

ELPO 长期低功率运行浅析

Analysis of ELPO Long-term Low-power Operation

王伟涛

Weitao Wang

广西防城港核电有限公司 中国·广西 防城港 538000

Guangxi Fangchenggang Nuclear Power Co., Ltd., Fangchenggang, Guangxi, 538000, China

摘要: 受到外部经济环境和电力市场的影响, 核电厂被迫参与调峰, ELPO 长期低功率运行变为新常态。论文对 CPR1000 核电机组 ELPO 长期低功率运行方式进行简要分析, 从原理和控制角度进行总结。

Abstract: Affected by the external economic environment and power market, nuclear power plants are forced to participate in peak adjustment, and the long-term low-power operation of ELPO becomes a new normal. This paper briefly analyzes the long-term low-power operation mode of CPR1000 nuclear power unit and summarizes the model from principle and control perspective.

关键词: ELPO; PCI; 剩余天数

Keywords: ELPO; PCI; days remaining

DOI: 10.12346/etr.v3i12.5030

1 概要

根据《核电站运行技术规范》定义, 长期低功率运行 ELPO 是这样一种运行模式, 功率补偿棒组全部抽出且运行的基准功率水平 (P_{Dref}) 通常小于 100%RP, 长期低功率运行 ELPO 持续时间大于 12h, 因为小于 12h 则采用负荷跟踪运行模式。而负荷跟踪运行则是对昼夜循环负荷变化的补偿, 在 24h 之内, 降功率到 30% 额定功率以上的任一功率水平, 持续时间小于 12h, 然后再返回到基准功率水平。延伸燃耗运行期间不能进行长期低功率运行。

长期低功率运行对堆芯的影响反映在燃料的 PCI 效应上, 在一类或二类瞬态工况下, 为了避免 PCI 效应引起的燃料棒破损风险, 若反应堆在长期低功率下运行, 会增加 PCI 效应的风险, 在一定条件下可能造成燃料棒包壳因 PCI 效应而破坏。为了避免 PCI 效应引起的燃料棒破损风险, 长期低功率运行时必须遵从特定的运行模式, 分析计算长期低功率运行可允许天数, 并实时计算长期低功率运行允许天数, 以保证燃料及堆芯的安全, 建立一个防止 PCI 破坏风险的裕度控制^[1]。

2 ELPO 长期低功率运行的影响论证

ELPO 时堆芯在一个固定的低功率水平下需运行一段时间。在 ELPO 期间, G 棒全部提出堆芯, R 棒位置可从全抽出到插入极限。在低功率水平时, 堆芯上部温度降低较多, 由于慢化剂的反馈效应, 轴向功率再分布时堆芯轴向相对功率分布将会向堆芯上部偏移。这样在 ELPO 期间堆芯上部燃耗更多, 因此当堆芯返回满功率时 ΔI 会变得更负。由于 ELPO 改变了堆芯轴向功率分布, 因此有必要研究其对核电厂运行的影响。

主要考虑以下两种 ELPO 模式来研究 ELPO 对堆芯径向和轴向功率分布的影响:

- ① 50 天 50% 功率水平运行。
- ② 91.5 天 (3 个日历月) 75% 功率水平运行。

通过《18 个月换料改进项 ELPO 论证》材料可以得出以下结论:

- ① ELPO 模式对焓升因子 $F\Delta H$ 的影响可以忽略不计。
- ② 尽管 ELPO 导致 ΔI 在返回满功率时将向负方向偏移, 但是通过有效地控制可以使其不会超出运行图的限值。

【作者简介】王伟涛 (1981-), 男, 满族, 中国吉林吉林人, 本科, 工程师, 从事核电厂运行研究。

另外,在 ELPO 以后,计算 I 类和 II 类堆芯功率能力的限值瞬态可以证明:

① ELPO 后堆芯功率能力的最小 DNBR 裕量在设计限值内,首循环 I 类工况最小 DNBR 裕量较小但无超限;

② ELPO 后 I 类和 II 类堆芯功率能力的最大线功率密度满足设计限值要求。

同时,长期低功率运行期间的运行准则来自针对核电厂机组的 PCI 分析,考虑了核电厂机组 18 个月换料项目首循环、过渡循环及平衡循环进行长期低功率运行的情况^[2]。分析表明,在基负荷运行、一次调频、负荷跟踪三种运行条件下最长持续时间为 50 日历天的 50%FP ELPO 可以保证 PCI 裕度。对于 75%FP 的 ELPO,在基负荷运行、一次调频、负荷跟踪三种运行条件下最长持续时间为 90 日历天的 75%FP ELPO 可以保证 PCI 裕度^[2]。

3 数据计算

核电机组长期低功率运行主要考虑的功率平台为 75%FP 和 50%FP,在计算中充分取保守原则,当长期低功率运行时,稳定功率水平不小于 75%FP 时,按照 75%FP 功率水平来进行计算;当长期低功率运行时,稳定功率水平在 75%FP 和 50%FP 之间时,按照 50%FP 功率水平来计算。

在非 ELPO 状态下连续运行时间大于 100 天 ($RSD \geq 100$),PCI 裕度完全恢复。实际计算中认为 PCI 裕度恢复与时间成线性关系(即 RSD)。

在每个燃料循环开始,计算中的相关参数设置如下:

$$PD_{ELPO}^{75} = 0; PD_{ELPO}^{50} = 0; RSD = 0$$

$$AD_{ELPO}^{75} = AD_{ELPOMAX}^{75}; AD_{ELPO}^{50} = AD_{ELPOMAX}^{50}$$

AD_{ELPO}^{75} 计算(此时 ELPO 的功率水平 $\geq 75\%FP$)

注:如果 ELPO 运行在 50%FP 的功率水平, AD_{ELPO}^{75} 将被设置为 AD_{ELPO}^{50} 的值。

当 ADELPO50 完全恢复以后,ADDELPO75 也将重置回初始值。

在 ELPO 运行期间, PD_{ELPO}^{75} 每天增加一天, AD_{ELPO}^{75} 相应减少一天,如下述公式:

$$AD_{ELPO}^{75} = \text{Max}\{AD_{ELPOMAX}^{75} - PD_{ELPO}^{75}; 0\}$$

在开始 ELPO 时,RSD 复位为 0;在基本负荷或基本负荷并 PFC 运行期,RSD 每天增加一天, PD_{ELPO}^{75} 累计抵消一天,如下公式:

$$PD_{ELPO}^{75} = \text{Max}\{PD_{ELPO}^{75}(\text{Begin of Base Load}) - AD_{ELPOMAX}^{75} \times RSD/100; 0\}$$

$$AD_{ELPO}^{75} = AD_{ELPOMAX}^{75} - PD_{ELPO}^{75}$$

一般 ELPO 维持 75%Pn 以上功率,简便算法如下(以 $AD_{ELPOMAX}^{75} = 90d$ 为例):

ELPO 开始,每运行一天 $AD_{ELPO}^{75} - 1$ 天。如果 ELPO 结束后开始 RSD,则 AD_{ELPO}^{75} 开始增加。设结束 ELPO 时 AD_{ELPO}^{75} 为 X,此次 RSD 运行天数为 Y,则当前 $AD_{ELPO}^{75} - X + 0.9 \times Y$ (最大取 90 天)。需要完全恢复 AD_{ELPO}^{75} ,则需要 RSD 运行 $100 - X/0.9$ 天

AD_{ELPO}^{50} 的计算(此时 ELPO 的功率水平 $\geq 50\%FP$)

在 ELPO 运行期间, PD_{ELPO}^{50} 每天增加一天, AD_{ELPO}^{50} 相应减少一天,如下述公式:

$$AD_{ELPO}^{50} = \text{Max}\{AD_{ELPOMAX}^{50} - (PD_{ELPO}^{50} + PD_{ELPO}^{75}); 0\}$$

在开始 ELPO 时,RSD 复位为 0;在基本负荷或基本负荷并 PFC 运行期,RSD 每天增加一天, PD_{ELPO}^{50} 和 PD_{ELPO}^{75} 累计抵消一天,如下述公式:

$$PD_{ELPO}^{50} = \text{Max}\{PD_{ELPO}^{75}(\text{Begin of Base Load}) +$$

$$PD_{ELPO}^{50}(\text{Begin of Base Load}) - AD_{ELPOMAX}^{50} \times RSD/100; 0\}$$

$$PD_{ELPO}^{75} = \text{Max}\{PD_{ELPO}^{75}(\text{Begin of Base Load}) - AD_{ELPOMAX}^{50} \times RSD/100; 0\}$$

$$AD_{ELPO}^{50} = \text{Max}\{AD_{ELPOMAX}^{50} - PD_{ELPO}^{50}; 0\}$$

4 在 ELPO 运行过程中 FPO 应注意事项

如果是计划的 ELPO 低功率运行,为了避免在功率补偿棒组插入时进入 II 区的风险,在降功率时应该通过硼化方式从而使功率补偿棒组全部保留在堆外。R 棒要适量插入,控制 ΔI 在硼化降功率过程的偏移幅度,而不是将 ΔI 拉回原值附近,这也避免了后续全堆芯通量图测量前的强迫提 R 棒的困难^[3]。

如果 ELPO 时间大于 72h,技术部门在到达目标功率 48h 后将安排全堆芯通量图测量,主要为:

①在稳定 48h 后进行全堆芯通量测量,不会引入氙振荡,因此堆芯测量时 ΔI 不会突然恶化。

②进行的通量测量要求是,在试验前 6h 内:R 棒位于调节带中部 ± 6 步,且 R 棒变化小于 2 步;轴向功率偏差 ΔI 小于 0.3% FP/h;一回路平均温度与参考温度差值小于 $\pm 0.5^\circ\text{C}$;一回路压力稳定在 (153~155) bar,压力变化小于 1bar。

根据经验反馈,如果能够预见 ELPO 时间将大于 72h,在降功率时尽量少插入 R 棒,否则在 ELPO 运行 48h 后进行堆芯通量图测量前很难将 R 棒置于调节带中部区域;预计 ELPO 运行大于 72h,在安排堆芯通量图测量及 LSS 参数修改前,不要安排可能导致控制棒移动的试验,否则机组控制可能有困难。

4.1 技术规范的要求

ELPO 时所有控制棒提出,会观察到两个现象:ELPO 期间堆芯上部的过度消耗将会导致在提升功率时功率峰向

堆芯下部偏移；由于轴向氙的峰值在堆芯上部，所以在升功率的第一个小时将加剧功率再分布时堆芯相对功率向堆芯下部的偏移。以上两种现象使得返回满功率时 ΔI 有超出运行图的风险。因此，对 ΔI 进行控制使其在运行图之内是非常必要的。

在 ELPO 末期，操纵员通过硼稀释进行升功率的策略受到技术规范的限制，因此升功率时尽可能以调节 R 棒来控制 ΔI 的变化。很多时候调节 R 棒无法控制 ΔI 在运行图内（特别是在接近寿期末），操纵员可以减慢稀释的速率或停止提升功率几个小时。在稳定的功率水平由于氙的振荡会使 ΔI 再一次增加，当 ΔI 变到以平衡氙返回满功率时的 ΔI 值时（6h 或 8h 以后）可以恢复升功率。需要特别注意的是无论通过哪种方式或策略，通过理论分析和机组实际操作案例来看，在寿期末 ELPO 之后返回满功率还是非常困难的。

4.2 DI 控制

DI 必须保持在运行梯形图的范围。在任何情况下，超出区域 II 的运行（左限制和右限制）都是严格禁止的。根据以往在 ΔI 控制问题上面临的一些困难及不同意见讨论，已达成的一般性结论以下几点：

①当 $50\% \leq P < P_{Dref}$ ，运行点在区域 II 内无限制，但只有在功率补偿棒抽出且在区域 I 内稳定 6h 后才允许离开区域 I 进入区域 II，因此目前只要保证 G 棒在堆顶，一旦为了提升 R 棒可能导致进入 II 区，可以提前闭锁 C21。

②在测量 ΔI_{ref} 时，在某些特殊情况下，如换料启动或长期低功率水平运行，可能需要重新确定区域 I，在新的参考功率水平，功率补偿棒抽出堆芯，在 ΔI_{ref} 测量和修改新参数过程中，轴向功率偏差维持在区域 II 内（区域 I 未知），因此在进行堆芯通量测量及参数修改时，允许闭锁 C21；闭锁 C21 的时间尽量短。

4.3 低功率运行后的功率提升应该遵守的要求

①在之前 30 天的功率运行期间反应堆曾经历过至少 72h 的“最大”功率以上的功率提升速度必须限制于 $3\%P_n/h$ 。

②可以阶跃增加 $10\%P_n$ ，然后稳定 3h，最后以 $3\%P_n/h$

的速率实现功率提升。

5 结论

长期低功率运行作为核电站一种特殊的运行方式，有其相应的运行配套文件、技术限制条件和运行特点。从多方面分析结果以及现场实际运行经验来看，此种运行模式是可行且有效的。

缩略语

ELPO——Extend Low Power Operation 长期低功率运行
 PCI——Pellet Cladding Interaction 芯块与包壳的相互作用
 BOC——Begin of Cycle 寿期初
 EOL——End of Life 寿期末
 AD_{ELPO}^{75} ——功率水平 $\geq 75\%FP$ 时可允许运行天数数值
 AD_{ELPO}^{50} ——功率水平 $\geq 50\%FP$ 时可允许运行天数数值
 $AD_{ELPOMAX}^{75}$ ——功率水平 $\geq 75\%FP$ 时最大可允许运行天数数值

$AD_{ELPOMAX}^{50}$ ——功率水平 $\geq 50\%FP$ 时最大可允许运行天数数值

PD_{ELPO}^{75} ——Performed ELPO Days at Power $\geq 75\%FP$ and $< 97\%$ 已完成的功率水平大于 75% 的 ELPO 日数

PD_{ELPO}^{50} ——Performed ELPO Days at Power $\geq 50\%FP$ and $< 75\%$ 已完成的功率水平在 50%FP 和 75%FP 之间的 ELPO 日数

参考资料

- [1] 肖会文,刘国明,姚红,等.长期低功率运行对CNP600堆芯中子学参数的影响[J].核技术,2016,39(11):78-84.
- [2] 白成斐,王欣欣,蔡德昌.CPR1000机组两种典型首循环长期低功率运行能力分析[J].核动力工程,2014,35(S2):1-3.
- [3] 朱闵红,傅先刚,王斐,等.大亚湾核电站延伸运行与长期低功率运行[J].核动力工程,2002(5):22-25+36.