

核热电汽轮机调节系统特点及方案探讨

赵永波

[提要] 本文根据实际工作中的体会,论述了饱和蒸汽核热电汽轮机调节系统的设计特点。如,高压缸进汽采用节流调节、力求减少压力损失、甩电负荷后需限制转速过分飞升、负荷调整方式等。此外,还探讨了具体的实施方案。

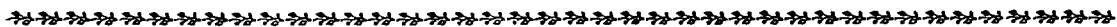
主题词: 汽轮机 调节系统

核热电汽轮机组目前在我国还是空白,国际上也还为数不多,但它是一种有广阔前途的供能方式。由于用核能进行热电联供具有一系列优点,我国北方采暖期长、工业用热比较集中的城市,工业用热量大的大型化工企业等采用这种方式供电、供热,将会充分显示其优越性。

核能的利用与反应堆堆型密切相关,此

文是针对获得广泛应用的压水堆堆型来研讨的。

核热电汽轮机的调节系统,由于调节参数多,比较复杂;核热电汽轮机调节系统又有一些新特点,因而加强这方面的研究探讨,对于促进我国自力更生建造这种机组,已是刻不容缓的任务。本文即打算根据实际工作中的体会,介绍其主要特点,并就其具体实



技术动态

ICR船用设计已签订合同并获得投资

Allison燃气轮机公司、Rolls—Royce和Garrett航空研究所的工业组已得到美国海军价值160万美元的一年合同,用于ICR(中间冷却回热式)船用燃气轮机推进系统的初步设计。

工作将集中在Allison1220—B1型燃气轮机的初步设计研究,该燃气轮机名义的额定功率是24000马力。

1220—B1的设计是基于Rolls—Royce的SMIA船用斯贝发动机,该发动机现正在美国和日本海军中服役。

在该合同下,航空研究所将设计中间冷却器和回热器系统,以及用于装舰的整个发动机的箱装体。航空研究所和Rolls—Royce将为美国海军研究ICR燃气轮机用于舰船的设计和

应用。与此同时,美国海军的海洋系统指挥部也与GF公司签订合同,进行平行的初步设计研究,以便把24000轴马力的ICR发动机用于海军今后的驱逐舰和保卫舰。

施方案做些探讨。

一、特 点

目前,配压水堆的蒸汽发生器给汽轮机提供的汽源,绝大多数为50~70绝对大气压的饱和蒸汽。由于汽轮机进汽参数偏低,排汽参数变化不大,因而机组配置的绝热焓降小;为保证设计功率,需增加进汽量,使蒸汽容积流量加大;进汽参数低,还使机内蒸汽及排汽湿度大。这些,除给汽机本体设计带来一系列新课题外,对其调节系统的设计也带来了一些新特点。

1. 高压缸进汽采用节流调节

火电汽轮机高压汽缸进汽普遍采用喷咀调节,以便减少节流损失,提高机组效率。而核电机组高压缸进汽却普遍采用节流调节。这是因为:

①采用喷咀调节时,其部分进汽将使叶片许用弯曲应力下降。而饱和蒸汽轮机的进汽容积流量大,若再采用部分进汽,首级叶片较高,强度难以保证。采用节流调节可以解决叶片强度问题。

②蒸汽容积流量大,还将增大高压缸尺寸,热应力反应敏感。采用节流调节可以简化高压缸结构,减少热应力。

③核电机组大多承担基本负荷,核热电机组从经济性和安全性出发也希望反应堆经常处于满负荷情况下运行,因而高压调节汽门经常处于全开位置,虽采用节流调节,不会造成大的节流损失。

2. 应力求减少压力损失

由于饱和蒸汽初参数低,绝热焓降 H_0 小,做功能力差,因而采取措施尽量减少压损,对提高机组出力和效率具有格外重要的意义。为此在调节系统中也采取了一些措施。

例如,在传统设计中,主汽门和调节汽门都设计成各自独立的结构,二者之间以管

道相连。蒸汽进入高压缸需经两次节流,压力损失大。目前,国外核电机组普遍采用了主汽门与高压调节汽门的组合汽门结构。两个独立作用的汽门共同坐在一个阀座上,各自自由独立的伺服机构驱动。这种汽门保持了原来的作用,但蒸汽进入高压缸只经过一次节流,据资料介绍,可以减少压损1%,增加了机组出力和效率。

又如,虽然核电汽轮机高压缸进汽普遍采用节流调节,但在下文将要介绍的探讨方案中,结合实际情况,吸取已取得的实践经验,对调整抽汽门,我们却采用了两组喷咀调节,以减少压损。因为调整抽汽门位于调整抽汽口之后,流量已大为减少,对本方案涉及的机组来说,采用喷咀调节已成成为可能。另外,该机组只有代表性的冬夏两种基本运行工况。在冬季调整抽汽量大,其后各级进汽较少,蒸汽只需通过第一只喷咀阀,第二只阀全关;当夏季运行时,调整抽汽量小,其后各级进汽较大,使两只喷咀阀均全开。这样,无论在那种工况下运行,汽门基本都处于全开位置,减少了节流损失。

3. 甩电负荷后需采取措施限制转速过分飞升

甩电负荷后转速的过分飞升是饱和蒸汽核电、核热电汽轮机组的一大难题,许多国家对此进行过大量研究,提出了许多解决措施。这是因为饱和蒸汽湿度大,正常运行时,在高低压汽缸、转子、汽水分离再热器、连接管道等表面上凝结着一层水膜;再加上饱和蒸汽轮机容积空间大,特别是增加了体积庞大的汽水分离再热器,增大了凝结水量。甩电负荷后,机内压力骤降,这些水份很快蒸发(所谓闪蒸),具有可观的做功能力,促使机组转速过分飞升,造成重大安全事故。因此,除机组本身采取紧凑结构、降低和去除凝水等一系列措施外,调节系统也需采取严格的防护措施。最关键的措施是在汽水分离再热器后,低压缸进汽前设置截

汽机构。此外，有些机组还使保安机构的动作提前。

也有个别厂家认为，凝结水的能量和汽轮机所具有的能量相比很小；另外，核电转子的惯性很大，它增加的转动惯量大于“闪蒸”可能造成的超速因素。因此，他们认为“闪蒸”一般不会造成重大问题。

目前，我国尚难进行这方面的研究工作，宜采用大多数厂家的研究结论。

关于截汽机构的控制方式，也有两种不同的情况。一些厂家设计的截汽机构，只受保安系统的控制，一旦甩电负荷，保安信号使执行机构迅速关闭截汽机构，机组停机。这种控制方式，当事故排除后，势必重新启动并网，对大型机组将造成重大经济损失。所以，不少厂家使保安信号和调节信号同时控制截汽机构甩电负荷后，保安信号首先使执行机构迅速关闭截汽机构，保证机组不得过分飞升；接着，依靠调节机构控制截汽机构，最终维持机组空转或带厂用电运行。当事故排除后，即可迅速并网供电、供热，提高经济性。

截汽机构的型式也有两种。一种是直行程组合汽门，它由两只各自独立的汽门组成，由保安信号和调节信号分别控制。这种汽门结构复杂，特别当尺寸大时，制造、调整均很困难。所以，目前国际上普遍采用另一种盘状蝶阀，直接装在管道上。它同时受保安信号和调节信号控制，同时起两种作用。其优点是：

- 1) 蝶阀阀体本身就是管道的一部分，因而结构紧凑、重量轻；
- 2) 蝶阀全开时，压力损失小，据文献介绍仅为1%，可以提高机组效率和出力；
- 3) 更为重要的是蝶阀受力状况好，易于调整，可实现甩电负荷时维持机组转速的要求。

此外，当甩电负荷保安机构动作后，系统上还需采取一系列措施，如迅速打开管路

上的旁通排放阀，汽水分离再热器上的安全阀，供热切换机构动作；以及尽快关闭抽汽、疏水管路上的逆止阀等，本文不做评述。

4. 负荷调整方式

常规核电站一般都设计成汽轮机负荷跟随发电机，而锅炉又跟随汽轮机的负荷调整方式。而热、电负荷又按静态自整的原则调整，即当电负荷和热负荷中任何一个发生变化，经过调整，系统重新稳定在另一个新的工况时，另一个被调量保持不变。而核电机组因大多数承担基本负荷，所以常设计成汽轮机跟踪反应堆变化负荷的调整方式。核热、电机组从经济性和安全性出发，也希望无论热、电负荷怎样变化，而反应堆都能在满负荷的情况下工作。为此在系统中新增加了主蒸发器输出的新蒸汽压力信号，用以自动调整汽轮机的负荷，使之与反应堆的功率相适应。这就打破了热、电汽轮机传统设计中的静态自整原则。

也有少数机组参加电网调频，设计成汽轮机跟随发电机，而反应堆又跟随汽轮机来调整负荷。

除以上主要特点外，为保证反应堆安全运行，在有的汽轮机调节系统中引入了负荷变化速度，蒸汽压力下降的限制器。

二、方案探讨

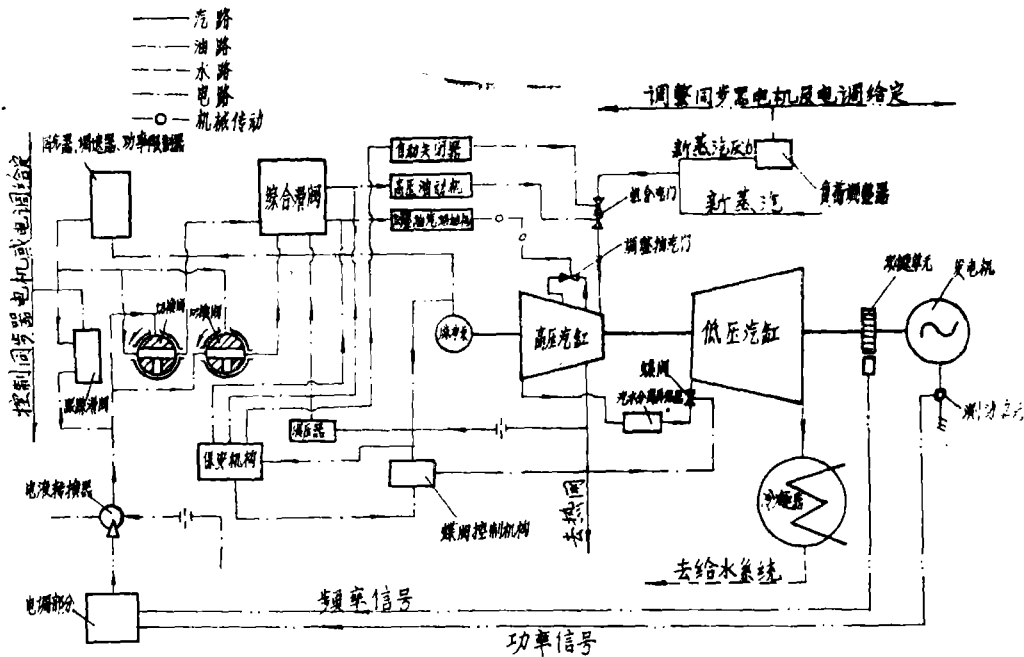
一九八四年，我们完成了HC65—47.5/24型核热、电汽轮机方案设计，包括其调节系统方案设计都顺利通过了审查。这里结合探讨的方案之一—功频电液调节为主，液压速度调节备用的系统，简述一下如何解决自行设计核热、电调节系统的一些特殊问题。系统的基本动作原理本文不做叙述。

1. 力求立足国内、稳妥可行

目前，有些国外核电站的自动化水平很高，可以应用计算机实现堆机的联控。也有

一些厂家采用中心控制台、机旁及计算机监控三级控制。正常情况下以中心控制台为主，实现对反应堆、汽轮机及发电机的独立分散控制。国内近年来引进世界各国许多供电机组，普遍采用电液功频调节，运行状况良好。国内目前有大量常规热电机组，全部

采用液压速度调节。许多工厂正针对供电机组，大力开展功频电液调节的设计、研究。根据国内外以上情况，本着力求立足国内、稳妥可行又尽可能先进的精神，设计了功频电液调节为主，液压速度调节备用的系统。其示意图见图一。



图一 调节系统方案示意图

在这个系统中，油系统油路的安排、设备的选用均与当前普遍采用的一种系统相同；保安和调节部套，许多通用成熟产品；局部产品如综合滑阀和系统联结进行了改造，增设电调、电液转换器及切换、跟踪机构以组成功频电液调节；增设蝶阀及控制油路、负荷调整器，以组合汽门代替原主汽门和调节汽门以满足核热、电机组的特殊要求。

这个方案，在保证核热、电汽轮机要求调节系统必须具备的基本功能的前提下，充分运用我国液压速度调节在设计、制造、运行方面的成熟经验，吸收了新的设计研究成果，使之既有一定先进性，又稳妥可行，把必须重新研制的产品减少到最低限度，从而

促进更快地发展我国的核热电事业。

2. 如何实现系统的功频调节

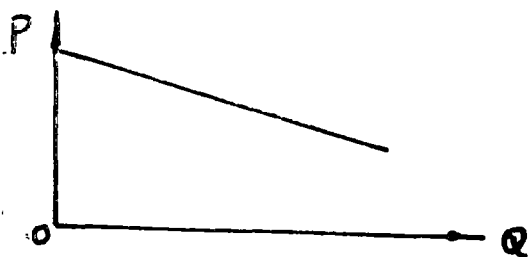
要实现热、电机组的功频电液调节，并与液压备用系统协调使用，必须解决电调部分和液调部分的互相联接，才能使方案成立。广泛采用功频电液调节的供电机组是设置专门机构来解决这一问题的。在本探讨方案中，我们没有另设专门机构，而对原液调系统中的综合滑阀进行了改造，并设置了跟踪、切换机构，使电调信号经电液转换器变为液压信号后，与液调脉冲油一起分别经跟踪、切换机构后，再单独引入综合滑阀电负荷调整滑阀。功频电液调节系统工作时，电调信号经电液转换器控制电负荷调整滑阀调整电负荷；电调部分故障时，可自动平稳地

切换为液压速度系统工作，改由液压脉冲油控制电负荷调整滑阀。不仅解决了电、液两部分的互相联接，而且解决了两种调节方式的跟踪、切换问题。

3. 多种负荷调整方式的实现

关于负荷调整方式。除了前文曾提及的一些原则外，用户还对本方案设计提出了“供热为主、以汽定电”的设计要求。为此，我们在电调和液调两系统中均设置了负荷调整器，从而使方案具有多种负荷调整的功能。

根据主蒸发器的运行特性曲线，新蒸汽压力 P 随堆功率 Q 具有如图二所示变化规律。



图二 主蒸发器 $P-Q$ 运行特性曲线

其中： P —新蒸汽压力
 Q —反应堆功率

负荷调整器测量新蒸汽压力，并根据压力的变化自动调整电调和液调的电功率给定（对液调即同步器）。当负荷调整器投入工作后，若热负荷增加，因电功率保持不变，故反应堆总输出功率 Q 增加，新蒸汽压力 P 降低，负荷调整器将自动调整电功率给定，减少电功率，使 Q 和 P 基本恢复。若热负荷减少，调整过程相反，仍保持 Q 、 P 值基本不变。由此圆满解决了在确定的堆输出功率 Q 的情况下，实现“供热为主、以汽定电”的要求。

如果负荷调整器的测量压力 P 按主蒸发器满功率运行时的新蒸汽压力进行整定，则可保证无论热、电负荷怎样变化调整，而反应堆总可基本保持在满功率的情况下运行。

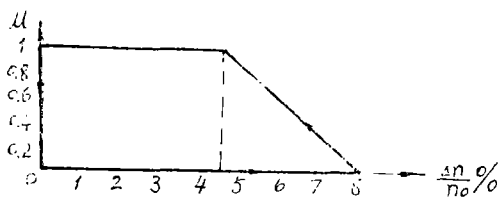
以上负荷调整方式就是汽轮机跟随反应堆运行的方式，也是本方案的主要设计运行方式。

当把负荷调整器切除后，则机组即可在电调给定或同步器的控制下按传统的热电机组的各种负荷调整方式运行。热、电负荷之间又将保持静态自整原则。这就是反应堆跟随汽轮机运行的方式。

4. 如何限制甩电负荷后转速的过分飞升

为了限制甩电负荷后因凝水“闪蒸”造成的转速过分飞升，本方案采取了一系列措施。最重要的措施就是在汽水分离再热器和低压缸之间的蒸汽管道上设置了蝶阀及一整套控制油路。其根本目的是除了限制转速过分飞升以外，还不得造成停机，最终能够使汽轮机在空负荷或带厂用电工况下稳定运行。为此，使蝶阀既受保安信号控制，又受调节信号控制。使蝶阀在正常运行时保持全开位置以减少节流损失，而甩电负荷后其开度

μ 随汽轮机转速 $\frac{\Delta n}{n_0}\%$ 按图三所示规律变化。



图三 甩电负荷后蝶阀开度变化规律

其中： μ —蝶阀相对开度

$\frac{\Delta n}{n_0}\%$ —汽轮机相对转速变化

甩电负荷后，在保安信号的作用下迅速关闭高压调节汽门、调整抽汽门及蝶阀（同时）关闭各抽汽、疏水逆止门，打开安全排放阀，切断汽机各处汽路（此时）汽机停

使用微计算机分析冷凝器振动

[美] S.S.米勒

美国热交换器学会1978年第七版“表面式蒸汽冷凝器标准”第6.2.4.5节中介绍了一种计算两支持板之间允许跨距的方法。在1982年5月第NP2371号电力研究学会(EPRI)报告“冷凝器管子更换准则手册”中,给出了使用这种方法的一种精确求解。此方法需要用试差法选择使管子受到最大动载荷的冷凝器压力与比容积。这里给出的程序是按照电力研究学会报告附件C的方法编制的。

程序的使用

该程序的开始假设运行条件为1英寸汞柱绝对压力与79°F相应温度,这是大多数工作冷凝器的运行条件。然后,以0.05°F的增量提高饱和温度,直至排汽管的速度等于在选定温度下声速的1/3而达到平衡。该程序直接计算出背压,不必使用蒸汽表。在此点产生的平衡代表了在管子上的最佳动载荷条件,这动载荷就是管子上的阻力:

$$W_D = C_D A \frac{\rho V^2}{2g}$$

止对外供热,迅速切换为由经过减温、减压装置的旁路管系来保证对热网连续供热),只有低压缸继续排汽做功。这将使机组转速继续上升,随着低压缸内蒸汽的排放、减少,转速开始下降($\frac{\Delta n}{n_0}$ 最大不得超过8%)。

在此过程中作用在蝶阀控制机构上的保安信号首先撤除,调节信号在额定转速的104.5~108%范围内控制蝶阀动作。因而随着转速的降低,蝶阀逐步开大。当转速降低至104.5%额定转速以下时,调节信号失去作用,蝶阀全开。当转速降低至接近空负荷转速或厂用电负荷转速时,作用在高压调节汽门和调整抽汽汽门上的保安信号也撤除。此时,调整抽汽门全开(汽机仍不对外供热),调节信号通过执行机构控制高压调节汽门维持机组空转或带厂用电运行。事故排除后,迅速并网,供电、供热。

为了防止甩电负荷后机组超速,还必须

尽量减少蝶阀的关闭时间,国外已可达0.1秒。为此,本方案为蝶阀油动机专门设置了快速放油油路。

由于本方案设计在我国还是首次进行,不足之处在所难免,许多问题还有待深入研究。但这必竟是一次相当有益的探索,并且有了一个好的开端。我们相信,经过继续努力,完全有希望主要依靠自己的力量,研制成功这种调节系统,为我国核热电事业的发展,做出贡献。

参 考 文 献

1. 抽汽式汽轮机译文集,上海汽轮机厂研究所技术情报室,1981年。
2. 哈尔滨汽轮机厂,汽轮机调节系统的设计,电力工业出版社,1980年。
3. [苏]B.M特罗扬诺夫斯基著,韩维奋等译,原子能电站汽轮机,原子能出版社1976年。

王岱祥 王洁如校对

have a relatively adequate power is also discussed in this paper.

6. Advanced inlet-air treatment improves gas-turbine performance (23)
7. Effects of Tip Endwall contouring on the Three-Dimensional Flow Field in an Annular Turbine Nozzle Guide Vane; Part I—Experimental Investigation (27)

STEAM TURBINE

8. The characteristic features of a thermal nuclear steam turbine regulation system and an exploratory investigation of a technical solution *Zhao Yongpo* (31)

Synopsis

This paper describes the design features of a thermal nuclear saturated steam turbine regulation system on the basis of the author's practical experience. Such features include, for example, the use of throttle regulation for high pressure cylinder inlet steam to minimize pressure loss, the prevention of excessive speed after load rejection, and load adjustment patterns, etc. In addition, concrete versions for their attainment are discussed.

9. Condenser vibration analysis by microcomputer (36)

BOILER

10. Initial experience with the hard coal-fired slag tap furnace of the 300MW unit at Elektromark's Elverlingsen power station, (41)

ENVIRONMENTAL PROTECTION EQUIPMENT

11. A silencer for the single can-type combustion chamber test bed of a gas turbine (48)

Synopsis

The noise attenuation relating to the testing of a gas turbine single can-type combustion chamber (high gas temperature of 1000°C, high pressure of 6 kg/cm² and high noise level of 123 dB(A)) has been successfully attained by a silencer proposed by the author. The noise reduction has been estimated at 55 dB (A). In addition, the technical problem of exhaust gas sampling for analysis has also been solved.

PRODUCTS

12. Sealed rotary joint *Dei Peiming, Li Jinling* (52)

ABSTRACTS

13. Maintenance experience of industrial steam turbines (53)
Power plant spray cooling; design and performance studies (53)