

# 安全相关系统在联合循环电厂调压站的应用

## Application of Safety Related Systems for Pressure Regulating Stations in Combined Cycle Power Plants

孙龙 贾静 彭扬子 宋凯兵 丁健康

Long Sun Jing Jia Yangzi Peng Kaibing Song Jiankang Ding

华北电力设计院有限公司 中国·北京 100120

North China Power Engineering Co., Ltd., Beijing, 100120, China

**摘要:** 论文分析发电厂中保护系统及安全相关系统应用的现状, 通过对依托工程调压站的功能安全评估, 提出燃气联合循环发电厂中保护系统及调压站等车间进行功能安全分析并应用安全相关系统的必要性。

**Abstract:** This paper analyzes the current situation of the application of protection systems and safety related systems in power plants, and proposes the necessity of conducting functional safety analysis and applying safety related systems in workshops such as protection systems and pressure regulating stations in gas combined cycle power plants through functional safety assessment based on engineering pressure regulating stations.

**关键词:** 安全相关系统; 保护系统; 分析; 应用

**Keywords:** safety related systems; protection system; analysis; application

**DOI:** 10.12346/peti.v5i4.8846

## 1 引言

目前, 联合循环机组调压站车间均有比较成熟的配置方案, 但一般是建立在以往的经验 and 强制规范要求下的, 有些燃机电厂还会在实际实施上根据自己的经验对调压站的逻辑进行修改, 而从一些报道的联合循环电厂事故来看, 天然气调压站的泄露、工艺系统设计缺陷等问题会产生的电厂事故及人员伤亡, 继而造成严重的后果, 因此安全相关系统在天然气调压站紧急停车系统中的应用是联合循环机组的自身需要。

## 2 安全相关系统的概念及相关标准

### 2.1 安全相关系统的概念

在国际标准 IEC61508 (GB/T20438) 中, 定义了安全相关系统 (safety-related system) 概念, 即执行必要的安全功能, 以使被保护对象处于安全状态的系统。当危险事件发生时, 安全相关系统将采取适当的动作和措施, 防止被保护对象进入危险状态, 避免危及人身安全, 保护设备和财产不受损失<sup>[1]</sup>。

### 2.2 安全完整性等级

安全相关系统的重要概念之一, 就是安全完整性等级

SIL。安全完整性等级指“用来规定分配给安全仪表系统的仪表安全功能的安全完整性要求的离散等级。SIL4 是完全完整性的最高等级, SIL1 为最低等级”<sup>[2]</sup>。

安全完整性等级 SIL, 则是对安全仪表系统的量化分级。对于过程行业应用领域, 大部分安全相关系统均适用于低要求模式。而火电厂保护系统, 从实际应用上看, 其安全功能动作频率也是低于 1 次/年的, 因此适用于按低要求模式应用。

### 2.3 安全相关系统的相关标准

*Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems* IEC61508 是国际电工委员会 (IEC) 在 2000 年发布的功能安全基础标准, 首次提出了安全完整性等级的概念。随后又颁布了针对流程工业的功能安全标准 IEC61511, 而中国国家标准 GB/T20438—2006《电气/电子/可编程电子安全相关系统的功能安全》以及 GB-T21109—2007《过程工业领域安全仪表系统的功能安全》, 相继年发布并开始实施。

GB50660—2011《大中型火力发电厂设计规范》中 15.6.2 提出“火力发电厂锅炉和汽轮机的跳闸保护系统可采用电子逻辑系统或继电器硬逻辑系统, 系统宜采用经认证的、SIL3

【作者简介】孙龙 (1974-), 男, 中国湖北武汉人, 本科, 高级工程师, 从事热工自动化研究。

级的安全相关系统。安全相关系统应符合现行国家标准 GB/T20438《电气/电子/可编程电子安全相关系统的功能安全》和 GB/T21109《过程工业领域安全仪表系统的功能安全》的有关规定”。

### 2.4 中国和其他国家安全相关系统在发电厂保护系统应用现状

欧洲部分国家将经过认证的功能安全系统应用于发电厂作为强制性规定，通过国家的法规同时规范了业主的安全管理职能。东南亚国家的发电厂设计初一般由欧洲公司担任咨询顾问，即便在容量很小的火电机组上，同样要求承包商提供经过认证的功能安全系统用于发电厂的保护系统。

中国发电厂所用的 DCS 系统，保护系统采用与控制系统相同控制器，并不设置具有安全保护功能的专用控制器，通常是采用硬件的冗余配置用来提高系统可靠性。采用冗余控制器、冗余电源模块、冗余通信总线的以及冗余 I/O 模块等措施。近几年，陆续有一些项目在建设中开始要求采用具有安全功能的可编程控制系统，但仍然处于尝试应用阶段，仅仅是控制系统本身采用了安全系统，仪表和执行元件采用常规设备，而且没有进行相应的评估和分析。

随着功能安全国家标准的推出以及近几年中国对设备安全、人身安全以及环境影响的持续关注，对安全系统的重视程度不断提高，功能安全系统不仅在石油、化工、核电领域有了更多的应用，在发电厂也引起了更多的关注。

## 3 功能安全工作基本流程

发电厂功能安全工作不是简单地购买一套系统设备，而是伴随电厂从前期立项、设计施工调试运行直到退役整个生命周期内，针对工艺过程保护系统进行的全部的安全活动。包括整体策划、风险分析、功能分配、SIS 设计、安装调试、修改确认，直至最终停用，而且还有全过程的安全生命周期管理。基本的工作流程如图 1 所示。

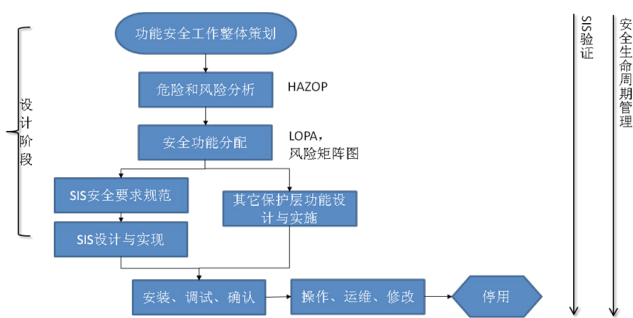


图-1 功能安全工作基本流程

## 4 安全相关系统在发电厂天然气调压站紧急停车系统的应用案例分析

论文以某燃气联合循环电厂工程的调压站紧急停车系统为依托工程，进行具体典型方案研究。功能安全评估工作采取以课题组团队为评估小组，主要成员、中国功能安全权威

机构专家作为技术支持与指导、结合业主和设备厂家提供意见参考的方式，完成对依托项目调压站安全停车系统危险与可操作性 HAZOP 分析，对天然气调压站紧急停车系统保护回路进行 SIL 验证和计算，为安全相关系统在天然气调压站紧急停车系统上的应用提供了支撑依据。

### 4.1 依托工程调压站概况

该工程为一拖一 9F 联合循环机组，该工程的燃气集团来天然气经厂内监督计量、过滤、加热、调压模块至各燃气轮机前置模块、启动锅炉燃烧系统。

基本流程：燃料在进入电厂调压站后，先进行天然气流量测量；再经过过滤、分离系统除去天然气中含有的机械杂质；为防止低温下调压单元故障，主厂房辅机冷却水回水余热将天然气加热到一定的温度，避免天然气结露；调压器控制天然气压力变化在满足燃机要求的范围；而进入燃料模块前，对天然气的压力、温度等参数的测量。调压站的主要设备采用撬装式结构设计，按功能分成入口模块、计量模块、精过滤模块、加热模块、电加热模块、调压模块、出口模块、放散模块、惰性气体模块、集污模块等。

### 4.2 依托工程功能安全评估过程

按照功能安全标准的实施流程，对天然气调压站的紧急停车系统进行 HAZOP 分析以及 SIL 定级：

①对天然气调压站的紧急停车 ESD 系统进行风险分析、辨识调压站工艺流程的过程风险、梳理调压站保护回路的安全功能要求，从而给保护层分配相应的安全功能。

②对天然气调压站内各个回路进行安全完整性分析，确定相应的 SIL 等级。

③制定仪表安全系统 SIS 的规格/规范书，按照已确定的 SIL 等级进行 SIS 系统的具体实施。

④根据整个系统各个回路的实际配置进行 SIL 验证，以确认安全回路的 SIL 等级达到最初的要求。

#### 4.2.1 天然气调压站紧急停车系统功能安全评估工作范围确定

本项目功能安全评估范围，选择天然气调压站紧急停车系统作为评估分析范围。采用保护层分析方法进行保护功能的 SIL 等级确定。

#### 4.2.2 依托工程 HAZOP 分析

① HAZOP 分析工作组成员。

按照标准的 HAZOP 分析流程，HAZOP 分析工作组成员由来自电厂的运行人员、调压站运行人员和仪控的检修专家、调压站厂家和设计院的工艺和仪控专家等组成，从而尽可能地保证 HAZOP 分析充分辨识出工艺系统存在的风险并且准确分析确定各项内容。

② 风险矩阵图。

在 HAZOP 分析过程中，为了对危险事件的后果以及频率进行分级，从而为后续的仪表安全功能分配提供依据，制定风险矩阵图。

③ HAZOP 分析工作表。

HAZOP 分析工作表是危险与风险分析工作的主要工具，制定了新的分析工作表格。

#### 4.2.3 依托工程 SIL 分析与定级

对天然气调压站的安全仪表功能评估就是为了衡量安全仪表系统的可靠性，提高安全仪表系统的功能安全水平，降低因安全仪表失效造成的损失。根据依托工程对天然气调压站的 SIL 评价开展了以下几个方面的研究：

①天然气调压站紧急停车系统为调压站安全仪表系统中失效最严重的系统，确定以天然气调压站的紧急停车系统为研究对象，针对天然气调压站的紧急停车系统建立了故障树，分析故障树最小割集，发现执行器为天然气调压站紧急停车系统中的薄弱环节。

②从 SIL 定级和 SIL 验证两方面开展了方法研究。在 SIL 定级方面，比较了 SIL 定级的两种方法：定性的校正风险图和半定量的保护层分析法，分析了保护层分析法在量化定级方面的优势，采用结合危险与可操作性分析的保护层分析法对天然气调压站紧急停车系统进行定级。

③在 SIL 验证方面，研究了三种方法，即可靠性框图法、故障树法和马尔可夫法。中国对安全仪表系统进行 SIL 验证，主要是分析计算硬件安全完整性，针对硬件所有的功能回路（SIF）进行 SIL 验证的一般过程，即先对每一个功能回路进行结构约束的计算，再进行安全可靠性的计算（失效概率 PFD 计算），判断其是否满足指定 SIL 的要求<sup>[9]</sup>。

#### 4.2.4 依托工程 HAZOP 分析与 SIL 定级结果

①本次功能安全评估 HAZOP 风险分析成果汇总如下：天然气调压站紧急停车系统中共有高风险点 4 个，低风险点 3 个，并提出建议措施 10 条。

对于辨识的各类风险点，典型的高风险点有入口单元紧急切断阀前压力、入口单元紧急切换阀后压力，燃机调压出口燃气压力、入口单元可燃气体泄露浓度、旋风分离单元可燃气体泄露浓度、计量单元可燃气体泄露浓度 1、计量单元可燃气体泄露浓度 2。

在分析过程中，针对现有系统风险点提出的各项建议措施，对完善机组工艺系统方案，保障系统安全稳定的运行具有重要意义。

②对天然气调压站安全相关系统的 SIL 分析，依据 HAZOP 风险分析结果，确定保护系统的安全仪表功能，并采用保护层分析法（LOPA）对保护功能进行 SIL 回路定级。

本次调压站紧急停车系统 SIL 分析定级结果包括：SIL3 回路 2 个、SIL2 回路 5 个、SIL1 回路 4 个。

其中，要求达到 SIL3 级的安全仪表功能有入口单元可燃气体泄露浓度高保护，旋风分离单元可燃气体泄露浓度高保护。

③由于功能安全评估集合来自设备厂家、设计院、电厂各单位工艺、控制、安全等全专业的人员，通过头脑风暴式的会议形式互相启发，也起到了对工艺系统风险点能够进

行充分的发掘，暴露容易被忽略的风险点的作用。

#### 4.3 实施案例的结论分析

结合依托工程，针对在联合循环机组天然气停车系统进行功能安全评估工作，总结几点关键点如下：

①目前调压站紧急停车 ESD 功能涉及的进出口阀门和排空阀门均为单一结构，若任何一个阀门失效，将影响整个 ESD 功能的实现，无法将调压站工艺导入安全状态。同时，进出口阀门还具有正常的工艺调节功能，一旦失效，会导致 ESD 功能同时失效。

②设备的选型。选择失效概率更低的阀门，更换进出口阀门和排空阀门，提高 SIL 等级。

③中国的 SIL 评价主要考虑硬件部分，而根据规范及标准，强调的是系统整体，如果一个系统达到 SILn 级别，应要求结构约束、部件的安全可靠性以及系统能力三者均达到 n 级。因此电厂方还应在硬件基础上更多地关注以下几点：软件；安全要求规格/规范书；设计、安装、使用、维护等遵循的安全手册；功能安全的评估和审核；质量管理体系；运行人员的能力和培训情况等。

④整个评估过程中，HAZOP 分析是安全相关系统应用的前提基础和关键环节。只有在 HAZOP 分析环节中对调压站紧急停车系统存在的风险进行充分辨识，并且详尽分析出每种风险场景的事故原因、可能性、后果等，才能进行准确的风险定级和 SIL 等级确定，使最终得出评估结果真实、可信，安全等级恰到好处，防止“保护拒动”，同时也避免“过保护”。

⑤事故数据的记录与积累。在评估过程中，对事故发生的可能性（频率）进行分析判断，需要事故数据、历史记录的经验积累，随着信息化的快速发展，技术条件足够支撑用信息化手段进行安全管理的需求，需要提升的是电力行业内的整体安全意识与安全数据资产意识。

## 5 结语

研究表明，在联合循环机组调压站系统应用安全相关系统是十分必要的，也是迫切需要的。安全相关系统在中国电力行业的应用，目前仍处于起步阶段，在实际的工程应用中，还需从发电厂保护系统的系统特点、实际需求、配套设备客观条件等方面考虑，选择合适的系统制造商，在工程实施以及后续运行维护中按照功能安全的标准规范执行，才能真正实现系统全生命周期的功能安全。

#### 参考文献

- [1] GB/T 21109.1—2007 过程工业领域安全仪表系统的功能安全第1部分:框架、定义、系统、硬件和软件要求[S].
- [2] GB/T 21109.3—2007 过程工业领域安全仪表系统的功能安全第3部分:确定要求的安全完整性等级的指南[S].
- [3] 杨放,李国斌,魏广丰,等.某天然气气站紧急停车系统的SIL验证方法[J].油气田地面工程,2021,38(12):103-110.