

系统与附件

一种核电控制棒驱动机构电源系统研制

朱卫华

(海装驻西安地区第五军事代表室,陕西 西安 710000)

摘 要: 针对核电站发电机组高稳定性和高可靠性等要求,设计了一套核电控制棒驱动机构电源系统(RAM)样机。该系统样机由两台电动机-发电机组和控制柜、断路器柜组成。从无功功率分配、系统监测保护和并网设计等方面对核电控制棒驱动机构电源系统进行设计,其中并网设计是该系统样机的核心技术。通过两种并网方式优劣对比,选择加载并车电阻方式。经试验验证:样机各项性能指标满足技术要求;采用加载并车电阻并网方式,一次并车成功率超过 90%,并车时间基本控制在 20 s 以内。

关键词: 电源系统;控制棒驱动机构;并网;无功功率

中图分类号: TL503.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2021)02-0042-04

The Development of the Power System for Control Rod Drive Mechanism of Nuclear Power Plant

Zhu Weihua

(Fifth Navy Representative Office in Xi'an, Shaanxi Xi'an 710000)

Abstract: To meet with the high requirements of gensets used in nuclear power plant with regard to stability and reliability, a power system for control rod drive mechanism of nuclear power plant (RAM) prototype was developed. The RAM prototype was composed of two M. G units, control cabinet and circuit breaker cabinet. The RAM was designed from the aspects of reactive power distribution, system monitoring and protecting, and parallel performance, among which the parallel design is the core technology of this RAM prototype. By comparison of two parallel methods, load parallel resistance was selected. Tests show that the performance of the prototype meets with the technical requirements. And using load parallel resistance, the success rate of parallel at the first time is more than 90%, and the time of parallel is controlled within 20 s.

Key words: power system; control rod drive mechanism; parallel; reactive power

0 引言

核电控制棒驱动机构电源系统(power system for control rod drive mechanism, 简称 RAM)的任务就是确保为控制棒驱动机构(control rod drive mechanisms, 简称 CRDM)稳定供电。正常工作时,2 台电动机-发电机组(Motor Generator, 简称 M. G 机组)并列同步运行,分别由 380 V 交流

母线供电;若其中一台因故断电(瞬态跌落或停电),1.2 s 内,另一台必须在过渡过程内能继续维持所要求质量的电能供给,即 M. G 机组的飞轮惯性储能必须保证 1.2 s 的电能供给。控制棒驱动机构电源系统是二代加核电站 CRP1000 和三代核电站 AP1000 反应堆的重要设备,其可靠性直接影响核电站机组的可用率。

收稿日期:2019-09-28;修回日期:2020-12-31

作者简介:朱卫华(1976—),高级工程师,主要研究方向为内燃机相关技术,zwh254@sohu.com。

1 系统组成与性能要求

1.1 系统组成

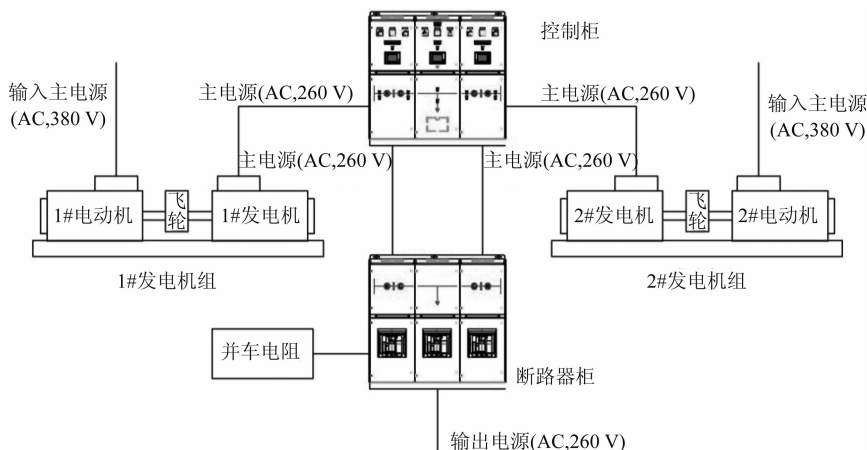


图1 核电控制棒驱动机构电源系统样机示意图

M. G 机组由异步电动机、同步发电机、飞轮、底座等组成，由外部给异步电动机供电，带动飞轮和同步发电机转动发电。

控制柜由 1#发电机组控制柜、同步控制柜、2#发电机组控制柜组成。每个控制柜配备西门子 PLC 控制系统与 HMI 人机界面。1#发电机控制柜与 2#发电机控制柜内均配备了一套励磁控制器，对发电机励磁进行调节控制。控制柜具有手动控制与自动控制两种模式。手动控制模式由控制继电器实现，自动控制模式由 PLC 实现。两种控制模式相互独立，当任一控制模式发生故障时，另一种模式仍可正常运行。

断路器柜由 1#发电机断路器柜、2#发电机断路器柜和出线柜组成。1#发电机断路器柜和 2#发电机断路器柜分别配置了发电机断路器以及相关的互感器。出线柜配备了并车电阻的接触器和断路器，以及母线所需的互感器。各个柜子之间的母线采用铜排连接。

1.2 系统性能

核电站控制棒驱动机构电源系统样机性能要求如下。

(1) M. G 机组应由电站三相 380 V 供电系统供电。两套 M. G 机组正常情况下应同时并网运行。每一套都应单独具备向 CRDM 提供满足要求的电压的能力，使得 RAM 系统不会因某套机组发生故障而停止运行。在 M. G 机组失电一定时间内，飞轮应有足够的惯性以允许的频率与电压向 CRDM 供电。

(2) 控制杆抽回、保持与插入操作均须由

核电站控制棒驱动机构电源系统样机由两台 M. G 机组和控制柜、断路器柜组成，如图 1。

M. G 机组供电，故 M. G 机组的动态特性须满足负载的变化。两套 M. G 机组设计为全压启动。在 F_n （额定功率）、 $0.8 U_n$ （额定电压）或 U_n 下，启动电流应小于等于额定电流的 6.6 倍（允许 20% 的误差），启动时间应小于 29 s。

(3) 在通常情况下，两台 M. G 机组处于同步状态，并向 CRDM 提供 260 V 电压，后者应能在反应堆操作过程中保持连续操作。M. G 机组可以承受功率变化并保持同步。如果一套 M. G 机组由于维修或是供电故障停止，另一套可以单独给 CRDM 提供电源。另外，在所有非正常情况下，M. G 机组电机接触器应保持闭路，飞轮应在一定时间内保持 M. G 机组运转，限制电压、频率下降。瞬态负载从零到额定功率时，或者从额定功率至零时，不会导致 M. G 机组瞬态电压变化超过 10%。在任何工况条件下，M. G 机组输出电压变化均不会超过 10%。

(4) 当 M. G 机组发生逆功达 2%，或差动电流达 5% 时，控制柜向断路器柜发出保护跳闸信号，使发电机断路器跳闸。当母排频率异常或者 M. G 机组频率异常时，控制柜也应发出保护跳闸信号至断路器柜，使发电机断路器跳闸。通过控制柜监测 M. G 机组的绕组温度、轴承温度、电压、电流、功率、频率等，当这些参数发生异常时可以实现声光报警。

2 系统设计

2.1 无功功率分配研究

发电机励磁控制系统是同步发电机的重要组成

部分, 其特性直接影响电机及电力系统运行的可靠性和稳定性。

当两台并联运行发电机的电势不相等而频率、相位相等时, 两台机组之间将产生一个无功性质的环流, 导致电势较高的发电机输出的无功功率增大, 而电势较低的发电机输出的无功功率减少。这是由于发电机负载电流功率因数低的无功功率大; 功率因数高的无功功率小。当环流相差太大时, 会引起一台发电机电流过载而烧坏。因此, 须自动调整发电机的励磁来改变环流, 使无功电流的分配不均度保持在允许范围内。由此可见, 当同步发电机并联运行时, 须对无功负荷进行合理的转移和分配。

对于调压特性为有差特性的发电机系统来说, 发电机并联运行时可以做到无功功率的合理、稳定分配。但实际上, 由于励磁系统的非线性及调节的不可控性, 发电机系统的调压特性不能做到线性下降。而且, 由于不同机组存在差异等原因, 无功功率的分配受到影响。一种常用的解决办法是联均压线。均压连接法又称转子均压连接法, 它只适用于同容量、同型号发电机的并联运行。它是将并联运行发电机的励磁绕组通过两根均压线并联起来。均压线的接通和断开与发电机主开关相互连锁。样机 M. G 机组配备无刷励磁系统, 故无法使用均压线方式进行无功功率分配。

假设不计饱和影响, 电机电磁功率 P_{em} 和输出 P_2 均为恒定, 端电压 U 保持不变,

$$P_{em} = \frac{mE_0 U \sin\theta}{X_l} = \text{常数} \quad (1)$$

式中: E_0 为空载电动势, X_l 为同步电抗。

$$P_2 = mUI \cos\varphi = \text{常数} \quad (2)$$

则忽略电枢电阻后 $P_{em} = P_2$, 即

$$\frac{E_0 \sin\theta}{X_l} = I \cos\varphi = \text{常数} \quad (3)$$

E_0 与励磁电流 I_f 有关, 即

$$E_0 = f(I_f) \quad (4)$$

同步发电机的相量图如图 2 所示。

由以上分析可知: 当原动机输入功率不变, 即发电机输出功率 P_2 恒定时, 改变励磁电流 I_f 将引起同步电机定子电流大小 I 和相位 φ 的变化。因此无功功率的调节应基于励磁电流的变化。通过自动电压调节器 (Automatic Voltage Regulator, 简称 AVR) 调节励磁电压与电流可以实现无功功率的调节, 从而实现两台 M. G 机组无功功率均匀分配。

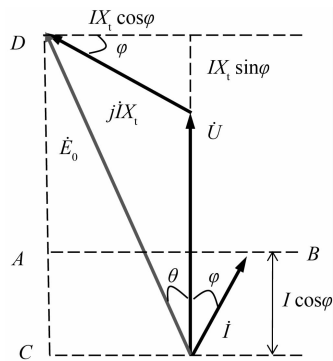


图 2 同步发电机相量图

2.2 监测保护设计

发电机的安全运行对确保电力系统的正常工作和电能质量起着决定性作用, 而其本身也是昂贵的电气设备, 因此, 应装设性能完善的继电保护装置, 以应对不同的故障和不正常工作状态。根据需要, 样机设置了发电机差动保护、逆功保护、过流保护、励磁保护、频率异常保护、欠电压保护及母排频率、电压异常保护。

样机控制柜配备了 PLC 控制系统与触摸屏, 以及监测报警系统, 可对 M. G 机组的相关参数, 包括: 绕组温度、轴承温度、电压、电流、频率、有功功率、无功功率、功率因素等进行监测, 并在超标情况下报警。电压、电流、频率、有功功率、无功功率、功率因素等电能参数通过多功能数显表统一采集和计算后, 通过 RS485 通讯送至 PLC。轴承温度、绕组温度等由 PT100 的温度传感器, 通过 PLC 的模拟量采集模块直接采集。各类保护动作均为开关量, 通过 PLC 的开关量采集模块直接采集。通过表格页和图形页将参数在触摸屏上显示。

2.3 并网设计

两台 M. G 机组并网技术是核电控制棒驱动机构电源系统样机的核心技术。两台 M. G 机组互为冗余热备份, 故两台 M. G 机组须并网发电。由于 M. G 机组是由电动机带动发电机发电, 而电动机的电源为非变频电源, 无法通过调节电源频率调节转速。而发电机组并网必须满足两台机组电压、频率、相位均一致才可并网, 所以须通过一种新方法调整发电机频率。

根据不同原理, 先后设计了两种调节发电机频率的方法。方法一: 瞬时断开上游接触器再重新合上, 使电动机短时失电, 降低转速后重新提速以改变发电机频率; 通过同期装置检测两台机组的频率、相位、电压, 一致时合闸断路器并网。方法二: 给一台发电机组突加负载, 使得发电机组的电

源频率下降后再缓慢上升；通过同期装置检测两台机组频率、相位和电压，一致时合闸断路器并网。两种方法各有优劣。方法一控制逻辑简单、操作方便，但是一次成功率较低，导致接触器频繁合闸，电机频繁启动，从而增加了系统损伤，降低了系统寿命；方法二虽然控制逻辑复杂，但是一次成功率高，对系统影响小、损害少。综合比较决定采用方法二的方式并网。

3 系统试验

3.1 性能试验

对核电控制棒驱动机构电源系统样机开展性能试验。分别测试电动机启动时间、电动机启动电流、发电机动态特性、发电机稳态特性、发电机励磁特性、机组失电保持特性等性能指标，结果均符合技术要求。试验过程中，M. G 机组的各个轴承温度、绕组温度、电压、电流、频率、功率因素、有功功率、无功功率等的监测数据均处于正常范围内。模拟各种故障，差动保护、过电流保护、欠电压保护、频率异常保护、逆功保护等保护措施与各项报警功能均正常动作，设定值符合技术要求。图 3 所示为性能试验的监测情况。

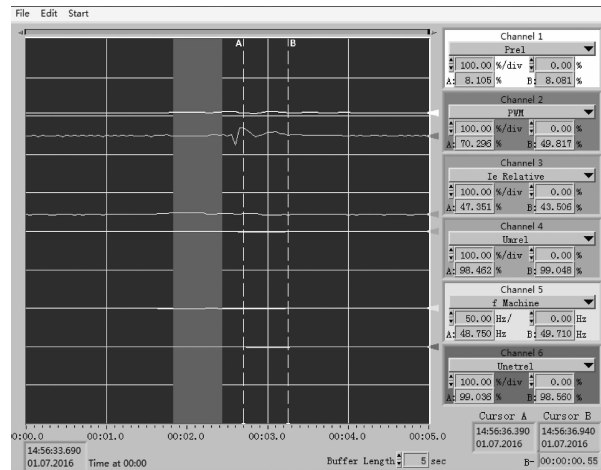


图 3 性能试验的监测

3.2 并车试验

对核电控制棒驱动机构电源系统样机进行并车试验。根据电动机扭矩转速特性、发电机频率动态特性、同期装置判断同期条件要求等因素进行计算，得到并车电阻大小。试验表明：采用方法二进行并车，无论是手动模式还是自动模式，一次并车成功率均超过 90%，并车时间基本控制在 20 s 以内。并车后进行负载试验，通过 AVR 进行无功分

配，两台发电机无功功率基本达到均衡。具体并车试验数据见表 1

表 1 并车试验数据

参数	1#发电机组	2#发电机组	两台机组偏差
线电压/V	258.7	258.7	0
相电压/V	149.8	149.8	0
电流/A	88	96	8
频率/Hz	49.96	49.96	0
有功功率/kW	10.9	9.9	1.0
无功功率/kVar	34.8	39.0	4.2
视在功率/kVA	39.0	42.6	3.6
功率因素	0.28	0.23	0.05

4 结论

本文针对核电站发电机组高稳定性和高可靠性等要求，设计了一套核电控制棒驱动机构电源系统。

经样机试验验证：该系统采用加载并车电阻方式进行并车，一次成功率高；使用 AVR 进行无功功率分配实际可行；各项参数监测报警功能正常；其他各项性能指标均达到设计要求。

参考文献

- [1] 张生玲, 李强. 低碳约束下中国核电发展及其规模分析 [J]. 中国人口资源与环境, 2015, 25 (6): 47-52.
- [2] 徐小杰, 程覃思. 我国核电发展趋势和政策选择 [J]. 中国能源, 2015, 37 (1): 5-9.
- [3] 欧阳予. 国际核能应用及其前景展望与我国核电的发展 [J]. 物理通报, 2007, 34 (2): 5-10.
- [4] 俞高伟, 周蕴花, 沈志华, 等. 核电站控制棒驱动机构电源系统 [J]. 发电设备, 2012, 26 (4): 278-281.
- [5] 张甬, 王宏印, 王天峰. 改进型控制棒驱动机构电源研究 [C] // 中国电机工程学会. 2013 先进核电站技术研讨会论文集. 2013: 503-508.
- [6] 沈文平. 同步发电机励磁控制系统研究 [J]. 现代制造, 2009 (36): 32.
- [7] 侯亚敏. 无刷励磁同步发电机励磁控制系统的研究 [D]. 广东: 华南理工大学, 2013: 10-12.
- [8] 于风卫, 韩加卓. 船舶发电机无功功率分配故障分析 [J]. 电机与控制应用, 2015 (4): 37-41.
- [9] 辜承林, 陈乔夫, 熊永前. 电机学 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010: 334-336.
- [10] 郑真福. 大功率柴油发电机组同步并车控制单元设计与应用 [J]. 通信电源技术, 2013, 30 (2): 44-45.
- [11] 汪欣勇. 柴油发电机自动并联机组的设计 [D]. 黑龙江: 东北石油大学, 2015: 24-27.