

文章编号: 0258-0926(2018)S2-0160-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2018.S2.0160

# “大机小网”运行环境下 昌江核电厂燃料管理策略研究

刘明权, 薛翔, 吴丹蕾

海南核电有限公司, 海南昌江, 572700

**摘要:** 昌江核电厂面临的“大机小网”问题突出, 机组处于长期低功率运行状态, 负荷因子也大幅度低于中国核电所辖机组平均负荷因子, 核电机组发电能力未得到充分利用, 给机组的安全性和经济性都带来较大的影响。为此, 延伸核燃料循环研究对于提升机组安全及经济性就显得更为重要。本文通过分析机组运行客观环境、配合电网调峰的影响、年换料策略的不足, 研究昌江核电厂延伸核燃料循环的可行性并对堆芯主要安全参数进行计算, 结果表明通过长循环的燃料管理策略可实现提升机组整体利用率的同时, 满足机组安全稳定运行的要求。

**关键词:** 大机小网; 燃料管理; 长燃料循环

**中图分类号:** TL38<sup>+</sup>4 **文献标志码:** A

## Research on Fuel Management Strategy of Changjiang Nuclear Power Plant under "Large Machine and Small Grid" Operation Environment

Liu Mingquan, Xue Xiang, Wu Danlei

Hainan Nuclear Power Co. Ltd., Changjiang, Hainan, 572700, China

**Abstract:** The problem that "large machine and small grid" in Hainan Changjiang Nuclear Power Plant is prominent. The load factor is greatly lower than the average level of nuclear power units in China, due to the long-term low power operation, which has great influence on the safety and economy of the unit. It is important for improving the safety and economy to study the extended nuclear fuel cycle. In this paper, the feasibility of the extended nuclear fuel cycle in Changjiang Nuclear Power Plant is studied, and the main safety parameters of the reactor core are calculated. The results show that the long cycle fuel management strategy can enhance the utilization rate of the unit, while meeting the requirements of the safety of the unit.

**Key words:** Large Machine and Small Grid, Fuel management, Long fuel cycle

### 0 引言

截至 2017 年底, 海南昌江核电厂统调装机容量为  $6.88 \times 10^3$  MW, 直调机组 217 台, 其中 2 台 CNP600 核电机组装机容量  $1.30 \times 10^3$  MW、占比 18.9%, 全网全年最高统调负荷  $4.57 \times 10^3$  MW, 核电机组在海南电网运行环境下的“大机小网”问

题十分突出。受运行环境的限制, 海南昌江核电厂 2 台机组自并网以来一直面临着长期降功率运行的问题。低功率运行从机组系统设备的安全性、可靠性以及企业的经济效益来说对核电机组都是不利的。

此外, 电网年负荷峰谷差大, 春节的 2~3 月

收稿日期: 2018-09-02; 修回日期: 2018-09-30

作者简介: 刘明权(1988—), 男, 学士, 现从事核电厂燃料物理相关工作

份与雨季的9~10月为显著的低谷时段,4~8月为用电高负荷区。在负荷低谷区段,电网调峰压力较大,首循环运行期间2台机组多次在75%FP(满功率)功率运行的基础上参与电网年负荷低谷区段的调峰。为提高机组的上网电量,原则上在年负荷低谷区段安排核电机组大修换料,机组大修时间固化,导致核电机组燃料管理方案[每循环换36组AFA-3G新燃料组件,平衡循环284EFPD(等效满功率天)]难以适应机组大修安排及循环能量需求,非长久之计。

本文通过分析未来几年的核电机组运行客观环境,研究适应海南昌江核电机组实际需求的燃料管理方案以提高机组整体利用率,并保证机组安全运行。

## 1 机组运行功率分析

### 1.1 电网安全

根据《电力系统安全稳定导则》<sup>[1]</sup>、南网“十项禁令”和南网总调“四个不安排”原则,电网运行必须满足“N-1”准则,即保证电网稳定和保证用户得到符合质量要求的连续供电。考虑电网单一故障准则,在核电单机跳闸后,为保证海南电网电力平衡,需通过500kV福港联网一回线从广东送电至海南电网,但联网线不应超长期负载能力,在海南电网不考虑长期外送的情况下:

核电单机出力+联网线功率波动<联网线长期负载能力; 联网线长期负载能力 600 MW; 联网线功率波动 $\approx$ 50 MW。

由上述条件可知核电单机出力不得高于550 MW,昌江核电厂2台机组成85%FP功率运行。在电网运行必须满足“N-1”准则的情况下,核电机组更高功率运行会对电网安全带来一定的挑战,若考虑核电单挑机组与联网一回线相机故障,则会给电网带来一级事件风险,而不被允许。

### 1.2 低功率运行与频繁调峰对设备可靠性的影响

机组长期处于低功率运行工况,甚至在低负荷区频繁升降功率,部分设备偏离设计运行工况,给设备可靠性带来严峻考验:

(1) 负荷跟踪导致核燃料组件内外压差的频繁变化,容易出现燃料元件芯块与包壳之间的相互作用(PCI)现象,增加了燃料元件的破损风险,特别是对于燃耗较高的燃料元件风险更高。

(2) 机组低功率运行期间,常规岛部分疏水管道、再循环管道等振动明显。

(3) 低功率运行致使蒸汽发生器出口饱和蒸汽品质降低,进入汽轮机做功后的蒸汽湿度增大,汽轮机叶片水蚀情况严重。

## 1.3 联网二回线工程

为提升电网负载能力,联网二回线工程于2015年开工建设。联网二回线起源于广东战警港城变电站,海南福山变电站,负载能力为与联网一回线相同为600 MW,计划于2019年第1季度建成,届时2台单机容量为650 MW的海南昌江核电机组将具备满功率发电的电网运行环境。

## 2 配合电网调峰的影响分析

由于“大机小网”的问题存在,在电网负荷低谷月份及特殊的台风天气下,2台机组配合电网调峰压力较大,机组的频繁扰动及低功率运行将降低机组设备安全性。目前,由于2台机组所面临的外部运行环境较为严峻,但随着电网负荷的逐年增加,抽水蓄能与联网二回线的陆续建成,调峰压力将会得到有效缓解。

### 2.1 电网负载能力分析

海南省电力需求保持高速增长。资料表明,至2020年全省用电最高负荷保持年均13%增速,至2020年最高统调负荷达到7400 MW<sup>[2]</sup>,配合电网调峰压力将显著减小。

### 2.2 抽水蓄能电站工程

抽水蓄能电站项目作为昌江核电项目的重大配套工程,建设3台200 MW水轮发电机组,总装机容量为600 MW,主体工程于2014年3月开工建设,预计2018年8月全部建成投产。在电网负荷低谷阶段,实现电能的临时储存,配合调峰压力可以进一步缓解。

## 3 燃料管理策略研究

### 3.1 年换料燃料管理方案的不足

受电网负荷特性的影响,昌江核电厂的2台机组原则上在2个负荷低谷区段安排大修,因机组大修时间较为固定,以额定功率运行计算,并考虑配合电网调峰的电量损失,实际的循环能力需求约为320 EFPD,设计平衡循环的循环长度284 EFPD难以匹配机组的循环能力需求,见表1。同

时,前几个过渡循环运行功率的不稳定及首循环提前停堆,导致燃料组件利用率降低。机组的换料设计方案已经偏离了初始设计方案,换料方案设计以及换料安全分析评价工作难度增加。

表1 实际燃料管理与初始设计对比

Table 1 Actual Fuel Management Versus Initial Design

循环	首循环	二循环	三循环	平衡循环
设计运行功率/%FP	100	100	100	100
设计循环长度/EFPD	387	272	277	284
设计新组件装量	—	36	36	36
机组实际功率/%FP	75	83	85	100
1#机组实际循环长度/EFPD	306	264	312	320
2#机组实际循环长度/EFPD	380	239	318	320

### 3.2 长燃料循环燃料管理策略的研究

大亚湾核电站、秦山第二核电厂等核电机组实施长燃料循环以来在保证堆芯安全的情况下取得了良好的运行业绩,以及其他核电机组的准备实施都为国内这方面工作提供宝贵的理论支撑和运行经验<sup>[3-5]</sup>,为昌江核电厂1#、2#机组长燃料循环的安全实施提供了良好的基础。

根据将机组大修时间安排在2、3、9、10月份的实际需求,以长燃料循环的运行方式计算循环能力需求:

(1)从2~3月份运行至第2年9~10月份机组停堆大修的循环长度为520 EFPD,可满足机组循

环能力需求。

(2)从9~10月份运行至第2年2~3月份机组停堆大修的循环长度为460 EFPD,可满足机组循环能力需求。

根据机组能力需求,并参考其他核电厂的长燃料循环换料方案制定昌江核电厂1#、2#机组的长燃料循环管理方案如表2所示。

表2 年换料与长燃料循环换料方案对比

Table 2 Comparison of Annual Reloading Schemes with Long Fuel Cycle Reloading Schemes

对比项	年换料	长循环
组件类型	AFA3G	全 M5 AFA3G
换料组件富集度	3.25%	4.45%含钐
换料组件数	36 组	48/44 组
平衡循环长度/EFPD	284	520/460
堆芯装载方式	OUT-IN	部分低泄漏
论证最大燃耗/MW d·t <sup>-1</sup> (U)	41000	52000
平均卸料燃耗/MW d·t <sup>-1</sup> (U)	33000	45000
循环燃料窗口/EFPD	10	15
焓升因子 $F_{\Delta H}$	1.55	1.60
热点因子 $F_q$	2.35	2.40

### 3.3 长燃料循环主要堆芯安全参数计算

海南昌江核电厂长燃料循环以1#机组第4循环为基础进行了可行性分析,各主要参数均能很好的满足机组安全要求。平衡循环和过渡循环的主要安全参数见表3、表4。

表3 长燃料循环平衡循环的主要安全参数

Table 3 Main Safety Parameters in Equilibrium Cycle of Long Fuel Cycle

计算参数	平衡循环		计算参数	平衡循环	
	长循环	短循环		长循环	短循环
装入新组件数目/组	48	44	BOL, HFP, ARO	2037	1790
循环长度/EFPD	517.3	464	BOL, HZP, ARO/10 <sup>-5</sup> · <sup>-1</sup>	-1.941	-5.862
$F_H$ (不包括不确定性、ARO)	1.442	1.448	EOL, HFP, ARO/10 <sup>-5</sup> · <sup>-1</sup>	-78.833	-79.231
最大组件卸料燃耗/MW·d·t <sup>-1</sup> (U)	50018	51039	EOL 停堆裕量/10 <sup>-5</sup>	2538	2387
BOL, HZP, ARO	2237	2020	—	—	—

注: 不确定性为9.2%; ARO—控制棒全部提出堆芯; BOL—寿期初; HZP—零功率; HFP—满功率; EOL—寿期末

表4 长燃料循环过渡循环主要安全参数

Table 4 Main Safety Parameters in Transition Phase of Long Fuel Cycle

计算参数	循环长度/EFPD	热点因子 $F_{\Delta H}$ (不包括不确定性、ARO)	最大组件卸料燃耗/MW·d·t <sup>-1</sup> (U)	BOL 零功率临界硼浓度/10 <sup>-6</sup>	BOL 零功率临界硼浓度/10 <sup>-6</sup>	BOL 零功率慢化剂温度系数/10 <sup>-5</sup> · <sup>-1</sup>	EOL 满功率慢化剂温度系数/10 <sup>-5</sup> · <sup>-1</sup>	EOL 停堆裕量/10 <sup>-5</sup>	
过渡循环	第5循环	483.3	1.445	42137	1877	1716	-2.773	-73.596	2553
	第6循环	487	1.438	42977	2029	1826	-2.998	-77.203	2361
	第7循环	506.8	1.443	47124	2156	1959	-2.991	-78.134	2505
	第8循环	465.2	1.447	51018	2019	1789	-5.869	-79.208	2363

#### 4 长燃料管理方案的潜在收益

(1) 优化了燃料管理方案,减少了机组降功率调峰的时间与频次,提高了机组设备可靠性。

(2) 提高了机组利用率,增加了电厂收益。初步测算昌江核电 2 台机组在实施长燃料循环燃料管理方案后每年可增加上网电量约 2 亿度,为电厂增加收益约 1 亿元。

(3) 卸出堆芯的乏燃料组件数目减少约 1/3,降低了潜在的放射性污染。

(4) 长燃料循环燃料管理采用部分低泄漏的装载方案,每次换料富集度高的新燃料组件装在堆芯中间,减少了电厂辐射剂量水平及辐射随机性效应,实现辐射防护最优化。

(5) 更低泄漏的装载方式减缓反应堆压力容器韧脆转变温度的升高速率,利于机组延寿。

(6) 长燃料循环与现有年换料循环相比,平均每年每台机组减少 1/3 次大修,大幅度降低了人员的疲劳程度和由此而带来的人因失误风险,提高电厂的安全。

(7) 合理的长燃料循环策略的实施将有利于电厂更好的安排大修窗口,避开电网用电高峰,提升群堆管理质量。

#### 5 结束语

综上所述,通过长燃料循环燃料管理策略的实施,未来海南昌江核电双机组能够实现更好的适应海南电网的运行需求,合理安排机组大修,减少机组调峰,从而提高机组安全性。同时提升机组安全性并实现企业经济效益与社会效益的同步提高。

##### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 电力系统安全稳定导则:GB/T 26399-2011 [S]. 北京:中国电力出版社,2011.
- [2] 海南省发展和改革委员会. 海南省“十三五”电力发展规划[Z]. 2017.05.
- [3] 张洪,李雷,李庆,等. 大亚湾核电站 18 个月换料工程及其项目管理[J]. 核动力工程,2002,23(5): 15-17.
- [4] 沈抗. 大亚湾核电站实施 18 个月换料项目的可行性研究[J]. 核动力工程,2002,23(5): 4-7.
- [5] 蔡光明. 秦山第二核电厂燃料管理策略改进的经济性分析[J]. 核科学与工程,2006,26(4): 380-384.

(责任编辑:张祚豪)