

核电厂强损仪控设备可靠性提升技术研究与实践

翟欣慰 涂画 王志武

苏州热工研究院有限公司, 深圳 518028

摘要: 在 2014 年以后, 某核电集团通过与行业进行对比, 发现近年群厂强迫发电损失指标趋势变差或不稳定, 特别是仪控设备故障发生频率高、造成发电强迫损失较大。但在核电行业仪控领域中, 并未对仪控系统设备造成的强迫损失进行专项可靠性提升分析, 针对导致发电强迫损失仪控系统设备的特点, 对工程阶段和运维阶段进行可靠性提升工作成为了核电厂仪控领域必不可少的研究方向。

关键词: 发电损失; 仪表控制设备; 可靠性提升

Research and Application on Reliability Technology Improvement of Forced Loss of Power Generation- I&C Equipment in Nuclear Power Plant

Xinwei Zhai Hua Tu Zhiwu Wang

Suzhou Nuclear Power Research Institute, Shenzhen 518028, China

Abstract: After 2014, compared with foreign peer groups, the nuclear power group found that the trend of forced generation loss index of group plants in recent years has become worse or unstable: especially the major equipment failure frequency of I&C equipment is high for this reason. However, in the field of I&C in the nuclear power industry, there is no special reliability improvement analysis on the forced loss caused by the I&C system equipment. According to the characteristics of I&C system equipment, reliability technology improvement during engineering stage and commercial operation stage has become an indispensable research direction in the field of I&C.

Keywords: power generation loss; I&C equipment; reliability improvement

0 引言

商用核电厂一方面受国家核安全监管, 核安全的重要性不言而喻, 另一方面核电厂本身也是以营利为目的, 为此需要安全性、经济性两手齐抓共管。因自 2014 年某核电集团新商运机组投产增多、旧机组不同问题导致停机停堆的事件, 造成发电强迫损失比重逐渐提高, 较国际 WANO (世界核电运营者协会) 指标相比, 强损指标明显抬头。本文在此深入调研某核电集团各核电厂 2014 至 2020 年各项强损事件, 挖掘仪控强损事件根本原因, 根据强损事件中仪控设备发电损失进行强损排序, 探索提高核电厂强损相关仪控设备可靠性的方法, 进行造成强迫发电损失的仪控设备可靠性提升研究, 对提高仪控设备可靠性、提高电厂系统设备可靠性有很强的指导意义。

1 概述

随着近年来电网上网竞争明显, 集团越发重视发电相关指标。在国际上, WANO 指标是核电行业普遍采用的、统一的、可衡量核电机组运行业绩的指标, 通过统一的 WANO 指标, 可以对标核电同行的业绩水平, 找出薄弱环节, 设定管理目标, 调整资源, 提高核电厂业绩。

发电强迫损失率 (以下简称强损) 是 WANO 的九大指

标之一。该指标用于反映电厂运行期间 (不包括计划停机) 由于设备故障、人因等所造成的停机或降功率导致的非计

划强损发电损失 (以下简称发电量损失)。该指标深刻反映了核电厂在保证安全发电方面的能力和相关工作的有效性, 也是核电厂经常进行业绩对标的指标之一。

国外设备管理行业起步较早, 在《以可靠性为中心的维修》一书中重点阐述了设备管理在国防方面的应用^[1]、莫布雷在《以可靠性为中心的维修 II》一书中重点阐述了可靠性在维修方面的流程和管理应用^[2]、美国电力科学院盖特纳也对以可靠性为中心的维修在电力系统应用进行了分析^[3]; 同时在核电厂设备管理方面, 欧美等发达国家进行了大量的工作, 已经建立了完整的设备管理体系, 施耐德 MG、史密斯 AM 等人^[4]在核电厂进行了以可靠性为中心的维修的应用, 同时 Dozier J^[5]在 ASME/JSME 国际核工程会议进行了预防性维护中维修模板等研究讨论。国际原子能机构也根据各国长期的核电站运行经验, 提出了核电站设备管理维护导则^[6]。

国内外对于核电厂设备可靠性管理、强损整体指标等研究对标和研究较多, 但都没有从对造成发电强迫损失的仪控系统设备的可靠性和老化管理方向进行研究; 国内没有针对强损仪控设备可靠性提升进行研究, 本课题尚属国内领域首次关注强损仪控设备。本文拟从某核电集团内核电厂实际

发生的各项仪控强损事件分析入手, 调研仪控强损可靠性提升的关键技术和方法, 以期填补相关领域的空白, 真正实际提高核电厂仪控强损指标。

某集团统计表明 2013~2017 年, 强迫损失率波动很大。其中 2014 年和 2017 年强损指标分别为 3.96% 和 0.95%, 远远高于 WANO 中间值 0.49% 和 0.47%。而且 2016~2017 年强损指标趋势变差。

在此背景下, 开展降低强损指标的关键技术研究, 制定强损整体管理策略, 有效改善群厂强损指标。

核电厂仪控系统设备有几个明显特点:

分布广: 设备小而生多; 电子元器件类型多; CCM 设备多; 种类多 - 模拟量 / 开关量 / 专用系统、PLC、DCS; DCS 平台多 (西门子、AREVA、三菱电机、广利核、和利时、Alstom 等);

风险高: 重大设备关联 (8+1 靠仪控监视、控制、

保护); 核安全关联 (与机组工艺、安全运行关联); 与运行业绩关联 (停堆、停机、强损);

寿命更新快: 设备寿命、技术寿命、经验寿命短; 技术更新快、设备老化和淘汰快;

维护难: 部分设备为黑匣子; 电子元器件多, 设备原理不同;

这些都给仪控设备预防性维修、仪控可靠性和老化工作在管理和执行上带来了极大的困难。

本文主要开展如下工作: 根据仪控强损事件、设备分类统计梳理结果, 制定强损整体管理策略及识别影响强损指标的设备, 并对这些设备按照强损的大小进行排序, 开展强损设备重要度分析; 同时根据强损事件归纳、整理形成强损仪控设备可靠性提升整体策略、在运维阶段和工程阶段两个环节双管齐下共同做好仪控强损设备可靠性提升工作。

(图 1)

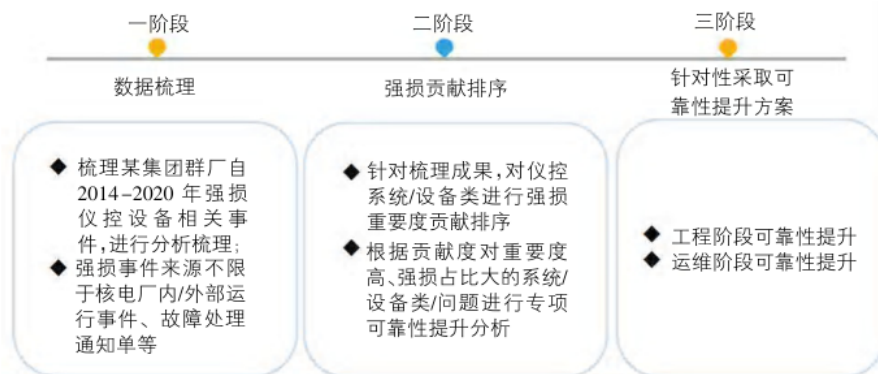


图 1 强损仪控可靠性提升技术路线

2 仪控强损数据梳理分析

根据统计, 2014-2020.6 群厂商运机组中, 由设备、人因等导致发电量损失共计 416 项, 对附件的强损事件逐项分析, 排除机械、冷源、电气、人因、设计等方面的问题, 归纳整理每项事件故障根本原因, 排除设备检查无异常事件, 筛查仪控系统、设备相关事件共计 108 项, 约占历年总发电损失的 4.3%, 涉及 KRGSIP 电源 (反应堆过程控制保护系统)、RAM (控制棒驱动系统)、G3E (汽轮机监视、调节、控制、保护系统)、DCS 平台/网络 (西门子 T2000、T3000 平台等)、RPN (核仪表系统)、二回路如 GSS (汽水分离再热系统)、AHP (高加系统)、ABP (低加系统) 等; 从设备类分析梳理, 仪控设备强损涉及仪控电源 (电容)、电磁阀、气动阀附属设备 (定位器、减压阀)、继电器、开关量仪表、模拟量仪表、通讯网络相关 (网关光电转换器) 等。

随着群厂商运机组的增加, 集团仪控相关强迫损失发电事件、发电损失均有明显的上升, 并在 2019 年发电损失统计值达到顶峰。根据梳理结果发现, 2014-2020 年仪控强

损事件中, 近些年除常规仪控设备损坏导致强损事件外, 还有其他类型, 如备件更换后短时间内故障的备件可靠性指标管理问题、某电厂隐蔽的电气设计通路叠加 CC (开关) 问题导致强损跳机, 也暴露了设计、隐蔽性、双重等类型故障, 增加了群厂仪控强损可靠性管理的难度, 也是需要进一步探索和提升。

3 仪控强损可靠性提升策略

电厂商运阶段仪控设备可靠性提升工作, 究其本质是对设备从设计到运维退役的全流程环节提升。是从工程设计、工程备件采购、厂家产品生产、工程安装、工程调试、设备上使用或者备件验收入库、备件上使用等几个环节的管理提升。是传统设备管理工作的设备领域向更上游的工程阶段的拓展。

3.1 核电设备管理领域工作现状

传统的核电厂设备管理领域仅覆盖电厂设备到货安装调试后的高运环节的设备可靠性管理。对于已经拥有丰富运维经验的群厂来说, 更进一步向设计、备件管理方向深入是十分必要的。(图 2)

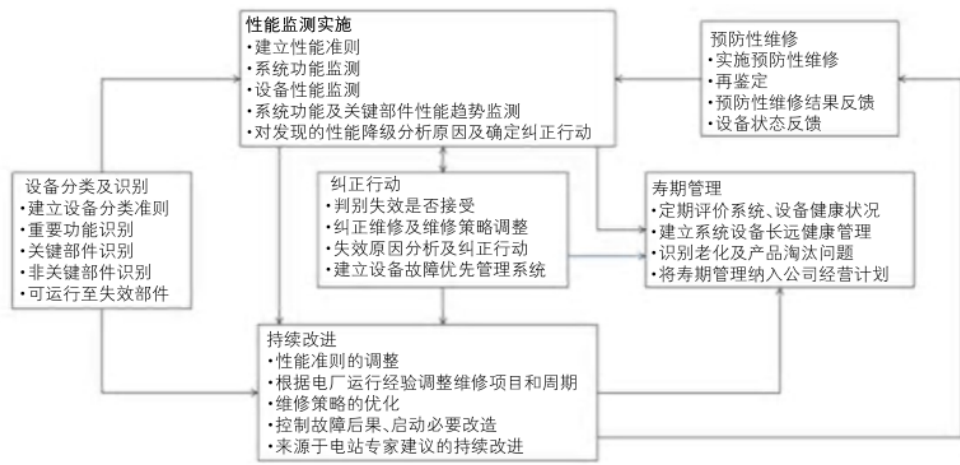


图 2 核电厂设备可靠性管理体系渊 AP-913 示意图

3.2 核电设备可靠性管理

核电厂可靠性设备主要分为两部分，固有可靠性和运维可靠性：固有可靠性主要由设备备件设计、生产、采购、安装调试的工程阶段相关工作来进行约束和控制；运维可靠性主要由维修工艺、维修内容综合决定，常规设备的运维可靠性主要以 PM（预防性维修）、CM（纠正性维修）、PdM（预测性维修）在 AP-913（核电设备可靠性管理体系）的指导下开展设备管理相关工作，以确保设备可靠性。（图 3）

其中，工程阶段的固有可靠性主要以消除潜在通路、消除假冗余、消除重要信号共用同一卡件等来保证系统设备可靠性；在采购阶段，主要以制定备件可靠性寿命相关参数表中、纳入备件采购技术规范终稿，作为可靠性的基础输入，保证追责权利；同时可以根据经验反馈选择长寿命高可靠性产品作为可靠性管理的一部分；在安装调试阶段，通常从控制施工质量、施工风险控制、施工端接异物控制、调试巡检控制和调试环境控制等几方面对固有可靠性进行保证；工程阶段对设备备件的生产、设计、安装调试是决定商运后设备可靠性的基础；商运后运维阶段，备件固有可靠性基本无法提高，只能通过运维手段来维持其功能，在运维阶段想要彻底提高设备可靠性只能通过改造、换型等方式。

根据对系统设备可靠性极高要求的国家航天企业的调研：在航天企业中，首先对整体如运载火箭进行可靠性建模，自顶向下分配可靠性指标，在底层某一仪控设备，通过可靠性建模向下分配可靠性指标，确定仪控系统设备的可靠性指标要求，再由仪控设备备件向下拆分，如拆分至分立元件，可规定分立元器件的可靠性寿命指标，从而满足顶层事件的可靠性指标。同时由于元件或备件用量不及核电厂，自产品备件筛选，如分立元器件均进行充分检查试验，筛选后再进行下一环节的组装工作。在相关备件的采购环节，对备件的可靠性、寿命等参数进行了规定要求，一方面对厂家的工艺提出了更高的要求、另一方面也保留了追责的权利，这使得备件可靠性得到极大保证。

航天企业在备件存储环节，管控措施同样严格：用户

企业结合厂家建议与实际采购使用需求对产品贮存数量、贮存条件进行约束来保证备件产品在贮存过程中的可靠性。

同时在设计之初，航天企业对相关控制电流信号回路进行建模，分析各种工况下可能存在的潜在通路回路，可有效针对解决如灯试开关故障跳机事件中灯试回路与跳机回路异常导通导致跳机的问题；当然，这个潜在通路分析方法工具也可应用于商运机组系统设备中，作为设计问题的反查的手段；同时可作为故障排查的工具：排查时模拟相关设备的故障，复现是否与现场故障状态一致。

仪控系统设备的运维可靠性主要以 PM、CM、PdM 作为 AP-913 设备可靠性管理体系的重要环节进行管理，仪控设备可靠性管理的特殊性在于，由于仪控系统设备自身存在的特点，需要灵活结合仪控可靠性和老化专项管理。

核电厂仪控系统设备为什么需要结合可靠性和老化专项管理呢？核电站的系统、结构或设备由于一个或几个老化机理的综合影响，随着工作时间和使用周期的延长，其物理特性会产生一定的变化，这种变化过程就称为设备的老化。由于老化的影响，核电设备中几乎所有使用的材料都会经历不同程度的劣化过程，而材料的劣化最终将导致核电站设备功能的降级甚至失效，严重影响核电站寿命周期并危及核安全。如果不设法延缓设备的老化过程，这些设备的安全裕度将较快地降低并达到要求的最低限值，缩短设备的寿命^[7]。

基于群厂常规设备可靠性管理水平和范围，本文的群厂强损仪控设备可靠性提升技术研究的方向在于控制产品备件质量提高备件固有可靠性、同时力图解决消除设计缺陷提高系统设备运行可靠性、结合多种先进监测检测手段进行可靠性和老化管理多管齐下来降低仪控强损指标，同时可靠性提升策略也为某电厂后续可靠性提升策略和应用方案提供基础。

4 某电厂仪控可靠性提升实践

4.1 引言

根据前述对强损仪控设备重要度分析，导致该电厂仪

控强损比重较大的几点是：存在设计阶段的潜在仪控电气设计通路，同时在运维阶段对电容的可靠性和老化管理存在薄弱环节、备件可靠性未明确导致强损事件发生时无法做到清晰的责任划分。综合考虑，为其指定可落实的强损仪控可靠性提升方案如下。

核电厂现有备件质量控制在几个方面：设备采购、设备监造、设备安装调试、设备上电后的运维等几个环节。其中，设备采购作为设备备件可靠性保证最重要的第一环，但始终没有对设备备件可靠性要求形成体系。从我国最早的商用核电站起步，多数设备备件都由国外厂家供货，后续机组的国产化水平才有所提高，但部分备件还是依赖进口产品，“卡脖子”现象仍然存在：对于这些备件产品，由于进口产品厂家话语权较强，多数设备只能定点采购，这些产品上线使用过程中出现的问题也基本是返厂检查，核电企业无法做到故障定位及技能提升，一切以国外厂家说法为准；同时部分设备的可靠性较低，但仍需依靠国外进口，未在产品采购技术规格书中将可靠性指标写明落实进合同中，电厂出现发电强迫损失也只能自行承担。

设备备件国产化浪潮已经来临，部分设备存在国产化替代的可能，如何保证国产产品备件可靠性标准不降低，上线使用后仍能稳定运行、性能可靠成为业内普遍担忧的问题之一。而在设备采购之初，首先需要将目前现阶段已使用设备的可靠性指标进行确定，在国产替代产品采购时，也有相关指标要求的依据。但是如何明确设备备件固有可靠性指标，核电厂作为大型工业产品用户，常规设备监督监造，不能像航天行业企业做到逐个元器件筛选、烤机，通过严格控制元器件品质、工艺等来保证可靠性。但作为用户企业，可在设备采购中对产品备件对其可靠性进行约束和要求。

4.2 备件可靠性和寿命指标概念

4.2.1 工作寿命要求

设备和备件安装调试合格后上线工作。在规定使用和维修的条件下，满足规定功能和性能要求的连续在线时间不少于 xx 年（xx 小时）。

4.2.2 工作可靠性要求

寿命期内，备件发生可维修故障的频率：平均每 xx 年发生可维修故障数不大于 1 次，发生不可维修故障视为寿命终结。

4.2.3 维修更换时间要求

单次故障维修 / 更换时间不大于 xx 小时。

4.2.4 贮存寿命期要求

设备和备件在规定条件下的无故障贮存期不少于 xx 年。贮存期后，设备和备件应能够保证实现工作寿命、工作可靠性要求、维修更换时间的要求。

4.2.5 可靠性与寿命指标的基本原则

确定备件可靠性寿命指标首先需要确定基本原则：

适用性：指标必须满足当前电厂运行和维修大纲的规

定要求，具备一定的指标先进性，具备剔除指标过低的不合格备件的能力，并尽可能为大纲优化保留余量；

可实现性：指标应在当前供应商技术能力可实现的范围内，避免因指标过高而导致无法采购到相应合格备件的情况。

4.3 备件可靠性与寿命指标的获取

(1) 从公开的设备标准或行业规则获得。

(2) 从乙方设备手册中获得。

(3) 从电厂同类备件应用的数据中统计计算分析获得，相关的模型如下：

1) Weibull 分布可靠性评估方法模型；

2) 采用寿命正态分布模型；

3) 指数分布可靠性评估方法模型；

(4) 依据电厂前期运行维护经验和需求推断。

通过上述四个途径获得的寿命与可靠性指标，还需要根据电厂实际情况进一步权衡优化，综合考察适用性、可实现性，最终确定列入备件采购规范的具体指标。

4.4 备件可靠性与寿命指标确定基本方法和权衡方法

基于适用性、可实现性原则，对上述指标进行综合权衡分析并最终按以下原则确定指标：

(1) 优先选择厂家数据确定指标，厂家数据低于公开标准或维修需求时，可以考虑更换厂家，以新厂家获得的数据作为采购规范指标。

(2) 没有确定供货厂家的情况下，依次按照公开标准、现场数据、维修需求、工程经验的优先级顺序采用相应数据作为采购规范指标。

4.5 开关电源 & 电容可靠性和老化管理

电源是大多数电子系统中的主要寿命限制部件，仪控用电源主要是线性电源和开关电源。

根据统计，某电厂由于电源模块导致强损事件发生在 SIP 线性电源及 GRE 阀门线性电源设备上，由于 SIP 线性电源电厂已开发检测装置检测其性能并做了大量工作，在此就不做过多研究。

但在该电厂 GRE/GSE 整体换型改造后，机柜整体供电使用菲尼克斯 QUINT-PS/1AC/24DC/40, 220VAC 转 24VDC 开关电源模块；同时，后续 DCS 相关改造后，也将使用高性能开关电源。本次某电厂电源 & 电容可靠性提升方案拟填补开关电源检测的空白。

目前，开关电源转换效率高、体积小，因而被广泛地应用于电子系统中，电源的故障会导致整个系统的崩溃。开关电源模块需要经过变压、整流、滤波、稳压等环节输出直流电压。

开关电源的主要元器件有电解电容、光电耦合器、印制电路板、半导体器件、开关变压器、电位器、熔断器等。电源在使用过程中，极易出现老化降级，尤其是电解电容最

容易发生故障。老化降级后的电源在使用过程中容易失效,导致严重的后果。当电解电容的容量极大地减小、等效串联电阻增大时,会出现开关电源输出不稳定,输出纹波过高等现象,电解电容是开关电源的薄弱环节,对开关电源的寿命影响极大,电容经常是开关电源故障的原因,因此,检测开关电源拓扑中电解电容的参数直接关系到该电源故障和使用寿命。

4.6 消除仪控隐蔽设计缺陷潜在通路

设计缺陷一般较为隐蔽,通过出厂前 FT(指设备出厂前调试)现场工程调试、运维阶段的定期试验等常规手段很难发现,因在前述试验的执行,均按一定程序或依靠调试试验人员经验,如出现调试试验程序以外、人员经验认知以外的隐患,不可避免地为后续商运埋下了隐患。由于隐蔽性设计问题种类千差万别,在此针对 GSS006CC 故障导致跳机事件,有针对性地提出能够在设计阶段发现和商运阶段反查发现设计问题的方法和方案。

潜在电路是电仪系统中存在叠加工况下可能导致非预期电路接通的潜在通路。针对某电厂 GSS006CC 故障导致跳机实例,运用潜通路分析方法,给出建模分析方案。

背景简介:在某电厂降功率期间,汽轮机跳闸后,电站立即展开原因查找,第一时间收集现场信息,检查确认汽轮机两列跳闸机构均动作,但没有表征跳闸原因的报警信号。从单一故障到叠加故障逐步查找,最终定位为 GSS130/230BA 液位试验开关 GSS006CC 接点故障,导致灯试回路与保护回路接通验箱上的灯试按钮进行操作时误触发保护信号导致汽轮机跳闸。

汽轮机保护系统 GSE 在汽轮发电机组发生任何预定的故障时,为汽轮机提供安全停机的的手段,防止事故发生、扩大和损坏设备,并将汽轮机跳闸信号送往反应堆保护系统。汽轮机跳闸是通过切断供向汽轮机蒸汽阀门操作装置的动力油,同时排出操作装置内部的残留油,使蒸汽阀门在弹簧作用下快速关闭。

根据电气保护参数的不同来源,GSE 系统电气回路设置了 17 个跳闸通道,任一通道动作接通都会导致执行跳闸继电器 GSE007XD 励磁动作,GSE007XD 励磁会导致下游的紧急脱扣电磁阀 GSE001/002EA 动作,引发汽轮机跳闸。

GSS006CC 为 3 位试验开关,包括 TA、TB、N 三个位置,同类型 CC 开关还用于常规岛水位计试验回路。GSS006CC 为 GSS230BA 液位计试验选择开关,其中 GSS006CC 包含三个选择位 TA(A 列试验位)、N(正常位)、TB(B 列试验位)。

正常运行:选择开关位于 N 位置,N 位置接点闭合,TA、TB 位置接点断开。

试验状态:选择开关位于 TA 或者 TB 位置,N 位置接点断开,TA 或者 TB 位置接点闭合。

TA 试验位用于闭锁 GSS230BAA 列液位计跳机保护,TB 试验位用于闭锁 GSS230BAB 列液位计跳机保护。本次 GSS006CC 故障 N 位置时 TA 试验位置接点异常闭合。

通过分析跟跳机有关的开关组合有 5 种,如表 1 所示。

通过分析,第 5 种情况在 GSS006CC 故障情况下按灯试开关保护回路误动作,其他 4 种情况都正常。通过对原理图进行动作时序分析,能分析出器件故障情况下的错误通路,从而快速定位故障位置。当出现故障模式库之外的故障,通过仿真确定故障路径上的故障器件来快速定位故障,故障确认后录入故障模式库,从而不断地完善故障模式库。

5 结束语

本文针对某核电集团下辖各核电厂发电强迫损失电量事件进行分析,整理仪表控制相关事件进行详细分析归纳,针对具体问题进行深入探究,形成了核电强损仪控设备可靠性提升的方法,用于核电厂强损相关仪控设备可靠性提升工作,具体研究成果如下:

(1) 对于强损仪控设备数据,根据设备类归纳整理,得出了强损仪控设备重要度排序,针对强损仪控设备类问题进行专项分析,形成了保证设备固有可靠性方法、消除设计阶段潜在电气通路方案及结合新技术的仪控可靠性和老化管理等几个可推广复制的强损仪控可靠性提升方案;

(2) 工程阶段明确设备固有可靠性指标的备件采购技术规范编写,是结合航天先进经验与核电厂现状进行整合而成,是设备可靠性管理工作向工程阶段的探索;提高仪控可靠性消除设计阶段潜在电气通路方案,可面向设计阶段进行设计隐患排查,同时也可以面向运维阶段的故障反查、改造,具有可操作性和可复制性;

表 1 GSS 跳机组合

| 序号 | 开关动作组合 | 影响后果 |
|----|----------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 1 | GGS 高高液位 SN1、GGS 高高液位 SN2 闭合、GGS006CC-1 闭合、GGS006CC-2 断开、GSS006TO 断开 | 保护回路动作、指示灯不亮 |
| 2 | GGS 高高液位 SN1、GGS 高高液位 SN2 闭合、GGS006CC-1 断开、GGS006CC-2 闭合、GSS006TO 断开 | 保护回路未动作、LA 指示灯亮 |
| 3 | GGS 高高液位 SN1、GGS 高高液位 SN2 闭合、GGS006CC-1 断开、GGS006CC-2 断开、GSS006TO 断开 | 保护回路未动作、指示灯不亮 |
| 4 | GGS 高高液位 SN1、GGS 高高液位 SN2 断开、GGS006CC-1 闭合、GGS006CC-2 断开、GSS006TO 闭合 | 保护回路未动作、LA 指示灯亮 |
| 5 | GGS 高高液位 SN1、GGS 高高液位 SN2 断开、GGS006CC-1 闭合、GGS006CC-2 闭合、GSS006TO 闭合 | 保护回路动作、指示灯亮 |

(3) 核电厂运维阶段仪控设备可靠性提升工作, 离不开仪控可靠性和老化管理, 结合新技术对设备进行性能检测、诊断, 不仅显著降低核电厂设备备件更换的运维成本, 同时对设备有效的性能检查可以做到设备状态的“可知”、“可控”;

(4) 对于某电厂具体的强损仪控设备问题, 有针对性地提出了具体方案, 包括结合新技术的电容可靠性和老化管理及潜在电路通路分析消除工作。

参考文献:

- [1] Nowlan F S, Heap H. Reliability -Centered Maintenance [M]. Virginia: US Department of Defense, 1978:15-20.
- [2] Moubray J. Reliability Centered Maintenance II [M]. New York: Industrial Press Inc., 1997:86-90.
- [3] Gaertner J P. Demonstration of Reliability Centered Maintenance [M]. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute, 1989:30-40.
- [4] Fox B H, Snyder M G, Smitch A M. Reliability -Centered Maintenance Improves Operations at TMI Nuclear Plant [J]. Power Engineering, 1998(11):123-127.
- [5] Dozier I J. Optimizing Preventive Maintenance with Maintenance Templates [C]. ASME/JSME International Conference on Nuclear Engineering IV, New Orleans, 1996:124-135.
- [6] 高立刚, 王宗军, 戴忠华. 大亚湾核电站设备管理体系创新[J]. 工业工程与管理, 2006(1):100-103.
- [7] 张圣, 王双飞, 王青青, 等. 核电厂关键设备老化管理研究[J]. 设备管理与维修, 2012(10):12-14.

作者简介: 翟欣慰 (1991-), 男, 山西临汾人, 工程师, 本科, 在职硕士研究生, 就职于中国广核集团苏州热工研究院有限公司, 主要从事核电厂仪控设备可靠性管理工作。