



中国科协2004年学术年会电力分会场
暨中国电机工程学会2004年学术年会

论文集

安全 高效 环保
电力可持续发展

11月20-24日 海南



中国科协2004年学术年会电力分会场
暨中国电机工程学会2004年学术年会

论文集

安全 高效 环保
电力可持续发展

11月20-24日 海南

目 录

一 发电、可再生能源及环保

• 超超临界机组 •

- 1 超超临界燃煤发电技术的研究 张晓鲁 (1)
- 2 国内 600MW 机组升级为超超临界参数若干技术问题探讨 孙 锐, 赵 敏 (5)
- 3 火力发电机组超临界化的发展趋势 李 波 (11)
- 4 超超临界燃煤发电机组的技术选择与产业化发展 李振中, 吴少华, 黄其励 (14)
- 5 超超临界火电厂材料技术研究综述 周荣灿 (19)
- 6 百万千瓦等级超超临界机组汽轮发电机参数选型 顾守录 (26)
- 7 600MW 超临界燃煤机组技术经济优势及环保效应分析 宋立群 (35)

• 发电机和励磁机 •

- 8 600MW 机组高压厂用电接线优化 时 可 (40)
- 9 发电机组励磁系统技术改造 张 蓉 (47)
- 10 三峡工程水轮发电机组灭磁方案研究 劳国强, 王 川 (51)
- 11 对三次谐波电压型定子接地保护整定计算的探讨 郭爱军 (58)

• 锅炉 •

- 12 大型 CFB 锅炉在电力运行中磨损、排渣等问题的探索 刘晓东, 胡志宏, 徐钦田, 等 (65)
- 13 循环流化床锅炉的发展及其应用前景 蒋敏华, 肖 平 (72)
- 14 高温空气无油点火技术研究与应用 袁 德, 李 明 (77)
- 15 现场热处理对 SA335-P91 材料组织和韧性产生的影响 李慧中 (81)
- 16 冲灰水闭路循环回水系统低温阻垢处理方案的探讨 孙 艳 (84)
- 17 低 No_x 煤粉燃烧器设计中一个关键参数的理论求解 李凤瑞 (87)
- 18 锅炉四管泄漏问题的规律及生产过程中的防治重点 张清峰, 陈英涛 (89)
- 19 褐煤型等离子燃烧器的优化设计与点火试验 张孝勇, 王雨蓬, 唐 宏, 等 (96)
- 20 百叶窗型直流煤粉稳燃燃烧器——一种新型通用燃烧器 刘洪亮, 周绍琪 (102)
- 21 国产首台 410t/h 循环流化床锅炉的清洁燃烧 石 波, 余武高, 蔡爱民 (104)
- 22 燃用褐煤六角切圆 670t/h 炉低 No_x 煤粉燃烧技术的研究 孙治坤, 李争起, 张 寅, 等 (111)
- 23 双通道煤粉燃烧器冷态流场 PIV 测试及完善技术 焦庆丰, 姚 斌 (116)
- 24 太原第一热电厂 300MW 锅炉喷燃器切圆直径调整对燃烧的影响 于智远 (121)
- 25 提高 P91 钢焊接接头冲击韧性的研究 蔡连元, 潘颖平, 李慧中, 等 (128)
- 26 铁岭发电厂 4 号炉结焦原因探析 潘 晶, 刘学增 (133)
- 27 灰色系统理论在电厂洁净燃烧专家系统中的应用 彭继文, 祖春光, 李文军, 等 (139)
- 28 复杂循环水系统经济运行方案的优化设计及软件开发 卢绪祥, 李录平, 乔 建, 等 (144)

• 汽轮机及燃气轮机 •

- 29 三门峡 300MW 汽轮机轴系振动故障的诊断和治理 李江海 (151)
- 30 提高汽轮机真空的措施及经济性分析 张运耀, 周天旺, 钟定辉 (155)
- 31 透平叶片减振结构的阻尼特性研究 李录平, 晋风华, 李 杰, 等 (158)
- 32 北重 330MW 汽轮机“机械危急遮断系统”改造探讨 陈 忠, 杨自强, 李亚军 (164)
- 33 低压末级叶轮的检查与分析 韩阳 (169)
- 34 330MW 汽轮发电机组跨国匹配轴系动力特性计算分析 王柏仁, 郭一兵 (173)
- 35 国产 200MW 汽轮机组热力系统设计优化与改进 孙人才, 李传博 (179)
- 36 国产 300MW 氢冷汽轮发电机密封瓦碰摩机理研究 晋风华, 李录平, 蒲军伟, 等 (183)
- 37 国产引进型 300 MW 机组节能降耗综合治理 初立森, 苏春艳, 李国军 (187)
- 38 汽轮机调节系统改造方案分析及优化 贾 和 (192)
- 39 125MW 汽轮机循泵出水门丝杆断裂分析 张 珣 (205)
- 40 燃气轮机燃用国产重油的可行性研究 赵凤娟 (210)

• 火电厂辅机 •

- 41 RY6-23 一次风机与 HP 磨煤机匹配性研究 朱顺利 (213)
- 42 大型火电站磨煤机可靠性增长模型验证及预测研究 张 勇 (215)
- 43 华蓥山电厂 100MW 机组锅炉引送风机变频改造项目实施及运行报告 周长明 (219)

• 火电厂控制 •

- 44 锅炉启动过程优化方法的研究 胡文森, 李 斌 (225)
- 45 2×142MW 供热机组给水控制系统分析与改进 付立新 (229)
- 46 国产智能前端在大型火力发电机组上的应用 赵洪生 (234)
- 47 鲁棒广义预测控制在火电厂单元机组协调控制上的应用研究 凌呼君, 王继昆, 席东民 (237)

• 火电厂化学 •

- 48 安徽省火电厂化学监督存在的问题与思考 郑敏聪 (242)
- 49 电站汽包炉机组局部轻微氧化性无除氧剂水化学工况研究 周年光, 张玉福, 龚洵洁 (247)
- 50 工业冷却水对不锈钢换热器腐蚀的研究及对策 张振达, 张福祥, 陈静 (252)
- 51 汽包炉水低磷酸盐处理工艺的应用研究 吴仕宏 (256)

• 火电厂环保 •

- 52 中国燃煤电站脱硫和脱硝技术现状与发展 中国电力投资集团公司 (260)
- 53 液相生化法脱硫试验研究 刘启旺, 王乃光, 陈江平 (265)
- 54 贵州省大型火电站 NO_x 排放量现状及分析 罗小鹏 (271)
- 55 华能珞璜电厂烟气脱硫装置运行维护的主要体会 苏 成 (275)
- 56 建设干法脱硫装置的主要体会和预期效益分析 王文彦 (278)
- 57 600MW 机组烟气脱硫设施供电方式研究 张树森 (282)
- 58 珞璜电厂烟气脱硫装置建设回顾及对社会环境的影响与贡献 顾咸志 (283)
- 59 湿式石灰石·石膏法烟气脱硫工艺布置及占地研究 龙 辉, 丛东升 (289)
-

- 60 城市二级污水的工业回用 曾德勇 (296)
- 61 火电厂废水“零排放”设计研究与应用 张贵祥, 董建国, 李志民, 等 (301)
- 62 火电厂烟气脱硫工艺技术经济分析与选择 黄伟, 程金明 (306)
- 63 浅谈火电厂烟气排放连续监测技术及其应用 张勇 (311)
- 64 燃煤电厂含煤废水处理工艺的改进 王德彬 (314)
- 65 燃煤电站氮氧化物控制技术现状与发展 董建勋, 李成之, 李振中 (317)
- 66 提高冷却塔循环水池安全经济排污的方案探讨 李莉 (321)
- 67 循环水排污水采用膜脱盐法处理回收工艺的试验研究 吴仕宏 (324)
- 68 采用再燃技术降低锅炉 NO_x 排放的工程研究与实践 文军, 王春昌, 王月明 (327)
- 69 电除尘技术在提高除尘效率中的应用 胡红斌 (332)
- 70 电力企业实施公害防治工作的研究与实践 韩忠贵, 蒋建强 (336)
- 71 坚持科学发展观 建设节水型电厂 汪德良 (341)
- 水电厂设备、系统及管理 •
- 72 三峡左岸电站计算机监控系统联合开发、调试及其经验探讨 谢秋华, 程建 (345)
- 73 三峡左岸电站水轮发电机组技术改造综述 关杰林, 程建 (349)
- 74 三峡左岸电站综合自动化系统综述 陈国庆 (353)
- 75 异步化同步发电机与同步发电机并联运行的分散变结构控制 宋军英, 陈允平, 刘涤尘 (358)
- 76 洪水期的风险调度方法 李万绪 (364)
- 77 KKS 编码和物资编码在太平驿 MIS 中的尝试 周强焱 (369)
- 78 三峡左岸电站 2F、6F 相对效率试验成果分析 叶青平, 张晓澍 (374)
- 79 岩滩水库泥沙淤积分析 钟华昌, 覃杰 (378)
- 80 研究提高三峡左岸电站厂用电系统可靠性的措施 薛福文, 刘昌栋 (384)
- 81 安徽的“眼泪”——皖西水库群运行和管理面临的新问题调查 毕勇 (387)
- 82 光纤传感技术及其在混凝土大坝变形监测中的应用 陈建春 (391)
- 83 水轮机转轮应力的现场测试 潘罗平, 唐澍 (395)
- 核电 •
- 84 大亚湾核电站运营技术开发与实践 贺禹, 高立刚, 郑东山 (399)
- 85 关于我国核电发展的几个问题 祁恩兰 (405)
- 86 广东大亚湾核电站 (GNPS) 环境管理体系建立与有效实施的基本经验陈德淦, 焦萍, 初志春 (410)
- 87 岭澳核电站自主化调试与创新 郑东山, 黄小桁, 禹阳, 等 (416)
- 可再生能源与分布式发电 •
- 88 冰蓄冷空调技术及其发展 叶水泉 (432)
- 89 “西气东输”天然气宜使用在热、电 (冷) 分布式全能系统 钟史明, 徐海荣, 应六二 (439)
- 90 大力发展小型绿色环保分散电源发供电技术——建立辽宁省燃料电池产业化基地 冯玉全 (444)
- 91 树立科学发展观积极发展小型热、电、冷联产 王振铭 (447)
- 92 试分析海南东方风力发电厂 600kW 风电机组防雷过电压保护系统钱启良, 赵永炬, 符成院 (454)

二 输变电及电力系统

• 电力系统规划、设计和运行 •

- 93 220kV 变电所的设计水平策划及成果.....朱晓明 (457)
- 94 安庆城区 10kV 配电网中性点接地方式探讨.....胡大明, 吴中弧, 张展 (459)
- 95 城市配电网接线方式探讨.....侯茜, 李向奎 (462)
- 96 加强电网三道防线 确保我国电力系统的安全.....孙光辉, 沈国荣 (464)
- 97 广西电网电压稳定情况研究.....高文建, 梁才浩 (469)
- 98 西北电网西电东送稳定水平提高措施研究.....范越, 史可琴, 段来越 (476)
- 99 西北省际间电量交易的隐忧与对策.....朱泽 (479)
- 100 华中川渝联网有关问题研究.....林常青, 熊秀文, 黄涌 (483)
- 101 基于 N-1 原则的输电断面传送功率能力分析.....李响 (487)
- 102 提高 500kV 输电线路输送容量的研究.....张启平, 钱之银 (491)
- 103 提高导线允许温度增加线路输送容量的研究.....叶鸿声, 龚大卫, 黄伟中, 等 (495)
- 104 西北电网安柞南系统工频过电压计算分析.....于峥 (504)
- 105 深入研究电力系统安全运行问题提高电网安全运行水平.....廖泽龙 (509)
- 106 谈华北电网结构的总体构思.....张建峰, 徐华, 王信 (513)
- 107 辽宁省电磁环网解环问题的探讨.....郭佳, 张伟利, 樊飞, 等 (518)
- 108 东北电网频率与联络线潮流的关系.....魏庆海, 鲁顺, 范东春, 等 (522)
- 109 基于 AGC 技术的电力系统频率控制标准研究及在华东电力系统中的应用.....汪德星, 张启平, 杨立兵 (526)
- 110 电力需求侧管理应纳入电力规划研究的主要内容.....张泽宇, 施昌培, 彭兴, 等 (531)
- 111 构筑甘肃电网事故综合防御系统.....周为民, 何世恩, 王景元 (535)
- 112 吉林省电网的现状分析及发展目标探讨.....盛大凯, 李群英 (539)
- 113 浅谈电力电子技术应用状况及其对电力系统的影响.....庄荣, 杨志, 赵争鸣, 等 (543)
- 114 吸取美加大停电教训, 保障广东电网安全运行.....刘启宏, 李力, 李扬絮, 等 (548)
- 115 安徽电网调度运行的概率充分性分析.....殷浩军, 丁明, 李生虎, 等 (552)
- 116 电力需求侧管理对深圳电网安全经济运行的启示.....胡子珩, 程韧俐, 邱利斌 (556)
- 117 天广直流输电系统过负荷能力及其应用研究.....洪潮, 许爱东, 欧开健 (561)

• 电力系统仿真 •

- 118 一种外包计算的新型 ASP 模式在电力系统中的应用分析.....孙华东, 岳程燕, 李若梅, 等 (566)
- 119 广西电网在线动态安全性分析系统.....林曦, 薛峰, 高文建, 等 (571)
- 120 实时数字仿真系统 RTDS 在阳城—淮阴 TCSC 工程中的应用研究.....赵学强 (576)
- 121 南方电网多直流馈入系统的 NETOMAC 仿真研究.....许爱东, 饶宏, 洪潮 (580)

• 输变电设备及故障诊断 •

- 122 由引线引起的电力变压器过热性故障分析.....韩洪刚 (584)
- 123 支柱瓷绝缘子断裂失效分析.....闫斌 (588)

- 124 复合绝缘子芯棒高温下脆断性能测试 梁曦东, 戴建军, 周远翔, 等 (593)
- 125 简论牵引变压器的寿命 郭满生, 张喜乐 (598)
- 126 红外信息采集与分析技术在电气设备故障检测诊断中的应用 蓝耕 (603)
- 127 DL/T664-1999《带电设备红外诊断技术应用导则》修订建议的探讨 赵墨林 (606)
- 128 电力系统防污闪现状与技术政策分析——规范防污闪涂料行业、全面提高 RTV 综合性能
..... 陈原, 张章奎, 巩学海, 等 (612)
- 129 城镇电网电缆入地改造的探讨 李朝阳 (618)
- 输变电电磁环境与谐波 •
- 130 电力系统技术发展对二次自动化设备的电磁兼容性能影响 傅静波, 江峰, 梁志成 (621)
- 131 高压交流输变电设备电磁辐射的环境影响评价及抑制 李晶明, 杨爱琴 (625)
- 132 高压输变电工程与电磁辐射环境保护 杨琳 (628)
- 133 我国更高一级电压等级输电的电磁环境研究 吴桂芳, 陆家榆, 邵方殷 (630)
- 134 电网绿色环保与谐波污染控制 段晓波 (635)
- 135 天广交直流并联输电系统的谐波分析 黄方能, 梁小冰, 顾南峰, 等 (639)
- 电力系统调度自动化和通信 •
- 136 实时安全告警在电网运行管理中的应用 王安贵 (647)
- 137 组件技术在新一代调度自动化系统中的应用 黄海峰, 杨志宏, 张慎明, 等 (649)
- 138 华北电网电力市场技术支持系统建设构想 宁文元, 李运平 (653)
- 139 SCADA 系统中存在的安全风险及对策 罗扬 (657)
- 140 电力线通信 (PLC) 技术综述 曹惠彬 (660)
- 141 OPGW 使用寿命及光中继路由可用性问题的研究 朱发强 (668)
- 142 光纤复合架空地线 (OPGW) 耐雷击性能分析 孙德栋, 陈希, 威力彦, 等 (674)
- 143 高可靠电源系统在电力通信中的应用 潘耀杰, 张磊, 吴林 (681)
- 电力系统电气测量、继电保护与控制 •
- 144 基于平衡测量原理适用于 MCU 实现的 $\tan \delta$ 在线测量方法 陈天翔, 张保会, 陈天韬 (686)
- 145 新型谐波电流检测方法和补偿电流控制策略 郝瑞祥, 张喜军, 张雄, 等 (690)
- 146 输电线路单端行波测距法和双端行波测距法的对比研究 覃剑, 葛维春, 邱金辉, 等 (695)
- 147 一个实用电声脉冲法空间电荷测量系统 王宁华, 高斌, 周远翔, 等 (701)
- 148 基于 GPS 技术的多功能电能表测试系统 刘水 (706)
- 149 广域测量系统及其在华东电网的应用 曹路, 张启平, 励刚, 等 (711)
- 150 龙泉换流站谐波滤波器保护误动分析和改进建议 肖遥, 康健, 高理迎, 等 (716)
- 151 继电保护实时监测与分析系统设计及实现 王皓, 何鸣 (722)
- 152 加强继电保护与紧急控制系统的研究提高互联电网安全防御能力 张保会 (725)
- 153 万全串补人工接地试验及串补保护误动分析 刘平, 牛晓民 (732)
- 154 自耦联络变压器零序保护的简化配置及整定配合 高有权 (736)
- 155 电力电子装置的过电压保护技术应用 蓝元良, 印永华, 汤广福, 等 (739)

156 高压直流输电控制保护系统国产化研究及其应用	胡 铭, 田 杰, 李海英, 等 (743)
157 电力系统稳定器 (PSS) 及其在三峡机组的应用	彭炜东, 薛福文 (748)

• 电力企业管理 •

158 完善江苏省电力公司安全管理体系的构想	崔中华 (759)
159 以人为本, 建设先进的电力企业安全文化体系	曾昌祥 (764)
160 电力企业安全文化建设	彭石明 (768)
161 电力市场下勘测设计企业管理创新	张茂华 (772)
162 电站建设进度管理探讨—从外高桥电厂二期 900MW 机组施工进度谈起	沈石楠 (776)
163 对现代电力企业安全管理工作的几点思考	王正华, 张 力 (784)
164 安全性评价在电力企业中的应用研究	王金萍, 樊凤林, 刘发旺, 等 (787)
165 引进现代安全管理理念创建南方电网“安、健、环”管理体系	刘 琳 (792)

• 数字化和信息技术应用 •

166 数字化电厂设计	黄增宏, 郭晓克, 孙岳武 (795)
167 开发 GIS 信息系统, 提升电力信息化应用水平	辜体仁 (798)
168 信息化工程理论与实践	潘明惠 (803)
169 Windows 操作系统下实时数据采集的实现	杨炳元, 张保会, 褚晓霞 (808)
170 电力企业网络安全研究	郭泽江 (813)
171 集中式电网集团数据中心的基础平台和应用组成	刁柏青, 步万峰 (820)

• 电力可靠性及安全 •

172 提高北京电网供电可靠性的措施	孙嘉平, 张建峰, 杨 超, 等 (824)
173 2003 年全国电力可靠性简要分析	陈丽娟, 赵 凯, 蒋锦峰, 等 (830)
174 广州电力生产安全管理新举措	林火华, 代保明 (849)

三 综合

• 资源、能源和电力发展 •

175 资源节约: 电力工业的可持续发展之路	中国电力企业联合会 (852)
176 加强电力监管 提高能源效率	张近朱 (856)
177 贵州煤电开发现状及前景	林再寅 (859)
178 开展电力规划研究应立足安全满足社会发展需求	刘当武, 许根养, 钱 云 (862)
179 2020 年中国电力可持续发展战略研究	叶 雷 (866)
180 云南省电源资源的开发与利用	朱云飞 (874)
181 从电力弹性系数看我国电力工业的超前发展	郭基伟, 郑 楠 (878)

• 其它 •

182 某热电厂油改煤 I 期工程 8#机除氧间大梁增载加固	高作平, 李曰辰 (882)
183 TEAM PROBLEM 21 基准族的涡流分析及实验验证	程志光, 郝瑞祥, 高桥则雄, 等 (885)
184 运用等值复数镜像法求解复合分层土壤结构的格林函数	孙结中, 刘 力 (890)
185 台风“杜鹃”的危害与思考	于午铭 (896)

超超临界燃煤发电技术的研究

张晓鲁

(中国电力投资集团公司, 北京 100053)

RESEARCH ON ULTRA-SUPERCRITICAL PRESSURE COAL-FIRED POWER GENERATION TECHNOLOGY

ZHANG Xiao-lu

(China Power Investment Corporation, Beijing 100053, China)

ABSTRACT: The ultra-supercritical pressure coal-fired power generation technology (USCT) is a mature, advanced and efficient power generation technology in the world. From the viewpoint of Chinese power industry development, this paper analyzes the necessity and feasibility of ultra-supercritical units in China, and introduces the qualification of ultra-supercritical units abroad. Based on the above, the technical course of ultra-supercritical units' development in China is expatiated and the prospect of USCT application is analyzed.

KEY WORDS: Ultra-supercritical pressure coal-fired power generation; Clean coal power-generation technology; Necessity, Feasibility

摘要: 超超临界燃煤发电技术是目前世界上成熟、先进、高效的发电技术。本文从国家电力发展的角度出发, 分析了我国发展超超临界机组的必要性, 介绍了国外超超临界机组的技术指标, 在此基础上阐述了我国发展超超临界机组的技术路线, 并对超超临界发电技术的应用前景做了展望。

关键词: 超超临界燃煤发电; 洁净煤发电技术; 必要性; 可行性

1 我国发展超超临界机组的必要性

按照国家制订的 2020 年电力发展规划, 我国发电装机容量将从目前的 4 亿千瓦增加到 2020 年 9 亿千瓦, 其中燃煤机组将达到 5.8 亿千瓦。

2003 年, 全国二氧化硫排放总量达到 2100 多万吨, 其中燃煤电厂二氧化硫排放约占全国排放总量的 46%。我国酸雨 pH 值小于 5.6 的城市面积占全国的 70.6%。随着燃煤装机总量的增加, 我国将面临严峻的经济与资源、环境与发展的挑战。提高燃煤机组的效率、减少总用煤量、降低污染物排放是当前我国火电结构调整, 实现可持续发展的任务。

目前我国电力工业装机中高效、清洁的火电机组比例偏低, 结构性矛盾突出。2002 年, 火电机组中 30 万千瓦及以上机组占 41.7%, 20 万千瓦以下机组占 42.5%, 超临界机组只占 2.38%。洁净煤发电、核电、大型超(超)临界机组、大型燃气轮机技术开发、设备生产刚刚起步。全国火电平均供电煤耗 383g/kWh, 比世界先进水平高出 60g/kWh。因此迫切需要在近期研制出新一代燃煤发电设备来装备电力工业。

新一代发电设备应具备可靠、大型、高效、清洁、投资低等性能; 能够替代现有的 300MW 和 600MW 亚临界机组, 成为装备电力工业的主流机型; 同时国内设备制造企业经过努力后能够具备生产能力, 能够形成规模生产和市场竞争局面。

分析国际上燃煤发电技术的发展趋势, 将采用两种技术路线来提高效率和降低排放。其一是利用煤化工中已经成熟的煤气化技术, 集成蒸汽燃气联合循环技术实现高效清洁发电, 其代表技术为 IGCC。此技术提高能效的前景很好, 但因系统相对复杂而造成投资偏高的问题需要解决。目前正在烟台电厂建设一台 300 或 400MW 等级的 IGCC 示范机组, 为今后的发展作好技术储备。另一个发展方向是通过提高常规发电机组的蒸汽参数来提高效率, 即超临界机组和超超临界机组。超超临界机组在发达国家已经实现了大容量、大批量生产。通过努力我国可以较快实现国产化能力, 降低设备成本。

如果我国 600MW 等级的燃煤机组采用超超临界技术, 供电煤耗 278g/kWh, 比同容量亚临界机组的煤耗减少 30 克/kWh, 按年运行 5500 小时

计算,一台 600MW 超超临界机组可比同容量亚临界机组节约标煤 6 万吨/年,同时 SO_2 、氮氧化物、粉尘等污染物以及 CO_2 排放将大大减少。采用超超临界燃煤发电技术对于节约资源消耗、保护环境、实现可持续发展具有重要意义。

2 国外超超临界机组的技术指标

超超临界机组蒸汽参数愈高,热效率也随之提高。热力循环分析表明,在超超临界机组参数范围的条件下,主蒸汽压力提高 1MPa,机组的热耗率就可下降 0.13%~0.15%;主蒸汽温度每提高 10℃,机组的热耗率就可下降 0.25~0.30%;再热蒸汽温度每提高 10℃,机组的热耗率就可下降 0.15%~0.20%。在一定的范围内,如果采用二次再热,则其热耗率可较采用一次再热的机组下降 1.4%~1.6%。

亚临界机组的典型参数为 16.7MPa/538℃/538℃,其发电效率约为 38%。超临界机组的主蒸汽压力通常为 24MPa 左右,主蒸汽和再热蒸汽温度为 538~560℃;超临界机组的典型参数为 24.1MPa/538℃/538℃,对应的发电效率约为 41%。超超临界机组的主蒸汽压力为 25~31MPa,主蒸汽和再热蒸汽温度为 580~610℃。

超临界机组的热效率比亚临界机组的高 2%~3%左右,而超超临界机组的热效率比超临界机组的高 4%左右。

目前,美国投运的超临界机组大约为 170 台,其中燃煤机组占 70%以上。前苏联 300MW 及以上容量机组全部采用超临界参数。至 1988 年已有近 200 台超临界机组投入运行,全国 35%电力由超临界机组供给。

日本的超临界机组共有 100 多台,总容量为超过 5760 万千瓦,占火电机组容量的 61%,45 万千瓦及以上的机组全部采用超临界参数,而且在提高参数方面做了很多工作,最高压力为 31MPa,最高温度已达到 600/600℃。

丹麦史密斯公司研究开发的前 2 台超超临界机组,容量为 400MW,过热蒸汽出口压力为 29MPa,二次中间再热、过热蒸汽和再热汽温为 582/580/580℃,机组效率为 47%,机组净效率达 45% (采用海水冷却,汽轮机的背压为 26kPa);后开发了参数为 30.5MPa,582/600℃、容量为 400MW 的超超临界机组,该机组采用一次中间再热,机组设计效率为 49%。

德国西门子公司 20 世纪末设计的超超临界机组,容量在 400~1000MW 范围内,蒸汽参数为 27.5MPa,589/600℃,机组净效率在 45%以上。

欧洲正在执行“先进煤粉电厂(700℃)”的计划,即在未来的 15 年内开发出蒸汽温度高达 700℃的超超临界机组,主要目标有两个:使煤粉电厂净效率由 47%提高到 55% (采用低温海水冷却)或 52% (对内陆地区和冷却塔);降低燃煤电厂的投资价格。美国和日本也将蒸汽温度为 700℃的超超临界机组作为进一步的发展目标。

可见,国际上超超临界机组的参数已经达到 27~32MPa 左右,蒸汽温度为 566~600℃,热效率可以达到 42~45%。国外机组的可靠性数据,表明了超超临界机组可以同样实现高的可靠性。我国石洞口二厂两台 60 万千瓦超临界机组的可用率就高达 90%以上,高于其它一些同容量亚临界机组。从环保措施看,国外的超超临界机组都加装了锅炉尾部烟气脱硫、脱硝和高效除尘装置,可以实现较低的排放,满足严格的排放标准。例如日本的超超临界机组的排放指标可以达到 SO_2 70 mg/Nm³; NO_x 30 mg/Nm³; 粉尘 5 mg/Nm³。可见,超超临界燃煤机组甚至可以与燃用天然气、石油等机组一样实现清洁的发电。

与其余几种洁净煤发电技术相比,超超临界机组技术具有继承性好,容易实现大型化的特点,在机组的可靠性、可用率、热机动性、机组寿命等方面已经可以和亚临界机组媲美,已经有了较多的商业运行经验。

3 我国发展超超临界机组的技术路线

2000 年开始,原国家电力公司启动了超超临界发电技术可行性的研究工作。2002 年该研究获得国家科技部支持,列入“十五”863 研究计划。该项目由国内制造企业、电力公司以及科研院所等 19 个单位组成的课题组,围绕我国开展超超临界机组的应用技术问题开展专题研究,分为 5 个子课题,其中子课题一为“超超临界机组的技术选型研究”;子课题二为“超超临界锅炉关键技术研究”;子课题三为“超超临界汽轮机关键技术研究”;子课题四为“大型燃煤电站烟气净化技术研究”;子课题五为“超超临界机组电站设计与运行技术研究”。

2003 年 11 月 7 日,子课题一通过国家科技

部组织的专家验收。该子课题全面、深入地调研了国外超超临界燃煤机组的现状和技术发展趋势,并根据我国的具体国情,全面分析了超超临界机组用钢的现状,在选用国际成熟的耐热钢材的前提下,分析研究了有关超超临界参数、机组容量、机组的结构型式、热力系统、重要辅机配套、机炉参数匹配及机组运行性能等问题。明确提出了我国近期发展超超临界机组的有关技术选型结论,提出了烟气净化技术的选型建议。研究结论既考虑了国际上超超临界机组发展的先进成熟水平,又充分考虑了我国当前设计和制造企业通过与国外合作迅速实现本地化的可能性。

在此研究过程中,在通过国际市场采购已商业化的耐热金属材料的条件下,用科学抽象的典型化、层次化方法,从技术可行性、设计制造模式、业绩和与国外合作、经济性分析四个重要方面分析,抓住本质,对繁多因素进行归类、分层处理,得到如下技术选型论证的结论:

1、我国发展超超临界机组的技术参数

蒸汽参数 25MPa/600℃/600℃ (发电效率约 44.63%,发电煤耗率 275g/kWh);同时,不排除蒸汽参数 28MPa/600℃/600℃ (发电效率约 44.99%,发电煤耗率 273g/kWh)的可能,提高压力后,其热效率提高约 0.4 个百分点,其技术经济性根据实际工程而定。

2、我国发展超超临界机组的参数等级

(1) 推荐 1000MW 容量等级机组方案和 600MW 容量等级机组采用超超临界参数方案,其中 600MW 容量等级超超临界机组应做为我电网中的主力机组。经研究分析,为保证机组的技术经济合理性,超超临界机组的单机容量应在 350MW 以上,超临界机组的单机容量应在 300MW 以上。

(2) 1000MW 级超超临界机组推荐采用单轴布置。对常规背压 (4.9kPa) 条件,1000MW 级汽轮机可采用 43~48" (1092.2~1219.2mm) 末级叶片四缸四排汽结构,其排汽损失在设计规范内;600MW 级汽轮机采用~1000mm 末级叶片四缸四排汽结构是合适的,同时可采用 48" 末级长叶片的两排汽结构。

大型超临界煤粉锅炉的整体布置主要采用Π型布置和塔式布置。锅炉水冷壁型式中的螺旋管圈和垂直管屏二种型式均有运行业绩,均是可行

的,但在数量上以前者为多。

(3) 采用二次再热可使机组的热效率提高 1%~2%,但也造成了调温方式、受热面布置、结构等的复杂性,成本明显提高。因此,推荐一次再热。

总的来看,这种技术选型方案具有创新性和世界先进水平。我国超超临界机组的推荐参数 25MPa/600℃/600℃ 是日本目前所采用的方案,压力比欧洲低,温度比欧洲高;目前世界上还没有该参数的 1000MW 单轴超超临界机组。这个方案适合我国经济和电力发展需要。

28MPa/600℃/600℃ 参数超超临界机组方案的技术水平略高于 25MPa/600℃/600℃ 参数方案,但仍属同一等级的。这个方案采用的压力比目前日本高、温度比目前欧洲高,该参数与 1000MW 级容量的组合方案具有世界先进水平。

按照上述技术路线,哈尔滨、上海、东方等三大动力设备厂与日立、三菱、东芝、西门子、阿尔斯通等公司进行了技术引进工作。

子课题二、三的研究针对已确定的机组选型参数,以制造企业为中心开展锅炉、汽轮机、发电机和重要辅机的研究工作。哈尔滨锅炉厂负责组织三家锅炉厂、研究单位,重点研究水冷壁水动力工况和奥氏体钢的加工和焊接工艺,提出超超临界锅炉的方案和设计软件。东方汽轮机厂负责组织三家汽轮机厂、研究单位重点研究高温、高压部件动叶材料、汽轮机总体结构及可靠性、高温材料冷、热加工工艺和末级长叶片技术,提出超超临界汽轮机的方案和设计软件。子课题四由国家电站燃烧技术中心正在研究大机组的脱硝技术,为今后自主发展烟气脱硝技术作好准备。子课题五由华能国际电力公司正组织西安热工院和华东电力设计院研究超超临界运行和设计技术。这些技术将为建设国产超超临界机组提供具体的方案。

4 超超临界发电技术的应用前景

根据我国现实及未来可能的资源条件和各种能源技术发展水平及其经济性,燃煤发电仍然在电力结构中占据不可替代的地位。大力发展先进、高效、清洁的燃煤发电技术是电力工业可持续发展的重要手段。最近国家发改委明确要求,在缺乏煤炭资源的东部沿海地区,优先规划建设发电

煤耗不高于 275 克标准煤/千瓦时的燃煤电站，这是超超临界机组的发展政策要求。因此，超超临界机组将会在东部得到快速发展。

今年煤炭价格大幅度上涨，从长远看，煤炭价格将会持续上涨。就目前的煤价水平，在坑口建设的超超临界机组的电价已经低于亚临界机组的电价，随着煤价上涨，超超临界机组将会更加经济。随着国家建设大型坑口煤电基地战略的实施，坑口地区的电厂装机规模会迅速增加，需要超超临界机组提高煤炭利用效率、减少排放。

随着超临界火电机组的国产化，我国在今后新增的火电装机结构中必将大力发展超临界和超超临界机组。根据现已完成的研究结果表明：今后电网新增超临界与超超临界机组的需求和数量

都将大幅度增加。其中超超临界机组由于与超临界机组相比效率将有较大幅度的提高，从而具有更高的竞争优势。预计 2020 年超超临界机组在燃煤机组装机总量中达到 25% 以上。

因此，加快建设和发展超超临界火电机组是解决电力短缺、能源利用率低和环境污染严重的最现实、最有效的途径。超超临界发电技术是我国电力工业升级换代，缩小与发达国家技术与装备差距的新一代技术，在未来 20~30 年是我国电力工业装机主要技术。超超临界火电技术的发展，还将带动制造业、材料工业、环保工业及其它相关产业的发展，创造新的经济增长点，是电力工业可持续发展的战略选择。

国内 600MW 机组升级为超超临界参数 若干技术问题探讨

孙 锐, 赵 敏

(电力规划设计总院, 北京市西城区 100011)

TECHNICAL DISCUSSION ON RAISING PARAMETER TO ULTRA SUPER CRITICAL FOR DOMESTIC 600MW UNIT

SUN Rui, ZHAO Min

(Electric Power Planning & Engineering Institute, 65 Ande Road, Beijing 100011, China)

ABSTRACT: This article give the explanations on the necessity of raising parameter to ultra super critical for domestic 600MW unit, and demonstrate the main design principles and the parameter selection, provide some recommendations, analyse the selection principle and the localization of the main and auxiliary equipments for the ultra super critical 600MW unit.

KEY WORDS: Fossil power plant; Ultra super critical 600MW; Technical; Discussion

摘要: 本文对国内 600MW 机组升级为超超临界参数的必要性进行了较充分的说明; 对 600MW 超超临界机组的主要设计原则及参数选择进行了论证, 并提出了推荐意见; 对 600MW 超超临界机组的主辅机选择原则及国产化程度等进行了较全面的分析。

关键词: 火电; 600MW 超超临界机组; 技术问题; 探讨

1 国内 600MW 机组升级为超超临界参数的必要性

自 80 年代初我国引进 300MW 和 600MW 亚临界机组技术以来, 目前 300~600MW 亚临界机组已成为我国火力发电的主力机组。在我国一次能源构成中煤炭是主要能源, 在相当长的时间内燃煤火力发电仍将在我国发电领域占主导地位。提高发电效率、降低污染、节约资源是今后火电机组的发展方向。

提高蒸汽参数、发展大容量机组是提高机组热效率的主要手段。目前世界各国火力发电机组参数已由亚临界参数 (18.0MPa、540℃) 发展到超临界参数 (25.0MPa、540℃~566℃) 和超超临界参数 (24~30.0MPa、580℃~610℃及以上。目前国际

上超超临界机组的发电效率可达 45%~47%, 比亚临界机组提高 6%~7%, 比超临界机组高 3%~4%, 其可靠性与超临界和亚临界机组基本相当, 技术成熟。因此, 从我国国情出发, 发展超超临界燃煤机组有利于提高机组热效率, 降低发电煤耗, 同时可减少二氧化碳和其他大气污染物的排放, 是提高我国火电机组技术水平、实现火电机组技术优化升级最有效又现实的措施, 也是我国火力发电机组发展的必然趋势。

根据中国电力工业的现状和发展规划, 从电网容量上看, 需要装设 1000MW 等级的大机组。但是今后在电网中不可能全部建设 1000MW 机组。其原因: 一是, 一些地区的厂址受到建厂条件和运输条件的限制; 二是, 机组容量越大, 电网对它的可靠性要求越高, 国产 1000MW 机组的可靠性在达到一定水平之前不可能在电网中成为主力机组; 三是, 1000MW 机组国产化需要一定的时间, 国产化进程将直接关系到工程造价, 而工程造价直接影响机组的上网竞争能力。以 300MW 和 600MW 亚临界机组为例, 它们是 80 年代初期一同引进的技术, 具有同等的技术条件和应用条件, 但是 300MW 机组却首先成为电网的主力机组, 截止到 2001 年已有 186 台机组投入运行, 而 600MW 机组却只有 22 台投入运行, 且大部分机组是在 90 年代后期投入运行的。究其原因主要是由于主机和辅机的国产化进程和可靠性问题导致的结果。600MW 机组的主机和辅机在中国开始制造和运行已经近二十年的时间, 国产化和可靠性问题已经得到解决, 现在开始建设的工程绝大部分已采用 600MW 机组。将 600MW 机组参数升级为超超临界, 虽然会引起一

些变化,但主要是集中在主机的部件要采用更好的材料上,对于辅机基本上没有影响,与将容量上放大到 1000MW 机组相比在技术上成熟得多。因此,可以预测我国 600MW 超超临界机组在国产化进程和可靠性上将比 1000MW 超超临界机组更快地达到较高的水平。

在今后相当长的时间内 600 MW 机组将成为火电建设和电网运行的主力机组。只有主力机组的效率得到提高,才能使全国的发电煤耗大幅度的降低,并获得明显的环保效益。因此,研究在我国 600MW 机组上采用超超临界参数有着非常重要的意义。

2 再热方式选择

超超临界机组在提高进汽压力的同时,为避免汽轮机末级蒸汽湿度过高,国外一些超超临界机组采用二次再热。与传统的一次再热循环比较,二次再热有如下主要三个优点:

(1) 降低低压缸的排汽湿度,减少末级叶片的磨蚀。

(2) 降低再热器的温升。一次再热循环系统中再热器的温升为 280℃左右,采用二次再热系统每个再热器中的温升在 200℃左右,这使得锅炉出口蒸汽温度更加均匀。

(3) 提高机组效率。二次再热与一次再热比较,其热效率一般高出 1.3%~1.5%。

低压缸的排汽湿度与机组的初参数、再热蒸汽参数的选择以及汽机背压都存在一定的关系。根据工程经验,排汽湿度一般控制在 10%左右,且最大不应超过 12%,否则将造成末级叶片严重的腐蚀。根据哈尔滨汽轮机厂提供的资料,若蒸汽参数选择 28.0MPa、580/600℃,汽机背压 4.9kPa 时,排汽湿

度就将达到 10.7%,已经达到了较大的排汽湿度。若汽机背压继续降低,则汽机排汽湿度还将增大。日本在川越电厂的两台机组由于主蒸汽压力高(31MPa),采用了二次再热。丹麦两台机组主汽压力为 29 MPa,但由于汽机背压低,也采用了二次再热。

虽然采用二次再热循环有上述优点,但根据相关资料介绍,二次再热要求汽轮机增加一个超超高压缸,低压缸进口温度将大于 400℃,使低压缸转子进入高温回火脆性区,必须对低压转子材料进行特殊处理,将使汽轮机设备成本增加 30%;锅炉增加比例会更多;机组的造价也要高 10%~15%。而机组的投资一般约占电厂总投资的 45%~48%左右,经折算约要提高电厂投资 4.5%~7.2%。由此可见,二次再热所带来的总体经济性并不十分明显。另一方面,二次再热循环系统复杂,运行操作也带来不便,使得二次再热机组的可靠性降低、运行成本增加。

我国近期开始建设的华能玉环电厂 2×1000MW 级超超临界机组和邹县四期 2×1000MW 超超临界机组均采用一次再热。

综合考虑各方面的因素,我国目前阶段超超临界机组采用一次再热比较合适。

3 蒸气参数选择

3.1 参数与经济性的关系

根据 1977 年在丹麦哥本哈根召开的 VGB 年会上,提出了超临界参数的具体效益,这些数据得到国际的公认和引用。其中认为将主汽压力由 18.5 提高到 25.0MPa,可降低净热耗 2%;若进一步提高到 30.0MPa,尚可再降低 0.75%。而蒸汽温度每提高 10℃机组效率的提高见表 1:

表 1 蒸汽温度每提高 10℃对机组效率的提高汇总表

	主汽温度 +10℃	一次再热汽温度 +10℃	二次再热汽温度 +10℃
一次再热机组效率变化	+0.30%	+0.25%	--
二次再热机组效率变化	+0.25%	+0.15%	0.15%

根据国外某公司分析,机组效率变化与参数的关系见图 1 和图 2。

从图 1 中可以看出:机组参数从亚临界参数 169kg/cm²、538/538℃提高到超临界参数 246 kg/cm²、538/566℃后,机组效率可提高 2.5%,其中由于压力的提高,使效率提高 1.7%;温度的提高,提高;而从超临界参数到超超临界参数的转变中,

使效率提高 0.8%。

从图 2 中可以看出:机组参数从超临界参数 246kg/cm²、538/566℃提高到超超临界参数 250 kg/cm²、600/600℃后,机组效率提高约 3.2%。

从这两个图还可以看出:亚临界参数到超临界参数转变中,对机组效率的影响主要来自于压力的温度的提高对于机组效率的影响要比压力提高的

影响大得多。

3.2 主汽温度选择

由于更高温度参数（如温度 650℃、700℃、760℃）的实施尚需进行大量的研究及中间实验工作，根据

目前超超临界机组已有的运行业绩，近十年火电机组发展可行的主蒸汽及再热蒸汽温度在下列范围内：566℃ /566℃，566℃ /580℃，580℃ /580℃，580℃ /600℃，600℃ /600℃，600℃ /610℃。

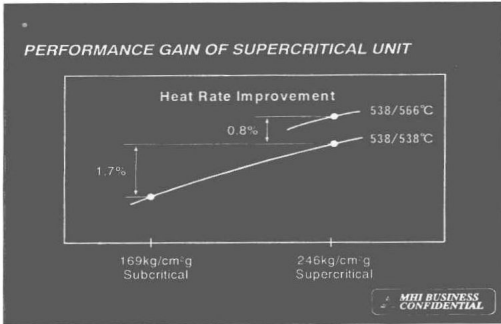


图 1 机组效率变化与参数关系曲线

如前所述，从超临界参数至超超临界参数的转变中，主汽温度的提高对机组经济性效益提高明显。目前国际上主汽温度/再热汽温 600℃ /600℃ 运行业绩较多，与之对应的高温材料也已经很成熟。下面将超超临界机组主汽温度分别为 580℃ 和 600℃ 进行对比分析。

从经济性的角度看，主蒸汽进汽温度从 580℃ 提高到 600℃，机组热效率提高约 0.5 %~0.6%。

对锅炉而言，过热蒸气从 585℃ 提高到 605℃，锅炉型式基本一样，仅后屏过热器和末级过热器的工质温度提高，使得后屏过热器部分受热管子、集箱、管道的材料档次提高。后屏过热器的管子材料还是可以使用 T91、TP347H，但管子壁厚将增加约 0.5~1mm；而末级过热器管系材料使用 TP347HFG 的部分要增加，相应使用材料档次提高

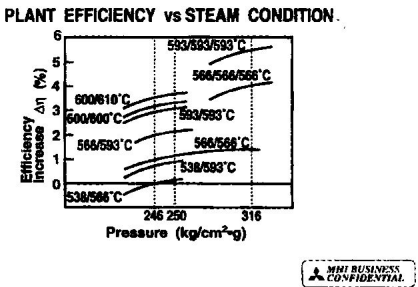


图 2 机组效率变化与参数关系曲线

一档；集箱和管道的材料由 P91 改用 P92，因此，过热蒸气温度从 585℃ 提高到 605℃ 约增加锅炉总价的 1%。

对汽机而言，目前高温 600℃ 参数机组的使用业绩已相当成熟，在日本及德国针对不同的阀门、汽缸、转子等已有系列的标准材料。根据 2000 年日本三菱公司相应机组在电厂运行的统计数据，不论投运时间长短，进汽温度 538℃ 到 600℃ 的范围内，整机可用小时均达到 8300 小时左右非常高的水平。材料应用温度的等级为 538℃，566℃，600℃。对汽轮机而言，在 538℃~600℃ 范围内，设备结构基本相同，价格主要随材料变化。机组的运行特性，启动及变负荷性能体现在温差、变化速率、寿命损耗这三个参数的关系上，进汽温度的高低将使转子的温升变化，影响到变化速率或寿命损耗。

表 2 进汽温度选择的技术经济比较表

主进汽温度/℃	538	566	580	600
经济性相对提高	基准	0.75%	1.1%	1.6%
冷态启动至满负荷时间增加(相对同样的寿命损耗)	基准	15min	20 min	30 min
冷态启动至满负荷寿命损耗增加(相对同样的速率)/%	基准	0.0025	0.034	0.005
转子材料	CrMoV	CrMoV	12Cr	
内缸	2.24CrMo	12Cr	12Cr	
主门	2.24CrMo	9Cr	9Cr	
蒸汽管道	2.24CrMo	9Cr	9Cr	
叶片	12Cr			
设备价格	基准	4%	10%	10%

根据以上的技术经济比较，对主汽温度 580℃ 与 600℃，汽机材料完全相同，因此设备价格基本相同。至于主汽温度升高后，对汽轮机启动时间的影响或者是寿命的影响是正常的，对机组的实际运行性能并不产生很大的影响。

对主汽管道而言，相同压力下，主汽温度 580℃

与 600℃，对主汽管道的影响分两种情况。第一种情况：对于主汽温度 580℃ 条件下，采用 P91 材料，根据国外厂商的研究和运行实绩，P91 材料一般最高用到 593℃，当主蒸汽温度提高到 600℃ 时，则需采用 P92；第二种情况：在温度为 580℃ 时也采用 P92 或 E911（如： NiederauBem 电厂 950MW

机组参数为 24.7MPa/580℃/600℃, 主蒸汽管道, 也采用 E911), 在这种情况下, 主汽温度提高到 600℃, 材料则不会改变, 只是管道壁厚会有所增加。在相同参数下, 采用 P91 的管道壁厚比采用 P92 的管道壁厚要多 44% 左右, 再考虑钢结构、支吊架的费用, 采用 P91 不一定比采用 P92 经济。所以, 对于主蒸汽温度 600℃, 推荐采用 P92, 而对于主蒸汽温度 580℃, 可以采用 P91 也可以采用 P92, 因此, 主汽温度 580℃ 与 600℃ 对于主蒸汽管道费用影响不大。

对高压给水管道而言, 相同压力下, 对于主汽温度 580℃ 与 600℃, 给水的温度都不会有大的变化, 所以管材不会改变; 由于给水流量变化很小, 所以管径不会变化, 因此, 对管道壁厚也不会有影响。

综上所述, 主汽温度从 580℃ 提高到 600℃, 机组热效率提高约 0.5%~0.6%, 锅炉造价增加 1%, 对汽机造价影响不大, 主蒸汽管道壁厚会有少量的增加。从目前国际超超临界机组发展趋势看, 主汽温度逐渐提高, 近期日本新建的 1000MW 级超超临界机组主汽温度一般在 600℃ 左右。华能玉环电厂 2×1000MW 超超临界机组及邹县四期 2×1000MW 超超临界机组评标结果蒸气参数均为 600℃/600℃。

因此, 我国目前超超临界机组主汽温度定为 600℃ 比较合适。

3.3 主汽压力选择

资料表明, 近十年国际上火电超超临界机组已采用的进汽压力为: 25MPa, 28MPa, 31MPa., 下面分别对三中压力参数的适用性进行分析。

当采用 31 MPa 时, 为了降低排气湿度, 通常需采用二次再热。因此, 在采用一次再热循环的机组上难以应用。

对于 25MPa 和 28MPa 两个压力参数的比较如下:

在机组热经济性方面, 提高进汽压力将使机组的热耗降低, 28MPa 压力与 25MPa 相比, 在额定负荷下热耗相对降低 0.2%~0.3%,

对锅炉而言, 当进汽压力从 25 MPa 提高到 28MPa, 整个锅炉的受压件和使用阀门都将改变, 锅炉成本将增加约 5%。

对汽机而言, 当进汽压力从 25 MPa 提高到 28MPa, 机组进汽端承压部套, 如主蒸汽管、阀门、外缸、蒸汽室及喷嘴的强度都要提高, 相应的材料

也要多消耗一些。汽机设备价格上升 3% 左右。

压力对主汽管道而言, 在相同温度下, 主汽压力由 25MPa 提高到 28MPa, 对主汽的管材选择没有影响, 只是管子的壁厚要增加。尽管理论上由于压力升高后, 蒸汽的比容减小, 在同样流速下管径可以减少, 但由于管径规格的限制, 实际上是难以做到的。因此, 主汽管道的重量会增加。

对高压给水管道而言, 管道的材料选择也没有影响, 只是管子的壁厚需要增加。高加给水系统增加投资 20%。

综合考虑上述设备价格和管道重量的增加, 压力由 25MPa 提高到 28MPa, 电站投资增加约 1%~2%。

从国际上超超临界已有的成熟运行业绩看, 在主蒸汽温度达到 600℃ 条件下, 主汽压力大多在 25MPa 以下。如日本三菱、日立、东芝这三家公司在国际超超临界市场上占有较大份额, 均没有 28MPa 的设计及制造业绩, 只有西门子公司有此压力参数的业绩, 但主汽温度尚未达到 600℃。因此, 28MPa 可供选择的技术范围很小。

综合以上几方面因素, 主汽压力由 25MPa 升到 28MPa 经济效益获得有限, 但在其它方面如: 电厂投资、安全可靠、国际上成熟应用业绩等均存在不利因素, 综合性价比并不占优, 因此, 建议目前我国超超临界机组主汽压力参数按 25MPa 考虑。

据了解华能玉环电厂和邹县四期 2x1000MW 超超临界机组招标文件均按汽机额定进汽压力 25MPa 进行招标, 但最终压力参数确定取决于机组的运行特性。若为纯滑压运行, 则在 VWO 工况汽机进汽压力将达到 26.25MPa, 再考虑补汽条件, 在 TMCR 工况汽机进汽压力就达到 26.25MPa, 华能玉环电厂超超临界机组即为此种情况, 因此, 华能玉环电厂汽机进汽压力最终确定为 26.25MPa。山东邹县四期工程通过招标确定汽机由东方日立公司供货, 机组采用定一滑一定运行, 汽机额定进汽压力为 25MPa。

4 汽机型式选择

600MW 等级超超临界机组是在超临界机组的基础上提高主汽、热再热蒸汽的参数, 通流部分、叶片型式及末级叶片长度等会发生一些变化, 但变化不大, 不会改变汽轮机汽缸结构和数量, 现国内外已投运的 600MW 机组大多采用三缸四排汽或早期的四缸四排汽机型。但随着汽轮机设计制造技术、末级叶片和材料的发展, 汽轮机正朝着结构简

单、尺寸减小、效率高的方向发展。目前日本三菱公司生产制造 600MW 两缸两排汽汽轮机,今年 4 月已在日本广野(Hirono)电厂投运。

因此,目前 600MW 超超临界汽机机型可考虑 2 个方案:

方案 1: 三缸四排汽机型

方案 2: 两缸两排汽(或三缸两排汽)机型。

(日本三菱公司技术为两缸两排汽机型,高中压合缸;德国西门子公司技术为三缸两排汽机型,高中压缸分缸)

根据目前汽机本体技术及制造水平,以及汽机末级叶片发展应用结果,结合近期 600MW 机组招标汽机厂商的投标方案和价格,建议今后我国 600MW 超超临界机组应优先考虑采用两缸(或三缸)两排汽机型。理由如下:

(1)技术发展的必然趋势。随着汽轮机设计制造技术和材料的发展,大功率火电机组朝着结构简单、尺寸小效率高发展,是火电机组永恒的追求目标。600MW 机组采用两缸两排汽或三缸两排汽是今后 600MW 等级机组的发展趋势。据了解,目前国内汽机制造厂也都大多积极推荐 600MW 超超临界机组采用两排汽机型。

(2)技术上可行。目前国际上可用于 600MW 机组两排汽的末级叶片只有西门子公司 1146mm 和三菱公司的 1220mm 末级叶片。西门子公司 1146mm 末级叶片自 1997 年运行至今已运行超过 30000h,在矸子电厂 1#机、外高桥二期等有成功运行业绩;据介绍,西门子公司目前已完成 1430mm 钛合金末级叶片的设计及试验验证工作,其排汽面积可达到 13.5m^2 ,比 1146mm 钢叶片降低热耗 0.6%,该叶片用于两排汽机型。三菱公司 1220mm 末级叶片是由神户电厂 60Hz 机组 40 英寸末级叶片模化而成,神户电厂运行 1 年后对 40 英寸末级叶片进行检查,情况良好;且模化成的 1220mm 末级叶片已在日本广野电厂 5#机应用,情况良好。因此采用两缸(三缸)两排低中压缸模块已基本成熟,技术可行。

(3)运行经济性差别不大。目前阶段两排汽机组与三缸四排汽机组相比,采用目前可选用的 1146mm 和 1220mm 两种末级叶片,在额定负荷工况配置的型式和数量不变,与常规 600MW 超临界机组相同。

汽机回热系统为 8 级抽汽,即 3 高+1 除氧+4 低。旁路系统采用 100%旁路(代替安全阀)或 30%

况下,由于其排汽面积小于四排汽面积,排汽的余速损失增加,使汽机效率略有降低,从汽机制造厂计算结果看,额定负荷时两排汽比四排汽热耗高 20kJ/kwh 左右;但在部分负荷运行时两排汽热耗还低于四排汽机型,因此,经济性上的差别主要取决于机组实际的运行工况。在假定条件下,考虑了年平均运行工况后,两排汽比四排汽热耗高 6kJ/kwh 左右,所以,两排汽与四排汽的年平均经济性相差不多。随着西门子公司 1430mm 末级叶片的开发成功,排汽面积进一步加大,排汽损失随之减少,两排汽的经济性会优于四排汽机型。4、降低汽机造价。由于两排汽比四排汽少 1 个低压缸,按照三菱在广野 5#机组情况,两缸两排汽比三缸四排汽汽机长度可缩短 7 米,汽机成本将降低。因此,国内汽机厂也认为,若今后三菱公司能把 1220mm 末级叶片的技术转让给国内汽机制造厂,两缸两排汽机型国产化率提高,两缸两排汽机型造价最终肯定会低于三缸四排汽机型,600MW 机组已成为我国主力机组,今后可为国家节约大量的工程投资。

综上所述,建议我国 600MW 超超临界机组应优先考虑采用两排汽机型。

5 600MW 超超临界机组设计特点

5.1 三大主机设计特点

汽机: 600MW 超超临界汽轮机可采用一次中间热、三缸(或四缸)四排汽或两缸(或三缸)两排汽、单轴、凝汽式。

锅炉: 锅炉可采用塔式或 J 型炉,单炉膛,一次中间再热,对冲燃烧或四角燃烧,垂直管圈或垂直上升内螺纹管圈,平衡通风、固态排渣、全钢构架。

发电机: 600MW 等级超超临界机组与超临界机组容量是相等的,发电机不受超超临界及超临界参数影响,设计及结构上没有区别。

5.2 主要附属系统及辅机配置特点

锅炉配套辅机(磨煤机、风机、除尘器)不受超超临界参数影响,仅仅是烟风制粉系统在燃料和烟、风量的减小,在系统配置上与超临界机组相同。

汽机配套辅机中高压加热器和给水泵受高参数的影响,其材料的选用和强度计算会有变化,但二级串联或一级大旁路。

给水系统采用二汽+一电泵。凝结水系统为二凝泵或三凝泵。

总之,600MW 超超临界机组除汽机配套辅机