

# 50MW 机组仿真机电气系统研制<sup>\*</sup>

陈鸣山

(南京师范大学动力工程学院, 南京, 210042)

[摘要] 描述了 50MW 火电机组电气系统的仿真开发, 叙述了系统功能、数学模型和程序软件. 经多年运行实践证明, 该系统模型准确、操作可靠、功能齐全.

[关键词] 50MW; 电气系统实时仿真; 数学模型; 机网接口

[中图分类号] TM 611; [文献标识码] B; [文章编号] 1008- 1925(2001)04- 0022- 05

## 1 50MW 仿真机电气系统概述

电厂仿真机是现代化教育设施. 50MW 热电机组仿真培训电气系统, 是在原化工部的支持下, 以金陵石化公司热电厂 1、2 号机组(QFS- 60- 2 型) 为原型进行仿真的. 电气仿真系统的一次系统图见图 1.

从仿真实念出发, 电站仿真要求在环境、气氛、控制室结构和仪表盘的布置等方面, 作与实际原型机一样的全仿真<sup>[1]</sup>. 从教学实际出发, 追求高的性价比, 可对仿真操作盘台作较大的简化, 作原理型仿真<sup>[2]</sup>. 综合以上观点, 采用国产微机化仿真系统, 对仿真操作盘台作一定的简化, 以保证工科学生实际操作能力的最大提高, 并满足电厂运行人员培训的需要. 电气仿真系统的硬件部分包括: 主控制盘台, 就地操作站和辅助显示台.

主控制盘台主要布置发电机变压器组、出线、厂用电等的监视与操作所必需的操作开关、显示仪表和信号报警设置等.

就地操作站主要利用可视化技术和声响设置模拟一些在实际运行中需要到控制室外的现场就地操作任务. 虚拟现场图中所有开关的操作均具有在线/ 离线两种状态. 在线状态时, 任一开关的操作需确认被仿真模型接受后, 才能进行其它开关的操作.

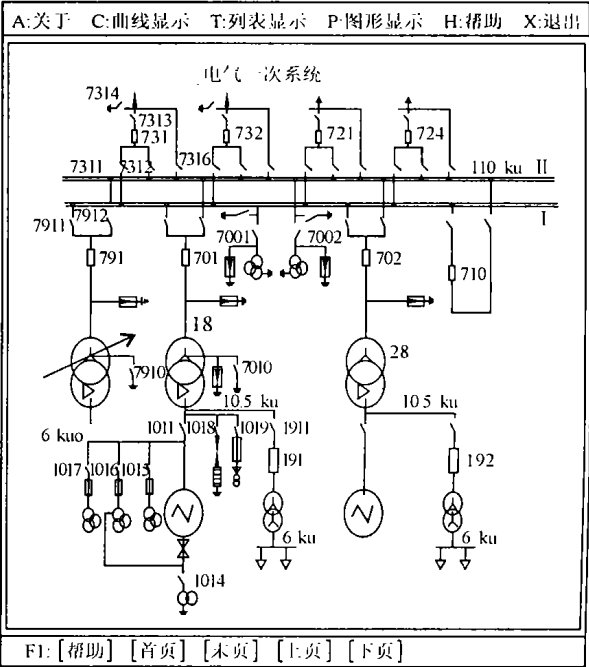


图 1 电气一次系统图

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2001- 05- 30

作者简介: 陈鸣山, 1944- , 南京师范大学动力工程学院副教授, 主要从事动力系统仿真以及图形化自动建模方面的教学与研究.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

辅助显示台设置大屏幕显示器. 该显示台以系统图、布置图、数据表、趋势曲线、追忆重复曲线等可视彩色画面提供给机、炉、电运行人员, 供学员决策分析和辅助操作作用.

## 2 电气仿真系统的功能

仿真系统的核心是系统过程的模型, 以确保电气仿真系统的各种功能. 功能的设置主要考虑两个因素, 一是要求仿真过程“实时”、“逼真”; 二是要求尽量发挥仿真机的先进功能, 如冻结、返回、重演、快慢速、变参数等, 反复做各种过程, 理论与实践充分结合.

本电气仿真系统主要功能有:

- (1) 由教师在指导员台用键盘或鼠标设置不同的起动状态, 包括冷态、热态、任意工况 3 类起动方式, 可存储 99 种任意工况.
- (2) 作单元机组的动态运行, 由起动、同期到无功有功调节, 直到解列.
- (3) 同期系统操作, 含自动、手动准同期和同期闭锁.
- (4) 自并励直流励磁机的励磁及调节, 含自动、手动励磁调节及强励; 模拟灭磁.
- (5) 双母线母联开关与相关隔离刀闸操作, 多路线(如图 1)上断路器与隔离刀闸操作.
- (6) 厂用电、备用厂用电等线路上断路器与隔离刀闸倒闸操作及相应连锁. 操作需符合安全规程, 否则命令被闭锁或造成事故.
- (7) 模拟电气系统约 50 种故障和故障的组合以及相应线路参数的改变, 以培养学员对运行中各种突发事件的应变能力.
- (8) 模拟多套继电保护装置的动作及正确的连锁保护、信号报警.
- (9) 仿真过程控制: 冻结、解冻、重演、追忆、强行返回、结束运行、快慢速调整. 以及工况保存、数据打印、操作水平评定.

## 3 数学模型

数学模型是系统仿真功能的核心. 电气系统是复杂的多参数仿真对象, 本仿真机在确保足够的仿真精度( $\pm 3\%$ )并满足实时性要求的前提下, 对模型作了必要的化简.

### 3.1 总体框图

电气系统模型可以分为 5 个部分: 发电机动态模型、励磁机及调节系统动态模型、机网接口、网络模型、转子动态模型. 电气部分通过机械力矩及转速两个变量同汽机模型接口. 其原理性连接如图 2 所示.

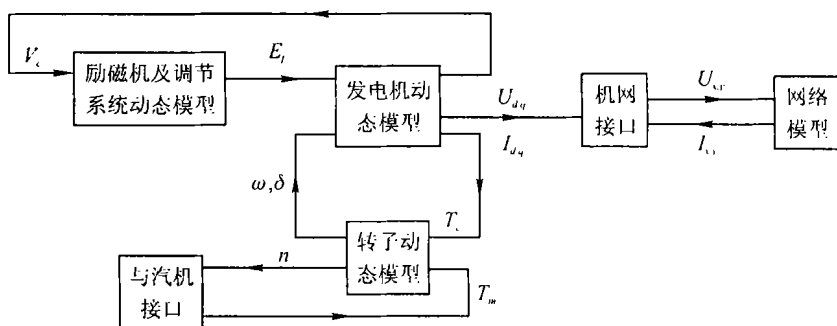


图 2 电气部分仿真原理框图

### 3.2 发电机电压方程

发电机采用实用模型<sup>[4]</sup>, 计及转子  $d$  轴励磁绕组及  $q$  轴瞬变阻尼绕组的动态过程. 忽略定子中的非周分量. 其电压方程为:

$$U_d = E_d + X_q I_q - Y_a I_d \quad (1)$$

$$U_q = E_q + X_d I_d - Y_a I_q$$

$$T_{qo} \frac{d}{dt} E_d = -E_d + (X_q - X_q) I_q \quad (2)$$

$$T_{do} \frac{d}{dt} E_q = E_f - E_q - (X_d - X_d) I_d$$

式(1)、(2)中  $U$ 、 $I$ 、 $E$ 、 $E$ 、 $Y_a$  分别为各绕组的电压、电流、电势、暂态电势和内阻. 下标  $d$ 、 $q$ 、 $f$  分别表示同步发电机的  $d$  轴、 $q$  轴和励磁绕组.  $X_d$ 、 $X_q$  分别表示同步发电机的  $d$  轴、 $q$  轴电抗.  $X_d$ 、 $X_q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴暂态电抗.  $T_{do}$ 、 $T_{qo}$  分别为励磁绕组、 $q$  轴阻尼绕组惯性时间常数.

对式(2)作差分处理, 有:

$$E_d(t) = A_q(X_q - X_q) I_q(t) + F_d \quad (3)$$

$$E_q(t) = A_d(X_d - X_d) I_d(t) + F_q$$

其中:  $F_d = E_d(t - \Delta t) + A_q[(X_q - X_q) I_q(t - \Delta t) - 2E_d(t - \Delta t)]$

$$F_q = E_q(t - \Delta t) + A_d[(E_f(t) + E_f(t - \Delta t) - (X_d - X_d) I_d(t - \Delta t) - 2E_q(t - \Delta t)]$$

引入  $A_d$ 、 $A_q$ 、 $F_d$ 、 $F_q$  作中间变量以简化模型计算:

$$A_d = \Delta t / (2T_{do} + \Delta t), A_q = \Delta t / (2T_{qo} + \Delta t).$$

### 3.3 励磁系统动态方程

自动励磁调节器为一阶惯性环节, 考虑到其时间常数很小(0.05), 在此简化为比例环节. 由于励磁机中有自励分路对其有正反馈影响, 故在励磁机环节中引入  $K_E$  表示. 又考虑到自动调压的非线性因素, 故引入限幅环节控制. 由此可得励磁调节系统框图如图 3 所示.  $V_{GN}$ 、 $V_{EN}$ 、 $V_{ESD}$  分别为机端电压、手动调节和强励电压给定值,  $E_f$  为同步发电机转子绕组输入电势.

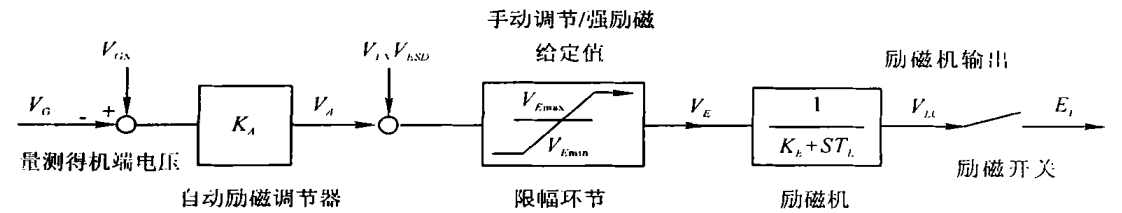


图 3 励磁及调节系统框图

有励磁机及调节系统的动态方程如下:

$$V_A = K_A(V_{GN} - V_G) \quad (4)$$

$$T_E \frac{dV_{LC}}{dt} = V_E - V_G$$

差分方程:  $V_A(t) = K_A[V_G(t) - V_{GN}(t)]$

$$V_{LC}(t) = \frac{2T_E - \Delta t}{2T_E + \Delta t} V_{LC}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t(V_E(t) + V_E(t - \Delta t))}{2T_E + \Delta t} \quad (5)$$

### 3.4 转子瞬态转矩 - 功率方程<sup>[4]</sup>

由于在仿真中把阻尼绕组产生的转矩和转动损耗造成的机械阻尼转矩的影响归入汽机机械功率  $P_m$  中, 因此在转子模型中不考虑阻尼项:

$$T_J \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \quad (6)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1.0) \omega_s$$

其中:  $P_m$  为机械功率;  $P_e$  为电磁功率;  $\omega$  用标么值,  $\omega$  为转子电角速度;  $\omega_s$  为同步电角速度;  $\delta$  为转子相对于同步参考轴的电角位移,  $P_e = U_d i_d + U_q i_q + r_a (i_d^2 + i_q^2)$ 。

令(6)中  $dt$ 、 $d\omega$ 、 $d\delta$  分别用  $\Delta t$ 、 $\omega(t) - \omega(t - \Delta t)$ 、 $\delta(t) - \delta(t - \Delta t)$  代, 可得差分方程:

$$\omega(t) = \omega(t - \Delta t) + \Delta t [P_m(t) - P_e(t)] / T_J$$

$$\delta(t) = \delta(t - \Delta t) + \Delta t \omega(t) \omega_s \quad (7)$$

### 3.5 网络的等值电路

网络计算采用  $X - Y$  坐标的准稳态模型, 即只考虑各电量的基波成分, 全部计算在复数域内进行。网络形成统一的正序等值电路。当线路发生故障产生不对称分量时, 采用序网模型分解, 分成对称的正序、负序、零序网络, 根据故障点条件进行相应的连接, 最后折合成一等效作用的故障电阻, 并入网络的等值电路。网

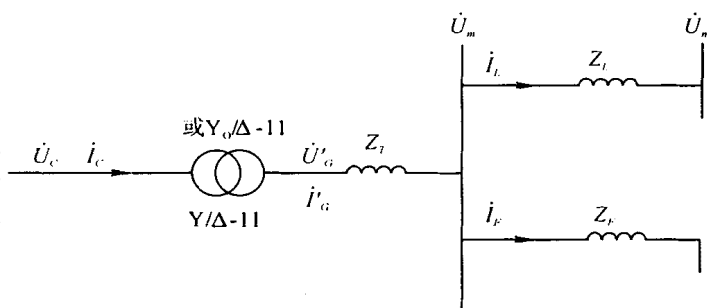


图4 网络等值电路图

络的等值电路如图4所示。将变压器阻抗折合到高压侧, 变压器化成理想变压器, 其移相作用在机网接口中体现。等值  $Z_F$  就是折合的等值故障阻抗。

### 3.6 机网接口坐标变换

在计算中, 发电机采用的是  $d - q$  坐标, 而网络采用的是  $X - Y$  坐标, 因此必须通过接口公式, 才能将它们联立, 求解。不失一般性, 可设  $t = 0$  时,  $X$  轴与  $(U_n)d$  轴重合。

令  $\delta$ :  $q$  轴领先  $X$  轴的角度, 即发电机功角;  $\gamma = \delta - \pi/2$ :  $q$  轴领先  $Y$  轴的角度。有坐标转换公式:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma \\ -\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma \\ \sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

要说明的是, 在发电机和网络之间还有一变压器。由图4可见, 将实际变压器化成理想变压器与变压器阻抗串联, 计算中变压器阻抗并入网络模型。理想变压器的移相作用在机网接口中其  $\delta$  角中即包含了变压器的相移量, 要注意在计算静态功角初值时加入变压器的相移量。将接口公式代入发电机差分方程, 可得接口等值电路。将该等值电路同网络等值电路相连, 即可得整个电气一次系统的等值电路, 因此求出各电量在  $X, Y$  坐标下的值。

## 4 电气系统仿真软件

### 4.1 总体框图

现只介绍电气仿真中模型计算的总体结构, 电气模型计算的主要流程如图 5 所示.

## 4.2 电气系统源程序及数据文件组成

计有输入输出变量文件、电气计算中间变量文件、恒参数定义文件、并行 FORTRAN 源程序、电气系统主程序、输入输出程序、开关初始化子程序、电气故障程序、电气操作入口程序、开关操作程序库、电器网络计算程序、电气一次计算程序、电气操作出口程序、电气保护程序、以及各种常数、各种工况数据文件. 所有程序约占 3500 行.

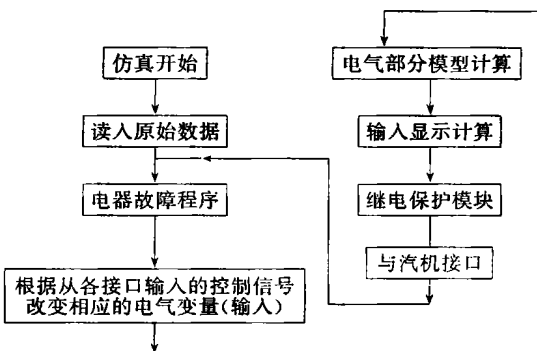


图 5 电气模型计算流程图

## 5 结束语

几年来, 50MW 火电机组电气仿真系统在省内外电力部门运行人员和管理人员的培训工作中发挥了较好的作用, 并已成为校内外学生的专业实习和专业教学的坚实基础, 对教学质量的提高起到了十分有益的作用.

本仿真系统具有以下特点. (1) 系统功能齐全, 既满足了正常工况操作培训的多种需要, 又满足了事故演练培训的专业需要, 灵活性强. (2) 该系统系国内第一套微机化的 50MW 仿真机, 介于全仿真与原理型仿真之间, 具有很高的性价比. (3) 模型用 C++ 语言开发, 面向对象, 模块化结构, 目标程序效率高, 移植性和维护扩展好. (4) 采用可视化仿真支撑系统<sup>[5]</sup>, 有方便的人机交互和完善的交互软件, 彩色图、数据表、线条图、曲线形象直观, 并可完善地输出打印、绘制、文件拷贝. (5) 仿真模型准确可靠, 精度高.

### [参考文献]

- [1] 于荣生. 大型发电机组的模块化建模与仿真[J]. 华北电力学院学报, 1989, (2)
- [2] Rafian M. Real\_ Time Power System Simulation[J]. IEEProc, 1987, 1134(3)
- [3] 邓小文. 核电站仿真器电气系统软件的开发与改进[D]: [学位论文]. 北京: 清华大学, 1990
- [4] 倪以信. 动态电力系统理论和分析[M]. 清华大学出版社, 1994
- [5] 程芳真. 可视化计算与仿真支撑系统——VCS3[J]. 清华大学学报, 2000, 40(2): 102 ~ 105

# The Study of Electrical System for 50MW Power Unit Simulator

Chen Mingshan

(College of Power Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing, 210042, PRC)

**Abstract:** The electrical system for 50 MW power unit simulator was studied in this paper. A mathematical model to describe the simulating processes was proposed and the program software was made for the simulating operation. The running experience shows that this system is effective, reliable and functional.

**Key words:** 50MW ; power plant ; electrical system ; simulator

[责任编辑: 严海琳]