

# 电网频率变化对压水堆机组运行的影响分析及应对措施

丁卫东

核动力运行研究所, 武汉, 430223

**摘要:**在世界核营运者协会(WANO)分析过的多起事件中, 操纵员完全依赖反应堆保护系统来保护堆芯, 而不是优先采取保守行动。尤其是在发生规程未覆盖的电网异常工况时, 由于操纵员缺乏经验可能使工况进一步恶化。分析电网频率变化对压水堆机组运行的潜在不利影响, 提出应对措施, 使操纵员在遇到此类电网异常工况时能及时作出正确的响应, 避免反应堆保护系统动作来保护堆芯, 以保守地监控压水堆机组运行, 始终保持电厂的安全限值有足够的裕度。

**关键词:** 电网频率变化; 压水堆机组; 应对措施

**中图分类号:** TL362+.1 **文献标志码:** A

## 0 前言

核发电机组与其他发电机组一样, 向电网提供合格电能的同时, 本身也会受到电网工况的影响。电网发生暂态时, 核发电机组除了面临常规电厂所遇到的诸如汽轮发电机应力等问题外, 更重要的是还要面对由于反应堆的核特性所带来的核安全与运行操作上的问题, 在较为复杂和紧张的时刻, 特别是遇到运行规程未覆盖的外电网特殊工况时, 操纵员的冷静而正确的判断和对机组的有效控制是至关重要的, 这在核电领域是个有待研究的课题。

本文以典型的压水堆(PWR)M310 机组为例, 分析电网频率变化对 PWR 机组运行的影响。M310 机组控制系统采用 G 模式(机跟堆模式), 其特点是设有温度调节棒组(R 棒组)和功率补偿棒组(G 棒组), 通过调节 R 棒组、调节 G 棒组和调节硼浓度来协调控制反应性, 使电厂具有快速跟踪负荷变化的能力。

## 1 拟研究电网频率扰动的工况

电力系统受到大的扰动时, 表征系统运行状态的各种电磁参数都要发生急剧变化。引起电力系统扰动的原因主要有以下几种:

(1) 负荷的突然变化, 如投入或切除大容量的用户等。

(2) 切除或投入系统的主要元件, 如发电机、变压器及线路等。

(3) 发生短路故障。

(4) 很多跟电网没有直接联系的活动也会影响电网的稳定性, 比如恶劣的天气条件, 高峰期的高用电需求, 或者穿越当地电网的大功率潮流等。

有的电力系统的扰动可能会触发自动停机停堆或导致机组孤岛运行, 反应堆操纵员根据已有的运行规程作出反应, 采取必要的行动来避免或减轻可能产生的后果。

有的电力系统的短暂扰动可能不会立即触发自动停机停堆, 则故障的正确判断和机组的控制就显得尤为重要, 否则, 有可能使机组偏离技术要求, 进而可能导致机组运行演变过程未必与预定的后续规程相符, 而此时操纵员没有恰当的规程可应对, 可能使工况进一步恶化, 甚至影响到反应堆的核安全。以下将对这 2 类电网扰动加以区分:

(1) 核电厂运行规程覆盖了的电力系统故障有: 厂外主电源丧失、厂外电源完全丧失、厂外电源丧失+LHP 不可用、厂外电源丧失+LHQ 不可用、电网故障引起的机组甩负荷后孤岛运行。这类故障都有相应的运行规程指导操作。

(2) 运行规程没有覆盖的电力系统初始暂态

有：电网频率下降或上升、电网自动重合闸动作成功、自动重合闸不成功、电网低电压故障等暂态。运行规程没有覆盖电网的某些渐变瞬态或小暂态，可能导致操纵员不能及时察觉、诊出和及时干预，等到异常工况演进到比较明显阶段才被操纵员所察觉，在紧张的情形下可能导致操纵员误判断，使工况进一步恶化。

本文着重分析核电厂运行规程没有覆盖的电力系统频率变化对压水堆机组运行的潜在风险和运行策略，为操纵员提供简单明了切实可行的操作预案，从而尽量避免忙中出错，减少人因失误。电网低电压故障对压水堆机组运行影响分析，笔者已有论文讨论，本文不再分析。

根据我国《电力工业技术管理法规》规定，正常运行时电力系统的频率应保持在  $50 \pm 0.2$  Hz。当电网的频率下降到 47 Hz 以下时，会导致电网发生频率崩溃，使电网瓦解，造成大面积停电，核电厂有丧失厂外电源的风险<sup>[1-2]</sup>。

在异常情况下，考虑主冷却剂泵的运行特性及堆芯的冷却效果，允许电网频率在 1~3 min 内运行在 47~49 Hz<sup>[3]</sup>。电网频率下降到 PWR 机组低频保护整定值 ( $f \leq 47$  Hz 且  $\Delta t \geq 0.5$  s) 时，主变压器开关自动断开，机组带厂用电运行，进入相应的规程。电网频率上升到高频保护整定值 ( $f \geq 51$  Hz 且  $\Delta t \geq 0.25$  s) 时，主变压器开关自动断开，机组带厂用电运行，进入相应规程。

因此，本文拟分析的工况为：机组功率运行工况下，电网频率从 49.8 Hz 逐渐下降直到接近参考机组低频保护阈值（包括频率、时间不同时满足阈值条件）、电网频率下降变化率过快，或电网频率从 50.2 Hz 上升到接近参考机组高频保护阈值（包括频率、时间不同时满足阈值条件）。

## 2 电网频率下降的风险分析

### 2.1 电网频率逐渐下降

电网频率下降且未达到机组低频保护阈值时，在一回路流量逐渐下降这一工况的初始时刻，由燃料传送到冷却剂的热量、一回路压力和堆芯入口水温变化不大，不会立即导致反应堆保护动作，堆芯入口和出口处水的焓差随流量的倒数而明显地变化，因为蒸汽含量上升，并且流量下降，因而临界热流密度下降，出现膜态沸腾的概率增大（烧毁比下降），可能出现燃料元件包壳

破裂事故。

2.1.1 可能导致偏离泡核沸腾裕量小信号产生 电网频率下降时，导致反应堆冷却剂泵转速下降，一回路流量下降，堆芯冷却效果不良，可能导致偏离泡核沸腾裕量小（C3）信号产生。该信号由一回路冷却剂热、冷段温差超过超温  $T$  阈值时产生，在超温  $T$  保护动作前 1 s 时触发，C3 信号闭锁手动和自动提控制棒，且触发汽轮发电机  $200\%P_n \text{ min}^{-1}$  的速率（ $P_n$  为额定功率）自动减负荷，每次持续 1.5 s，2 次中间停 28.5 s。这一系列自动动作的目的是限制偏离泡核沸腾比（DNBR）过小。

电网频率下降时，C3 信号触发汽轮机减负荷对电网频率的稳定更不利，但由于此时一回路流量下降，出于对反应堆的保护考虑，只能闭锁控制棒提升，禁止引入正反应性，同时减少汽轮机负荷以平衡一、二回路功率。

2.1.2 可能触发超温  $T$  保护 若上述 C3 信号通道故障等原因导致保护未触发，由于电网频率下降，主回路流量偏低，冷却效果不良，这时保护系统计算出的超温  $\Delta T$  保护阈值减小一些，以便及时保护，当主回路温差实测值达到超温  $\Delta T$  保护阈值时，可能会触发超温  $\Delta T$  紧急停堆保护，防止 DNBR 下降。保护的目的是：确保燃料元件处于合适的发热状态和包壳与冷却剂之间有良好的热传导。

2.1.3 可能触发反应堆冷却剂泵转速低紧急停堆保护 若上述 C3 信号和超温  $T$  保护通道共模故障等原因导致保护未动作，且电网频率继续下降，可能导致反应堆冷却剂泵转速降至 1365 r/min ( $\Delta t < 0.5$  s) 且 P7（反应堆核功率  $> 10\%P_n$ ）允许信号同时存在时，会触发反应堆停堆。保护的目的是：防止堆芯偏离泡核沸腾。

2.1.4 2 台反应堆冷却剂泵流量低允许信号触发紧急停堆 如果电网频率仍然继续下降至 47 Hz，但  $\Delta t < 0.5$  s，反应堆冷却剂泵转速下降至流量低于 88.8%，若上述保护都因失效未动作，则导致 2 台反应堆冷却剂泵流量低叠加 P7 允许信号触发反应堆紧急停堆。保护的目的是：防止一回路流量偏低导致反应堆功率不能及时导出，而引起反应堆燃料和包壳温度上升。

2.1.5 可能会出现的其他现象及后果 如果操纵员不及时干预，还将可能会导致整个核电厂所

有的异步电动机的转速下降，将产生热阱冷却方面的异常。例如：电网频率下降，循环水泵出力不足，导致冷凝器的真空变差，汽轮机末级叶片温度升高，存在汽轮机末级叶片断裂风险；冷凝器的真空变差，二回路循环热效率降低，在核电机组 G 模式运行情况下，为了维持汽轮机组的出力不变，汽轮机组调门开度会增大，一回路核功率升高，有触发  $109\%P_n$  高功率停堆保护的风险。

电网频率下降，重要厂用水系统/设备冷却水系统 (SEC/RRI) 泵的出力不足，会导致 SEC/RRI 系统流量受影响，可能存在供给重要设备冷却水温超过其安全功能设计限值的风险，甚至还可能会影响到余热导出系统、安全壳喷淋系统、反应堆换料水池及乏燃料冷却净化系统的安全功能。

## 2.2 电网频率下降速度过快

当电网频率瞬间以  $2.5 \text{ Hz/s}$  速度下降时，主冷却剂泵主力矩翻转，导致冷却剂流量降低速度大于电压丧失引起的流量降低速度<sup>[3]</sup>。可能触发的保护为：反应堆冷却剂泵转速降至  $1365 \text{ r/min}$  叠加 P7 允许信号触发紧急停堆，2 台反应堆冷却剂泵流量低叠加 P7 允许信号触发紧急停堆，1 台反应堆冷却剂泵流量低叠加 P8 (反应堆核功率  $> 30\%P_n$ ) 允许信号触发紧急停堆。

如果事故发生时反应堆运行在满功率，堆芯的热通量几乎无法输导，DNBR 临界的裕量减小。如果不能立即紧急停堆，一部分燃料组件就可能损坏。

## 3 电网频率上升的风险分析

电网频率上升且低于机组高频保护阈值时，反应堆冷却剂泵转速上升，一回路流量上升，堆芯冷却效果变好，使超温  $T$  保护阈值增加，由于温度效应同时会给反应堆引入正反应性，同时将引起堆内中子注量率上升，表现为燃料温度上升。最后，反应堆稳定在大于初始功率的新的功率水平。这种情形本身并不危险，但是，在这些初始条件发生这种事故所造成的后果可能超过设备的设计值<sup>[4-6]</sup>。

## 4 建议针对参考机组的应对措施

### 4.1 电网频率下降时操纵员的响应

(1) 机组的控制：当操纵员发现汽轮机转速及反应堆冷却剂泵转速下降时，应查询电网情况，并密切监视机组，必要时根据调度指令协助

恢复电网频率，不能擅自开大汽轮机主蒸汽阀。如果上述措施未能恢复电网频率，电网频率不断下降，操纵员应做好孤岛运行的准备，避免主泵转速降至  $1365 \text{ r/min}$  叠加 P7 允许信号存在，导致紧急停堆。若电网频率下降至  $f \leq 47 \text{ Hz}$  且  $\Delta t \geq 0.5 \text{ s}$ ，由于汽轮机调节系统在频率下降时为维持机组额定转速而将汽门全开，机组甩负荷后孤岛运行只带了约 5% 的负荷，汽门关小需要时间，汽轮机转速上升，频率上升，电压升高，操纵员应手动减少汽门开度，直到汽轮机转速恢复正常，并确认自动励磁系统调节发电机电压至额定值。此后汽轮机负荷手动控制，必须加强对机组的监视，并联系电网调度，一旦故障消除，尽快实现并网（恢复厂外主电源），将汽轮机负荷控制切换为自动控制。

(2)  $I$  的控制：频率不断下降，如果堆芯燃料处于寿期末，则氙毒比较大，而慢化剂温度效应更是寿期初的好几倍，因此氙振荡特别明显， $I$  很难控制， $I$  超出区使得堆芯出现不可控氙振荡的风险增大，可能导致机组的核安全水平严重降低。因此，机组速降负荷至孤岛运行的过程中，操纵员应该注意遵守本厂运行技术规范关于  $I$  的控制。负荷变化时利用多种手段协同控制反应性，以优化  $I$  的控制，使  $I$  尽量沿参考线运行。

(3) 操纵员应密切监视电网频率下降趋势，关注电力系统的低频减载是否动作，并在分析核电厂低频保护判据时必须要考虑：低频保护的各段动作频率和相应时限必须在核电机组厂用电频率异常运行允许的范围；低频保护必须根据核电机组所接入的电网的频率响应特性，与低频减载装置是否密切配合，尽可能减少汽轮机、发电机的跳闸，避免造成恶性连锁反应。

(4) 当电网频率持续下降时，如果操纵员不及时干预，电力系统的低频减载动作叠加核电厂低频保护同时动作，则会导致丧失厂外主电源。此时，操纵员应该做好孤岛运行的应对措施。

### 4.2 电网频率上升时操纵员的响应

汽轮机调速系统处于自由状态时，由于二回路功率变化大，且反应堆冷却剂泵转速随电网频率上升而上升，需密切注意一回路温度变化。多普勒效应、慢化剂温度效应可能使反应堆核功率上升。

机组稳定后, 操纵员的工作是联系电网调度询问电网情况, 并在接到电网通知“可以降低负荷”时, 将机组负荷降至要求负荷。

#### 4.3 针对电网频率扰动的预判

电网频率发生扰动时, 操纵员对机组与电网的运行趋势应做好预判, 提前做好应对措施。操纵员应该询问电网调度, 电力系统的低频减载是否已动作以及电网的稳定情况, 因为这关系到电网的频率是否会恢复正常。如果电网频率有可能进一步恶化, 操纵员要将结合核电厂频率保护定值与电网的保护及控制结合, 预判频率的变化将会导致本电厂机组状态如何变化, 并做好应对预案。核电厂汽轮发电机-主变压器组频率保护定值及对应的自动动作见表 1。

## 5 结束语

电网的暂态虽然种类繁多, 针对电网失电事故, 核电厂已有成熟的处理规程为对预想的事件次序做出响应提供指导, 并确认自动安全设施按

表1 核电厂发电机-主变压器组频率保护定值

Table 1 Predetermined Protection Value for Generator and Main Transformer in Nuclear Power Plant

保护名称	保护定值	动作对象	机组状态
低频	$f \leq 47\text{Hz}$ , $\Delta t \geq 0.5\text{s}$	跳主变开关	带厂用电, 孤岛运行
低频	$f \leq 47\text{Hz}$ , $\Delta t \geq 3\text{s}$	关主汽门, 跳发电机开关, 灭磁	停汽轮发电机、主变及厂用变
高频	$f \geq 51\text{Hz}$ , $\Delta t \geq 0.25\text{s}$	跳主变开关	带厂用电, 孤岛运行

设计要求动作。但是, 对于失电之前没有涉及的电网状况降级, 这些规程并不充分。尤其是, 对于电网状态降级但仍保持可用的情况, 操纵员或许并没有做好响应准备。因此, 本文分析了参考机组在功率运行工况下, 电网频率从 49.8 Hz 逐渐下降直到接近参考机组低频保护阈值或电网频率从 50.2 Hz 上升到接近参考机组高频保护阈值时, 且操纵员不及时干预, 电网频率异常变化可能触发反应堆保护动作, 若此时保护失效则可能带来潜在风险。本文针对电网频率变化的建议, 可以为操纵员提供分析的方法和参考的预案, 并通过研究和演练应对措施, 可以提高操纵员在电网频率异常变化时对机组的控制能力, 以保守地监控压水堆机组运行, 始终保持核电厂的安全限值有足够的裕度。

参考文献:

- [1] 沈善德. 电力系统辨识 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [2] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]第二版. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [3] RCC-E. 法国压水堆核电站建造标准. 核岛电气设备设计和建造规则[S]. 2002.
- [4] John Wiley & Sons Ltd.. "Transients in Power Systems [J], Lou van der Sluis, (2001): 97-102.
- [5] 郑福裕. 压水堆核电厂运行物理基础[M]. 北京: 原子能出版社, 1995.
- [6] 大亚湾核电培训中心编, 大亚湾核电站事故规程解读 [M] (第一版). 北京: 原子能出版社, 2007.

# Analysis and Countermeasures for Effects of Grid Frequency Change on PWR Unit Operation

Ding Weidong

Research Institute of Nuclear Power Operation, Wuhan, 430223, China

**Abstract:** In many analyzed events by WANO, operators relied solely on the reactor protection system to protect the reactor core without taking pre-emptive conservative actions. Especially during this off-normal grid conditions which was beyond the procedure guidance, these conditions may be further exacerbated by a reactor operator's inexperience. In this paper, the potential adverse effects of the grid frequency change on PWR units operation is analyzed, the appropriate contingency plans are proposed so that the reactor operators can respond correctly in time when this off-normal grid condition occurs, to avoid causing reactor scrams to protect the reactor core, and the operators can conservatively monitor the PWR units operation, and a prudent margin to the plant safety limitations is always maintained.

**Key words:** Grid frequency change, PWR units, Countermeasures

作者简介:

丁卫东 (1968—), 男, 高级工程师。2003年毕业于武汉大学电力电子与电力传动专业, 获工学硕士学位。现主要从事核电厂操纵人员执照考核试题编制和研究。

(责任编辑: 杨洁蕾)