学模型如图 2 所示。从左至右依次为电压测量与电流补偿部分、励磁控制部分(包括串联型 PID 校正、软反馈校正、功率放大、顶值限制、过励限制、低励限制)、励磁系统功率部分。

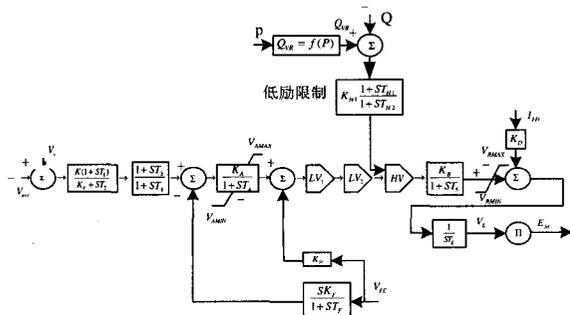


图 2 三机无刷励磁系统数学模型

Fig.2 Mathematical model of brushless excitation system

## 2 励磁系统现场参数测试及计算

励磁系统稳定性仿真计算是以标么值为基础的,文献[2]规定了相关的标么值系统。本文依据发电机制造厂家提供的发电机、励磁机、励磁调节器的技术资料,结合现场试验得到了励磁机空载特性曲线和发电机空载特性曲线,确立了计算所需基准值,从而为励磁系统参数(标么值)计算和发电机时间常数的确定提供了依据[4]。

根据试验计算后所得参数如下:换相电抗的整流器负荷系数  $K_c^{[6]}$ ; 发电机强励电压下的励磁机饱和系数  $S_{e_{max}}$ 、75%的发电机强励电压下的励磁机饱和系数  $S_{e_{0.75max}}$ , 此两项确定 PSASP(电力系统分析综合程序)中所使用的励磁机饱和系数  $C_1$ 、 $C_2^{[6]}$ ; 反映发电机转子电流对励磁机的去磁作用的去磁系数  $K_0$ ; 励磁机组电压上限  $V_{e_{max}}$  (一般由厂家直接给出); 换相电抗的整流器励磁电压上限  $E_{fd_{max}}$ ; 励磁机组时间常数  $T_E$  (一般由厂家直接给出); 励磁机自励系

数  $K_E$ , 对于本模型取为 1; AVR 输出电压限幅值  $V_{r_{max}}$ 、 $V_{r_{min}}$ 。以下是参数计算公式:

$$K_C = \frac{3(X_{de}'' + X_{2e})U_e^2 I_{fb}}{2\pi U_{fb} S_{Ne}} \quad (1)$$

式中:  $X_{de}''$  和  $X_{2e}$  为励磁机次暂态电抗和负序电抗,单位为标么值 (pu);  $U_e$  为励磁机电枢额定线电压,单位为伏 (V);  $S_{Ne}$  为励磁机额定容量,单位为伏安 (VA);  $I_{fb}$  为发电机励磁电流的基值,单位为安 (A);  $U_{fb}$  为发电机励磁电压的基值,单位为伏 (V)。

$$S_e = C_1 e^{C_2 E_{fd}} \quad (2)$$

分别将  $S_{e_{max}}$ 、 $S_{e_{0.75max}}$  和  $E_{fd_{max}}$ 、 $0.75 E_{fd_{max}}$  带入式 (2), 联立求解得到  $C_1$  和  $C_2$ 。

$$K_D = (1 + S_{ED}) \left[ \frac{U_E - E_{FD}}{E_{FD}} - \frac{K_C}{\sqrt{3}} \right] \quad (3)$$

式中:  $U_E$  为与位于恒值电阻线上的励磁电压  $E_{FD}$  对应的在励磁机空载电压曲线上的电压值;  $E_{FD}$  为由恒值电阻线工作点所确定的发电机励磁电压值。

$$V_{r_{max}} = \frac{1.35 K_{EP} U_{ae} \cos \alpha_{min}}{U_{efb}} \quad (4)$$

$$V_{r_{min}} = \frac{1.35 K_{EP} U_{ae} \cos \alpha_{max}}{U_{efb}} \quad (5)$$

式中:  $K_{EP}$  为强励时副励磁机电压下降系数,本模型为永磁机,取 0.85;  $U_{ae}$  为发电机额定负载下的副励磁机电枢线电压值,单位为伏 (V);  $U_{efb}$  为励磁机励磁电压基准值,单位为伏 (V);  $\alpha_{max}$  和  $\alpha_{min}$  分别为可控整流器最大控制角和最小控制角,单位为度 ( $^\circ$ )。

## 3 励磁系统模型和参数的校核<sup>[7]</sup>

实际发电机励磁控制系统是复杂的高阶系统,在电力系统稳定性计算中应用的励磁系统模型都是对实际系统进行简化后得到的降阶模型。因此,将稳定性计算用模型的仿真结果与现场试验的结果进行校核,以确认实际励磁系统模型参数。

励磁系统模型参数的现场校核可以分为发电机空载下小扰动试验校核和大扰动试验校核。小扰动试验校核励磁控制系统小干扰动态特性和相关参数,大扰动试验校核励磁调节器输出限幅值。由于受试验条件的限制,本文只进行了小扰动特性校核试验。

小扰动特性校核的步骤如下:①在发电机空载、电压为额定值的条件下进行一次阶跃响应试验,记录发电机定子电压,阶跃量本文选择为 5%,此时

应将调节器置监控位置。涟钢一期发电机组空载阶跃响应得试验结果如图 3 所示。②在 PSASP 中建立一单机无穷大母线系统,外电抗为发电机同步电抗的 100 倍,调整潮流使发电机运行于空载状态。③运用 PSASP 进行暂态稳定性计算,选择发电机定子电压为输出量,仿真结果如图 4 所示。④对比仿真结果与试验结果,有差异时对 PID 环节的时间常数进行修正,直至两者之间的偏差在文献[1]规定的允许范围之内。

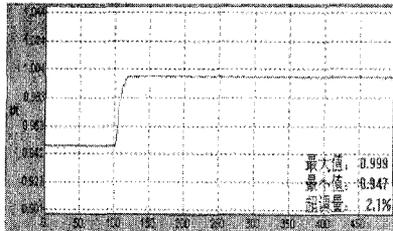


图 3 一期机组空载阶跃响应的试验结果

Fig.3 Testing results of no-loading step of No.1 generating set

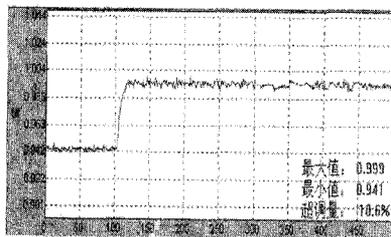


图 4 一期机组空载阶跃响应的仿真结果

Fig.4 Simulation results of no-loading step of No.1 generating set

试验结果与仿真结果品质参数如表 1 所示:

表 1 试验结果与仿真结果的对比

Tab.1 Comparison between testing results and simulation results

参数	实测结果	仿真结果	允许偏差值
$T_p$ /s (峰值时间)	0.38	0.40	± 0.1
$M_p$ / (%) (超调量)	2.1	10.6	± 5
$T_s$ /s (调节时间)	0.97	1.05	± 2
$N$ (振荡次数)	1.00	1.00	1.00

比较两者结果可以看出,超调量存在很大差异,因此有必要对 PID 模型的时间常数进行修正。

#### 4 稳定计算程序中使用的励磁系统模型参数

在电力系统分析综合程序 PSASP 中,经过修正后的参数如表 2 所示。表中:  $T_r$  为量测环节时间常

数;  $V_{\max}$  为放大环节输出上限;  $V_{\min}$  为放大环节输出下限;  $T_a$  为功率放大环节时间常数;  $K_a$  为功率放大环节增益;  $K_f$  为并联校正环节增益;  $T_f$  为并联校正环节时间常数;  $K_{f1}$  为用来调节时间常数补偿度的比例反馈系数;  $X_c$  为调差电抗;  $T_1 \sim T_4$  为串联校正环节的时间常数;  $K_b$  为第二级调节器增益;  $T_5$  为第二级调节器时间常数。

表 2 PSASP 中涟钢一期机组励磁系统参数

Tab.2 Excitation system model parameters of No.1 unit in Lianyuan Iron and Steel Company in stability calculation program

模型参数	数值	模型参数	数值
$T_r$ /s	0.02	$V_{\max}$ /pu	15.00
$V_{\max}$ /pu	14.50	$V_{\min}$ /pu	-15.00
$V_{\min}$ /pu	-14.50	$K_f$ /pu	1.00
$K$ /pu	75.00	$T_f$ /ms	0.80
$K_a$ /pu	0.00	$C_1$	0.31
$T_1$ /s	4.00	$C_2$	0.25
$T_2$ /s	4.00	$K_f$ /pu	1.00
$T_3$ /s	0.20	$T_f$ /ms	0.00
$T_4$ /s	0.03	$K_b$ /pu	0.38
$K_c$ /pu	1.80	$E_{fd\max}$ /pu	5.25
$K_b$ /pu	1.00	$V_{\max}$ /pu	9999.00
$T_a$ /s	0.02	$K_{f1}$ /pu	0.00
$T_5$ /s	0.00	$X_c/\Omega$	2.68

#### 5 结论

为了研究大量自备发电机组的并网给企业电网稳定性所带来的影响,本文利用电力系统分析综合程序结合现场实测数据,得到了华菱涟钢一期两台发电机组稳定计算用励磁系统的模型和参数,为确定企业电网的运行方式奠定了基础。本文以华菱涟钢 2×30 MW 发电机为实例,提出的励磁系统参数测试方法,对大量建有分布式发电机组企业的电网稳定性计算具有参考价值。

#### 参考文献

[1] 阮前途,陶玉华.大电网中小系统的安全运行[J].华东电力,1997,(6):5-8.  
 RUAN Qian-tu,TAO Yu-hua. Safety Operation of Regional Power System in Large Power Grid[J].East China Electric Power,1997,(6): 5-8.  
 [2] Q/GDW 142-2006,同步发电机励磁系统建模导则[M].北京:国家电网公司,2006.  
 Q/GDW142-2006,Rule for Modeling Generator Excitation System[M].Beijing: State Grid Corporation of China,2006.

(下转第 82 页 continued on page 82)

简单分析电流互感器内部有接地点其形成机理如图 1 所示。

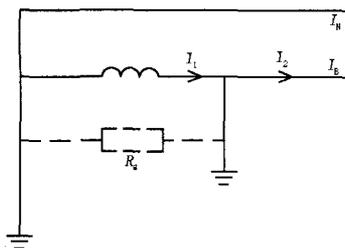


图 1 电流互感器绕组内部有接地点原理图

Fig.1 Principle diagram of current transformer winding internal earth point

电流互感器内部有接地点,端子箱有接地点,两个接地点存在地网电阻  $R_g$ ,端子箱接地点存在时, $R_g$  较小,分流大,B相减少越多,当接地点改在主控时,由于  $R_g$  较大,分流明显减弱,相量测试结果正常。另外,电流互感器开路有高压,有较大的入地电流,使分流作用明显,所以测试结果是可解释的。

## 2 结束语

在实际工作中,造成电流互感器回路多点接地主要有以下几点:(1)主控室内控制屏和保护屏分别接地,引起两点接地。(2)10 kV 开关柜出厂时电流二次回路接地点已和断路器外壳连接,在安装中开关柜与接地网连接,已有一点接地,又在控制室接地,造成电流回路两点接地。(3)在对变电所的改造

中,将接地点改接在控制室,将户外端子箱接地点解开,但由于人为疏忽,造成电流回路两点接地。(4)电流二次回路绝缘损坏接地,造成电流回路两点接地。(5)电流互感器绕组绝缘损坏接地。

此现场实例表明,不仅是差动保护回路的电流互感器一点接地及接地点选择问题非常重要,其它类型保护电流互感器回路接地问题同样非常关键!在执行部颁反措要点时,应将多组电流互感器回路独立接地,并且统一接地点在主控制室。这样,接地点标志明显,便于检查、管理,不易形成多点接地。即使电流互感器回路绝缘破坏造成多点接地,也能最大程度地减少分流,使影响降到最小。由于电流互感器回路多点接地没有监察装置,使缺陷不能及时发现处理,所以必须非常重视电流互感器回路绝缘测试,应保证定期测试。

## 参考文献

- [1] 电力系统继电保护及安全自动装置反事故措施要点[S].
- [2] 国家电网公司十八项电网重大反事故措施. 继电保护专业重点实施要求[S].
- [3] 邹森元. 电力系统继电保护及安全自动装置反事故措施要点[Z].

收稿日期: 2007-08-30; 修回日期: 2007-10-23

作者简介:

郭润生(1969-),男,高级工程师,高级技师,长期从事继电保护运行管理工作。E-mail:grs2283@sina.com

(上接第 53 页 continued from page 53)

- [3] 杨冠城. 电力系统自动装置原理(第三版)[M].北京:中国电力出版社,2002.  
YANG Guan-cheng.Theory of Power System Automatic Device[M].Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [4] 锁军,史可琴,等. 渭河 3 号机组励磁系统参数测试与仿真[J]. 电网技术,2007,31(5):72-74.  
SUO Jun,SHI Ke-qing,et al. Simulation and Measurement of Excitation System Parameters for No. 3 Unit in Weihe Power Plant[J]. Power System Technology, 2007,31(5):72-74.
- [5] 刘永奇,苏为民,等. 华北电网大容量发电机励磁系统建模与参数辨识测试[J].电网技术,2007,31(5):64-71.  
LIU Yong-qi,SU Wei-min,et al. Modeling and Parameter Testing and Recognition for Excitation Systems of High-Capacity Generators in North China Power Grid[J]. Power System Technology, 2007,31(5):64-71.
- [6] 李基成.现代同步发电机励磁系统设计及应用[M].北京:中国电力出版社,2002.

LI Ji-cheng. The Design and Application of Modern Synchronous Generator Excitation System[M].Beijing: China Electric Power Press,2002.

- [7] 赵红光,刘增煌,等. 华中-川渝联网稳定计算用发电机励磁和调速系统的数[J].电网技术, 2007, 31 (5): 50-63.  
ZHAO Hong-guang,LIU Zeng-huang,et al. Research on Mathematical Models and Parameters of Generator Excitation System and Governor System for Stability Analysis of Interconnection of Central China Power Grid with Sichuan-Chongqing Power Grid[J]. Power System Technology, 2007,31(5):50-63.

收稿日期: 2007-09-09; 修回日期: 2007-10-26

作者简介:

李学军(1979-),男,硕士研究生,研究方向为分布式发电对配网的影响; E-mail: lxjzld981080@yahoo.com

王 击(1968-),男,副教授,主要从事配网重构的研究。