

核电厂反应堆功率控制系统浅析

孟强, 王丹华

(华能山东石岛湾核电有限公司, 荣成 264312)

摘要: 为更好的学习各反应堆的功率控制模式, 通过对 HTR-PM 高温气冷堆, VVER-1000 压水堆, CPR1000 压水堆, AP1000 等反应堆功率控制系统的分析和比较, 研究表明, HTR-PM 反应堆功率控制系统的控制模式最简单, 具有较大的优越性, 但 HTR-PM 的反应堆功率控制系统尚未真正的实际运行, 其控制理念的实现尚需要不断优化和改进。

关键词: 反应堆功率控制; 控制模式; 运行; 调试

中图分类号: TM623

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)03-0040-05

Analysis on Power Control System of Nuclear Power Plant

MENG Qiang, WANG Danhua

(Huaneng Shandong Shidao Bay Nuclear Power Co., Ltd., Rongcheng 264312, China)

Abstract: In order to study the power control mode of each reactor type, based on the HTR-PM, VVER-1000 PWR, CPR1000 PWR, AP1000 analysis and comparison, the reactor power control system research shows that the control mode of reactor power control system HTR-PM which is the most simple, has great advantages, but HTR-PM reactor power control system has not been really practical operation, the realization of its control concept still need to continuously optimize and improve.

Key words: reactor power control; control mode; operation; commissioning

核电站反应堆应具有灵活的功率调节系统。早期核电机组的控制模式一般为 A 模式。随着核电的发展, 法国法马通公司提出了 G 模式, 目前法国国内大型核电机组(功率 ≥ 1300 MW)一般采用 G 模式, 部分机组采用 A 模式与 G 模式配合运行。AP1000 核电机组的反应堆控制模式采用革新的功率水平与功率分布独立控制思想, 提高了机组运行的灵活性和安全性。而全球首座具有第四代核能系统安全性的商业示范电站高温气冷堆核电站采用两座 250 MW 的反应堆带一台 200 MW 的汽轮机, 与传统压水堆单堆带汽轮机的设置方式不同, 给反应堆功率控制和堆机协调控制带来了难点和挑战。

1 HTR-PM 功率控制方案

HTR-PM 电站的功率控制采用大系统递阶控制方案^[1]。采用三层递阶控制方式, 由下向上分别为局部控制层、协调控制层、双堆功率分配层。反应堆功率控制系统做为局部控制层, 向控制棒的步进电机驱动器输出转动控制信号、步进动作脉冲信号和转向信号。转动控制信号决定步进电机的转动和停止, 步进动作脉冲信号的频率决定步进电机的转动速度, 转向控制信号决定步进电机的转向。

反应堆功率控制系统、氦气流量控制系统和给水流量控制系统为局部控制层, 控制对象分别为控制棒、主氦风机和主给水泵; 热氦温度控制系统、蒸汽温度控制系统、输出热功率系统和汽轮机转速为协调层控制系统, 操作变量分别是核功率、氦气流量、给水流量和汽轮机调节级压力; 双堆功率分配层由双堆功率分配器组成, 其功能是: 根据 1#和 2#模块的当前设定功率水平和输出热功率实际值,

收稿日期: 2016-04-11

基金项目: 中国华能集团科技项目经费资助(HNKJ15-H19)

作者简介: 孟强(1982), 男, 河北深州人, 高级工程师, 学士, 主要从事核电厂反应堆功率控制系统的研究工作(e-mail) mengqiang@sdwgs.chng.com.cn。

发电负荷测量值和电站负荷设定值,分配并给出两个NSSS模块新的设定功率水平。

1.1 系统功能

HTR-PM的反应堆功率控制采用24根控制棒,包括15根补偿棒、3根安全棒、6根调节棒,分为A/B/C/D四组,每组6根棒。反应堆功率控制系统通过操作控制棒,提供必要的自动和(或)手动控制手段,实现HTR-PM的启动、功率运行、功率转换和正常停闭等操作,并满足规定的稳态和瞬态运行特性,防止和纠正偏离正常运行状态,避免预计运行事件的发生,减少不必要的停堆,保证反应堆的连续稳态运行。

硬件主要包含功控逻辑装置、功控监测装置和必要的人机界面。功控逻辑装置安装于功控逻辑机柜内,功能是执行控制棒操作的安全联锁、控制棒手动操作、功率自动调节、手自动切换和控制棒驱动机构的状态监测等,包含冗余的控制器模块、冗余的供电模块、冗余的查询电源模块、AI模块、DI模块、DO模块、步进电机控制专用模块。功控监测装置安装于功控监测机柜内,功能是执行棒位计算显示及控制棒的单一选择监测功能,包含冗余的控制器模块、冗余的供电模块、冗余的查询电源模块、DI模块、DO模块、串行通信模块。

1.2 自动调节实现

反应堆功率控制系统将得到的反应堆加权平均核功率测量值与其给定值进行比较,根据两者的偏差信号和偏差变化信号经过预定的频率调节算法产生控制棒的转动、转向及转速控制信号,实现控制棒的提升或下降。HTR-PM反应堆功率自动调节原理如图1所示。



图1 HTR-PM反应堆功率自动调节原理

Fig. 1 HTR-PM reactor power automatic regulation principle

反应堆功率自动调节算法受安全因素的限制,调节要求比较特殊。其控制性能着重考察反应性扰动下的系统响应特性。由于反应堆对象中含有积分环节,所以控制器仅采用PD比例微分控制器即可满足其调节性能。

1.3 自动调节性能的指标

反应堆功率自动控制系统的最终性能指标需要根据反应堆的物理热工特性,步进电机驱动机构的工作特性等试验完成后才能确定,目前暂定为(1)反应堆功率自动调节范围:30%~100%堆功率;(2)静态误差:小于 $\pm 1\%$ 给定功率;(3)动态性能:超调量小于10%,调节时间小于30s。

1.4 与其他控制系统的配合

HTR-PM除反应堆功率控制系统外,还具备氦气流量控制系统、给水流量控制系统、热氦温度控制系统、蒸汽发生器出口蒸汽温度控制系统、反应堆输出热功率控制系统、蒸汽旁路与排放控制系统、汽轮机转速-功率控制系统、双堆功率分配控制器等控制系统。通过操作控制棒、主氦风机、主给水泵、汽轮机调节门来实现对热氦温度、蒸汽发生器出口蒸汽温度、反应堆输出热功率、汽轮机转速等的控制,以此完成电站的功率协调控制。

2 VVER-1000功率控制方案

反应堆功率自动控制系统,由堆外核测系统、堆内核测系统、反应堆功率调节器、棒控棒位系统和就地仪表组成。反应堆功率调节器(简称APC)是基于西门子TXS系统的双通道的调节器^[2]。根据核功率或主蒸汽集管压力定值器的信号、校正后的中子通量密度或主蒸汽集管压力探测器、以及其它用于确定工况的大量模拟量和开关量信号,来完成调节棒控制规律的计算。

2.1 系统功能

VVER-1000的最大允许装载布置的控制棒束为121束,每个棒束由布置在燃料组件内部专用孔道内的18根吸收中子的棒组成,棒束被分为10个棒组,1~7组为停堆棒组,8~10组为调节棒组,其中第10组为主调节棒组。

APC软硬件系统是采用西门子TXS系统的双通道的调节器,存在主调节器和备用调节器,实现完全热备用冗余控制。每个通道内部使用“Master Checker”的工作模式。APC结构简图和接口图,如图2所示。

APC每个通道一方面采集就地仪表的信号,另一方面通过L2总线接收来自保护系统的信号,并将处理结果送到棒控棒位系统,同时,APC通过H1总线将信息送到人机界面。

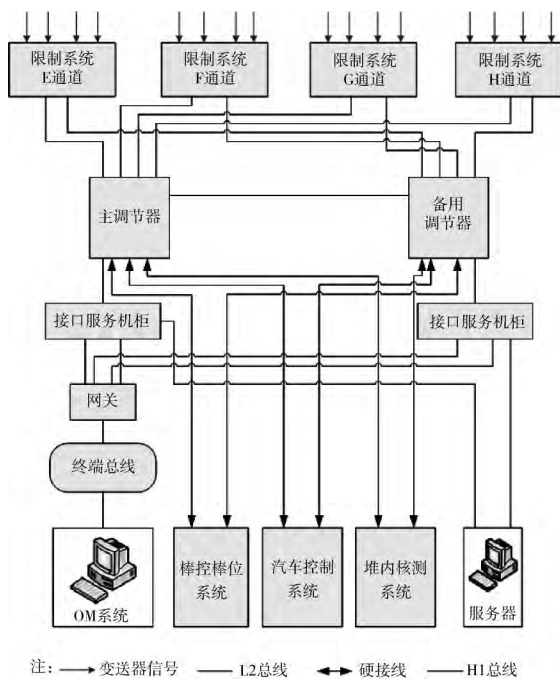


图2 APC结构简图和接口图

Fig. 2 APC structure diagram and interface diagram

2.2 自动调节实现

2.2.1 N 模式

N 模式是保持反应堆的功率，主要用于低功率和停堆，主调节量是反应堆核功率，采用当前反应堆功率与设定值之间的偏差控制反应堆功率，使反应堆功率保持在设定值范围内，汽轮机控制器的工作方式是维持主蒸汽集管压力为给定值，从而保持发电机功率与反应堆功率一致。APC 实现以下功能：保持反应堆功率恒定等于当前功率；根据反应堆功率限制系统产生的限值以及主蒸汽压力的允许偏差值，通过给定值控制，使反应堆功率以给定的速率升功率/降功率到目标功率。在反应堆功率限制系统保护动作降低反应堆功率之后，将反应堆功率保持在降低后的新的功率水平上。

2.2.2 T 模式

T 模式是保持二回路的压力，是电站的基本运行模式，主调节量是二回路主蒸汽集管压力，初始给定值为 6.12 MPa，操纵员可通过画面设置增加/减小主蒸汽压力额定值，APC 形成主蒸汽集管压力额定值，形成有效给定值，接受当前主蒸汽压力测量值，并考虑到发电机与反应堆之间的功率偏差及发电机负荷变化的速率，产生控制棒的启动信号 (APC 命令)^[3]。APC 实现以下功能：调整反应堆

功率到发电机功率 10% 范围内；当反应堆与发电机功率偏差小于 10% 时，当前主蒸汽集管的压力与设定值之间的偏差为反应堆功率的控制信号，保持主蒸汽集管的压力恒定。将主汽压力保持在额定压力。汽轮机自动调节器调节汽轮发电机功率。

2.2.3 C 模式

C 模式是允许堆芯功率分别展平的模式，通过调整第 8、9、10 组控制棒的位置来展平反应堆堆芯功率分布，APC 将控制棒的控制权交给堆内核测系统中的反应堆功率分布控制器(简称 PDC)。当反应堆的功率大于 35% 时，才允许操作员手动选择 C 模式。此时，APC 监测二回路主蒸汽集管压力，如果主蒸汽压力大于 6.77 MPa，则 APC 产生“插棒”命令，关闭 PDC，自动退出 C 模式，回差为 0.2 MPa，即该信号动作后，直到主蒸汽母管压力降至 6.57 MPa，才停止插棒，重新投入 PDC；当产生反应堆功率超过允许速率上升、给水失配引起的预保护动作等信号时，自动退出 C 模式，切换至 N 模式。在二回路的压力不大于 6.77 MPa 时，控制棒驱动机构的移动由 PDC 控制。堆内核测系统根据堆芯的中子注量率，来计算堆内的功率分布，然后 PDC 根据这些数据，给出向上或向下的命令，驱动调节控制棒的驱动机构运动，来展平堆内的功率分布。汽轮机控制器的工作方式是维持主蒸汽集管压力为给定值，从而保持发电机功率与反应堆功率一致。

2.3 与其他控制系统的接口

1) 与反应堆限值系统：APC 采集来自反应堆限值系统的反应堆功率、主蒸汽集流管的压力、发电机的功率信号、反应堆停堆、快速预保护信号、第一类预保护、第二类预保护等信号。APC 没有信号送反应堆限值系统。

2) 与人机界面(简称 OM690)：APC 通过接口服务器机柜和安全级网关，接收来自正常运行仪控系统人机界面的 N 模式的功率设定值、功率上升速率设定值、功率下降速率设定值三个模拟量信号；接收来自正常运行仪控系统人机界面的 N 模式选择、T 模式选择、C 模式选择、启动和停止 N 模式、复位 T 模式禁止、压力设定值增减 0.01 MPa、APC 通道切换、复位输出故障等开关量信号。APC 通过接口服务器机柜将本身的工作情况送到正常运行仪控系统人机界面，供操纵员监视用。

3) 与棒控棒位系统: APC 从棒控棒位系统采集已经切换到自动状态、控制棒提棒、控制棒插棒这 3 个反馈信号, 它们是 APC 投入自动的前提条件。APC 把控制棒向上、向下的命令、允许 PDC 的信号、APC 可以投入运行的信号送棒控棒位系统。

4) 与堆内核测系统: APC 将自身的运行模式 N、T、C 送到堆内核测系统, 以便堆内核测系统计算堆内参数并展平堆内功率分布。

5) 与汽轮机控制系统: APC 将自身的运行模式 N、T、C 送到汽轮机控制系统, 以便汽轮机控制系统选择运行模式, 共同保证一二回路的协调控制。

3 CPR1000 功率控制方案

CPR1000 的反应堆功率控制系统(简称 RRC)是虚拟的仪控系统。RRC 系统主要控制的过程参数包括反应堆温度、压力、功率、稳压器液位、蒸汽发生器液位以及大气释放阀和旁排阀的控制。控制系统主要包括: 稳压器压力控制, 稳压器液位控制, 通过给水流量控制蒸汽发生器液位, 灰棒控制反应堆功率, 通过调节棒控制平均温, 蒸汽排放到大气及冷凝器的控制^[4]。

3.1 系统功能

CPR1000 的控制棒组分为功率调节棒(两组 G 棒, 共 12 组, 俗称灰棒; 两组 N 棒, 共 16 组)、温度调节棒(一组 R 棒, 共 8 组)、停堆棒(四组 S 棒, 第一次燃料循环是 13 组, 后续循环是 25 组)。功率控制采用 G 模式控制, 是一种堆跟机的控制方式。反应堆功率控制本质上采用的是开环与闭环相结合的方式, 通过 G 棒和 R 棒两种控制棒来实现具体的功率控制。其中 G 棒为功率调节棒, 二回路负荷直接对应 G 棒棒位, 即 G 棒为反应堆功率的开环控制。R 棒为温度调节棒, 通过调节堆功率来确保一回路温度在其给定值上, 因此 R 棒可认为是堆功率的闭环控制。从控制效果看, G 棒为粗调, R 棒为细调。

3.2 自动控制的实现

通过对各过程参数的控制, RRC 系统在设计上确保电厂运行准则被遵守并且电厂的正常运行工况能够得到满足, 并能够确保各过程量在正常运行范围内而不会触发报警或安全设定值^[5]。各过程参数控制示意简图, 如图 3 所示。

由图 3 可见, 反应堆功率控制、蒸汽发生器液

位控制、一回路温度控制都与二回路负荷直接相关, 而稳压器液位控制与一回路实际温度直接相关, 与二回路负荷间接相关。机组功率全部受二回路负荷影响, 从而很容易的实现堆跟机的控制模式。事实上, 对于各过程参数的控制的理解都应围绕功率的传递与变化来考虑。对于 CPR1000 来说, 简单的提及反应堆功率控制, 已不现实, 机组功率的控制已经整合在一起了。

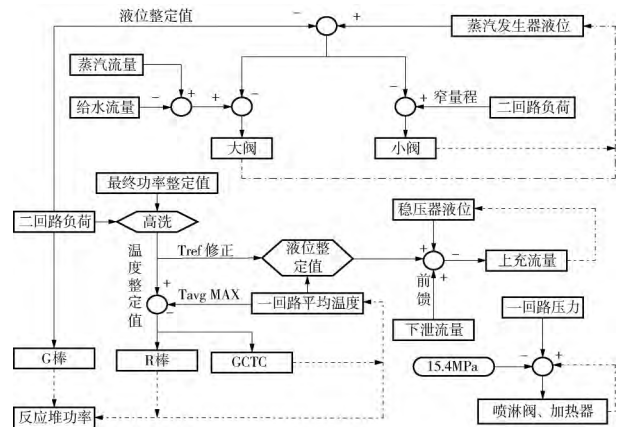


图3 CPR1000 控制系统简图

Fig. 3 CPR1000 control system schematic

4 AP1000 功率控制方案

AP1000 的反应堆控制原理是对短期中子通量值以及中子通量分布的控制, 反应堆功率控制方式也对应的表现为对功率水平和堆芯内的功率分布的控制^[6]。在反应堆功率控制系统中, 堆芯功率的调节(M 棒组)和轴向偏移的调节(AO 棒组)所采用的方法是不同的。反应堆冷却剂系统的硼浓度由操纵员调节, 需要考虑堆芯长期燃耗。四组 M 棒组(两组灰棒, 两组黑棒)处于完全提出位置, 两组 M 棒组(灰棒)完全插入, AO 棒组插入较浅。在负荷跟踪和负荷调节响应瞬态时, 功率控制和轴向偏移控制两个子系统联合作用。反应堆功率控制通过自动调节 M 棒组来实现, 而轴向功率偏差控制则由 AO 棒组完成。

功率控制子系统通过调节 M 棒组的位置来控制反应堆冷却剂的平均温度。冷却剂的实测温度与整定值之差是反应堆功率控制的基本控制变量。偏差在死区范围内, 控制棒就不会移动。温度差值越大, M 棒组移动速度越快。但是在低功率时, 特别是汽轮机未并网时, 旁路系统参与调节冷却剂温度

的情况下,引入核功率定值计算器,可以使堆芯功率以选定的速率进行线性变化,防止控制棒的频繁大范围移动,避免损坏控制棒。

轴向功率偏差控制是指在负荷跟踪和电网频率变化瞬态时,控制堆芯轴向上半部和下半部的功率差值,在允许范围内,这主要是通过AO棒组实现的。很显然,此时需要引入中子注量率、反应堆的运行模式、操纵员希望的轴向偏移值等信号参与控制。

功率控制具有优先权。如果功率控制棒动作,那么轴向偏移控制棒就不能动作。只有温度偏差在死区范围内,并且M棒组全部处于停止状态,轴向便宜控制棒才允许移动。

5 各功率控制方案的比较和分析

从反应堆功率控制的目的来看,可分为功率水平的控制和功率分布的控制。压水堆核电站核功率控制方案经历了A模式、G模式、K模式、AP1000模式四个阶段。压水堆的反应堆功率控制主要采用化学补偿溶剂控制、可燃毒物控制和控制棒控制3种方法。前两者主要用于燃料燃耗不同的反应性调节,后者主要用于快速负荷跟踪。

A模式的核功率控制手段只有两种——改变硼酸浓度和调节黑体控制棒,是一种“机跟堆”的基本负荷运行模式。A模式核电站负荷跟踪能力受限制,主要是维持反应堆的功率,功率协调控制的功能基本上不存在,但是保证了反应堆的安全运行。国内压水堆核电站的跟踪反应堆功率模式大多如此,VVER-1000的N模式与之类似,AP1000的功率控制模式也有点类似。缺点有两个方面:(1)功率水平调节主要靠硼酸浓度调整,需要投入化学和容控系统,大大降低了功率调节速度;(2)调节棒组大多为黑体棒组,中子吸收能力较强,对中子注量率影响较大,其移动对功率分布影响很大,控制棒的移动范围和速度受到很大限制。

G模式改变了以往功率控制单纯的“机跟堆”方式,实现了“堆跟机”、“机跟堆”两种模式的共同存在和相互转化。灰棒是吸收中子能力相对较弱的控制棒,它的应用带来了更快的核功率调节速度。控制棒移动的空间和速率得到了显著提升,控制棒在功率控制和调节中发挥了更大的作用。此模式仍存在两个缺点:(1)在反应堆功率变化时仍需要调节硼酸浓度;(2)功率水平控制时仍会影响轴向功

率的分布控制。VVER-1000的T模式与之类似,CPR1000的功率控制采用的此类理念,AP1000功率控制中的轴向功率偏差控制很好的弥补了上述的第2条缺点。

K模式克服了功率水平与功率分布调节的耦合作用,将复杂的控制问题转换为多个简单且易于控制的子问题,从而得到了比G模式更快的功率调节速率。HTR-PM的控制理念与之对应,将通过实现对控制棒、主氦风机、主给水泵、汽轮机调节阀等的自动控制,来完成反应堆功率控制,乃至电站的功率控制。

AP1000模式将核功率水平与功率分布分开控制,采用功率控制和轴向偏移控制两个子控制系统,弥补了其他模式下的轴向功率偏差无法控制的缺点。功率水平控制系统不仅采用了灰棒组件来调整基本负荷,而且采用了黑棒组件以控制冷却剂平均温度;轴向偏移控制引入中子注量率,通过控制AO棒组实现功率分布控制。但是功率控制和轴向偏移控制存在优先级别,功率控制级别优先于功率分布控制。

对以上四种控制方案,无绝对的优劣之分,不同堆型采用不同的控制策略是必然的。仅仅对控制系统来说,简单是最直接的优点,HTR-PM的控制策略毋庸置疑是最简单的,球床式堆型也省去了硼浓度的控制。反应堆功率控制技术的变迁,也与堆型设计的第一代、第二代、第三代和第四代有关,堆型越先进选用的控制理念和策略将会越完备。

6 结论

目前,HTR-PM和AP1000的反应堆功率控制系统尚未真正的实际运行,其控制理念的实现尚需要机械设备的完美配合,需要设计人员对控制策略不断优化和改进,需要机组各运行工况的调试,需要并网发电和负荷调节的检验。随着核电行业的不断发展,数字化自动控制技术在核电领域的广泛应用,反应堆物理的国产化研发,更加合理和完备的控制理念和策略将会不断涌现。

参考文献:

- [1] 董哲. 华能山东石岛湾核电厂高温气冷堆核电站示范工程全厂功率控制与调节系统设计说明书[R]. 北京: 清华大学核能与新能源设计研究院, 2014(5): 2-3.

(上转第35页 Continued on Page 35)

4 结论

广东省核电节能减排效果明显。核电效益是节省煤炭等不可再生能源用量,减少 CO_2 、 SO_2 、烟尘、 NO_x 等污染物排放。通过广东省1993年(广东省核电生产前一年)–2010年核电节能减排效益综合评价研究,发现广东省核电节能减排综合效益1993–2010年呈上升趋势;广东省1993–2010年单位GDP煤炭和石油消耗总量呈下降趋势,单位GDP火电生产总量呈下降趋势、单位GDP核电和水电生产总量1994–2010年变化幅度不大,但是核电和水电在电力供应中所占比例较小;总体上广东省单位GDP火力发电 CO_2 排放总量呈下降趋势。我国在快速发展核电的同时,要注意放射性废物和滨海核电站的热污染等问题的处理。

研究过程中出现某些指标数据难以获得问题。 CO_2 排放量统计数据没有,仅以火力发电排放 CO_2 排放量计算;广东省氧化氮 NO_x 排放量统计年鉴没有1993–2010年全部数据,仅以火力发电排放氧化氮 NO_x 排放量计算;有些指标例如单位GDP工业固体危险废物排放量、废气治理设施数、废水治理设施数、单位GDP工业污染治理投资统计年鉴没有1993–2010年全部数据,因此删掉了这些指标,这些指标的删除对核电节能减排效果评价的结果可能会产生一定的影响。

参考文献:

- [1] 郭贤明,李建华. 广东核电发展的优势与前景 [J]. 能源技术, 2009, 30(3): 169-172.
- [2] 大亚湾核电站 [OL]. http://www.lvmama.com/dest/dayawan_hedian/place.
- [3] 赵仁恺. 发展核电对减排 CO_2 的贡献 [J]. 核科学与工程, 2003, 23(1): 1-8.
- [4] 徐洪波,杨俊峰. 河北省节能减排项目绩效评价研究 [J]. 现代营销, 2011(5): 141.
- [5] 陈一萍. 基于密切值法的节能减排评价研究 [J]. 生态环境学报, 2010, 19(2): 419-422.
- [6] 王曼,杨俊峰. 节能减排项目绩效评价体系的构建 [J]. 中国证券期货, 2010(10): 103.
- [7] 迟国泰,祝志川,张玉玲. 基于熵权-G1法的科技评价模型及实证研究 [J]. 科学学研究, 2008, 26(6): 1210-1213.
- [8] CO_2 及污染物排放系数 [OL]. <http://www.china5e.com/show.php?contentid=213543>.
- [9] 杨保安,张科静. 多目标决策分析 [M]. 上海: 东华大学出版社, 2008: 20-21.
- [10] 刘艺梅,杨锦秀,杨启智,等. 基于熵权的农民工对流出地影响的模糊综合评价 [J]. 农业技术经济, 2008(4): 28-29.
- [11] 贾艳红,赵军,南忠仁,等. 基于熵权法的草原生态安全评价 [J]. 生态学杂志, 2006, 25(8): 1004-1008.
- [12] 黄曼丽,朱凌,尹华. 基于熵权的多目标综合评价方法在水利工程中的应用 [J]. 中国农村水利水电, 2008(12): 100-102.

(责任编辑 高春萌)

(下接第44页 Continued from Page 44)

- [2] 周海翔. 田湾核电站自动功率控制器(APC)功能分析 [J]. 核技术, 2006, 29(11): 850-853.
ZHOU H X. Tianwan nuclear power plant automatic power controller (APC) functional analysis [J]. Nuclear Technology, 2006, 29(11): 850-853.
- [3] 郭春. 田湾核电站反应堆功率控制系统APC控制逻辑 [R]. 连云港: 江苏核电有限公司, 2008.
- [4] 董威,曹东茂. 阳江核电堆机协调控制方案浅析[C]//第一届中国(国际)核电仪控技术大会论文集: 专题二. 北京: 中国核学会, 2011(5): 4-6.

- [5] 杨宗伟,冯光宇,栾振华,等. 岭澳二期核电站反应堆控制系统启动试验研究 [R]. 深圳: 中广核工程公司调试中心, 2012: 1-2.
- [6] 孙林宁. AP1000压水堆功率控制模式浅析 [J]. 科技资讯, 2015(6): 42-43.
SUN L N. Analysis of Power Control Mode of AP1000 [J]. Science and Technology Information, 2015(6): 42-43.

(责任编辑 张春文)