

我国电站仿真技术进展与建模理论研究

吕崇德, 范永胜, 蔡瑞忠

(清华大学, 北京 100084)

[摘要] 对我国电站仿真技术的发展过程与建模理论的研究进行了论述和分析, 重点阐述了 20 年来火电机组仿真技术从科学研究到产业化和使我国火电仿真机数量上跃居世界第一位、质量上达到世界先进水平的进展过程, 给出了我国电力仿真机的分布情况; 综述了我国电站系统仿真的核心技术——热工对象的建模理论和技术的研究状况, 分析了集总参数模型、分布参数模型和高精度集总参数动态修正模型等不同的建模方法应用于不同的仿真对象和仿真目的。

[关键词] 系统仿真; 建模; 电力

1 我国火电仿真系统发展历程及现状

1.1 我国电力工业发展特点

从 20 世纪 80 年代初开始, 我国电力工业以先行工业的地位得到迅速的发展, “八五”计划里年装机容量为 1800 万 kW, 到 1998 年拥有发电设备容量约为 22 亿 MW。其中火电装机容量约占 75%, 水电约占 24%, 核电不到 1%。而火电年发电量占全国总发电量的近 80%。

80 年代我国电力工业安装了一批 200 MW 的大型火电机组, 到 1990 年已经有 142 台在运行中。随着电网容量的增大, 到 90 年代我国大型火电厂安装的主力机组单机容量以 300~600 MW 大型机组为主, 甚至 800 MW 也已开始安装。到 1998 年, 300~600 MW 的机组已达 130 多台。这些大型火电机组大部分是引进的外国先进设备。它们的自动控制都采用计算机分散控制系统 (DCS)。运行人员要掌握这些机组的运行技术是有较高的难度。

由于我国一次能源的蕴藏量以煤最为丰富, 每年大约有 12 亿 t 原煤的产量, 其中约 5 亿 t 用于发电, 只有少量火电机组采用石油或天然气作燃料。

因此, 我国火电厂的结构是以燃煤机组为主。燃煤电厂的煤粉制备、烟气除尘、除硫和燃煤过程减少氮的氧化物生成等都给发电设备的结构和热力系统带来了复杂性、技术困难和高投资。

1.2 发展电厂仿真技术的必要性

早在 70 年代中期, 我国电力工业第一次较大规模从西方发达国家引进 4 个大型火电厂, 它们是元宝山电厂的法国 300 MW 燃煤机组、大港电厂的意大利 350 MW 燃油机组、陡河电厂的日本 200 MW 燃煤机组、清河电厂的前苏联 200 MW 燃煤机组。它们是超高压 (蒸汽压力为 13 MPa) 或亚临界 (蒸汽参数 17 MPa) 机组, 具有蒸汽再过热系统。自动控制系统采用了机、炉协调控制和计算机监控。这些特点反映了当时的世界火电机组的先进水平。在建厂过程中, 就如何掌握这些新型机组运行技术问题提到了日程。在国内进行理论学习然后派人到国外去进行仿真操作培训的同时, 如何利用仿真技术解决中国的大型火电机组的运行培训问题摆到了电力工业领导和科技人员面前。

1975 年美国联邦能源部提出的安全性专题报告中就已经指出: “电厂的可靠性可以由改进设计

[收稿日期] 1999-07-05

[作者简介] 吕崇德 (1934-), 男, 山东青岛市人, 清华大学教授, 博士生导师

和加强维护来改善,但是它只占可靠性的20%~30%。另外70%~80%依靠于运行人员。”

1988年清华大学曾对国内大型电厂运行人员进行过调查,结果是:某电厂未经过仿真培训的一组运行人员在200 MW机组上连续18个月内出现过7次事故,其中6次未能正确操作处理而被迫停机,有一次事故中造成人员受伤,另一次事故中造成停机长达15天之久。另一个电厂在10个月内发生过四次甩负荷事故,是参加过仿真培训的运行人员操作,他们炉、机、电运行人员互相配合,均能正确地处理和消除事故,而没有影响生产。还有一个电厂在11个月内发生五次事故,包括保护动作、甩负荷、锅炉灭火等,也是由经过仿真培训的人员操作的,结果有四次能够很快消除事故,十分钟内恢复正常生产。这些资料说明仿真技术对电力生产的安全性起着至关重要的作用,是电力工业技术进步的主要标志之一。

1.3 我国电站仿真技术从科研到产品发展过程^[1]

1.3.1 从科研起步独立发展中国的电厂系统仿真技术及培训仿真机 随着数字式计算机的发展,世界上工业发达的国家,经过一个10多年的研究过程,几乎同时在英国、美国、日本出现了实用性的火电仿真培训系统。例如:1971年美国加利福尼亚州匹兹堡火电厂安装了第一台750 MW全机组仿真机,采用了当时出现不久而且价格比较昂贵的数字式计算机;同年日本仙台火电厂安装了350 MW机组的培训仿真机,也是采用了全数字计算机;仍然是同一年英国中央发电局在利兹市白宫路培训站建成了一台660 MW全范围仿真机,采用的是模拟-数字混合式计算机。

70年代中期我国引进国外四个大容量、高参数、先进的火电厂的同时,清华大学于1975年建议电力部立项研制中国的火电机组仿真系统,开始了中国第一台大型火电机组模拟系统的研制。仿真对象确定为国产第一台200 MW燃煤发电机组。

当时我国还处于不开放年代,和国外没有深入技术交流,只能依靠中国自己的技术力量作为一个科研项目去进行。克服了没有先进的计算机设备和软件的困难,采用了当时清华大学生产的一台DJS-130型的小型计算机,于1982年完成了我国第一台大型火电仿真系统,开始了中国自己有能力

开发电厂仿真机的历史,使我国成为世界上少有的几个能开发此类仿真机的国家之一。因此获得电力工业部优秀科技成果一等奖和国家科学技术进步一等奖。被电力部门称为中国电力仿真技术的里程碑。利用这一台仿真机在清华大学建成了中国第一个火电厂运行仿真培训中心,在5年时间里为电力工业培训了约2000名运行技术骨干。1984年清华大学又开始研制中国第一台完全复制哈尔滨第三发电厂200 MW机组控制室的全范围高精度仿真机,于1988年完成,安装在东北电管局。这是中国自己最早研制成功的两台适用性的火电仿真机。

1.3.2 科研成果迅速向产业化转化 我国能源部于1988年在第一台完全复制控制室的全范围仿真机的安装现场召开了各省市电力局参加的电厂仿真机技术交流会。提出了中国有能力发展自己的电厂全范围、高精度的仿真机,决定在电力系统推广、发展和应用仿真技术。1988年10月能源部向各省市电力局及各大发电厂发出了《关于发展火电机组模拟培训装置的通知》。文件规定把仿真机列为电力工业的重要技术进步项目,应抓紧规划和定点,建立200 MW以上各种容量机组的仿真机,运行人员上岗前必须在仿真机上进行为期不少于一个月的模拟培训,并逐步作到人员定期轮训。

在这一阶段我国也引进了国外开发的电厂仿真机。其中具有代表性的是1988年从美国引进一台300 MW火电全范围仿真机,安装在北京电力学校,但是这台仿真机价格十分昂贵,高于国内价格的8倍,这是中国国力难以承受的。

1.3.3 中国发展火电仿真机的高峰 进入90年代,西方发达国家能源发展处于十分缓慢状态,新电厂建设减少。因此它们不少电厂仿真机公司相应地也因没有足够的市场而关闭。

这个阶段电厂仿真机发展的突出特点是在中国:1988年后,国内电厂仿真机开发公司的大量涌现也是世界仿真历史上所未有过的,到1993年底竟然有20多家电厂仿真机开发公司或中心出现。但是该时期运行的国产仿真机数目只有15台。其中清华大学生产8台,华北电力学院3台,亚洲仿真公司2台,东南大学1台,西安热工研究所1台。清华大学和华北电力学院开发的仿真机共同被国家科委等单位评为1992年全国十大科技成就。

据不完全统计,从1988年我国完成2台电站仿真机之后,仅仅用了10年,到1997年,我国电力部门拥有的火电机组培训仿真机已经达到68台,核电仿真机3台,水电厂仿真机2台,电网调度仿真机5台,这些属于电力工业的培训仿真机共计已经达到78台,成为世界上仅次于美国的第二个电力工业仿真机拥有大国。其中单就火电仿真机而言,其数量已占世界第一位,而且近90%是由国内自己研制和开发的。这充分显示了我国具有强大的仿真技术和仿真机开发实力。除广西、海南和西藏外,各省市均建立了火电仿真培训中心。这些培训中心已经拥有或规划建成200~600 MW各种规格型号的火电培训仿真机。还有不少发电厂如华能福州电厂、华北盘山电厂等单独拥有自己使用的仿真机。

同时,电网调度仿真机、水电仿真机、变电站仿真机也在开发,但数量较少。清华大学1992年完成的中国第一套电力系统调度仿真系统安装在东北电管局调度中心,获电力部科技进步一等奖和国家科技进步二等奖;1993年完成了我国第一台水电仿真机,仿真对象为吉林省的丰满水电站。

2 我国电站仿真机的分布情况

上述78台仿真机的分布情况是东北电网拥有10台火电仿真机,1台电网仿真机,1台水电仿真机。华北电网拥有16台火电仿真机,1台核电仿真机,1台电网仿真机。华东电网有18台火电仿真机,1台核电仿真机。华中电网有12台火电仿真机,1台核电仿真机,2台电网仿真机。西南电网有7台火电仿真机。西北电网有5台火电仿真机,1台水电仿真机,1台电网仿真机。

在这78台仿真机中国内自己完成的为69台,占我国电力工业仿真机的89%。从美、法、日等进口占9台。

不仅如此,我国已有能力出口电厂仿真机,1995年8月清华大学完成了向巴基斯坦出口中国第一台仿真机的任务。仿真对象为木扎法戈电厂210 MW燃油机组。同时由于独立发展火电仿真系统和技术,开发成功面向对象、面向工程的模块化、图形化、高精度的建模方法;有着独立研制成功的为支持仿真机的开发、调试、运行管理等仿真

支持环境软件。这些建模和支持软件工具于1996年出口韩国。使我国成为世界上有能力出口电力仿真技术先进的国家。

3 仿真对象数学模型的研究状况

系统仿真中的核心技术是建立数学模型。电站对象的数学模型包括锅炉本体模型或核电站的蒸汽发生器模型、汽轮机本体模型、发电机本体模型、回热加热系统模型、控制系统模型以及各种辅机模型等。从系统本身的复杂性、当前工程应用的要求以及建模技术来看,最为复杂的乃是锅炉本体和核电站蒸汽发生器的数学模型,多年以来,国内外有关电站建模理论的研究大多集中于此,因此本文着重讨论锅炉本体的各种建模理论和方法。

到目前为止,国内外对汽包锅炉的建模及动态特性研究发表论文较多。从国内研究和开发的全工况实时仿真培训系统来看,汽包锅炉的所有子系统,特别是汽水系统的数学模型几乎均为传统的集总参数模型。采用这种模型可以满足定性仿真和一般培训仿真的精度要求,然而随着仿真技术向工程分析仿真、全程控制系统的定量分析与仿真研究领域深入,它们对于数学模型精度要求较高,传统的集总参数模型则显得不能满足要求。为了满足这一要求,将锅炉和汽机所有单相区段的模型改为采用高精度的集总参数动态修正模型是必要的。

3.1 集总参数模型

传统的集总参数模型有两种:将金属与工质分开处理的集总参数模型和将金属与工质合并处理的集总参数模型。该两种模型均具有建模简单、计算方便、物理意义明确、动态响应趋势基本正确以及适用于实时全工况仿真等优点,因而在工程应用中,特别是在全工况电站培训仿真机的建模工作中,得到了广泛的应用,目前国内外所开发的大多数电站培训仿真机均使用集总参数模型。然而,对于像锅炉的省煤器、过热器以及再热器等一类具有典型分布参数特性的仿真对象来说,集总参数模型存在严重的不足之处:模型动态精度较差,不能较好地反映热工对象的分布参数特性;若以集总参数模型为基础进行控制系统仿真研究,所得某些结果,如控制器的参数整定,则与实际情况差别很大,所以不适用于控制系统的仿真研究。

为了提高集总参数模型接近分布参数对象的精度,增加建模区段的分段数是一种有效的方法^[2]。理论上讲,随着分段数的增加,金属与工质分开处理的多段集总参数模型就越能逼近实际的分布参数对象。然而建模工作量和仿真计算量均成倍增长,且模型更加复杂,病态现象更为严重,有时反而会降低实际仿真计算的精度。

3.2 高精度的集总参数动态修正模型

导致传统集总参数模型精度较低的原因是在从原始分布参数模型(偏微分方程)到集总参数模型(微分方程)的简化过程中所必然形成的。在该简化过程中所作的过度假定和近似,尤其是集总参数的假定,导致模型结构以及模型所反映的惯性产生了偏移。国内最新研究认为高精度的集总参数动态修正模型基于惯性补偿的修正方法,通过增加惯性补偿方程式以及适当调整动态修正因子和惯性补偿时间常数,对原集总参数模型的结构及其所反映的惯性进行补偿或修正,使修正模型更好地逼近于分布参数模型。高精度的集总参数动态修正模型能充分反映热工对象的分布参数特性,静态误差远小于线性化分布参数模型,具有建模简单、计算方便以及实用性强的特点,既适用于全工况高精度实时仿真培训系统研究,又适用于电站全程控制系统仿真研究,因而具有广泛的工程应用前景^[3]。

3.3 分布参数模型

热工对象最原始的分布参数模型由一组偏微分方程和若干代数方程组成,可以采用直接数值求解技术对该原始分布参数模型进行求解。所得数值解具有很高的精度,可作为标准解。但是这种方法具有积分步长小、计算量大的缺点,很难满足仿真计算的实时性要求,因而在实际工程中很少采用。

在一定的简化假定条件下,对原始分布参数模型进行线性化处理,可得线性化分布参数模型,即传递函数模型^[2]。线性化分布参数模型在某一工况点附近以及小扰动的情况下能较好地反映热工对象的分布参数特性,以此为基础可以方便地进行控制系统的仿真研究,所得结果与现场调试情况较为吻合,因而被广泛地应用于热工对象控制系统的设计与研究工作中,国内外有关电站控制系统设计和调试的单位大多采用的此类模型。但该模型静态误差较大,不适用于大扰动全工况仿真,因而也不适

用于电站全程控制系统仿真研究。

以某一工况下的线性化分布参数模型为基础,将传递函数模型中的有关参数拟合成分荷或工况参数的函数,则可得时变参数的非线性分布参数模型^[4],相对于原线性化分布参数模型来说,时变参数的非线性分布参数模型对负荷或工况变动范围的适应性增强,比较适用于大范围的控制系统的仿真研究。然而该模型的静态误差仍然很难消除,因而在国内外的电站培训仿真机上一般均很少使用。

Dolezal R 等提出一种直接面对偏微分方程组求解的近似解析模型^[5]。该模型适用于大扰动全工况仿真,Dolezal R 等曾采用它成功地完成了锅炉启动过程以及各种事故工况的仿真,并通过现场测试证明了模型的有效性。这种近似解析模型不会产生计算过程中的数值不稳定性,并能充分反映热工对象的非线性分布参数特性以及比较精确地反映金属壁温的变化规律。但是其近似解析解的表达式相当复杂,且含有指数项,仿真计算耗时量大,模型初始化过程亦相当复杂。

3.4 其它类型的锅炉建模技术

与汽包锅炉相比,直流锅炉(包括亚临界或超临界直流锅炉)建模的特殊性主要表现在两相区段上。国内在这方面的理论研究已赶上国际先进水平,最新的研究成果主要有:基于 Lagrange 流体质点追踪思想的动态计算模型和适用于大扰动全工况仿真的非线性集总参数移动边界的动态数学模型^[6,7]。然而尚没有采用此先进模型开发出实用性的全工况实时仿真培训系统。众所周知,国内在直流锅炉,特别是超临界直流锅炉的设计与制造、运行与控制等方面均落后于国际先进水平,因而迫切需要开发能用于定性和定量分析的全工况仿真系统。

循环流化床锅炉是一种新发展的具有高效、低污染和对燃料适应性强等优点的锅炉,从而受到国内外普遍重视。在燃烧系统的建模理论方面,我国已做了大量有益的研究工作,比较成熟的模型有小室模型、小室加“核心-环”模型等^[8]。清华大学已成功开发了国内首台用于实时全工况培训仿真的循环流化床锅炉仿真机。应该指出的是,循环流化床锅炉的数学模型在模型精度和满足仿真的实时性等方面仍需要进一步的提高。

参考文献

- [1] 吕崇德, 睦喆, 姜学智, 等. 系统仿真学报, 1999, 11 (4): 224~227
- [2] 章臣樾. 锅炉动态特性及其数学模型 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1987
- [3] 范永胜. 两类实用的单相受热管集总参数动态修正模型 [D]. 北京: 清华大学, 1999
- [4] 上海锅炉厂研究所. 电力技术通讯, 1975, (5)
- [5] Dolezal R. Simulation of large state variation in steam power plants [M]. Springer-Verlag Berlin, 1987
- [6] 王广军. 蒸汽发生系统通用动力学模型 [D]. 南京: 东南大学, 1995
- [7] 范永胜. 600 MW 超临界机组直流锅炉的全工况建模与仿真研究 [D]. 南京: 东南大学, 1997
- [8] 杨晨. 大型循环流化床锅炉整体数学模型的建模与仿真方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 1999

Development of Simulation Technologies and Researches of Modeling Theory for Power Plant in China

Lü Chongde Fan Yongsheng Cai Ruizhong
(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

[Abstract] In this paper the development of simulation technologies and modeling theory of the fossil power generating unit in China is discussed and analysed. Authors described developing process of the fossil power simulators from scientific researches to achieving the most quantity in the world. While the information of electric power simulators distributed over the world is given. The key technologies — modeling theory and method of the thermal system simulation are summarized. Authors expounded the lumped parameter model, distributed parameter model, dynamic revised model of high precision lumped parameter and other model. These model equations are applied various simulated objects and different simulation precision.

[Key words] system simulation; modeling; electric power

(cont. from p. 10) develop without the stable support by agriculture, only when the modernization of agriculture, industry and infrastructure realized can we enter the knowledge society smoothly. The total level and sub-sistent problems of agricultural science and technology are discussed, the basic tasks that the innovative system for agricultural knowledge should undertake are also studied. The author believes that information and biology technology will be the two fundamental dustries in 21st century, the prospect and trend of their application in agriculture are also described. The author anticipates that the rapid development and intensive use of biology technology in agriculture will inaugurate 6 new fields for the research work of agricultural science and technology, which include the creation of new species, the application of the new fast breeding technology, the establishment of agricultural factory, the producing of new man-made food and feed, the exploitation for new energy and the searching for new space.

[Key words] knowledge economy; the innovative system for agricultural knowledge; information technology; biology technology