

电厂电气系统图形建模仿真

柏强¹,刘君¹,牛凯²,许正宇²,李岩松¹

(1. 华北电力大学(北京)电气工程学院,北京 102206; 2. 北京华康达计算机应用技术有限公司,北京 100029)

摘要: 数学模型是电厂仿真的基础。该文将电厂电气系统中的每一设备或元件作为一个模块并编写相应的算法存入算法库,通过图形建模方法对其进行组态,实现了对电厂电气系统的仿真。目前,该算法已应用于上海石化热电总厂的仿真系统中,仿真结果表明,该算法速度快且不存在收敛问题,仿真精度能够满足现场要求。

关键词: 电厂仿真; 数学模型; 图形建模

中图分类号: TM743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)02-0062-04

0 引言

电力行业对生产运行人员的操作要求很高,因此计算机仿真培训的作用越来越不容忽视。目前,计算机图形建模方法已成为电厂仿真培训这一领域发展的必然趋势。国外已开发了大量仿真支撑软件,如MMS、NLOOP、CETRAN、APROS等,而国内也已开发了诸如STAR-90、GNET等仿真软件^[1]。通常,图形建模都是通过程序编程形成算法库(包括通用算法模块和专用算法模块),然后根据电厂系统原理图和各设备的参数,通过模块组态和模块参数化建立仿真模型。本文基于WinPROS动态仿真平台提出了一种新的分析方法,实现了电厂电气系统的仿真。

针对采用单元接线的电厂,通常将其电气系统分为发变组系统、励磁系统、高压厂用电系统、低压厂用电系统等几个子系统,并形成相应的算法^[2]。上述电厂仿真系统在电厂接线不同时,如电厂具有发电机电压母线或厂用电系统不采用分裂变作厂高变时,其算法将难以满足要求。从提高算法通用性的角度出发,本文把电气系统里的每一个设备做成一个模块,如发电机、变压器、开关等,其中,刀闸、断路器及其组合通称为开关,而励磁系统、负荷被看成是“元件”,各模块对应于算法库里的电气专用算法,即发电机算法、变压器算法、开关算法、励磁算法和边界(负荷)算法。建立与算法对应的图标,生成相应的模块用于组态。在具体应用时,根据电厂的实际电气接线图把相关联的模块连接起来,形成网络,即可实现对电厂电气系统的仿真。这样形成的仿真系统便于维护、修改和扩充。

1 数学模型的形成条件

数学模型是阐述客观现象和解决实际问题的基础,通过对具体问题合理的不同假设,根据物理机理将其数学化,可以生成不同的数学模型。根据对电厂仿真的具体要求和电力系统生产运行的特点,通过合理的假设简化问题并生成相应的数学模型,使其符合现场运行的实际情况。

由于仿真培训对象是电厂热工分场的运行人员,他们关心的主要是如何监视和操作厂用电系统,故分析时可以忽略厂外系统的干扰或影响,把电厂的电气系统看作是一个独立的小系统来处理。同时由于厂用电系统所带负荷和消耗功率(即厂用电)占发电机总发出功率的比重比较少(一般在10%左右),而且厂用电子系统网大都为辐射网,所以在满足精度要求的前提下,采用直流潮流代替交流潮流计算,从而提高了计算速度,解决了采用交流潮流时可能出现的不收敛问题^[3]。

在用直流潮流解网时,电压相角可以近似看作与有功成线性关系。故在建立数学模型时,有以下几个假设条件:

- 1) 厂用电负荷(引风机、凝结水泵、一次风机、二次风机等)投入运行后均处在额定运行状态,即功率为额定值,功率因数也为额定值。
- 2) 发电机并网后,感应电动势相角为0,其电压幅值由励磁系统给出,其余各母线电压与其相角成线性关系。
- 3) 不考虑厂外系统的影响,即把厂外系统看成是一个负荷,电厂向系统输送的功率 P_s 为已知量。
- 4) 忽略变压器和线路的电阻,只考虑其电抗值。

5) 不考虑开关拒动和保护投退的情况。

2 数学模型及几个算法

数学模型是将实际问题转化为数学问题,数学模型相应的算法就是解决和处理这个数学问题。

2.1 发电机模型及 CMALGGenerator算法

发电机是电厂电气系统仿真的主要设备之一,其数学模型应能够正确反应发电机的启动、同期并网、正常运行等工况,能够反应出负荷变化、甩负荷、汽轮机超速、发电机组故障等工况时参数的相应变化。根据 DCS画面显示的要求,CMALGGenerator算法主要计算发电机的端电压、定子电流、有功功率输出、无功功率输出以及发电机的频率和发电机损耗。

1) 发电机端电压 U_G

a) 并网前发电机端电压 U_G 等于空载电势 E_Q 。当汽轮机的转速超过临界转速 2950 r/min 并达到稳定后,准备同期并网。此时合灭磁开关缓慢调节励磁电阻,增大励磁电流。根据机组的空载特性曲线,计算发电机空载电势,即发电机的端电压。当转速、电压幅值和相角满足并网条件时并网。即

$$E_Q = A_1 + B_1 \cdot I_f + C_1 \cdot I_f^2 + D_1 \cdot I_f^3 + F_1 \cdot I_f^4 \quad (1)$$

其中: I_f 为发电机励磁电流; A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 、 F_1 为系数。

需要指出,如没有特别说明,所有的变量和参数都取标么值,以下类同。

b) 并网后发电机的端电压可根据潮流计算结果给出。计算时把负荷作为流程的边界处理,从而求得各母线上电压,包括发电机端口电压。

2) 发电机定子电流

$$I_G = 2 \cdot G \cdot \sqrt{(E_Q \cdot E_Q + U_G \cdot U_G - 2 \cdot E_Q \cdot U_G \cdot \cos(-OutPha))} \quad (2)$$

其中: G 为发电机导纳; $OutPha$ 为发电机端电压相角 (rad)。

3) 发电机有功功率 P_G

$$P_G = U_G \cdot I_G \cdot \cos \quad (3)$$

4) 发电机无功功率 Q_G

$$Q_G = U_G \cdot I_G \cdot \sin \quad (4)$$

5) 发电机频率 f

$$f = RV \cdot Num / 60 \quad (5)$$

其中: RV 为发电机转速 (r/min); Num 为发电机的极对数。

6) 发电机损耗 $Loss$

$$Loss = 3 \cdot R_S \cdot I_G^2 + (WFL + TFL) \cdot RV^2 / N_n^2 + TL \cdot E_Q^2 / U_N^2 + R_T \cdot I_f^2 + AL \cdot I_G^2 / I_n^2 \quad (6)$$

其中: R_S 为定子电阻; WFL 为风损耗; TFL 为轴瓦摩擦损耗; TL 为铁心损耗; U_N 为发电机额定电压; AL 为附加损耗; I_n 为发电机额定电流; R_T 为转子电阻; V_n 为发电机额定转速。

7) 发电机净功率 P_M

$$P_M = P_G + Loss \quad (7)$$

2.2 励磁系统模型及 CMALGExcitation算法

励磁系统模型应能正确反应出励磁机的启停、发电机跳闸等运行状态和各种工况下的动态变化。CMALGExcitation算法主要计算自动电压调整 A、B 柜输出的电流、电压和工频手动励磁输出电流、电压及发电机主励磁机电流、电压。

$$U = U_{SET} - U_G + I_{af} \cdot K_1$$

$$U_T = \frac{K_F \cdot S}{1 + T_F \cdot S} U_f \quad U_1 = U - U_T$$

$$U_{AB} = \frac{K_A}{1 + T_A \cdot S} U_1 \quad U_{AA} = K \cdot U_{AB}$$

$$I_{AB} = K_{AB} \cdot U_{AB} \quad I_{AA} = K_{AA} \cdot U_{AA}$$

$$\begin{cases} \text{if } U_L < U_{AB} < E, \text{ then } U_2 = U_{AB} \\ \text{if } U_{AB} < U_L, \text{ then } U_2 = U_L \\ \text{if } U_{AB} > E, \text{ then } U_2 = E \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{发电机主励磁电压 } U_f = \frac{K_L}{1 + T_L \cdot S} U_2 \quad (9)$$

发电机主励磁电流

$$I_f = C_1 \cdot U_f \cdot U_f + C_2 \cdot U_f \quad (10)$$

其中: U_{SET} 为设定值; U_G 为发电机端电压; I_{af} 为手动励磁调节器输出电流; K_1 为手动励磁调节器系数; E 为可控硅最大输出电压; U_L 为可控硅最小输出电压; K_F 为自动励磁调节器稳定系数; T_F 为自动励磁调节器稳定时间常数; K_A 为自动励磁调节器比例系数; T_A 为自动励磁调节器时间常数; K_{AA} 为自动电压调整 A 柜系数; K_{AB} 为自动电压调整 B 柜系数; C_1 、 C_2 、 K 为系数; S 为拉普拉斯算子。

2.3 变压器模型及 CMALGTransformer算法

变压器模型不仅包括变压器本身,它还包括变压器自动和手动保护开关。它能够反应变压器故障、异常或检修时,自动保护开关、手动保护开关的状态量。CMALGTransformer算法主要计算变压器高低压侧电压、电流,反应正常和异常情况下双绕组变压器各侧参数的变化。

1) 变压器高压侧电压 U_f

$$U_f = AGF \cdot (1 + AUPF \cdot InPha) \quad (11)$$

2) 变压器低压侧电压 U_1

$$U_1 = AGL \cdot (1 + AUPL \cdot OutPha) \quad (12)$$

3) 变压器电流 I

$$I = G \cdot \sqrt{(U_f \cdot U_f + U_1 \cdot U_1 - 2 \cdot U_f \cdot U_1 \cos(\lnPha - OutPha))} \quad (13)$$

其中: G 为变压器导纳; AGF 、 $AUPF$ 、 \lnPha 为高压侧电压的幅值系数、相角系数、相角; AGL 、 $AUPL$ 、 $OutPha$ 为低压侧电压的幅值系数、相角系数、相角。

2.4 开关模型及 CMALGB ranch 算法

开关模型能够反应出开关(刀闸和断路器及其组合)的逻辑状态。为了能够反应开关动作后系统潮流的变化,电力系统普遍采用结线分析的办法^[4]。在电厂电气主接线中,有很多直接连接在两端母线间的开关,例如分段母线间开关,工作母线与备用母线间开关。当开关断开时,流过的电流自然是零。但当开关闭合时要计算这些开关则需要专门处理。

针对电厂仿真的特点和多年的经验,本文把开关的两端母线看作是不同的节点,把开关当作一个阻抗很小的元件来处理,其线路相当于导纳很大的一条支路,然后通过潮流计算得出流过开关的电流^[3]。应用上述开关模型得到的 CMALGB ranch 算法主要计算厂用系统工作母线与备用母线之间的电流,或者是变压器到分段母线间的电流。

支路电流 I :

$$I = G \cdot \sqrt{(U_f \cdot U_f + U_1 \cdot U_1 - 2 \cdot U_f \cdot U_1 \cdot \cos(\lnPha - OutPha))} \quad (14)$$

其中: U_f 、 U_1 、 \lnPha 、 $OutPha$ 分别为开关两侧的电压和相角; G 为设定的很大的导纳值。

3 图形建模及实现过程

WinPROS动态仿真平台是一个运行在PC机Windows NT操作系统下的动态仿真平台,它分为单机版和网络版两种,原为开发化工DCS仿真的平台。该平台带有算法库,包含各类工艺和多种DCS控制算法,将算法库中的算法模块连接起来即可构成过程模型,实现交互式在线开发模式,极大地便利了模型的开发和维护。

根据上述发电机等各元件的算法,本文在WinPROS动态仿真平台上开发并实现了发电厂电气系统的仿真。即根据所建立的数学模型,利用Visual C++编程形成电厂电气系统算法库,它是按照电气机理建立的一种面向电厂电气系统的模块式算法。算法库中包含通用算法和专用算法两大类。通用算法是完成基本算术或逻辑运算的算法,如加法算法、数字量输入/输出算法。专用算法是针对电厂生产过程中常规设备而专门建立的算法,如发电机算法、

励磁算法、变压器算法等等。

根据电厂的系统原理图、设计图纸和设备的原始数据,通过模块组态和模块参数化建立仿真模型。模块组态是先嵌入系统中每一元件的图标,再根据系统图上的每一设备的原始数据,在算法库中选择相应的算法,生成某一模块。对同一类型的设备,一般选择同一算法,生成不同的模块。如对主变压器、厂用变压器和备用变压器,均可以选择CMAL-Transformer算法。每一模块由一个或多个输入、输出、系数组成,它具有相对独立性。模块建立后,根据系统的网络结构将模块的输出与物理上相关联的另一模块的输入连接起来,形成模块图。需要注意的是,模块的输出量的类型必须要与另一模块的输入量的类型一致^[5]。

以上海金山化工热总厂的厂用电系统和发变组系统为例,模块组态及相应的仿真DCS画面如图1~5所示。

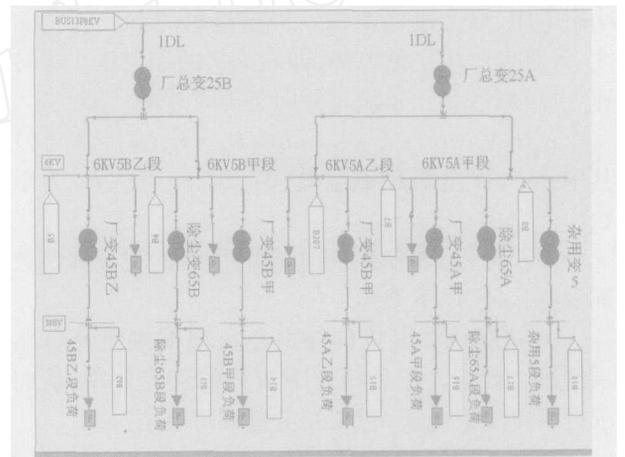


图1 厂用电组态图

Fig 1 Configuration of station power service systems

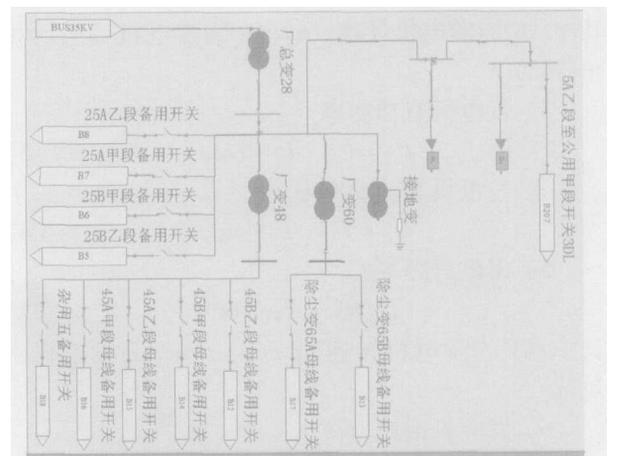


图2 备用组态图

Fig 2 Configuration of back-up systems

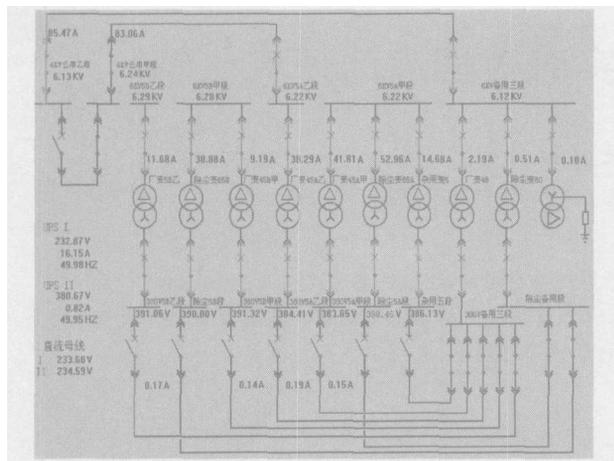


图 3 厂用电系统 DCS画面

Fig 3 DCS menu of station service electric systems

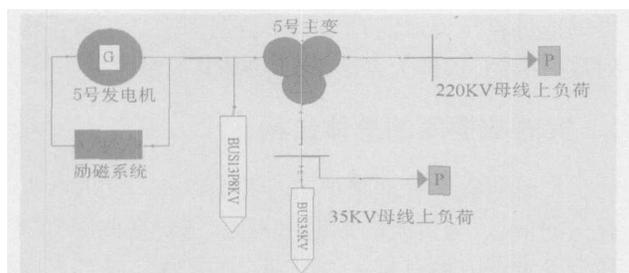


图 4 发变组组态图

Fig 4 Configuration of generator and transformer systems

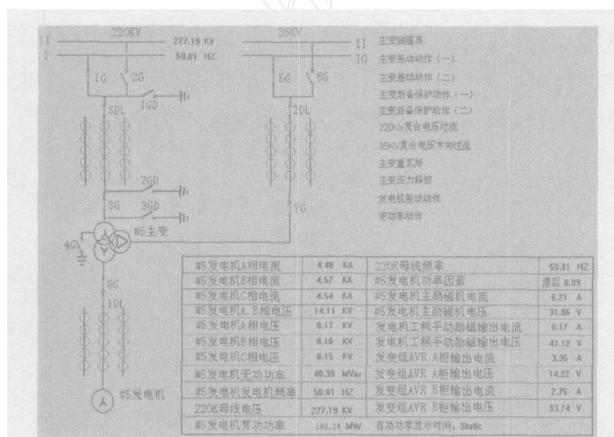


图 5 发变组 DCS画面

Fig 5 DCS menu of generator and transformer systems

4 结论

将发电厂电气系统看成一个完整的系统,把系

统中的每一个设备或元件看成是一个模块,在 Win-PROS平台上实现了用图形建模方式来建立发电厂电气仿真系统,该仿真开发系统维护、修改和扩充方便,为建模工程师避免了大量的重复性工作。本文简要描述了其中的几个数学模型及算法。目前应用这一仿真开发系统已成功开发出上海石化热电厂仿真培训系统。实践证明,这一方法不仅可以满足仿真精度要求,而且仿真速度快,不存在收敛问题。

参考文献:

[1] 王威,蔡瑞忠,吕崇德,等. 电站仿真建模一体化环境[J]. 计算机仿真, 1998, 15(2): 38-40.
 WANG Wei, CAI Rui-zhong, L ü Chong-de, et al Integrated Modeling Environment of Power Plant Simulation [J]. Computer Simulation, 1998, 15(2): 38-40.

[2] 陈永国. STAR-90模块式建模[J]. 燃气轮机技术, 2002, 15(4): 48-51.
 CHEN Yong-guo Modeling Based on STAR-90 Module [J]. Gas Turbine Technology, 2002, 15(4): 48-51.

[3] 李建华,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(6): 37-40.
 LI Jian-hua, et al Development of Software for Operator Training Simulation System in Power Plant [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(6): 37-40.

[4] 于尔铿. 能量管理系统[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
 YU Er-keng Energy Management System [M]. Beijing: Science Press, 2001.

[5] 胡建宏,等. STAR-90模块式图形建模技术的实现[J]. 电力情报, 2000, (3): 52-54.
 HU Jian-hong, et al The Realization of Graphical Modeling Technology Based on STAR-90 Module [J]. Information on Electric Power, 2000, (3): 52-54.

收稿日期: 2005-06-07; 修回日期: 2005-07-06

作者简介:

柏强 (1983 -),男,硕士研究生,研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: baique520@sohu.com

刘君 (1970 -),女,副教授,研究方向为电力系统分析与控制;

牛凯 (1968 -),男,高级工程师,主要从事应用数学方面的工作。

Simulation of graphical modeling for power plant electric systems

BAIQiang¹, LU Jun¹, NU Kai², XU Zhen-yu², LI Yan-song¹

(1. School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2 Beijing Huakangda Computer Application Technology Co., Ltd, Beijing 100029, China)

(下转第 69页 continued on page 69)

据后端,其数据内容对于客户程序来说是陌生的,是一种私人数据源。然而各种客户程序如:工作站、报表生成系统、票生成系统等都依赖于实时数据。因此,有必要寻求一种公共的、标准的方式对外开放其信息。

实时数据库采用公共的、统一的访问接口以后,不仅使访问数据大为方便,同时为变电站自动化系统其他功能模块的开发提供了便利,如果开发者需要新开发一个功能模块,那么他不必花大量的时间去学习了解整个系统,掌握整个系统的数据结构以及相互关系,他只需要通过接口向实时数据库提取数据就可以满足其要求。

5 结束语

实时数据库是变电站监控软件的重要组成部分。本文在实时数据库理论的基础上,从数据对象模型、数据存储管理、事务管理以及数据访问接口等几个方面对其进行了深入研究,设计了变电站自动化系统的实时数据库,它实现了高速数据的访问和存储,并且为各功能模块以及系统的开发者提供了一个访问数据库的统一接口,为系统的开发者提供了极大的便利。

参考文献:

- [1] 刘云生,卢炎生,王道忠. 实时数据库系统及其特征[J]. 华中理工大学学报, 1994, 22(6): 66-70.
LU Yun-sheng, LU Yan-sheng, WANG Dao-zhong. A Real-time Database System (RTDBS) and Its Special Features[J]. Journal

of Huazhong University of Science & Technology, 1994, 22(6): 66-70.

- [2] 刘铭. 工业实时数据库设计研究(博士学位论文)[D]. 西安: 西安交通大学, 2003.
LU Ming. Research on Industrial Real-time Database, Doctoral Dissertation[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2003.
- [3] 张志樵. 实时数据库原理及应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 2001.
ZHANG Zhi-lin. The Principle and Application of RTDBMS[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2001.
- [4] 吴文传,张伯明,许春晖. 调度自动化系统实时数据库模型的研究与实现[J]. 电网技术, 2001, 25(9): 28-32.
WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming, XU Chun-hui. Study and Implementation of Real Time Database Management System (RTDBMS) Model Applied in EMS[J]. Power System Technology, 2001, 25(9): 28-32.
- [5] 白树忠,南新志. 变电站综合自动化实时数据库管理系统的研究与开发[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(3): 43-46.
BAI Shu-zhong, NAN Xin-zhi. The Study on Real-time Database Management System for Auto Substation System[J]. Proceedings of the EPSA, 2002, 14(3): 43-46.

收稿日期: 2005-06-13; 修回日期: 2005-08-07

作者简介:

赖明江(1981-),男,研究生,研究方向为电力系统自动化; E-mail: laimj@iea.org.cn

耿英三(1963-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为电力电子及低压电器 CAD/CAE;

张国刚(1976-),男,讲师,博士,主要研究方向为智能化电器及 CAD,电器仿真计算等;

王建华(1954-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为高压真空电器、电器 CAD&CAM 技术、智能化电器等。

Study of real-time database management system (RTDBMS) applied in substation automation system

LA IMing-jiang, GENG Ying-san, ZHANG Guo-gang, WANG Jian-hua

(Institute of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: According to the limitation when the RTDBMS used in substation automation system and the structure and the characteristic of substation, the real-time data in substation automation system are illustrated. This paper also designs the data model, data management strategy based on hashing, and the interface with object-oriented method.

Key words: real time database management system (RTDBMS); data model; data slice; data management; interface

(上接第 65 页 continued from page 65)

Abstract: Mathematical models lay a foundation for power plant simulation. Every equipment or component of power plant electric systems is considered as a module with related arithmetic which is put into the algorithm bank. The simulation can be realized throughout configuring module by the way of graphical modeling. This algorithm has been used in the simulation system of Shanghai Oil and Chemical Thermal Power Plant successfully. The result shows that this algorithm is of rapid speed and without convergency. The precision is also within demand.

Key words: power plant simulation; mathematical model; graphical modeling