

结构与可靠性

核电应急柴油发电机组滑油低压保护
停机控制的设计优化杨 浩¹, 马 龙¹, 熊记伟¹, 刘 刚², 杨天峰³, 王 卫⁴

(1. 西安陕柴重工核应急装备有限公司, 陕西 西安 710075; 2. 上海核工程研究设计院有限公司, 上海 200233;
3. 陕西柴油机重工有限公司, 陕西 兴平 713105; 4. 中国核电工程有限公司, 北京 100840)

摘 要: 通过采用转速分段及增加短延时的改进方法, 对当前核电应急柴油发电机组滑油低压保护停机控制设计进行了优化。经论证与试验表明: 优化后的保护停机控制对机组起动及运行过程均起到了保护作用, 同时确保了滑油压力的正常建立, 避免了机组因受外部因素影响导致应急保护停机误动作, 提高了机组起动的可靠性。该优化方案已经在核电厂应急柴油发电机组控制系统中得到广泛应用。

关键词: 核电应急柴油发电机组; 滑油; 低压; 应急保护停机

中图分类号: TK421⁺.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2020)04-0034-03

The Design Optimization of the Lube Oil Low Pressure Emergency Protection
Stop Control for Nuclear Power Plant Emergency Diesel Generator SetsYang Hao¹, Ma Long¹, Xiong Jiwei¹, Liu Gang², Yang Tianfeng³, Wang Wei⁴

(1. Xi'an Nuclear Emergency Equipment Co., Ltd., Shaanxi Xi'an 710075; 2. Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200233; 3. Shaanxi Diesel Heavy Industry Co., Ltd., Shaanxi Xingping 713105; 4. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840)

Abstract: The method of speed segmentation and increasing short delay was adopted to optimize the design of the lube oil low pressure protection stop control for the nuclear power plant emergency diesel gensets. The verification and test show that the optimized control system can protect both the start-up and operation of the gensets, and ensure the proper lube oil pressure, avoid the malfunction of emergency protection stop caused by external factors, thus can improve the reliability of gensets start-up. This optimization scheme has been widely applied in control system of the nuclear power plant emergency diesel gensets.

Key words: nuclear power plant emergency diesel generator sets; lube oil; low pressure; emergency protection stop

0 引言

核电应急柴油发电机组是保证核电厂安全可靠运行的重要设备。在反应堆一回路发生失水时, 应急柴油发电机组应迅速起动、待用; 在外电网失电或外电网失电的同时发生一回路失水, 机组应在电厂规定的时间内起动, 并按程序带动专设安全设施

负载, 将反应堆堆芯余热带走, 防止堆芯烧毁, 减轻事故后果和环境污染。

应急柴油发电机组的起动及带载可靠性与核安全息息相关, 而影响机组起动性能的因素诸多。因此, 在关乎核安全的工况下, 机组应急起动会屏蔽许多日常运维工况下的故障保护停机信号, 仅保留部分会对机组产生巨大危害, 甚至造成报废的保护

收稿日期: 2019-01-04; 修回日期: 2019-03-26

作者简介: 杨浩(1984—), 工程师, 主要研究方向为应急柴油发电机组电气控制系统设计及安装调试, yanghao@sxdpse.com。

停机项目, 目的是在应急启动过程中, 如出现运行条件异常或者发生机械、电气故障, 在遵循保反应堆不保机组的原则下, 屏蔽这些异常与故障, 启动并带动专设安全负载。滑油低压保护作为应急保护停机中重要的一项, 既关系到应急启动过程中机组的安全性, 也关系到机组能否成功启动并具备带载能力, 保证反应堆的安全。

1 滑油系统及压力低保护作用

1.1 滑油系统作用

柴油发电机组包括五大机械辅助系统, 分别为燃油系统、润滑油系统、冷却水系统、压缩空气系统和进排气系统。润滑油系统作为机组重要的辅助系统之一, 承担着柴油机热备时的预润滑和柴油机正常运行时的润滑冷却功能, 具体如下:

机组在热备用状态时, 润滑油经预供泵加压, 由滑油/高温水板式换热器加热, 然后进入柴油机内部摩擦副循环, 以保证机组可随时快速启动和带载。

机组在正常运行时, 机带滑油泵从油底壳吸入润滑油并泵入柴油机内部摩擦副和需要冷却的部位, 带走因摩擦产生的热量, 并冲洗摩擦副表面的磨屑和杂质, 保证机组正常运行。同时, 润滑油产生的油膜还起到密封缓冲、减小振动与噪声、传递动力的作用^[1]。

滑油系统若出现滑油压力降低或缺失, 会使柴油机产生异常磨损, 故障扩大会导致柴油机报废, 最终酿成重大事故。

1.2 滑油压力低保护停机作用

在柴油机启动过程中, 滑油压力是通过曲轴带动机带滑油泵的转动来建立的。在整个运行过程中, 如果出现油底壳油位不足、管道阀门未打开、机带滑油泵卡滞等情况, 都会造成机体内滑油供应不足, 导致柴油机运动件之间发生硬摩擦, 进而导致拉缸甚至损坏柴油机。滑油压力低保护停机的作用是通过压力传感器监测滑油压力值, 当柴油机出现滑油压力不足或缺失时, 可快速、准确地做出判断, 并使机组及时停机。

2 滑油压力低保护停机设计方案

目前, 国内核电应急柴油发电机组把柴油机滑油压力低 3 取 2 (见后描述) 保护停机作为重要保护项目, 是考虑到成套机组设备价格昂贵以及安全性; 在机组启动及运行过程中, 如油压建立不正常时, 可及时对柴油机起到保护作用。

为了避免机组在应急工况下滑油压力测点出现测量故障, 导致机组误动作停机, 在控制方案中滑油压力低停机逻辑采用 3 取 2 的逻辑设计 (任意 3 个压力测点至少同时有 2 个测点检测到滑油压力过低, 则触发保护动作, 防止单个传感器故障引发保护停机)。

早期, 国内应急柴油发电机组滑油压力低保护停机的控制设计普遍采用法国 ALSTOM 公司的设计理念: 当机组启动, 延时 15 s 后, 对 3 个测点的油压传感器进行压力检测, 若任意 2 个测点监测值低于设定值, 则发出保护停机信号。具体控制原理^[2]如图 1 所示。

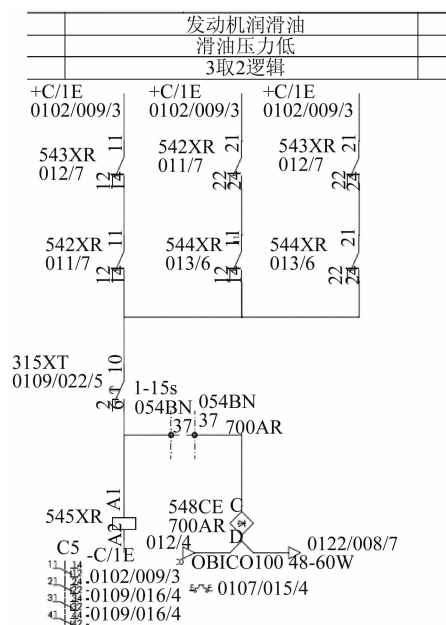


图 1 滑油压力低 3 取 2 控制原理图

图 1 控制方式对机组启动 15 s 后运行工况下的滑油压力低进行保护, 适用于应急启动模式, 忽略了机组启动过程中, 滑油压力建立不稳定的情况; 虽然提高了机组启动成功率, 但是对机组从 0 转速至额定转速的启动过程不能进行有效的保护。假如在启动过程中发生机带滑油泵卡滞、阀门未打开、预供滑油泵未开启等现象, 柴油机运动件有可能会产生干摩擦, 进而出现拉缸甚至损坏主机的情况。

另外, 这种控制方案设计不便于机组在怠速启动运行模式下的维修、调试工作。专利方给出的机组滑油进机压力报警值及停机值是按照额定工况给出的定值, 但怠速工况下的滑油压力要比额定工况下的滑油压力低很多, 这样就很难满足柴油机设计专利方要求的滑油低压报警、停机设定值, 经常会出现由于滑油进机压力低而导致启动机组失败的现

象,影响怠速模式下的维修、调试工作。

3 设计方案优化及应用

在机组起动过程中,滑油压力的建立是一个比较复杂的过程,理论上油压高低与柴油机转速高低呈正比例线性化关系,但实际上还受到油底壳液位高度、滑油进机管道长度、滑油油温、传感器测点布置、传感器监测响应等多因素的影响。针对原设计方案的缺点,公司在巴基斯坦核电项目中,对应

急柴油发电机组滑油压力低保护停机方案进行了多次试验和修改,最终确定了一种合理的优化方案,有效控制和保护了起动过程中滑油油压的建立。具体优化方案如下。

3.1 转速分段控制

优化方案对机组转速进行分段,判定滑油压力的建立,设定不同转速下的报警、停机值。转速分为 $V < 80\%$ 额定值, $V \geq 80\%$ 额定值两个阶段^[3]。具体如图2。

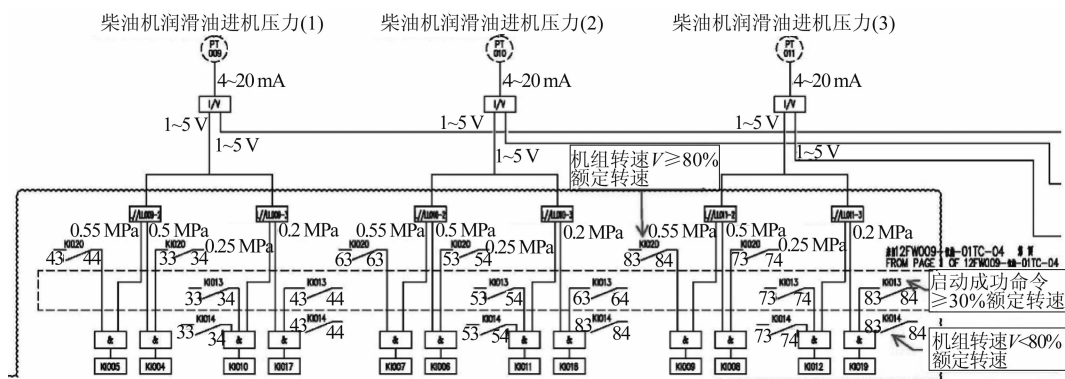


图2 增加转速分段的滑油低压3取2控制原理

压力设定值根据机组怠速模式下,手动增加转速至100%额定值时的实测滑油压力变化值来设定。当机组的转速 $V < 80\%$ 额定转速时,起动成功后,报警设定值为 ≤ 0.25 MPa,停机值设定为 ≤ 0.2 MPa;当机组转速 $V \geq 80\%$ 额定转速时,报警设定值为 ≤ 0.55 MPa,停机值设定为 ≤ 0.45 MPa。经以上设计方案优化,机组顺利通过怠速模式的工厂调试试验,100次快速起动型式试验没有出现一次失败;同时,很好地保护了机组起动过程及运行过程中滑油压力的建立。

3.2 延时控制

设备发往现场后,根据厂房情况,对滑油系统管道进行了重新布置。在现场进行全厂失电试验过程中,机组多次出现滑油进机压力低导致的应急保护停机。通过检查滑油系统管道布置及监测起动过程中滑油压力值的变化,发现:现场管道布置不合理。现场采用弯管布置,且滑油进机口在高位,高位管道长约3 m,而预供泵出口在低位。当机组预供滑油泵停止工作后,滑油进机口外部管道内滑油流回预供泵端,进机口内部滑油流回油底壳。机组起机后,机带滑油泵将润滑油从预供泵低位,经3 m长管道吸入柴油机,导致机组起动过程机带滑油泵吸油不及时,油压在短时间内不能正常建立;机组在转速 $V \geq 80\%$ 额定值后,滑油进机压力值偶尔会低于触发停机设定点,造成偶发性停机。滑油

低压保护停机会使应急工况下机组的快速启动可靠性降低,给核电厂失电情况下的安全性造成重大隐患。因此,进行以下整改措施。

(1) 修改润滑油系统进机管道布置:将滑油进机口与预供泵出口保持同一高度;进机口采用斜45°角弯管法兰连接。

(2) 对滑油进机压力低控制原理进行优化完善。

最终的优化实施方案为:在分阶段转速控制中增加延时判定的功能。在机组转速 $V < 80\%$ 额定转速时,起动命令发出后,延时7 s,判定报警值 ≤ 0.25 MPa,停机值 ≤ 0.2 MPa;在机组转速 $V \geq 80\%$ 额定转速时,延时5 s,判定报警值 ≤ 0.55 MPa,停机值 ≤ 0.45 MPa。

经优化,机组在现场调试及多次试验过程中未发生由于滑油压力低导致起动失败的情况。

3.3 应用

经过优化控制的方案,在国外核电项目应急柴油发电机组的长期运行中,其合理性及可靠性得到了充分验证。因此,在国内核电厂福清5&6项目应急柴油发电机组的控制设计中开始应用此种控制理念。由于柴油机型号不同,滑油压力在起动过程中建立的油压曲线也不同,在采用转速分段加延时方案时,设定了不同报警及停机值,具体如下所述。

(下转第48页)

表 7 推进工况输出扭矩扭转应力 MPa

轴段	25% 负荷	50% 负荷	75% 负荷	100% 负荷
1	7.49	11.96	15.67	18.89
2	7.49	11.96	15.67	18.89
3	7.49	11.96	15.67	18.89
4	7.49	11.96	15.67	18.89
5	7.49	11.96	15.67	18.89
6	7.49	11.96	15.67	18.89
7	7.49	11.96	15.67	18.89
8	7.49	11.96	15.67	18.89
9	10.59	16.92	22.16	26.72
10	5.59	8.93	11.69	14.10
11	5.59	8.93	11.69	14.10

表 8 推进工况总扭转应力 MPa

轴段	25% 负荷	50% 负荷	75% 负荷	100% 负荷
1	7.51	11.99	15.72	18.94
2	8.53	13.82	18.88	21.79
3	9.39	15.16	21.15	23.86
4	9.94	15.82	22.26	24.90
5	10.15	16.38	23.63	26.26
6	10.05	16.30	23.89	26.60
7	10.37	16.57	23.91	26.52
8	10.40	16.57	23.82	26.41
9	14.75	23.68	34.02	37.62
10	7.70	12.40	17.76	19.67
11	5.78	9.25	12.25	14.61

3 结论

本文基于集总参数方法搭建了自主 6EX340EF 主机试验台轴系的扭转振动模型,开展了自由振动

计算;并在 6EX340EF 主机试验台上进行了扭转自由振动与强迫响应振动测试,得到如下结论:

(1) 对 6EX340EF 主机试验台轴系的扭转自由振动计算表明:前三阶固有频率分别为 21.22、46.67、73.90 Hz;

(2) 测试得到的前三阶固有频率分别为 22.25、47.22、72.52 Hz,计算值与测试值的误差在 5% 以内,验证了 6EX340EF 主机集总参数模型的准确性;

(3) 进一步开展了推进工况下扭振强迫响应测试,基于测试扭角数据,结合试验台轴系扭振模型,得到不同工况下扭振合成应力值推算结果:曲轴轴段最大应力为 8.24 MPa,中间轴段最大应力为 11.86 MPa,测功器轴段最大应力为 6.07 MPa,均小于相应轴段的许用应力限值,轴系安全。

参考文献

- [1] 陈之炎. 船舶推进轴系振动 [M]. 上海: 上海交通大学出版社. 1987.
- [2] VANCE J M, ZEIDAN F Y, MUROHY B G. Machinery Vibration and Rotordynamics [M]. Canada: Wiley&Sons, 2010.
- [3] WALKER D N, Torsional vibration of turbomachinery [M]. New York: McGraw-Hill, 2004.
- [4] 中国船级社. 钢质海船入级规范 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.

(上接第 36 页)

机组转速 $50 \text{ r/min} < V < 350 \text{ r/min}$, 延时 4 s, 判定报警值 $\leq 0.1 \text{ MPa}$, 停机值 $\leq 0.05 \text{ MPa}$; 机组转速 $350 \text{ r/min} \leq V \leq 480 \text{ r/min}$, 延时 4 s, 判定报警值 $\leq 0.25 \text{ MPa}$, 停机值 $\leq 0.2 \text{ MPa}$; 机组转速 $V > 480 \text{ r/min}$, 起动命令发出延时 15 s, 判定报警值 $\leq 0.55 \text{ MPa}$, 停机值 $\leq 0.45 \text{ MPa}$ 。

4 结论

通过工厂及核电现场的多次试验表明:滑油压力低保护停机采取分段转速控制后,对机组起动过程及运行过程中滑油压力的正常建立起到了充分的保护作用;同时,因增加了延时控制功能,避免了机组受滑油系统管道布置、滑油温度、怠速起动方

式的影响,导致机组应急起动滑油压力低误动作停机,大大提高了机组起动可靠性。

优化的设计方案在巴基斯坦核电厂应急柴油发电机组电气控制系统、工厂试验台架及国内项目机组控制系统中得到了广泛应用。

参考文献

- [1] 朱建元. 船舶柴油机 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2008: 193-212.
- [2] PEI X. EDG set process lubrication oil system electrical diagram [R]. Paris: Alstom, 2015.
- [3] 刘刚, 刘勇, 等. EDG 仪控逻辑图 [R]. 上海: 上海核工程设计研究院, 2014.