

发电机并网模型在APROS仿真平台上的实现

王宝安¹,刘玉芳²,万秋兰¹,朱德师³
(1. 东南大学 电气工程系,江苏 南京 210096;
2. 南京工程学院 仿真部,江苏 南京 210013;
3. 扬州第二发电公司 运行处,江苏 扬州 225131)

摘要: 针对电厂希望对机组进行全范围、全工况、实时、连续仿真的迫切要求,提出采用高级过程仿真软件(APROS)作支撑平台开发集操作培训、工程分析研究于一体的多功能仿真机。指出火电版本 APROS 提供的图形化电气模型库中只有母线、开关、发电机、变压器、线路、负荷几种简单的元件,为弥补其不足,部分电气设备如励磁等可采用数学函数模块或逻辑模块组合建模。文中励磁建模是根据励磁系统的物理特性,建立由比例-积分-微分 3 个函数叠加作为主要环节的励磁系统数学传递函数。发电机同期并网时要求冲击电流要小,并网后发电机能迅速进入同步,因而文中建立的同期模型具备调节功能使得并网断路器两端的电压有效值、电压频率、相角 3 个分量的差为零。

关键词: 并网; APROS; 仿真培训; 数学模型

中图分类号: TM 76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2006)11-0018-03

近年来,随着用电需求的增加和技术的进步,越来越多的大容量、高参数、自动化程度高的火电机组投入运行。通过机组仿真技术验证机组运行的安全性、稳定性和经济性日益得到了重视。传统的机组仿真因受当时的计算机等技术水平的限制,只能对机组某些局部的动态特性进行仿真。而目前运行现场已要求仿真机能对机组进行全范围、全工况、实时、连续的仿真,并能为机组安全、经济运行提供故障诊断、性能预测和控制优化等功能。开发一台集操作培训和工程分析研究于一体的多功能仿真机已显得非常急迫^[1-3]。

在经过多次调研论证后,采用了目前国际先进的图形仿真软件——高级过程仿真(APROS)支撑平台开发某电厂 600 MW 火电机组的仿真机。本文将着重介绍在 APROS 上实现的包括励磁、同期在内的电气并网模型。

1 仿真平台介绍

目前,APROS 的火电、核电、造纸三大版本软件广泛应用于火电厂、核电厂、化工、造纸等在内的多种行业^[4-5]。

APROS 是一个多功能仿真系统,以火电版本为例,它可以用于协助解决电厂所有阶段的各种任务,包括前期的可行性设计、安全分析、运行指导、控制系统测试、技术改进及培训仿真等,如图 1 所示。

火电版本 APROS 仿真平台由用户图形界面、热工过程模块库、控制系统模块库、热力计算库、电气系统模块库、仿真实时数据库及 APROS 仿真引擎组成,如图 2 所示。

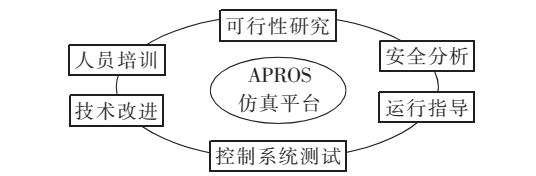


图 1 APROS 应用于电厂的示意图
Fig.1 Application of APROS in power plant



图 2 APROS 仿真平台的组成
Fig.2 The composition of APROS

在用户图形界面 Grades 中,用户通过模型搭建并在模型的属性框中填写相关初始参数即可完成仿真模型的图形组态。APROS 运行时模型参数的变化会实时在线地传递给 APROS 仿真引擎并在实时数据库中加以更新。在任意时刻,模型的运行过程都以快照文件的形式保存,保存内容有模型及其状态的完整信息。除了模型组态和修改外,APROS 还提供管理工具控制仿真计算过程,以及通过数值监控方式或者趋势图方式监视仿真模型的动态性能,其中数值监控可监视指定部件属性的瞬时值,而趋势图可显示模型某些参数的长期性能。

火电版本 APROS 提供的电气系统图形化模型种类相对精简,有母线、开关、发电机、变压器、线路、负载等 6 种。这样,仿真机中的一些必不可少的电气设备^[6-7]如励磁等就需要根据其物理特性采用数学函数模块或者逻辑模块进行组合建模。

2 并网建模

本文介绍的并网模型主要包括励磁、同期等电气环节。图 3 是发电机的简化示意图。

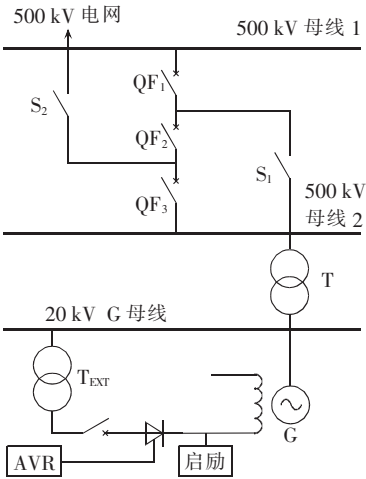


图 3 发电机系统示意图
Fig.3 The sketch diagram of generator system

该厂并网为准同期并网,并网开关选择靠近 500 kV 母线的断路器 QF_1 。发电机定子额定电压 20 kV,采用数字式静态自并励励磁。由于发电机启动并网前转子剩磁切割定子绕组所产生的定子电压很低,不满足自并励系统的启励要求,因此在励磁前期必须引入启励电源。当发电机定子电压达到额定电压 40 % 左右时,启励电源将自动退出,之后发电机定子电压经励磁变压器 T_{EXT} 降压后经晶闸管整流为直流电源向发电机转子提供励磁电流。励磁电流的大小由自动电压调节器(AVR)控制。待并网断路器 QF_1 两端电压接近并网条件时,投入自动同期装置,由自动同期装置完成发电机与系统的并网。

2.1 励磁建模

APROS 中的电气系统模块库相对简单,在搭建发电机励磁系统模型时,APROS 模块库不能提供现成的整流器等元件,因此,根据励磁系统的物理特性,建立纯数学传递函数表示自并励励磁系统^[8-9],如图 4 所示。

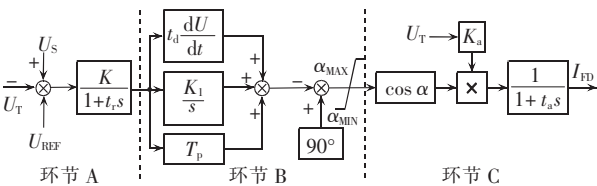


图 4 励磁系统传递函数
Fig.4 The transfer function of excitation system

图 4 中将函数划分为 A、B、C 3 个主要环节,其中环节 A 中 U_s 分量是电力系统稳定器(PSS)的输出,由于目前厂家 PSS 功能没有投入,在仿真时将 U_s 分量作零处理。 U_T 分量是发电机实测端电压,

作为该传递函数的反馈量。 U_{REF} 分量是励磁系统的目标调节分量。另外,环节 A 中的一阶惯性函数表示励磁系统信号调理电路对模拟量的影响,环节 B 代表了自励励磁系统中 AVR 的调节算法,由比例-积分-微分 3 个函数叠加组成一个非线性分量并作正弦-余弦角度换算及限幅处理后得到整流柜中晶闸管的控制触发角,环节 C 是自并励励磁系统三相交流晶闸管整流电路的数学模型,其区别于其他励磁系统的一个重要特征就是其中的乘法器引入了发电机实测端电压 U_T 分量,这是因为自并励励磁的交流电源就取自发电机定子出口电压。由于发电机转子为感性绕组,励磁电压和励磁电流存在一阶惯性函数关系,但延迟时间 t_a 很小,通常可近似取 0。最后,励磁传递函数的输出值 I_{FD} 连接到 APROS 提供的发电机元件就可以实现自并励励磁的整个环节。

2.2 同期建模

发电机并网时需要遵循的原则是并网断路器合闸时,冲击电流应尽可能小,在并网后发电机应能迅速进入同步运行状态,以减小并网对系统的扰动。理想的并网条件是要求并网断路器两端的电压有效值、电压频率、相角 3 个分量的差为零。但在实际操作时,只需前述 3 个差值分别在接近于零的范围内就可以进行合闸操作^[10]。

在搭建 APROS 同期模型时,采用了控制系统模块库的大量分立模块,其基本原理如图 5 所示。

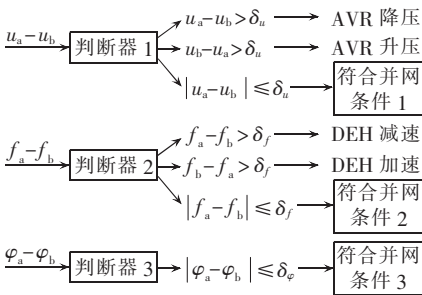


图 5 同期装置数学模型
Fig.5 The math model of synchronization device

图 5 中, u_a 、 f_a 、 φ_a 分别为并网断路器发电机-主变压器高压侧电压有效值、频率和相位角; u_b 、 f_b 、 φ_b 分别代表并网断路器 500 kV 系统侧电压的有效值、频率和相位角; δ_u 、 δ_f 、 δ_φ 分别代表准同期并网装置对合闸并网所设置的电压有效值差、频率差和相位差的阈值。只有当电压有效值差、频率差和相位差的实际数值均同时低于这 3 个阈值且汽轮机数字式液压控制系统(DEH)允许自动同期时,同期装置才会向并网断路器发送合闸命令,如图 6 所示。

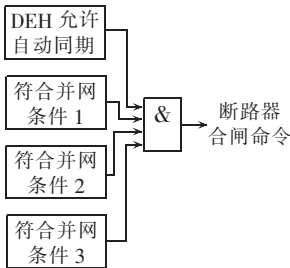


图 6 并网断路器合闸条件
Fig.6 The close logic of parallel-in switch

3 仿真结果

该电厂并网操作票规定,采用自动励磁调节方式时,发电机启励后发电机端电压首先上升到90%额定电压,然后手动升压到20 kV。图7给出了并网期间发电机端电压的变化波形(因图形缩小,原时间和电压刻度看不清,笔者对图7上部分典型数值作了标记)。

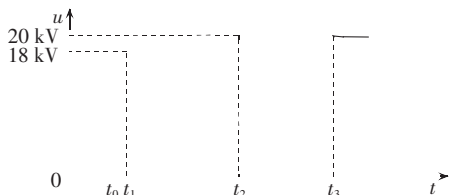


图7 并网期间发电机端电压

Fig.7 The terminal voltage of generator during parallel-in

t_0 时刻合上励磁开关,经过很短的时间到 t_1 时,发电机端电压迅速上升到峰值19 kV左右,经过2次超调振荡后,端电压稳定在18 kV。之后通过几次手动升压,在 t_2 时刻将发电机端电压升到20 kV。在 t_3 时刻,如此时机组转速接近并网允许转速,DEH下达并网允许指令,则同期装置开始判断并网断路器两端电压有效值的差值、频率差值和相位差值,如差值超过并网条件,则同期装置向AVR和DEH传送相应的调节发电机端电压或者汽轮机转速的指令(图7电压波形从 t_3 开始出现的略微下降就表明同期装置向AVR发送了降低发电机端电压的指令)。当并网断路器两端电压的有效值的差值、频率差值和相位差值进入并网允许阈值时,同期装置向并网断路器发送并网合闸命令,从而完成了同期并网的整个过程。

4 结论

a. APROS 仿真支撑系统是一个优秀的过程仿真系统,它可以用于电厂从设计到运行的各个阶段,能够真实模拟电站热力系统、控制系统以及电气系统的全范围全过程的动、静态特性。

b. 在 APROS 平台上实现电气并网系统的仿真时,部分设备没有库元件,可根据设备原理用数学模型来表示,仿真结果证明该方法是可行、有效的。

c. 目前,电厂已用该仿真机对运行人员和新员工进行了轮训。参加培训人员一致认为,该仿真系统所模拟的机组启动、并网、停机等仿真效果良好,各种工况下的参数变化、异常情况与现场一致^[11-12]。

参考文献:

- [1] 吕崇德,任挺进,姜学智,等. 大型火电机组系统仿真与建模[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [2] 何敏,吕崇德. 新一代的电站仿真技术[J]. 系统仿真学报,2001,13

(1):83-85.

HE Min, LÜ Chong-de. Power plant simulation: technologies in the next generation[J]. Journal of System Simulation, 2001, 13 (1):83-85.

- [3] 李建华,刘晓鹏,耿建,等. 电厂电气运行人员培训仿真系统软件开发[J]. 电力系统自动化,2002,26(11):37-40.
- LI Jian-hua, LIU Xiao-peng, GENG Jian, et al. Development of software for operator training simulation system in power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(11):37-40.
- [4] 蔡宝玲,王哲,魏湘,等. 基于引进仿真支撑软件 APROS 的电站仿真培训系统热力发电[J]. 热力发电,2004,33(11):7-13.
- CAI Bao-ling, WANG Zhe, WEI Xiang, et al. Power plant emulating training system based on artificial supporting software APROS[J]. Thermal Power Generation, 2004, 33(11):7-13.
- [5] 陈松,朱学农,张会敏. 恰希玛核电站全范围模拟机的建模与验证[J]. 上海铁道大学学报,1998,19(5):135-139.
- CHEN Song, ZHU Xue-nong, ZHANG Hui-min. Chashma Npp-1 full scope training simulator APROS[J]. Journal of Shanghai Tiedao University, 1998, 19(5):135-139.
- [6] 万秋兰,单澜达,陈欽技. 发电厂电气主系统培训仿真实用模型[J]. 东南大学学报,1999,29(1):74-77.
- WAN Qiu-lan, SHAN Yuan-da, CHEN Xin-ji. Practical model of training simulation for power plant electrical system[J]. Journal of Southeast University, 1999, 29(1):74-77.
- [7] 刘玉芳,万秋兰. 基于 APROS 的发电厂电气系统仿真模型[J]. 电力自动化设备,2005,25(1):66-68.
- LIU Yu-fang, WAN Qiu-lan. APROS-based simulative model for power plant electrical system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(1):66-68.
- [8] 郁顺康. 自动控制理论[M]. 上海:同济大学出版社,1992.
- [9] 崔艳,窦河群,刘广生. 330 MW 励磁系统模型及并网过程仿真[J]. 电力情报,1998(1):27-29.
- CUI Yan, DOU He-qun, LIU Guang-sheng. Excitation system modeling and switch-in-network simulation of 330 MW power unit[J]. Information on Electrical Power, 1998(1):27-29.
- [10] 杨冠城. 电力系统自动装置原理[M]. 北京:水利电力出版社,1995.
- [11] 李平康. 现代电力生产过程集成仿真实现技术[J]. 中国电力,2002,35(12):47-50.
- LI Ping-kang. Integrated simulation realization technology of modern power production process[J]. Electric Power, 2002, 35 (12):47-50.
- [12] 张园萍,焦俊. 论火电机组仿真机实训方案设计[J]. 电力学报,2004,19(2):173-175.
- ZHANG Yuan-ping, JIAO Jun. The project design of the power station simulator's practical training[J]. Journal of Electric Power, 2004, 19(2):173-175.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

王宝安(1978-),男,江苏扬州人,助教,博士研究生,主要研究方向为发电厂电气系统建模仿真与电力电子应用(E-mail: wbaseu@seu.edu.cn);

刘玉芳(1975-),女,重庆人,讲师,主要研究方向为电力系统仿真;

万秋兰(1950-),女,江西南昌人,教授,主要研究方向为电力系统仿真与电力系统稳定分析;

朱德师(1971-),男,江苏高邮人,工程师,主要从事发电厂生产运行管理。

Realization of generator parallel-in model on APROS simulation platform

WANG Bao-an¹, LIU Yu-fang², WAN Qiu-lan¹, ZHU De-shi³

(1. Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 210013, China; 3. Yangzhou 2nd Power Plant, Yangzhou 225131, China)

Abstract: To meet demands of full-scope, all-condition, real-time and continuous simulation of unit, APROS (Advanced PROcess Simulator) is adopted as the support platform to develop a multifunction simulator, which integrates operation training and project analysis. Its graphical electrical model library (thermal power version) supplies only a few simple elements such as bus, switch, generator, transformer, line and load. Several electrical devices such as exciter can be modeled by the combination of mathematical function modules and logic modules. The excitation model is expressed by a mathematical transfer function based on physical characteristics of the excitation system, mainly including proportional - integral - differential functions. To realize small impulse current and quick generator parallel-in, the established synchronization model has the function to regulate differences of voltage virtual value, frequency and phase between two ends of the parallel-in switch to zero.

Key words: parallel-in; APROS; simulation training; mathematical model