

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.11.024

AP1000 反应堆冷却剂泵“3 s 供电”问题分析

严兆君¹, 吴 军¹, 宋光耀²

(1. 中国电能成套设备有限公司, 北京 100080; 2. 山东核电有限公司, 山东 海阳 265116)

摘要:针对 AP1000 核电技术中反应堆冷却剂泵因所采用的屏蔽泵转动惯量小、泵的惰走时间短,在汽轮机跳机后,如何保持反应堆冷却剂泵电机 3 s 供电时间的问题,结合 AP1000 核电厂系统固有特点,分析了“孤岛运行”、“机组满功率运行”、“机组满功率运行 + 500 kV 外电网失去”、“机组满功率运行 + 外电网失去”4 种极限工况特点。根据电网稳定性和堆芯偏离核态沸腾仿真结果,分析了汽轮机跳机后的电气系统响应和反应堆冷却剂系统响应。研究表明,在汽轮机跳机后能满足反应堆冷却剂泵 3 s 供电时间要求,以增加冷却剂强迫循环时间,实现安全停堆。

关键词: AP1000 核电; 冷却剂泵; 3 s 供电; 惰转

中图分类号: TM623

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)11-1432-04

Analysis of the “3 seconds power” of AP1000 reactor coolant pump

YAN Zhao-jun¹, WU Jun¹, SONG Guang-yao²

(1. China Power Complete Equipment Co., Ltd., Beijing 100080, China;

2. Shandong Nuclear Power Co., Ltd., Haiyang 265116, China)

Abstract: Aiming at how to retain 3 seconds power for the reactor coolant pump motor after the shutdown of steam turbine, because of canned-motor pump being applicated as the reactor coolant pump in AP1000 nuclear power, with small inertia and short running down time, the characteristics were analyzed under extreme conditions, such as “island operation”, “full power operation”, “full power operation + 500 kV power lose”, “full power operation and external power lose”, combined with the inherent characteristics of AP1000 nuclear power plant. The electrical system response and the reactor coolant system response were analyzed according to the simulation results of the power-grid stability and the reactor core DNBR. The research results indicate that the “3 seconds power” of reactor coolant pump after the shutdown of steam turbine can be satisfied to increase the forced circulation time of coolant and shut down safely.

Key words: AP1000 nuclear power; coolant pump; 3 seconds power; running down

0 引 言

在核电站一回路系统中,通过反应堆冷却剂泵的运行,建立强迫循环带出堆芯的热量。一旦反应堆冷却剂泵停转,意味着冷却剂强迫循环的失去,一回路只能靠自然循环的方式冷却堆芯,所以一般在设计中为了延长强迫循环的时间,泵往往带有较重的飞轮以增加转动惯量。

AP1000 核电技术中反应堆冷却剂泵采用屏蔽泵,相对而言其飞轮较小,亦即其转动惯量小,泵的惰走时间短,所以为了增加冷却剂强迫循环的时间,设计中要求在发生跳机事故时,仍有 3 s 时间持续给泵供电以延长泵转动时间,帮助建立充分的自然循环条件。

根据文献[1]的内容,“3 s 供电”问题具体要求为:

在电网稳定性分析中,当电力系统无故障时,在汽轮机跳机后至少 3 s 内,反应堆冷却剂泵的母线电压

收稿日期: 2014-07-25

作者简介: 严兆君(1963-),女,浙江宁波人,硕士,高级工程师,主要从事核电厂电气设计、采购管理等方面的研究。E-mail: yanzhaojun@cpcec.com

通信联系人: 吴 军,男,硕士,高级工程师。E-mail: wujun@cpcec.com

仍可维持在要求的定值之上,从而保证冷却剂泵的流量不小于设计基准事故分析中假设的流量。

汽轮发电机组有足够的转动惯量,以保证当机组未与电网并列、仅带厂用电运行时,若发生汽轮机跳机,则其惰转持续到发电机出口断路器断开的至少为 3 s。

如何保证反应堆冷却剂泵“3 s 供电”同时也为国家主管部门在 PSAR 审查中重点关注的问题。

本研究结合 AP1000 核电电气系统设计特点、设备参数及各种事故工况特性,进行分析如何满足冷却剂泵“3 s 供电”要求,实现安全停堆。

1 AP1000 反应堆冷却剂泵电气系统简介

AP1000 核电厂电气系统与一般压水堆核电厂相比,供电方式和系统结构不尽相同,具有其自身的特点,AP1000 反应堆冷却剂泵电气系统图如图 1 所示。

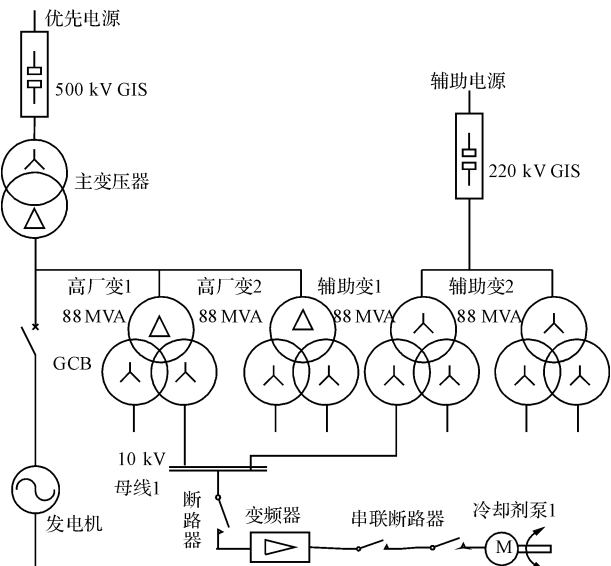


图 1 AP1000 反应堆冷却剂泵电气系统图

(1) 辅助电源来自厂外 220 kV 系统,厂内 500 kV 和 220 kV 系统的没有任何电气连接,不设置联络变。

(2) 发电机出口设置断路器(GCB),能够满足在厂内和厂外电力系统在短路事故下,正确动作、保护发电机;在电厂启动时,断开 GCB,厂用电采用 500 kV 的厂外优先电源。

(3) 厂用电系统按照单堆设置,堆间没有任何电气连接,中压母线和低压母线均无公用段,每台机组配置两台辅助变和高厂变,辅助变容量和高厂变容量相同都为 88 MVA,100% 备用方式,能够满足核岛和常规岛中压母线同时快切到不同变压器的要求。

(4) 4 台反应堆冷却剂泵电源引接分别来自常规岛 4 段中压母线。

(5) 反应堆冷却剂泵通过变频器供电,变频器的一

次侧输入电压为 10.5 kV,二次侧输出电压为 6.9 kV,变频器和反应堆冷却剂泵之间设置两个串联的断路器。

2 主要工况分析

针对 AP1000 核电厂的固有特点,下面重点分析运行中几种典型或极端的工况情况,其他运行工况可介于这类工况之间进行考虑。

2.1 “孤岛运行”工况

2.1.1 工况特点

(1) 发电机和外电网没有任何电气联系,包括优先电源和辅助电源回路均断开。

(2) 发电机带厂用运行,汽轮发电机组电功率等于厂用电功率,额定功率约为 5% ~ 6%。

(3) 发电机输出电压、频率随厂用负荷的变化波动大。

(4) 堆功率通常维持稳定在 30% 左右(不能超过旁路的容量)。

(5) 蒸汽大部通过旁路排放到凝汽器。

(6) 由于末级叶片在一定的低蒸汽流量下颤振、应力水平高,通常不允许汽轮机在该低负荷工况下长期运行。

此时,汽轮机跳机后将全厂停电、旁路闭锁,然后大气释放阀开启,一回路会在短时间处于绝热加热之下,该瞬态下要求反应堆冷却剂泵维持足够的冷却剂流量,确保堆芯最小的偏离核态沸腾比(DNBR)不超标^[2]。

2.1.2 工况分析

发电机不与厂外系统相连并带厂用电运行时,在保护配置上,汽轮机跳机不直接引起发电机出口断路器跳闸,而是由发电机低电压或励磁过流保护跳开发电机出口断路器。

汽轮机跳机后,转子惯性惰走,转速降低引起发电机机端电压降低。某 AP1000 核电项目汽轮机惰转曲线如图 2 所示。可以看出,跳机 3 s 后,转速降为约额定转速的 98%。同时按照现有发电机自动电压励磁调节器性能,电源电压在自动励磁调节器的控制下很容易保持在 85% 额定电压以上^[3]。

根据电机学原理,在发电机磁极对数不变的条件下,电机转速和电能频率成正比关系:

$$\frac{n}{n_0} = \frac{f}{f_0} \quad (1)$$

发电机转速下降 2% 时,电能频率同样下降 2%,频率波动在厂用负荷正常工作的范围内,不会引起厂用电保护的動作。再者在该频率波动范围内,变频器会根据电源频率的波动,自动调整反应堆冷却剂泵输

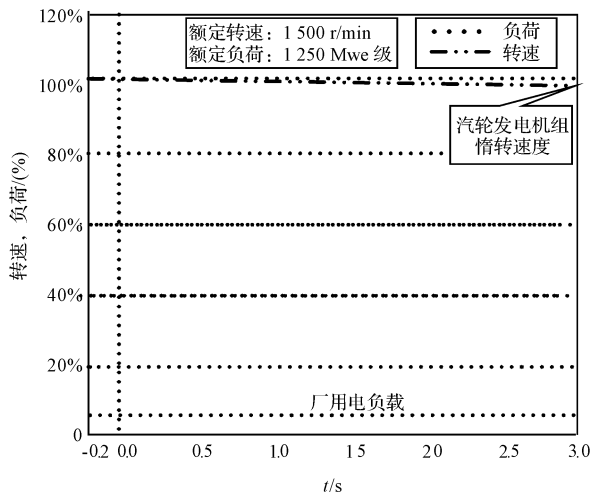


图2 汽轮发电机组惰转曲线

入电源的频率,使其维持在电机额定频率值不变。

所以 3 s 内不会出现发电机出口断路器跳闸,发电机至少能为反应堆冷却剂泵供电 3 s 时间。

为了验证停堆过程中 DNBR 不超标,本研究需对 DNBR 进行瞬态分析。由于反应堆满功率时比低功率的瞬态事故更为严重,可根据西屋公司 VIPRE-01 程序计算“满功率运行+外电网失去+汽轮机跳机”工况下的 DNBR,该 DNBR 可包络孤岛运行工况下汽轮机跳机引起的停堆。

在保证汽轮机跳机后能利用汽轮机组惰转再继续供电 3 s 中:

(1) 厂用电要保持稳定,该点对继电保护提出了高要求,必须杜绝保护或开关不动作、故障越级扩大事故的发生。

(2) 汽轮发电机组的转动惯量足够大,惰转 3 s 时的转动频率仍保持在所要求的反应堆冷却剂泵供电频率之上。

(3) 为始终保证反应堆冷却剂泵在失电惰转前就有所要求的转速,在汽轮机跳机前,要使发电机发出适当的无功功率以维持厂用母线电压。

2.2 “机组满功率运行”工况

2.2.1 工况特点

(1) GCB 和主变高压侧断路器均闭合,扣除厂用电外,发电机以满功率并网运行。

(2) 发电机提供厂用电,厂内 6 段中压母线进线电源均引自两台高厂变,备用电源引自两台辅助变,且处于热备用状态。

(3) 堆功率稳定在 100%,反应堆出口的蒸汽全部送汽轮机做功。

2.2.2 工况分析

若汽轮机跳机,发电机变为同步电动机挂网运行,

发变组保护检测到逆功率信号后,延时 15 s 跳开 GCB,反应堆冷却剂泵电源通过 500 kV 电力系统经主变倒送厂用电实现,不存在“3 s 供电”要求。

目前核电厂址所在沿海各省的电力系统都相当庞大,个别省份装机容量达到近 1 亿千瓦,整个电网结构紧密,抵御故障能力较强。相关文献[4-6]已对类似项目进行过分析研究。以山东某 AP1000 核电项目为例,对 500 kV 电网失去一台百万机进行仿真,电压波动曲线如图 3 所示。从仿真曲线来看,失去一台百万机后,厂内 500 kV 母线电压仍能保持稳定。

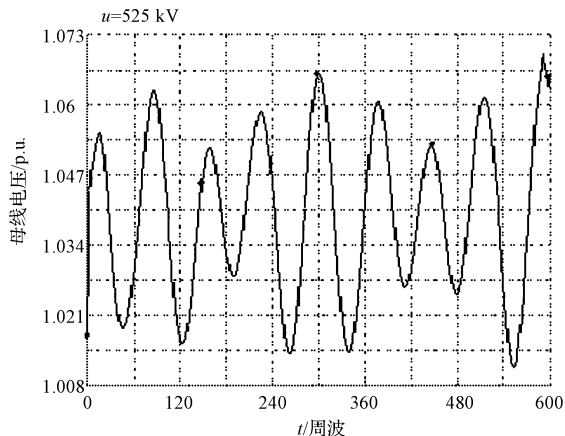


图3 切百万机后厂内母线电压波动曲线

按照故障叠加原则分析,若 GCB 拒动,失灵继电器动作,启动失灵保护,主变高压侧断路器、GCB、厂内 6 段中压母线进线开关同时跳开,辅助电源快速切换。鉴于辅助变的设置为 100% 明备用,反应堆冷却剂泵电源能够快速过渡到稳定工况。保护配置中快切时间为 6 个周波(120 ms),母线失电时间大约在 40 ms ~ 60 ms,反应堆冷却剂泵的电源能够得到快速切换,同样不存在“3 s 供电”的问题。

2.3 “机组满功率运行+500 kV 外电网失去”工况

2.3.1 工况特点

该工况基本特点和 2.2.1 相同,仅故障类型不同。此时,失去 500 kV 外电网,机组进入孤岛运行,但 220 kV 辅助电源可用。

2.3.2 工况分析

厂外 500 kV 电网故障(例如短路),由于保护动作的选择性,主变高压侧断路器跳开,汽轮机和发电机快速甩负荷至厂用电,维持反应堆冷却剂泵正常供电。发电机组甩负荷瞬间,机端电压和频率是先陡然升高后逐步降低。即使在汽机跳闸后 3 s,厂用母线电压和频率也不会较额定值下降很多^[7]。

如果主变高压侧断路器拒动,则失灵保护动作,联跳发电机出口断路器(GCB),自动装置检测到失电信

号后,启动母线快切至 220 kV 辅助电源来满足冷却剂泵“3 s 供电”。

2.4 “机组满功率运行+外电网失去”工况

2.4.1 工况特点

(1)堆芯和发电机均以满功率运行,发电机提供厂用电,厂内 6 段中压母线进线电源均引自两台高厂变。

(2)考虑失去外电网电源是由于汽轮机跳机导致电网崩溃这一连串事故引发的厂内电气系统(例如高厂变相间短路)和厂外电力系统同时故障。

(3)从汽机停机到失去厂外电源之间,假定一个合适的延迟时间为 3 s,该延迟时间的假定是基于厂外电网的固有稳定性。

(4)GCB 和 500 kV 高压侧断路器跳开后,220 kV 辅助电源快切失败,发生全厂断电。

2.4.2 工况分析

该种工况属于极限事故,发生的概率极低。一旦发生,反应堆冷却剂泵电机在全厂失电后将会得不到工作电源,进入惰转。此时反应堆处在高功率状态下,一回路冷热段温差大,4 台反应堆冷却剂泵惰转后容易过渡到自然循环。反应堆冷却剂泵惰转过程中,反应堆冷却剂流量下降,同时冷却剂泵低转速信号将直接触发反应堆停堆。在该瞬态下,反应堆冷却剂泵维持的冷却剂流量要确保堆芯最小的 DNBR 不超标。

根据西屋公司 VIPRE-01 程序计算,4 台反应堆冷却剂泵惰转下,DNBR 瞬态分析最小大概为 2.7 左右,四泵惰转下 DNBR 分析如图 4 所示。偏离核态沸腾(DNB)设计基准能够得到满足(最小 DNBR 为 1.21)。

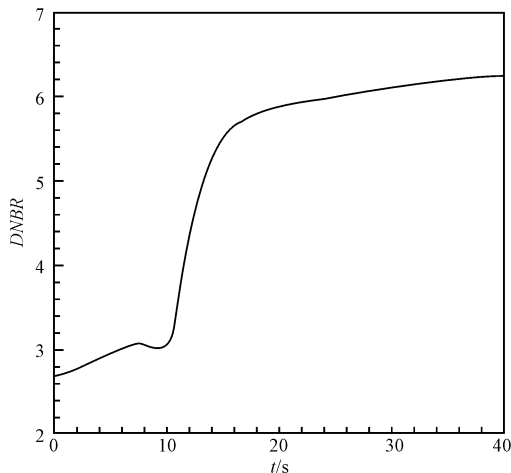


图 4 四泵惰转下 DNBR 分析

同时该工况是失去蒸汽负荷事故中对 DNB 裕量的最高限制。在该工况下,稳压器安全阀将动作,可维持反应堆冷却剂系统的压力在安全设计压力之下^[8-9]。

此外,根据西屋公司反应堆冷却剂泵采购技术规格书的要求,反应堆冷却剂泵的飞轮惰转流量下降曲线(半流量时间 5 s 时)可以保证堆芯在 I、II 类工况下,在 95% 置信度下有 95% 的概率不发生 DNB;针对全部失流事故工况下,AP1000 仍有 19% 的热工设计裕量。

3 结束语

反应堆冷却剂泵被喻为核电站的“心脏”,是反应堆冷却剂系统的循环动力和压力边界设备之一。由于 AP1000 核电中反应堆冷却剂泵采用屏蔽泵,其转动惯量小,泵的惰走时间短,在汽轮机跳机后需维持 3 s 的能动电源要求。其目的是为了保证一回路冷却剂再继续流动一段时间,以实现安全停堆。

本研究结合 AP1000 核电项目固有特点,分析了 4 种典型极限事故工况下的电气系统响应和反应堆冷却剂系统响应;分析了在汽轮机跳机后如何满足反应堆冷却剂泵 3 s 的能动电源要求;对后续 AP1000 核电厂初步设计和初步安全分析具有重要借鉴意义。

参考文献(References):

- [1] Westinghouse Electric Company. AP1000 Design Control Document[Z]. Westinghouse Company, 2011.
- [2] 林诚格. AP1000 非能动安全先进核电厂[M]. 北京:原子能出版社, 2008.
- [3] 吴国平. ABB UNITROL® P 型励磁系统性能特点综述[J]. 江西电力, 2004, 29(4): 4-6.
- [4] 赵勇. 大容量核电机组接入对电网的影响分析[D]. 济南:山东大学电气工程学院, 2013.
- [5] 施希. 大型压水堆核电站接入电网的理论和技术研究[D]. 武汉:武汉大学电气工程学院, 2009.
- [6] 丛国辉, 王元, 马家炯, 等. 百万千瓦级核电厂主泵轴封技术现状及发展趋势[J]. 流体机械, 2013, 41(12): 36-42.
- [7] 李志军. 发电机突甩负荷机端过压机理分析[J]. 水电厂自动化, 1998, 66(2): 35-37.
- [8] 郭玉君, 张金玲. 反应堆系统冷却剂泵流量特性计算模型[J]. 核科学与工程, 1995, 15(3): 220-225.
- [9] 王宝生, 王冬青. 全厂断电事故下 AP1000 非能动余热排出系统瞬态特性数值分析[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(9): 1514-1521.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

严兆君, 吴军, 宋光耀. AP1000 反应堆冷却剂泵“3 s 供电”问题分析[J]. 机电工程, 2014, 31(11): 1432-1435.

YAN Zhao-jun, WU Jun, SONG Guang-yao. Analysis of the “3 seconds power” of AP1000 reactor coolant pump[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(11): 1432-1435.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>