

AP1000 核电厂反应堆冷却剂泵的 供电与控制设计

韩 勇, 刘飞洋, 刘文静, 高 永

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术国家级重点实验室, 成都, 610041

摘要: AP1000 核电厂反应堆冷却剂泵采用屏蔽泵, 其电机受自身设计参数以及运行工况的限制, 需要采用变频调速来满足其运行和技术要求。针对这一特点, 对冷却剂泵的供电方式、中压变频技术以及控制逻辑进行研究, 以期能全面掌握 AP1000 核电技术, 并将这些技术应用到三代电厂的自主设计中。

关键词: AP1000; 反应堆冷却剂泵; 中压变频器; 单元串联; 矢量控制

中图分类号: TM645; TM623 **文献标志码:** A

0 前 言

AP1000 三代核电厂的反应堆冷却剂系统 (RCS) 由 2 条环路组成, 每条环路有 1 台蒸汽发生器 (SG)、2 台反应堆冷却剂泵 (RCP) 以及 1 条热段管道和 2 条冷段管道。RCP 采用屏蔽泵, 其电机受自身设计参数以及运行工况的限制, 不能采用全电压直接启动方式, 需要采用变频调速来满足其运行和技术要求, 因此, RCP 的供电和控制方式与二代核电相比有较大的差异, 在设计上具有明显的自身特点和技术特征。

1 AP1000 反应堆冷却剂泵的供电设计

1.1 负荷特点

(1) RCS 正常运行时, 热态电功率仅为冷态时的 75% 左右。RCP 的屏蔽电机功率是按热态时工况温度为 271 确定的, 该工况温度低于 RCP 正常功率运行温度 (280.7~291.7), 屏蔽电机在电厂正常功率下运行时具有足够的功率余量, 而在冷态启动或低于 271 温度下运行时, 必须降低 RCP 转速, 使电动机功率限制在设计功率以下运行^[1]。

(2) AP1000 三代核电厂中 RCP 的电机频率是按 60 Hz 设计的, 而我国电网频率为 50 Hz, 因此需要对供电电源的频率进行调节, 以满足 RCP 的运行要求。

1.2 供电方式

在 AP1000 三代核电厂的电气系统设计中, 4 台 RCP 分别由 4 段 10.5 kV、频率 50 Hz 中压母线, 经中压变频器 (VFD) 和 1E 级 6.9 kV 开关柜供电^[2]。

在核电厂正常运行期间, VFD 需要长期运行, 以便将 10.5 kV、50 Hz 电源转换成 6.9 kV、60 Hz 电源后供电给 RCP。每台 RCP 的 2 个 1E 级 6.9 kV 断路器串联连接, 以满足 RCP 的安全相关的跳闸要求。RCP 断路器为 AP1000 三代核电厂交流供电系统中唯一的安全级电气设备。

1.3 设备特性

1.3.1 变频器 RCP 变频器为非 1E 级设备。但是, 由于任何 1 台 RCP 停运将导致反应堆停堆, 其供电可靠性直接影响电厂的可用率, 因此将变频器归为 R-1 级的“关键可靠性”物项 (R), 同时在 0.3g 加速度情况下, 保持结构的完整性。AP1000 核电厂所用中压变频器的转速调节范围为 -85%~100% 额定转速。

变频器性能主要表现在以下 5 方面:

(1) 可靠性: VFD 的控制系统、外部输入控制电源为冗余设计, 2 套冗余的冷却系统交替运行, 每套冷却系统都能为 VFD 提供 100% 的冷却; 功率单元容量的选择上增大一级, 达到 1200 A 规格, 以保证在电网供电品质变坏的情况

下维持 RCP 的转速；VFD 采用中性点漂移技术，可以在功率单元发生故障时自动快速（250 ms 内）旁路故障单元，通过调节三相输出电压之间的相位，确保输出线电压仍保持三相对称，最大程度提高电源利用率。

设备每相配有 6 个功率单元，实际上每相只需 5 个功率单元就可以输出 6.9 kV 以上，因此即使一相上坏了 3 个功率单元，VFD 也可以通过中性点漂移技术使输出电压达到 6.2 kV，足以维持电机在 80% 以上的额定电压运行而无需停机。

(2) 谐波控制：VFD 采用的是多重化移相变压器^[3]，输出采用多电平移相式（PWM）的单元串联 36 多脉冲整流方案，使输入谐波满足 IEEE 519-1992 “电力系统中的谐波控制推荐实施和要求”标准规定。输出采用 PWM，同一相中不同串联单元的三角形载波互差一定相位，以增加输出电压台阶，提高等效开关频率，改善输出电压波形，使输出至 RCP 电流谐波小于 1%。

(3) 抑制输出电压变化率和共模电压：较高的输出电压变化率可能引起电动机绝缘损坏。变化率的大小主要取决于：电压跳变台阶的幅值，这与 VFD 的电压等级和主电路结构有关；VFD 功率器件的开关速度，开关速度越高，变化率越大。AP1000 变频器采用的单元多电平方案，其输出电压变化率远远低于其他类型的 VDF，开通时约为 900 V/ μ s，使得电机绝缘不会受到影响，对电缆的长度也没有限制。共模电压即电机的零序电压。如果电源的中性点接地，电机外壳也接地，VFD 在没有输入变压器的情况下，共模电压会施加到电动机定子绕组和外壳之间，最大可接近相电压峰值，会严重影响电机绝缘。AP1000 变频器采用多重化移相变压器，由于分布电容的影响，约 90% 的共模电压由输入变压器承担，不会影响电机绝缘。

(4) 调速性能：VFD 采用无速度传感器矢量控制技术，在不采用速度传感器反馈转速的情况下将转速控制在要求速度 ± 90 r/min 精度以内，同时具有转矩限幅、快速转速跟踪再启动等功能，可有效防止加速过程中的过电流跳机和减速过程中的过电压跳机以及其他不正常的停机^[4]。

(5) 能量回馈：常规的单元串联式多电平变频器采用二极管整流，能量无法向电网回馈，导

致变频器制动能力非常弱^[4]。为控制 RCP 从 -85% 速度至正转，AP1000 变频器采用可控功率单元整流电路，实现能量双向传输，将 RCP 再生发电制动中产生的能量回馈至电网侧。

1.3.2 安全级 6.9 kV 开关柜 每台 RCP 设置了 2 个不同序列的断路器（B 序列和 C 序列），以满足冗余性要求。断路器在设计基准事故下要求执行安全级跳闸功能，这是断路器执行的唯一 1E 级功能。根据设计可靠性保证程序（D-RAP），开关柜作为具有重大风险的系统、设备或部件（SSC），并被分类为 R-2 级“关键可靠性”物项（R-Item），为抗震 I 类设备。

2 RCP 的控制

RCP 的控制方式分手动和自动，控制信号分别来自保护和安监视系统（PMS）、电厂控制系统（PLS）、多样化驱动系统（DAS）和 VFD。

2.1 启泵控制

RCP 只能在 PLS 手动启动。RCP 必须满足以下条件后才能手动启动：

(1) 最小气蚀裕量符合要求。

(2) 如果 RCS 冷段温度小于等于 177 °C，则每台 SG 二次侧给水温度必须小于每个有效的冷段温度 28 °C。

(3) 如果任意一个有效的 RCS 热段温度大于等于 177 °C，则稳压器水位必须小于 92%。

(4) 速度需求应设为 17.5% 同步转速（315 r/min），且任何运行的 RCP 的速度需求应为 17.5%（315 r/min）。

(5) 反应堆停堆断路器未合闸。

(6) VFD “准备运行”信号具备。

RCP 启动流程见图 1。

为了防止在共振频率下运行，设置了下列 5 个转速点，主泵只能在这 5 个转速点长期运行：

(1) 0%，表示不运行或停运的泵。

(2) 17.5% 同步转速（315 r/min），表示泵启动和最小流量。

(3) 50% 同步转速（900 r/min），用于提供稳压器喷雾。

(4) 88% 同步转速（1584 r/min），用于在冷段温度低于 274 °C 时限制泵的功率。

(5) 100% 同步转速（1800 r/min）。

启动时刻，操纵员逐一将每台 RCP 启动至

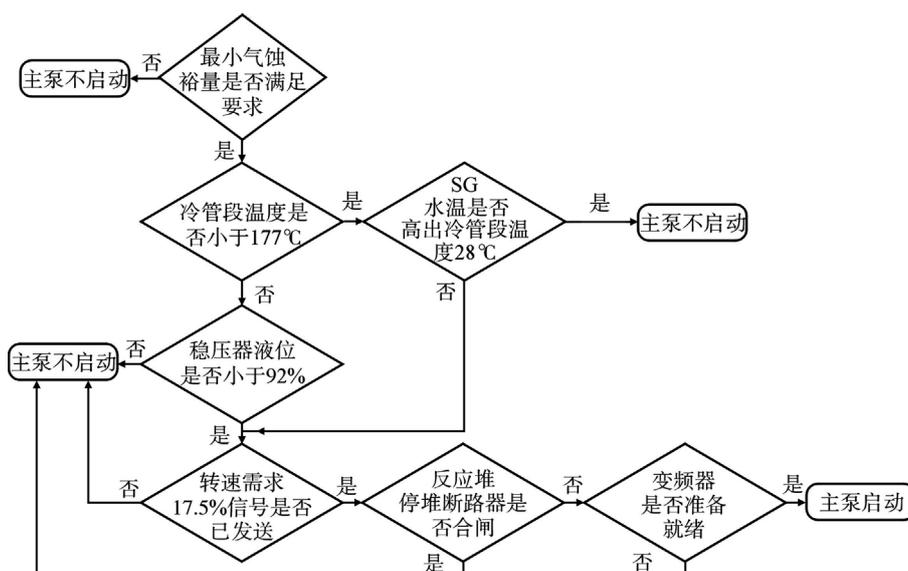


图1 RCP启动流程图

Fig. 1 Flow Chart for RCP Start

17.5%同步转速，之后再同时提高4台RCP的转速，最终直至100%同步转速。需要注意的是88%同步转速工况因会加速堆芯包壳材料磨损而无法长时间运行，每个换料周期只允许运行120h，设有报警信号提醒操纵员。

2.2 停泵控制

RCP可由PLS或VFD手动停泵，也可以通过PMS和DAS自动停泵。其停泵命令为：

(1) PLS：RCP正常停车时，通过PLS系统将4台RCP转速同时降到17.5%同步转速，然后使RCP进入自然惰转状态，不受变频器控制，使每台RCP逐一停车。

(2) PMS：停泵命令包括轴承水温过高、超速、稳压器压力低3、稳压器水位低2、蒸汽管线压力低2、安全壳压力高2、冷段温度低2、CMT动作、ADS动作、SG水位低2同时热段冷却剂温度高。

PMS系统信号经2/4处理后断开2个冗余的1E级RCP断路器。

(3) DAS：停泵命令包括SG水位低2、稳压器水位低、CMT动作。

DAS系统信号将断开变频器上游母线断路器以提供多样化的停泵手段。

(4) VFD：VFD上提供手动紧急停车按钮以在特殊工况下停止变频器的输出。此外，VFD/电机保护信号可断开变频器。

3 结束语

介绍了AP1000核电厂RCP的技术特点和运行工况，以及供电方式、中压变频技术和控制逻辑。由于AP1000核电厂的RCP采用60Hz屏蔽泵，VFD需长期运行。虽然采用冗余设计、中性点漂移等技术提高了VFD的可靠性，同时通过设置不同的转速点和控制联锁确保了RCP的稳定运行，但这种设计还是存在因VFD故障造成的意外停堆风险，并且过高的设备可靠性要求也带来了技术难度和经济成本的增加。

在今后自主化设计中，采用50Hz屏蔽泵是降低意外停堆的最佳方式，变频器在核电厂正常运行时处于旁路状态，仅在RCP启动和停运时才投入运行，可以有效地提高RCP供电的可靠性，确保核电厂长期稳定和经济地运行，但采用50Hz主泵对系统、结构的影响还需深入地分析和研究。

参考文献：

- [1] 孙汉虹, 程平东, 缪鸿兴, 等. 第三代核电技术AP1000[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 林诚格, 郁祖盛, 孙光弟, 等. 非能动安全先进压水堆核电技术[M]. 北京: 原子能出版社, 2010.
- [3] 吴忠智, 吴加林. 变频器应用手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [4] 竺伟, 陈伯时, 周鹤良. 单元串联式多电平高压变频的起源、现状和展望[J]. 电气传动, 2006, 06: 10-14.

Electrical and Control Design for Reactor Coolant Pumps in AP1000 Nuclear Power Plant

Han Yong, Liu Feiyang, Liu Wenjing, Gao Yong

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China

Abstract: The Reactor Coolant Pumps (RCP) of AP1000 nuclear power plant are the canned motor pump. Because of the restriction of the RCP motor design parameter and operation mode, the Variable Frequency Drive (VFD) shall be used to meet the operation and technical requirements. This paper studies the power supply mode, MV VFD technical and control logic of the RCP, so that the key technology of the AP1000 nuclear power plant can be totally caught and applied to the independent design of the third generation nuclear plants.

Key words: AP1000, Reactor coolant pump, MV VFD, Cell-series, Vector control

作者简介：

韩 勇（1963—），男，高级工程师。主要从事反应堆电气系统及设备的设计和研究工作。

刘飞洋（1982—），男，工程师。2007 年毕业于哈尔滨工程大学控制理论与控制工程专业，获硕士学位。现从事反应堆电气设计工作。

刘文静（1984—），女，工程师。2006 年毕业于北京建筑工程学院电气工程及其自动化专业，获学士学位。现从事反应堆电气设计工作。

（责任编辑：刘 君）