

欧洲压水堆先进机组 TEP 除盐水补给的研究分析

任江, 黄荣飞

台山核电合营有限公司, 广东 江门 529228

摘 要 : 在欧洲压水堆先进核电机组的设计中, TEP 承担了一回路除盐水的供给, 而 M310 机组的除盐水由 REA 提供, 其上游有 0REA 和 9ASG 用于补给除盐水的除气^[1], 而欧洲压水堆先进机组只有 TEP6 子系统用于除气^[2], 未考虑除盐水补给的冗余, 这点是两者比较大的区别, 从欧洲压水堆先进机组目前的运行经验看, 暂未发现由于 TEP6 子系统影响机组运行的情况, 但在整个寿期内, 是否会出现本文中所述的问题目前还无法下结论, 针对可能存在的问题, 以及可能导致的后果及应对措施将在本文中进行分析和研究。

关 键 词 : 欧洲压水堆先进机组; TEP; 除盐水; 除气器; 氦

Research and Analysis on Tep Desalination Water Supply for Advanced Pressurized Water Reactor Units in Europe

Ren Jiang, Huang Rongfei

Taishan Nuclear Power Joint Venture Co., LTD. Jiangmen, Guangdong 529228

Abstract : In the design of the European pressurized water reactor advanced nuclear power unit, TEP undertakes the supply of the primary dividing brine, While the demineralized solution of the M310 unit was provided by the REA, Upstream with 0 REA and 9 ASG to recharge the demineralized water^[1], While only the TEP 6 subsystem is used for degassing^[2], No redundancy of the demineralized water replenishment is considered, That's a big difference, From the current operation experience of European PWR units, No unit due by the TEP 6 subsystem, But throughout his life, It is currently impossible to conclude whether the questions presented in this article will arise, To address the possible problems, And the possible consequences and countermeasures will be analyzed and studied in this paper.

Keywords : European pressurized water reactor advanced unit; TEP; desalting water; degator; tritium

引言

欧洲压水堆先进机组 TEP 系统运行功能主要是处理可复用冷却剂并提供一回路所需的除盐水, 在正常运行时与 REA 配合向一回路注入除盐水进行稀释或者与硼酸混合后进行自动或手动补给, TEP 提供除盐水功能的可用性直接关系到机组的运行, 但除盐水的来源单一, 一旦设备故障无法及时恢复将影响除盐水补给, 从而威胁到机组的运行, 因此, 我们需要分析 TEP 除盐水的补给过程可能遇到的问题及解决办法, 从而为长期稳定运行提供一个可参考的思路。

一、TEP 系统功能

TEP 系统运行功能主要是处理可复用冷却剂及提供一回路所需的除盐水:

1. 存储 RCV 和 RPE 排放的可复用冷却剂;
2. 对冷却剂进行净化和蒸发处理, 分离成除盐水和硼酸;
3. 存储除盐水供 REA 的除盐水注入子系统使用;
4. 对除盐水进行除气处理, 降低放射性后排放;
5. 对新补给除盐水进行除气处理, 去除溶解在水中的气体。

TEP1 六个储存罐用于储存冷却剂和除盐水。欧洲压水堆先进

机组在设计 TEP 系统时, 根据核电站正常运行时一回路补给和排出冷却剂体积相当的特点, 采用了非常灵活的储存方式, 即 REA 向一回路补给多少除盐水和硼酸容积, RCV 就向 TEP 排出多少冷却剂容积, 这些冷却剂又经处理为浓硼酸和除盐水, TEP1 需要储存的冷却剂和除盐水的总体积维持基本不变, 只是冷却剂和除盐水所占比例在变化。如果没有维修需求, TEP1 在任何机组状态下都是要求可用的, 必须随时保证对 RCV 和 RPE 可复用冷却剂的接收和提供机组所需的除盐水。

理论上讲, TEP1 的 6 个罐子都可以接收含硼水冷却剂或者除盐水, 但为了更好的运行, 防止除盐水和含硼水的交叉混

作者简介: 任江 (1985.09-), 男, 汉族, 江西永修, 工程师, 大学本科, 核电运营。

和，规定一个罐子同一时刻只能储存含硼水或者除盐水中的一种流体，其入口的两个阀门不能同时开启，逻辑上设置有闭锁，通过选择罐子接收流体的种类，从而实现入口两个阀门的逻辑闭锁。

在正常功率运行时，6个罐子的使用配置要求如下：

- 一个储存罐连接在含硼水管线上；
- 一个储存罐连接在除盐水管线上；

为了安全起见，防止冷却剂和除盐水的混合，至少应保留115 m³（一个储存罐体积）的空体积，以备能够在任何时候接收RPE的来水和一回路的排水。

从上述介绍可知，欧洲压水堆先进机组 TEP1 系统（即储存罐子系统）除盐水最多可接收5罐，至少保证一个空罐用于接收一回路的排出的可复用冷却剂，因此，TEP除盐水的容积需要提前根据机组状态做好储备。

TEP1 储存罐子系统的存储容量在设计上考虑了：

- 停堆后6 ~ 8 h最大氙浓度（短热停）时的再启动、停堆90 h后（长热停）无氙时的再启动、冷停堆无氙的再启动及换料停堆后的再启动；
- 60% ~ 100% P_n标准的负荷跟踪运行；
- 燃料补偿为最低至5 ppm的冷却剂硼浓度；
- RPE系统收集的（可回收的冷却剂废液和安全阀排放的）反应堆冷却剂；

➤提供机组运行所需的除盐水，如改变反应性的冷却剂稀释和反应堆冷却剂补给。

TEP1 最大存储容量是根据寿期末反应堆从氙冷停堆状态能够无延迟返回满功率这一过程所需的除盐水量来决定的。与此同时，TEP1 存储容量也需要满足机组启动过程中由于主回路加热后热膨胀和除硼操作置换出冷却剂的容量要求（约100 m³）。TEP1 应始终保证有足够的存储空间来接收上述操作产生的冷却剂排放，同时也应始终保持有足够满足上述工况的除盐水，同时 TEP1 应始终保持有足够的除盐水处理量以满足维持2天的负荷跟踪运行所需水量。

对于欧洲压水堆先进机组 TEP 存储的除盐水，不仅要满足正常运行的要求，还要满足化学技术规范的要求^{[3] [4]}，在化学技术规范中，TEP1 除盐水要求氙含量小于7500MBq/t，氧含量小于0.05mg/kg，总电导率小于2 μS/cm。

对于 TEP 系统来讲，联调阶段首次充水可以通过除盐水直接注入，但是后续的补水须经过 TEP6 的除气后才能对 TEP1 的储存罐进行补给以满足化学技术规范要求，因此 TEP 的除盐水量取决于 TEP6 的运行情况，一旦 TEP6 故障或者由于预防性维修，就会影响除盐水的补给，因此在进行预防性维修之前，我们需要提前做好除盐水的制水和补给，一旦 TEP6 故障，则无法进行除盐水的补给了，此时机组就需要依靠 TEP1 固有的除盐水量维持运行，这也是欧洲压水堆先进机组 TEP 设计上比较大的缺陷所在，相对来说，M310 机组就多了一个冗余，他们有 OREA 和 9ASG 用于补给除盐水的除气，当其中一个系统由于故障或维修时，还有另一个系统可进行除盐水除气后补给^[5-6]。

二、TEP 除盐水补给存在的问题

如前文所述，当机组由于氙含量高需要处理排放时，TEP 就需要补给等量的除盐水以保证储水量，新除盐水的补给必须经过 TEP6 除气，由于欧洲压水堆先进机组为单堆设计，TEP6 的设计未考虑冗余设计原则，只有一套除气设备，因此一旦 TEP6 故障或者由于预防性维修需要停运时，就会影响 TEP 除盐水的补给，下面从 TEP6 的运行功能来分析。

TEP6 除气子系统（图1），承担了如下的运行功能：

1. TEP1 储存罐补给的除气；
2. REA 制硼所需补给的除气；
3. 冷却剂处理子系统分离后的除盐水除气；

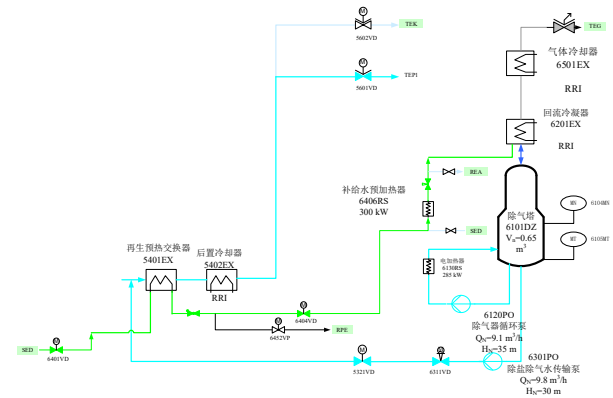


图1: TEP6 流程简图

对于 TEP6 来讲，以上三大运行功能，不能同时进行，同一时刻只能执行一项功能，因此 TEP6 工作负荷较重，尤其当一回路的氙含量较高需要经常性排放时，TEP6 就需要连续运行，那样将加重 TEP6 的负荷，因为在处理氙含量高的除盐水前，需要提前储备好除盐水量，否则 TEP1 除盐水量下降，导致机组运行受影响，尤其在机组寿期末需要大流量稀释时，此时对除盐水的的需求量将更大，TEP6 要求运行的时长将更多，由于超负荷的运行加大了 TEP6 部件损坏的几率，也会导致除盐水补给更加困难。

三、TEP 除盐水补给问题的解决办法

对于 TEP 除盐水补给存在的问题，设计方 ANP 给出的结论是，TEP6 的设计满足运行要求，这主要是基于设计方提供的经验数据计算出来的，具体如下：

欧洲压水堆先进机组设计上 TEP6 排氙时不补水，ANP 澄清 TEP1 储存的水量足够2天的负荷跟踪运行所需。同时欧洲压水堆先进机组设计上是考虑回收 TEP3 分离出来的除盐水，根据德国机组的经验数据，平均每年需排水1390立方，最高是2000立方，如果按照这个限值来安排排放，每年排放量就是2000吨（排放最大值），TEP6 的处理能力是2.3 kg/s（8.4 t/h），一年排放2000吨需要处理238h（约10天），补给同容量的除盐水也需运行10天，共20天，从2000吨的运行经验数据来看，ANP 认为 TEP6 负荷很小，能满足运行要求。

同时根据国家标准《GB 6249-2011 核动力厂环境辐射防护

规定》^[7]表明, 针对3000MW反应堆每年总氙排放量限值为75 TBq, 热功率高于此值可适当调整, 因此欧洲压水堆先进机组氙排放设计满足要求^[8]。

对于以上的经验数据, 虽能证明满足运行需要, 但是这建立在 TEP6 设备运行良好且一回路氙含量较低的情况下, 一旦设备故障导致 TEP6 不可用, 而机组又需要大量稀释时, 或者一回路由于氙含量高需要经常性换水时, 都将对 TEP6 的运行带来极大挑战, 一旦故障导致不能提供所需的除盐水, 那将会对机组运行带来影响, 因此我们需要探索其他的解决方案^[9-10]。

方案1: 根据机组状态, 优化运行, 提前储备除盐水

此方案的优点是不需要进行设备改造, 根据已有运行经验, 确保3罐除盐水能维持正常运行超过10天的补偿燃耗稀释量要求, 在这期间可以不需要 TEP6 补水, 但需要确保 TEP6 的可用性, 这种情况只是正常补偿燃耗的需求, 一旦由于氙含量高需要经常换水时, 就需要储备更多的除盐水, 若 TEP6 的预防性维修时间超过除盐水储量可用时间, 对机组稀释功能的影响将会影响机组的运行, 因此 TEP1 除盐水储量需要时刻关注, 并监视好机组参数, 一旦有需要做好除盐水的提前储备。

方案2: 1/2号机组 TEP6 相互备用

此方案优点是 TEP6 互相备用, 对于两台机组来讲, 都多了

一套备用手段, 一旦机组需要边排氙边补给除盐水, 则能满足要求, 但是此方案需要对设备进行改造, 而且运行方案的制定需要同时考虑对两机组的影响, 避免互相串水, 从可行性来讲, 此方案的改造量较小, 只需在 TEP6 返回 TEP1 的管线上增加管线和阀门, 从而实现互相备用, 不过由于现场设备已经固化, 要做改造需要对现场进行合理性分析。

方案3: 在 SED 初始充水管线上增加一套除气器用于全厂公用

此方案优点是可以全厂公用, 这样即使是后面二期项目也可以使用, 达到最大的经济性, 但是此方案需要额外增加一套除气器设备, 耗资相对会较高, 至于现场设备的布置, 可以考虑参考 FA3 的 OREA 改造。

四、结论

综合来讲, 当前欧洲压水堆先进机组 TEP 除盐水补给的设计在电厂运行中满足需要, 但随着运行时间的推移, 如果后续 TEP6 故障率较高, 影响除盐水的补给时将对运行策略挑战较大, 影响机组运行, 那时就需要考虑方案2或者方案3的改造, 从而彻底解决 TEP6 无冗余备用的局面, 实现机组的长期稳定运行。

参考文献

- [1] 广东核电培训中心编. 900MW 压水堆核电站系统与设备 [M]. 原子能出版社 2005.
- [2] 台山核电合营有限公司编. EPR 机组智能化控制的设计原理 [M]. 原子能出版社 2019.
- [3] 生态环境部核与辐射安全中心编. 核电厂技术规格书文件体系及发展方向 [M]. 中国环境出版集团 2019.
- [4] 刘新华. 核电厂一回路源项和排放源项 [M]. 科学出版社 2019.
- [5] 单建强. 压水堆核电厂系统与设备 [M]. 西安交通大学出版社 2021.
- [6] 陆道纲. 二代和三代压水堆核电厂系统与设备 [M]. 中国电力出版社 2023.
- [7] 生态环境部核与辐射安全中心编. 中华人民共和国国家标准《GB 14587-2011. 核电厂放射性液态流出物排放技术要求》. [S] 中国环境科学出版社 2011.
- [8] 环境保护部发布. 中华人民共和国国家标准《GB6249-2011 核动力厂环境辐射防护规定》[S]. 中国环境科学出版社 2011.
- [9] 国家能源局发布 核电厂水工设计规范 [M]. 中国计划出版社 2015.
- [10] 谢学军, 廖冬梅, 王瑞 压水堆核电厂水化学 [M]. 中国电力出版社 2024.