

台山核电厂汽轮机仪表控制系统的新特点

刘康泰, 任振国, 黄兴有, 马 莉

台山核电合营有限公司, 广东台山, 529228

摘要: 第三代中国先进压水堆 CEPR 核电机组相比第二代 CPR1000 项目, 在核电汽轮发电机的控制、保护、监测系统上首次采用了三代技术, 在设备冗余、性能以及逻辑设计上都进行了优化, 提高了控制和保护的可靠性。本文通过对比, 对三代技术新特点进行了介绍和分析, 为系统后续运行和维护提供参考。同时由于后续核电机组也将采用新的系统, 本文能帮助同行更快速掌握新系统的特点。

关键词: 第三代; CEPR; 汽轮发电机; 仪表控制系统; 新特点

中图分类号: TL36 **文献标志码:** A

New Features of Turbine I&C System in Taishan NPP

Liu Kangtai, Ren Zhenguo, Huang Xingyou, Ma Li

Taishan Nuclear Power Joint Venture Co., Ltd., Taishan, Guangdong, 529228, China

Abstract: Compared with CPR1000, the third generation CEPR nuclear power plant uses the third generation of control, protection and supervise system of turbine for the first time. Equipment redundancy, performance and logic design have been optimized, therefore the reliability of control and protection have been improved. This paper compares the two techniques, introduces and analyzes the new features of this third generation technique, for the purpose of supplying information for the operation and maintenance. Since the new system will be used by the following nuclear power stations, this paper will share the information of the new features with the same trade.

Key words: Third Generation, CEPR, Turbine, I&C System, New features

0 概述

台山核电厂一期规划建设 2 台第三代中国先进压水堆 (CEPR) 核电机组, 汽轮发电机额定输出功率为 1750 MW, 为世界范围内在运和在建核电厂中的最大汽轮发电机。

汽轮发电机控制和保护系统由汽轮发电机调节系统 (GRE)、汽轮发电机保护系统 (GSE)、汽轮发电机监测系统 (GME) 组成。GRE 的主要任务是根据转速或负荷指令, 通过控制汽轮发电机进汽阀门的开度来调节进入汽轮发电机的蒸汽流量, 从而使其转速和输出功率与设定值基本相等。在核电厂生产过程出现异常或瞬态的情况下, 其他相关系统产生的汽轮发电机跳闸保护命令后, 由 GSE 执行相关保护动作, 达到保护汽轮发电机的目的。GME 对汽轮发电机的重要动静参数

进行监测, 并传送给操纵员或 GSE 系统使用。

在仪表控制设备方面, GRE/GSE 机柜型号为 ControSteam V3, 由法国阿尔斯通公司供货。与中广核集团的其他百万千瓦级核电机组普遍采用的 V2+ 版本相比, V3 在硬件结构上差别较大, 而在控制和保护逻辑上稍有差别。GME 机柜采用德国 CEPRO 公司的 MMS 6000 系列监测组件, 与其他机组差别较小。本文将介绍 3 个系统的仪表控制部分, 并比对其与中国改进型三环路压水堆 CPR1000 项目的主要差别。

1 GRE/GSE 仪表控制系统介绍

1.1 硬件

GRE/GSE 设计有 6 个转速探头 (转速调节和超速保护各 3 个) 和 1 个 3 取 2 逻辑的跳闸保护

模块。

机柜设备主要有：

(1) MFC3000 双冗余控制器。实现汽轮发电机的开环和闭环控制功能(转速控制、负荷控制、阀门管理及功率限制功能)，以及与数字化仪表控制系统(DCS)等外部系统的通讯功能。

(2) CE3500 保护控制器。三重冗余设计，符合 SIL3 标准，实现 GSE 保护功能的信号采集、逻辑处理及命令输出等功能。

(3) CE1000 I/O 模块。实现探头和硬接线信号的采集和控制命令的输出。

(4) FT3100 超速保护模块。符合 SIL3 标准，采集转速信号并在超速时输出跳机命令。

(5) VICKERS 阀门模块：用于采集阀位和输出阀门开度指令。

(6) 人-机界面：由 1 台配置 ControCAD 的工程师站，1 台配置 Controlog 的操作员站和 1 台打印机组成，实现组态修改、动态仿真和人-机交互功能。

1.2 逻辑和软件

1.2.1 控制功能 GRE 主要由速度控制、功率控制、限制功能和阀门管理 4 部分功能组成。

速度控制将操纵员的转速设定值与实测转速值相比较，得到转速偏差，经过死区或滤波器滤波后，叠加一次调频信号后转换为蒸汽流量需求信号，后经阀门管理逻辑转换为阀门开度，从而实现转速的控制。

功率控制分为自动控制 and 直接控制 2 种模式。前者纳入了功率测量值，属于闭环调节，调节速度相对较慢，但是调节准确，在机组正常运行时使用；直接模式未纳入功率测量值，属于开环调节，调节速度相对较快，但为有差调节，在瞬态工况下使用。

限制由阀门机械特性限制功能、核岛主蒸汽压力限制和汽轮发电机入口压力限制功能，以及来自其他系统的负荷速降 3 部分组成，防止蒸汽发生器压力过低、一回路过冷，防止汽轮发电机超功率或根据设备工况紧急降负荷。

阀门管理功能将由转速控制回路、功率控制回路、超速/超加速限制回路综合而成的蒸汽流量信号转换成高、中压缸的阀门开度信号，通过阀门的密封油系统实现阀门的控制。

1.2.2 保护功能 GSE 的跳机保护信号有 3 个来

源：试验信号；111%超速保护信号；来自各工艺系统的跳机信号。跳机信号一般采用 3 取 2 逻辑，并通过硬接线方式连接。

2 GME 仪表控制系统介绍

GME 采用德国 EPRO 公司的 MMS6000 系列监测组件，与 CPR1000 其他机组差别较小。

GME 由汽轮发电机安全监视系统(TSI)、振动检测和故障诊断系统(TDM)组成。TSI 对重要参数进行监视、报警并产生跳机命令。TDM 对 TSI 收集的信息进行分析，以帮助技术人员进行故障原因分析和判断。

GME 由 2 个机柜组成。1 号机柜执行轴系监测功能；2 号柜主要执行阀系监测功能，与 DCS 通过网络连接。轴系监测项目有：高中压转子偏心、轴承绝对振动、转子相对振动、转子轴向位移、高中压转子绝对膨胀、高中压缸绝对膨胀、低压转子绝对膨胀、转子键相信号。阀系监测项目有：高压进汽阀振动、高压进汽阀油动机油压。GME 系统的阀门温度和缸体温度不在 TSI 中采集，而由 DCS 系统采集。

3 与 CPR1000 项目对比

3.1 GRE/GSE 方面

3.1.1 硬件 仪表：CPR1000 项目转速控制和超速保护共用 3 个转速传感器采集转速信号。高压缸排汽压力、低压缸排汽压力、润滑油压力由 DCS 采集，不在 GRE/GSE 机柜采集。汽轮发电机跳闸信号由 GSE 的压力开关采集并送至核岛。

台山 CEPR 项目转速控制和超速保护各有 3 个转速传感器，分别采集转速信号、高压缸排汽压力、保护用低压缸排汽压力。润滑油压力由 GRE/GSE 机柜采集，生成“二回路不可用”信号的低压缸排汽压力由 DCS 采集；汽轮发电机跳闸状态信号由汽机旁路系统(GCT)压力开关采集并送至核岛。

控制和保护机柜：CPR1000 项目闭环控制器为 STG RX3i，开环控制器为 CCL C8073，保护控制器为 STP C8035 和 MPM123，IO 卡件为 FCL01 C8035。只有一路来自 DCS 的时钟信号；连接保护控制器和 IO 卡件的网络为 F8000。台山 CEPR 项目采用了完全不同的升级版硬件，其中开/闭环控制器为 MFC3000，保护控制器为

CE3500；IO卡件为CE1000；有3路来自DCS的时钟信号：网络时间协议（NTP）、5s脉冲、国际通用时间格式码（IRIG-B）；连接保护控制器的网络为P8000，连接IO卡件的网络为E8000。

3.1.2 控制和保护逻辑 CPR1000项目的跳机信号有：转速测量不可用或转速低，发电机热氢温度高，低压缸排汽温度高，GCT喷淋水压力低和喷淋阀打开，ATWT信号，保护控制器失常信号。台山CEPR项目跳机信号有：转速测量不可用，保护控制器CE3500失常，凝结水抽取系统（CEX）出口阀门关闭且流量低，新蒸汽压力测量不可用，高压缸入口压力测量不可用，中压截阀失效；DCS健康信号失去。

快速甩负荷（Runback）：CPR1000项目信号有：APA、RPR、GSS、GPA、后备盘命令。台山CEPR项目为：SICS、CEX、GSY、APA、RGL、GSS。另外由于机组容量及汽轮发电机缸体差异，具体触发阈值也有不同。

主蒸汽压力限制或蒸汽流量限制：CPR1000项目方面，调节阀前蒸汽流量限制由操纵员设置，作为汽轮发电机功率的上限值（与其他限制信号比较取小），限制汽轮发电机功率，防止一回路过冷。台山CEPR项目方面，来自RGL的定值和调节阀前实测压力的偏差进行比例积分（PI）运算，对功率控制的上限进行限制（与其他限制信号比较取小），目的是在GCT误开、二回路发生破口等情况下，限制汽轮发电机功率，防止一回路过冷。

高压缸入口进汽压力限制：CPR1000项目方面，由操纵员设定值与实测压力的偏差进行控制，无RGL限制信号。台山CEPR项目上增加了来自RGL的限制信号（在反应堆线功率密度高、燃料包壳破损危险等情况下，反应堆需降功率，送给汽轮机一个以不同速率下降的定值），与操纵员设定值取小值，再与实测压力值相比进行PI运算，对汽轮发电机功率上限进行限制。

与核岛互锁功能（Interlock）的差别：CPR1000项目上，互锁使能、解锁按钮分开。使能信号生效后，等待堆外核仪表控制系统（RPN）信号触发并锁定汽轮机功率，需要操纵员手动解除锁定。台山CEPR项目上，互锁使能和解锁按钮为同一个，由操纵员手动或部分停堆信号（partial trip）触发互锁，以锁定汽轮机功率，解

锁按钮为同一按钮。无RPN触发信号。

部分停堆：CPR1000项目上，GRE/GSE逻辑中无此功能。台山CEPR项目上，当失去部分主泵、给水泵/汽轮发电机跳闸、高线功率密度、低偏离泡核沸腾比（DNBR）等情况发生时，反应堆掉落一部分控制棒来快速降低功率。结果为：

如产生快速甩负荷信号时，目标值由操纵员设定；如产生interlock信号时，锁定汽轮机功率，并限制解锁后的功率增长速率。这样可以在上述工况下更好地控制反应堆。

总/净功率控制模式：CPR1000项目只有总功率控制模式；台山CEPR项目可以设置总功率或净功率控制模式（其关系为总功率=净功率+厂用电），为操纵员提供了多种控制模式。

阀门机械特性限制：CPR1000项目的上限值为102%；台山CEPR项目为112%。

3.2 GME方面

轴振动危险值跳机保护：CPR1000项目轴振采用单一危险值手动跳机方式；台山CEPR项目采用2取2（不同轴承）自动跳机，为操纵员的手动跳机保护增加了额外的保护方式。

阀门和缸体入口和出口温度测量：CPR1000项目使用热电偶元件测量；台山CEPR项目使用热电阻元件测量，测量精度更高。

GME机柜和DCS通讯方式：CPR1000项目直接使用Modbus RTU协议进行通讯；台山CEPR项目通过Modbus RTU协议转为Modbus TCP/IP协议后进行通讯。

汽轮发电机缸体就地膨胀测量装置：CPR1000项目没有汽轮发电机缸体就地测量装置；台山CEPR项目每个低压缸均设置一个就地膨胀测量装置。

其他不同点如测点数差异等，是由于汽轮发电机缸体数量差异导致，因此未在此列出。

4 结束语

该版本的GRE/GSE仪表控制系统在国内核电领域为首次使用，并将作为后续机组的标准配置。本文通过对其的总体介绍和新特性比较，以期使读者有全面的了解，尤其对于有一定CPR1000运营经验的读者，希望能帮助其更快地掌握新系统的运营和维护。

（责任编辑：刘君）