

中国改进型压水堆核电技术 ——CPR1000 的形成

濮继龙

(广东核电集团,广东深圳 518028)

[摘要] 介绍了目前正在建设的岭澳核电站(二期)和辽宁红沿河核电站所采用技术——CPR1000 的形成过程及其中的重要技术创新点。

[关键词] 压水堆;CPR1000;自主品牌

[中图分类号] TL421⁺.1 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)03-0054-04

百万 kW 级压水堆核电站是国家早在 1983 年就已经明确的核电技术路线。从 20 世纪 80 年代初首次引进国外技术建设大亚湾核电站,到今天采用自主技术建设岭澳核电站(二期)、辽宁红沿河核电站,中国核电技术经过消化吸收、持续改进、自主创新,完成了从高点引进到创建品牌的历史性跨越,形成了具有自主知识产权的中国改进型百万 kW 级压水堆核电技术——CPR1000,总体性能达到国际同类先进水平。

1 CPR1000 核电技术形成的 3 个阶段

1.1 从法国到大亚湾

20 世纪 80 年代我国开始从法国引进百万 kW 级核电技术。这种技术以美国西屋公司标准 312 堆型为原型,通过改进和批量化建设,发展成为标准化的 CPY 技术。为了提高出口竞争力,法国在 CPY 的基础上形成了安全性和经济性更好的 M310 堆型。美国三哩岛和前苏联切尔诺贝利核电站事故后,法国为了进一步提高核电机组的安全性,进行了大量技术改进,这些技术改进体现在了出口到大亚湾的核电技术上。因此,大亚湾核电站吸取了法国同类 900 MWe 系列机组的运行经验反馈和改进措施,其中,核岛共实施了 98 项设计变更,常规岛共实施了 15 项设计变更。可以说,在设计方面,国际上 80 年代中期成熟的技术和研究成果大部分应用在

了大亚湾核电站。

为进一步提高机组的可靠性和运行性能,大亚湾核电站通过“技术消缺”、“有计划、有重点的技术改进”和“全面评估,实施升级改造”3 步走战略,自 1994 年投产开始,开展了一系列技术改进和创新活动。其间重要的改进项目包括:控制棒导向管的设计改进和更换、增设凝结水精处理系统、核燃料传输装置改进、2.1% 硼(质量分数)回路改造、提高燃料浓缩度、采用 18 个月换料、开发和应用严重事故导则等。通过不断的技术改进,大亚湾核电站的堆芯熔化概率从 1.24×10^{-5} 降低到 1.03×10^{-5} ,从引进时的 80 年代机组的技术水平,提升到了 90 年代国际先进水平;运营业绩也稳步提升,能力因子(机组发电可用率)从 1997 年的 76.53% 提升到现在的接近 90%,年发电量也从可行性研究的 100×10^8 kW/h 提高到 150×10^8 kW/h。上述过程中,有一些重要的技术改进项目很有代表性。

1.1.1 18 个月换料项目

通过加大堆芯中 ^{235}U 的装入量(新燃料组件芯块中 ^{235}U 的富集度从 3.7% 提高到 4.45%),以延长燃料循环中功率的运行时间,从而将换料周期从 1 年延长到 1 年半。

18 个月换料方案将采用“内→外”装料方式,以

[收稿日期] 2007-08-18

[作者简介] 濮继龙(1943-),男,江苏江都市人,研究员级高级工程师,研究方向:核工程与核安全

减少中子的径向泄漏,增加堆芯的反应性,提高燃料的卸料燃耗,同时采用钆棒(Gd_2O_3)作可燃毒物来抑制功率峰。改用带中间搅混格架的 AFA-3G 新型燃料组件,包壳材料 M5 合金,使燃料元件在高燃耗下仍能保持零泄漏率的能力。通过对 1994 年大亚湾核电站商运以来的运行情况进行分析,对蒸汽发生器堵管份额、堆芯功率峰因子、长期低功率稳定运行(灰棒全抽出)等运行参数进行了优化。

18 个月换料实施过程中,大亚湾核电站通过与法国签订一系列工程服务、技术转让、支持服务合同,提升了核电站运行水平和国内设计自主化能力,同时实现了先进燃料制造的国产化。

1.1.2 概率安全评价(PSA)技术应用

大亚湾核电站从 1997 年开始,在吸收、消化先进技术和经验的基础上,自主开展了概率安全评价(PSA)技术的研究、开发与应用,建立了反映电站设计特征和实际运行状况的、能同时评价堆芯损坏频率和早期大量释放频率的一体化 PSA 模型。

为进一步提高电站核安全决策的有效性、更合理地利用电站资源,大亚湾核电站积极借鉴国际上先进的风险指引型管理方法,将 PSA 技术广泛应用于电站核安全管理领域中,例如,基于 PSA 技术的堆芯风险实时评价与管理系统已广泛应用于电站日常生产活动中,及时掌握有关的风险信息,有的放矢地进行风险管理,确保电站的风险处于可知可控的状态,提高电站的安全运行水平;发生重大的设备缺陷或异常突发事件时,迅速进行详细的 PSA 分析,确定出关键重要设备和人员操作,为纠正行动的制定提供决策建议;将 PSA 纳入到电站工程改造和不符合项的管理流程,从风险的角度定量地评价和比较各种方案对安全的影响。

1.1.3 严重事故管理导则研制

核电站严重事故管理导则(SAMG)是在严重事故下用于主控室和技术支持中心的可执行文件,是较为完整的、一体化的针对严重事故的指导性管理文件。SAMG 是广东核电集团在现有系统和设备的基础上,总结出的一套针对电厂可能发生的严重事故的对策集。SAMG 的使用可使电站事故管理范围和处理能力得到扩展,是现有应急运行规程(EOP)的扩展,是在管理上对严重事故缓解能力的一个重大改进,并最终达到提高核电站安全水平的目的。

大亚湾核电站开创了国内严重事故管理导则研制技术发展的先河。通过建立严重事故管理导则,

实现了在可能发生的严重事故工况下,对压力壳裂变产物边界和安全壳第 3 道屏障的保护,针对性地缓解严重事故的后果,进而减少对电站周围环境的放射性释放,最后使事故机组恢复到可控、稳定的状态。根据估算,SAMG 的实施可以使严重事故工况下安全壳早期失效的概率下降 2 倍,晚期失效的概率下降 4 倍,从而较大地提高电站的安全水平。

1.2 从大亚湾到岭澳一期

岭澳核电站一期于 1997 年 5 月开工建设,是以大亚湾核电站为参考电站,采用“翻版加改进”的技术方案,吸收了大亚湾核电站已取得的技术进步。

岭澳核电站一期采用了比大亚湾核电站版本更高的设计制造规范,维持热功率和其他主要运行参数不变,结合经验反馈和核安全技术发展要求,实施了 52 项重大技术改进,使岭澳核电站一期的安全水平从设计上达到世界先进水平,运行和维修条件得到较大的改善,进一步提高了电站安全水平和技术经济性能。PSA 表明,在同等评估条件下,岭澳核电站一期的堆芯熔化频率(CDF)进一步降低,安全性进一步提高。按照国际标准,岭澳核电站一期实现了部分设计自主化和部分设备制造国产化,整体国产化率达到 30%,国内 180 余家企业参与了工程建设和设备制造,并基本具备了自主设计能力。2003 年 1 月 8 日,岭澳核电站一期提前 66 天全面建成投产,节省投资 3.81×10^8 美元,比国家批准的预算节约近 10%。2002 年 11 月,国际原子能机构(IAEA)在对岭澳核电站一期作运行前进行安全评审后认为:“岭澳核电站一期的大部分指标都可以与新的 IAEA 国际安全标准相媲美,其业绩将成为全球核工业界极有价值的参照。”

1.3 从岭澳一期到岭澳二期、红沿河

经过大亚湾到岭澳核电站一期的实践摸索和经验积累,通过积极开展系列化、标准化百万 kW 级压水堆核电站的建设,广东核电集团已形成一套自有的产业化经验。技术分析表明,由于广东核电集团一直坚持标准化、自主化路线,新机组的建设相对于参考电站改动较小,完全可以实现设计复用。广东核电集团于 2004 年推出了“中国改进型压水堆核电技术——CPR1000”技术选型方案,同时,确定岭澳核电站二期作为 CPR1000 堆型的第一个示范电站。

岭澳核电站二期根据大亚湾和岭澳一期核电站运行经验反馈和法国同类机组批量改造计划(LOT93,VD2),进行了包括全数字化仪控系统、半

速机、严重事故应对措施等在内的 15 项重大技术改进和 40 项其他技术改进,采用新技术满足新安全法规、导则的要求,事故处理规程由事故定向转为状态定向,首次堆芯装料即采用 18 个月换料方案,压力容器设计寿命达到 60 年,采用堆坑注水技术,主回路应用破前漏(LBB)设计理念,采用可视化进度控制,利用三维辅助设计进行设计校核等一系列技术,使这一堆型更加先进、更加成熟,总体性能达到了国际同类核电机组的先进水平。

2007 年 8 月 18 日在辽宁开工建设的红沿河 400×10^4 万 kW 核电站是国家“十一五”期间首个批准开工建设的核电项目,也是我国采用 CPR1000 技术批量建设的第一个核电项目,在我国核电发展中具有承前启后的作用。根据国家规划,红沿河一期工程将在岭澳二期国产化目标基础上,在主设备安排方面,努力实现“质量更好、价格更低、国产化比例更高”的目标,项目的整体国产化比例不低于 70%,重件设备国产化比例不低于 90%。与此同时,国产化纵深方向也将进一步延伸。红沿河项目作为 CPR1000 技术标准化建设的突破口,自主标准设计、集中批量采购、定点设备制造、标准施工技术、专业调试准备等工作已经全面展开。

1.3.1 全寿期数字核电厂的构成和应用

全寿期数字核电厂,又可称为全寿期核电工程信息管理系统,应用的技术路线是:a. 电站的设计应用以三维工厂设计系统为核心技术手段,依托网络信息技术(局域网和互联网)对电厂进行数字化异地协同设计;b. 设计的知识和成果完整地保留在一个统一的数据仓库中,可以及时快捷地提取与设计相关的各种信息,并集中控制管理所有技术文件和图纸的出版和升级,将设计的数据用于设备和材料的采购和现场管理,实现设计采购一体化管理;c. 业主以及所有承包商的工程管理都应以设计基准数据为基础,将现场的建造及施工、安装、调试的各种结果数据以及质量控制数据统一在该数据仓库中进行集中管理,形成最终的数字电厂,实现核电厂全寿期的数字化管理和知识积累;d. 业主的运行维护管理应该是该数据库的合理的延伸和扩展,在此基础上建立核电厂配置管理系统;e. 向电厂的施工和运行提供三维虚拟仿真平台,推行电厂四维虚拟建造技术,进一步降低电厂的建造投资和风险。

广东核电集团于 2001 年 8 月至 10 月之间引入了与理论研究模型最为符合的、在国际市场上发展

最快的 AVEVA 公司 VANTAGE 系列解决方案,完成了全寿期数字核电厂从理论到实践的各项准备工作,初步建成了全寿期数字核电厂设计生产系统,并已经在岭澳核电站二期、红沿河核电厂设计项目和现场施工中进行应用。

1.3.2 数字化仪控的应用

随着仪控技术的飞速发展,传统的组装式仪表已经退出主导地位,逐渐被技术领先的数字化仪控系统所取代。数字化仪控系统(DCS)经过多年的应用及不断地改进,在安全性、可靠性方面也逐步提高,为 DCS 在核电站应用创造了条件。作为在掌握大亚湾核电站传统组装式仪表核心技术基础上的大胆尝试,岭澳一期在常规岛控制上全面采用 P320 控制系统,在汽轮机控制中应用先进的 DCS,这些改进技术的应用在提高安全性和可用率以及降低维修成本方面的贡献是显著的。

岭澳二期作为 CPR1000 的首台机组,全数字化仪控系统主要包括以下几个部分:DCS 核心部分由西门子的 TXP 系统(用于非安全级设备的控制)和法国 AREVA 公司的 TXS 系统(用于安全级设备的控制)组成;外挂的独立的 DCS 系统,如汽轮机控制与保护系统、堆芯测量系统、核仪表系统等;辅助系统中还有一些采用可编程逻辑控制系统(PLC)。总之,在岭澳二期项目中已经基本找不到传统组装式仪表的影子。

1.3.3 先进的运行技术

1) 状态导向法事故处理程序(SOP)。CPR1000 采用先进的状态导向法事故处理程序,取代了之前在岭澳核电站一期使用的 EOP。EOP 采用确定论的方法,根据核电站假想的单一事件的发生和发展机理进行反应堆控制,实现安全停堆。

与 EOP 相比,SOP 的使用不受事件的起因或者演化的限制,通过不断地循环监视机组性能参数来判断机组状态,针对不同的状态采取相应的策略进行处理。因此,使用 SOP 不仅可以应对任何因单一事件导致的事故,还可以处理核电站叠加事故,甚至可以弥补事故处理中出现的人因失效事件,具有更为广泛的覆盖性和适用性。

2) 数字化运行程序。岭澳核电站二期 DCS 的应用给主控室操作和监视界面带来了根本性转变。为了充分发挥 DCS 的优势,利用先进主控室提高运行人员控制机组的能力,岭澳核电站二期在一期原有运行程序的基础上进行了数字化开发设计。数字化运行程序

是根据纸质的运行程序,按照“任务梳理,人机分工”原则,对程序进行数字化结构设计,将集成监视、自动诊断、快速链接等自动化工作交给 DCS 系统,而程序的执行以及操作方式仍然控制在运行人员手中。

岭澳核电站二期数字化程序的设计方案继承了大亚湾、岭澳核电站一期的运行经验,借鉴了国际核电站运行程序的数字化方法,独辟蹊径,使 CPR1000 在运行管理方面具有区别于其他核电站的鲜明特点。数字化正常程序和事故程序的应用帮助提升了核电站的运行控制水平,为将来进一步开发更先进的数字化运行程序打下了坚实的基础。

3) 运行技术规范。运行技术规范是机组在正常运行期间,确保公众与工作人员的安全必须遵守的最低技术规则,遵守运行技术规范能确保电站的运行始终保持在最终安全分析报告所要求的安全范围内。

新版技术规范是针对岭澳核电站一期 2005 年 8 月前使用的旧版技术规范而言。与旧版技术规范不同的是,新版技术规范是从使用者的角度来编写。对不同的运行状态进行规定,规定了反应性控制、堆芯余热导出、放射性物质屏蔽、辅助支持功能和所需设备出现随机事件时采取的措施等 5 个方面内容,条理清晰,便于使用。岭澳核电站二期的新技术规范还有一些新的特点:由于 SOP 事故规程的应用,新技术规范作了相应的变化,带有鲜明的 SOP 特色;加强了正常运行状态与事故状态的接口关系,弥补了以前技术规范的不足。

2 CPR1000 技术发展展望

从大亚湾核电站到岭澳核电站一期、二期,再到

红沿河核电站,从 0 到 30%、50%、70%、90%,经过多年的技术引进及合作,目前我国核电设备除了少数部件需要进口外,大部分设备已具备国产能力。随着我国核电发展中长期规划的出台以及自主品牌核电站批量化建设格局的展开,核电设备国产化必将迈上一个新的台阶。以岭澳核电站二期和红沿河核电站为载体,CPR1000 已初步形成了一条辐射装备制造业等多个领域、规模宏大的产业链。国家积极发展核电战略的实施,将为 CPR1000 提供更加广阔的舞台。

CPR1000 符合核电科技发展规律,可实现与第三代核电技术平稳过渡衔接。作为“二代加”技术,通过持续技术改进,逐渐趋近第三代,从而保证与先进技术更加平稳地衔接过渡。CPR1000 将在后续建设项目中根据经验反馈,持续改进,进一步提高综合技术安全经济性能,最终实现与第三代压水堆核电站技术融为一体。这些重大技术改进所形成的技术基础,将加速第三代技术的消化吸收进程。

3 结语

从 CPR1000 技术形成的历程不难看出,由于它的成熟、安全、经济、先进特性,这个经过引进、消化、吸收、创新之后而具有中国特色的自主品牌是目前我国设计自主化、设备本地化、建设自主化、运行自主化水平最高,且以国内运行业绩最佳核电站为参考基础的技术方案,是我国近期实现核电建设 4 个自主化水平最高、可以自主批量建设的“二代加”主力堆型。这有利于在较短时间内提高我国核电竞争力,形成标准化、系列化、规模化发展格局,并为第三代核电技术的引进、消化、吸收、创新打下坚实基础。

The Formation of the Improved Chinese Pressurized Water Reactor Technology—CPR1000

Pu Jilong

(Guangdong Nuclear Power Holding Co., Ltd, Shenzhen, Guangdong 518028, China)

[Abstract] This paper introduces the formation of the Improved Chinese PWR technology—CPR1000 which is applied in Ling Ao Nuclear Power Station (Phase II) and Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Station, and its key technological innovations.

[Key words] pressurized water reactor; CPR1000; self-owned brand