

水闸配电系统故障模式分析及影响研究

薛利刚

(江苏省蔷薇河地涵管理所,江苏 宿迁 223643)

摘要:针对小型水工闸站配电系统设备种类多、运行环境潮湿、防汛调度安全关联度高等问题,提出一种基于失效模式与影响分析(FMEA)的水闸配电系统风险评价方法。以桑墟水电站为工程案例,在梳理工程功能、配电系统组成及运行管理需求的基础上,构建“工程背景与对象确定—资料收集与系统划分—关键设备识别—故障模式识别—FMEA评价—风险排序与等级划分—改进措施与成果输出”的技术路线。同时,从严重度、发生度和探测度3个维度建立评分体系,计算风险优先数(RPN),并结合风险贡献率和改进前后RPN变化开展仿真分析,相关研究结果可为小型水利工程配电系统状态检修、风险分级管控和运维资源配置提供参考。

关键词:水闸; 配电系统; 故障模式; 影响分析; 运行维护

中图分类号:TV66 **文献标识码:**B **文章编号:**1007-7839(2026)10-0051-0007

Research on failure modes and effects analysis of sluice power distribution system

XUE Ligang

(Jiangsu Qiangwei River Culvert Management Office, Suqian 223643, China)

Abstract: A risk assessment method for sluice power distribution systems based on Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) is proposed to address the issues of multiple types of equipment, humid operating environments, and high safety relevance for flood control dispatch in small sluice stations. Taking Sangxu Hydropower Station as a case study, based on the sorting of engineering functions, distribution system composition, and operation management requirements, a technical route of “engineering background and object determination—data collection and system division—key equipment identification—failure mode identification—FMEA evaluation—risk ranking and grading—improvement measures and results output” is constructed. At the same time, a scoring system is established based on three dimensions: severity, occurrence, and detection. The risk priority number (RPN) is calculated, and simulation analysis is conducted based on the risk contribution rate and changes in RPN before and after improvement. The relevant research results can provide reference for the condition-based maintenance, risk grading control, and operation and maintenance resource allocation of small-scale water conservancy engineering distribution systems.

Key words: sluice; power distribution system; failure mode; effects analysis; operation and maintenance

水闸、水电站及闸站工程通常承担防洪、排涝、灌溉、供水、发电等综合任务,其配电系统是闸门启闭、机组运行^[1]、自动监控和现场照明等功能实现的基础。与一般工业配电系统相比,水利工程配电系统运行环境具有湿度高^[2]、汛期负荷波动明显、停运

检修窗口受调度约束等特点。一旦配电系统发生故障,可能造成闸门启闭受阻、保护控制失效、调度指令执行延迟等问题,从而影响工程安全运行^[3]。

传统闸站电气设备管理多依赖定期巡检、预防性试验和故障后检修。该模式能够满足基本运行

收稿日期: 2026-07-06

作者简介: 薛利刚(1982—)男,工程师,本科,主要从事水利水电工程相关工作。E-mail: bing6396252828@163.com

要求,但在故障风险排序、检修资源配置和隐患闭环管理方面仍存在不足。对于设备数量较多、运行年限差异较大且资料不完全的小型水工建筑物^[4],仅依靠经验判断难以准确识别配电系统的关键薄弱环节。

失效模式与影响分析(failure modes and effects analysis, FMEA)是一种由设备或功能单元出发,逐项识别潜在故障模式、故障原因、故障影响及控制措施的可靠性分析方法^[5]。该方法具有逻辑清晰、工程适用性强^[6]、便于形成风险排序结果等优点,适用于水闸配电系统故障风险识别和运维改进^[7-8]。

本文以桑墟水电站配电系统为研究对象,结合工程背景和运行管理需求,建立水闸配电系统FMEA分析流程,构建严重度、发生度和探测度评分规则,识别典型故障模式并计算风险优先数。在此基础上,结合仿真图表对故障模式风险排序、风险贡献率和改进效果进行分析,以期类似小型水利工程配电系统风险评价和状态检修提供参考。

1 工程概况及配电系统分析

1.1 工程背景

桑墟水电站位于江苏省沭阳县桑墟镇,工程上

游连接沐新干渠,下游通蔷薇河,是利用沐新河排洪或向连云港输送工农业用水进行发电,并兼具防洪、排涝、灌溉、送水等综合效益的小型水工建筑物。工程于1986年建成并并网发电,闸门全开设计流量为25 m³/s,运行管理与区域防汛、供水及灌溉调度密切相关。

根据工程资料,桑墟水电站现有5台机组,装机容量为5×125 kW,配套主变压器容量800 kVA,并设置高压柜、低压配电柜、直流屏、发电机控制柜及监控通信设备。工程建成后经历多次机电和电气设备改造,包括发电机组更换、高压柜更新、直流屏更新、低压配电柜更新以及监控系统完善等,为开展配电系统风险评价提供了典型工程背景。

1.2 配电系统构成与运行特点

结合桑墟水电站设备配置和运行功能,本文将配电系统划分为一次设备、二次控制保护设备和辅助监控设备。其中,一次设备包括主变压器、高压开关柜、低压配电柜、电缆线路和接地系统;二次设备包括直流屏、蓄电池、继电保护装置、测量回路和分合闸控制回路;辅助监控设备包括监控通信装置、计量采集装置和照明配电回路。主要单元及风险关注点如表1所示。

表1 水闸配电系统主要单元及风险关注点

类别	主要设备	风险关注点
一次设备	主变压器、高压柜、低压柜、电缆及接地系统	绝缘下降、接头过热、短路接地、开关拒动
二次控制保护设备	直流屏、蓄电池、继电保护装置、互感器及端子排	直流失电、保护误动或拒动、二次回路异常
辅助监控设备	监控通信装置、计量采集装置、照明配电箱	通信中断、采集异常、照明回路故障

由表1可见,配电系统故障既可能直接造成供电中断,也可能通过控制、保护、监控等二次系统间接影响工程运行。因此,本文在故障模式识别中不仅考虑一次设备的绝缘、温升和开断故障,也考虑直流系统、二次回路和监控通信环节的隐蔽性故障。

2 基于FMEA的配电系统风险评价方法

2.1 技术路线

水闸配电系统FMEA分析按照“工程背景与对象确定—资料收集与系统划分—关键设备识别—故障模式识别—FMEA评价—风险排序与等级划分—改进措施与成果输出”的步骤开展。技术路线如图1所示。



图1 水闸配电系统FMEA分析技术路线

2.2 评分指标与计算公式

FMEA评价通常从严重度 S 、发生度 O 和探测度 D 这3个维度对故障模式进行评分^[9-10]。严重度表示故障发生后对供电连续性、设备安全和工程调度的影响程度,发生度表示故障在运行维护过程中出现的可能性,探测度表示故障在发生前或发展过程中被巡检、监测、试验等手段及时发现的难易程度。各指标采用1~10分制,分值越高表示风险越大,其计算式为

$$RPN_i = S_i \times O_i \times D_i \quad (1)$$

式中: RPN_i 为第 i 个故障模式的风险优先数, S_i 为严重度评分; O_i 为发生度评分; D_i 为探测度评分。

RPN 值越大说明该故障模式需要优先采取控制措施,FMEA评分标准如表2所示。

表2 FMEA评分标准

指标类别	分值范围	评价含义
严重度 S	1~3	影响较小,局部设备或辅助功能短时异常
	4~6	影响局部供电或运行监视,需要计划处理
	7~8	影响主要设备运行或闸站调度执行
	9~10	可能造成全站停电、保护控制失效或重大运行风险
发生度 O	1~3	较少发生,通常仅在特殊条件下出现
	4~6	偶发或与设备老化、潮湿环境相关
	7~10	发生可能性较高,需重点监控
探测度 D	1~3	容易通过巡视、试验或在线监测发现
	4~6	发现难度中等,需专项检测
	7~10	隐蔽性强,常规巡检不易发现

2.3 风险等级划分与效果评价

结合小型闸站配电系统运行可靠性要求^[1],本文将 RPN 值划分为高风险、中风险和低风险3个等级。高风险故障应纳入重点隐患清单优先安排检测、检修或技术改造,中风险故障应纳入计划性维护持续跟踪,低风险故障可结合日常巡检和常规保养进行控制。

风险等级划分如下:

$$R_i = \begin{cases} \text{高风险, } RPN_i \geq 160 \\ \text{中风险, } 80 \leq RPN_i < 160 \\ \text{低风险, } RPN_i < 80 \end{cases} \quad (2)$$

为进一步分析各故障模式在系统总风险中的

相对贡献,定义风险贡献率,其计算式为

$$P_i = \frac{RPN_i}{\sum_{i=1}^n RPN_i} \times 100\% \quad (3)$$

式中: P_i 为第 i 个故障模式的风险贡献率, $\sum RPN_i$ 为全部故障模式 RPN 值之和。

对采取改进措施后的风险变化,可采用风险降低率进行表征,其计算式为

$$\eta_i = \frac{RPN_i - RPN'_i}{RPN_i} \times 100\% \quad (4)$$

式中: RPN_i 为改进前风险优先数; RPN'_i 为改进后风险优先数; η_i 为风险降低率。

需要说明的是,本文案例评分主要依据工程资料、同类闸站配电系统常见故障特征和运行维护经验进行示例化构建,正式应用时应结合现场设备台账、试验报告、故障记录和专家复核结果进行修正。

3 配电系统故障模式识别与风险评价

3.1 故障模式识别

根据配电系统构成及水利工程运行特点,本文从电源可靠性、开关动作可靠性、绝缘状态、温升状态、直流控制电源、二次回路和监控通信等方面识别故障模式。对于可能导致供电中断、保护失效、闸门控制受阻或故障扩大化的故障模式,提高严重度评分;对于受潮湿环境、设备老化和检修记录影响较明显的故障模式,提高发生度评分;对于隐蔽性强、需专项试验或在线监测才能发现的故障模式,提高探测度评分。配电系统故障模式评分热力图如图2所示。

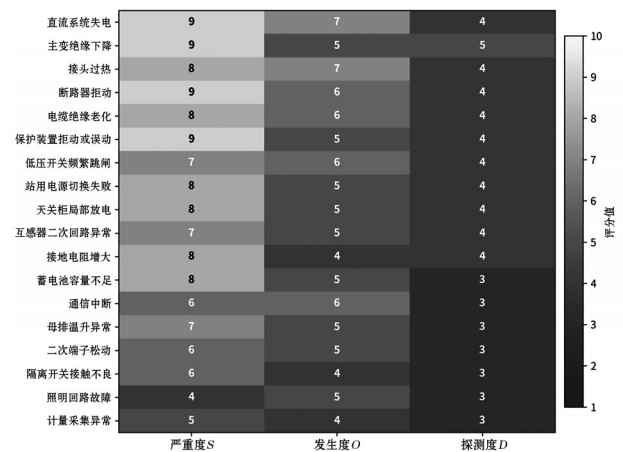


图2 配电系统故障模式评分热力图

由图2可知,直流系统失电、断路器拒动、主变绝缘下降和保护装置拒动或误动等故障模式严重

度评分较高,说明该类故障一旦发生,可能对闸站供电可靠性和运行安全产生明显影响。接头过热、低压开关频繁跳闸、通信中断等故障发生度相对较高,反映出潮湿环境、负荷波动和设备老化对配电系统运行状态具有持续影响。

3.2 FMEA 计算结果

桑墟水电站配电系统典型故障模式 FMEA 分析结果如表 3 所示。

由表 3 可知,18 类典型故障模式的 *RPN* 值介于 60~252 之间,其中高风险故障模式共 9 项、中风险故障模式共 6 项、低风险故障模式共 3 项。高风险故障主要集中在直流电源、主变压器、高压开关柜、低压配电柜、电缆线路和继电保护装置等环节,说明水闸配电系统风险并非仅来自一次设备,也与二次控制保护和直流电源系统密切相关。配电系统故障模式 *RPN* 排序如图 3 所示。

表 3 水电站配电系统典型故障模式 FMEA 分析

序号	设备单元	故障模式	主要原因	<i>S</i>	<i>O</i>	<i>D</i>	<i>RPN</i>	等级
1	直流屏	直流系统失电	蓄电池老化、充电模块故障、直流馈线短路	9	7	4	252	高风险
3	主变压器	主变绝缘下降	受潮、长期过负荷、绝缘材料老化	9	5	5	225	高风险
4	低压配电柜	接头过热	螺栓松动、接触电阻增大、负荷电流偏大	8	7	4	224	高风险
2	高压开关柜	断路器拒动	操作机构卡涩、分合闸线圈故障、控制回路异常	9	6	4	216	高风险
5	电缆及接头	电缆绝缘老化	运行年限较长、潮湿环境、外力损伤	8	6	4	192	高风险
6	继电保护装置	保护装置拒动或误动	定值错误、插件老化、二次回路接触不良	9	5	4	180	高风险
8	低压配电柜	低压开关频繁跳闸	负荷波动、开关容量不足、保护整定不合理	7	6	4	168	高风险
7	高压开关柜	开关柜局部放电	柜内积尘受潮、绝缘距离不足、局部绝缘缺陷	8	5	4	160	高风险
9	站用电源	站用电源切换失败	双电源切换装置故障、控制逻辑异常	8	5	4	160	高风险
10	互感器	互感器二次回路异常	端子松动、二次开路或短路、绝缘下降	7	5	4	140	中风险
11	防雷接地系统	接地电阻增大	接地体腐蚀、连接点松脱、土壤电阻率变化	8	4	4	128	中风险
14	蓄电池组	蓄电池容量不足	长期浮充、单体落后、维护试验不足	8	5	3	120	中风险
12	监控通信装置	通信中断	光纤链路异常、交换机故障、通信电源异常	6	6	3	108	中风险
13	母线系统	母排温升异常	接触面氧化、长期温升、紧固件松动	7	5	3	105	中风险
16	端子排及二次回路	二次端子松动	振动、潮湿、检修后紧固不到位	6	5	3	90	中风险
15	隔离开关	隔离开关接触不良	触头氧化、机械磨损、操作不到位	6	4	3	72	低风险
17	照明配电箱	照明回路故障	空气开关损坏、线路短路、灯具老化	4	5	3	60	低风险
18	电能计量装置	计量采集异常	采集模块故障、通信异常、接线错误	5	4	3	60	低风险

由图 3 可知,直流系统失电的 *RPN* 值最高(252),主变绝缘下降、接头过热、断路器拒动、电缆绝缘老化和保护装置拒动或误动等故障模式也处于高风险区间。这说明在闸站配电系统运维中,应优先关注具有高严重度和较强隐蔽性的故障模式,而不是仅依据故障发生频率安排检修资源。

3.3 风险故障模式与风险贡献分析

从高风险故障构成看,直流系统承担继电保护、分合闸控制、事故信号和监控通信等关键供电任务,一旦蓄电池容量不足或充电模块故障,在外部电源异常或站用电切换过程中可能造成保护和

控制回路失电,其后果具有连锁性和隐蔽性。主变压器绝缘下降和高压断路器拒动发生度相对较低,但严重度较高,一旦发生可能影响全站供电或扩大停电范围,应作为年度预防性试验和重点检修项目。主要故障模式风险贡献率如图 4 所示。

由图 4 可知,前 8 类主要故障模式的风险贡献率相对集中,直流系统失电贡献率最高达 9.5%,主变绝缘下降、接头过热、断路器拒动和电缆绝缘老化贡献率均较高。该结果说明,若能对少数高贡献故障模式进行重点治理,即可在较大程度上降低系统总体风险水平。

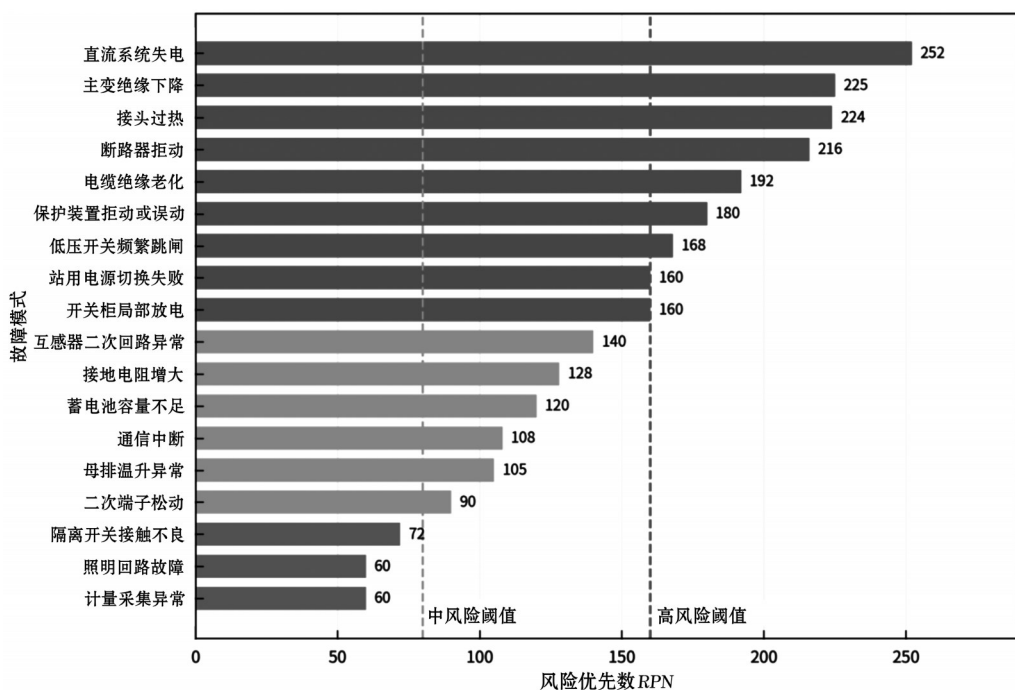


图3 配电系统故障模式 RPN排序

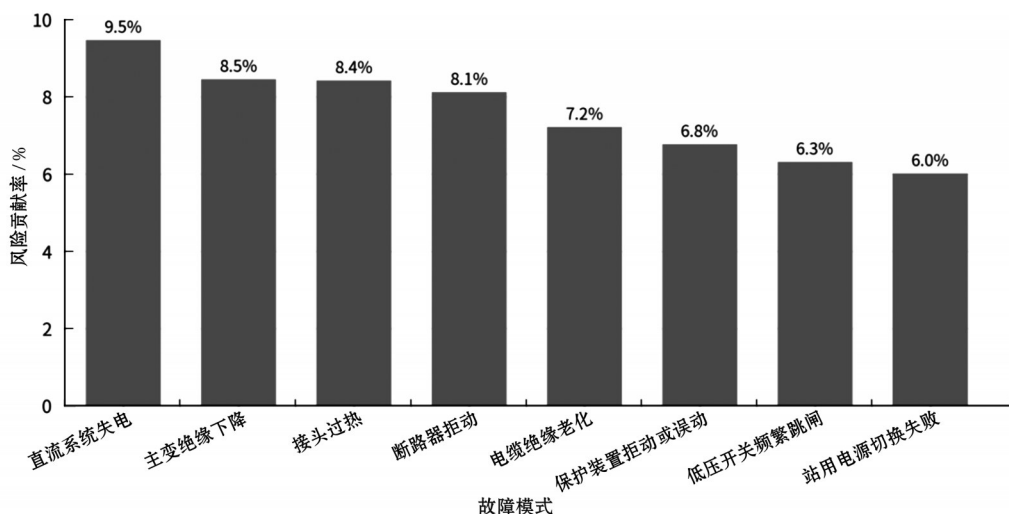


图4 主要故障模式风险贡献率

4 改进措施与效果评价

4.1 分级管控措施

根据FMEA风险排序结果,可将水闸配电系统运维措施分为重点治理、计划维护和常规巡检3个层级。对于高风险故障,应形成闭环整改清单,明确责任人、整改时限和复核方式;对于中风险故障,应纳入年度检修计划和状态跟踪;对于低风险故障,可结合日常巡视、卫生清扫和常规保养进行控制。高风险故障模式改进措施如表4所示。

4.2 改进效果估算

为验证改进措施的针对性,本文对高风险故障

模式进行改进后RPN估算。考虑到严重度通常由故障后果决定,短期内不宜随意降低,因此改进后RPN主要通过降低发生度和探测度实现。例如,蓄电池容量核验和在线告警可降低直流电源故障的发生可能性和不可探测性,红外测温 and 紧固检查可降低接头过热的发生度,断路器动作试验和机构维护可降低拒动风险。高风险故障模式改进前后RPN对比分别见表5和图5。

由表5和图5可知,经针对性措施控制后,高风险故障模式的RPN值均明显下降,风险降低率约为46.4%~55.0%。其中,直流系统失电的RPN由252降至135,说明蓄电池容量核验、模块备份和告警完善

表 4 高风险故障模式改进措施

故障模式	主要原因	改进措施
直流系统失电	蓄电池老化、充电模块故障	开展蓄电池容量核验,配置备用充电模块,完善直流馈线告警
主变绝缘下降	受潮、绝缘老化、长期过负荷	开展绝缘电阻、介损、油温和红外测温检查
接头过热	螺栓松动、接触电阻增大	开展红外测温和紧固检查,建立温升异常台账
断路器拒动	机构卡涩、分合闸线圈异常	开展分合闸动作试验和机构润滑维护
电缆绝缘老化	潮湿环境、运行年限长	开展绝缘试验,治理电缆沟积水和潮湿环境
保护装置拒动或误动	定值错误、插件老化、二次回路异常	开展保护定值复核、二次回路校验和插件检查

表 5 高风险故障模式改进前后 RPN对比

故障模式	改进前 RPN	改进后 RPN	改进前等级	改进后等级	风险降低率/%
直流系统失电	252	135	高风险	中风险	46.4
主变绝缘下降	225	108	高风险	中风险	52.0
接头过热	224	120	高风险	中风险	46.4
断路器拒动	216	108	高风险	中风险	50.0
电缆绝缘老化	192	96	高风险	中风险	50.0
保护装置拒动或误动	180	81	高风险	中风险	55.0
低压开关频繁跳闸	168	84	高风险	中风险	50.0
站用电源切换失败	160	72	高风险	低风险	55.0
开关柜局部放电	160	72	高风险	低风险	55.0

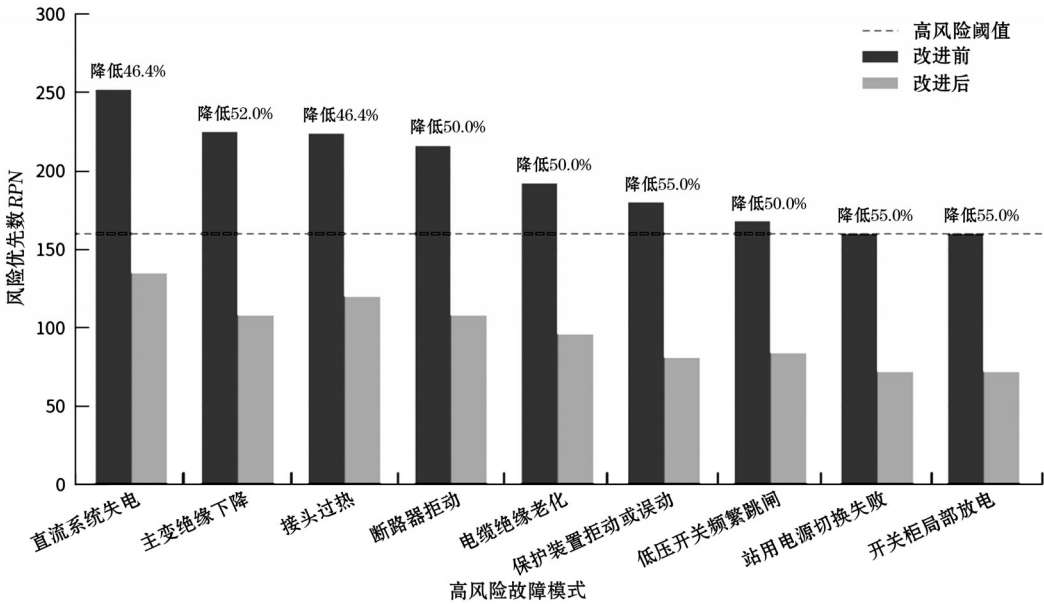


图 5 改进前后高风险故障模式 RPN对比

能够显著提高故障可发现性和处置及时性,主变绝缘下降、接头过热和断路器拒动等故障也通过预防性试验和状态检测实现风险降低。改进前后风险等级数量变化如图6所示。

由图6可知,改进前高风险故障模式数量为9项,中风险6项,低风险3项;改进后高风险故障模式数量降为0项,低风险为10项。该结果说明,针对高RPN故障模式实施分级治理后,系统风险由集中高

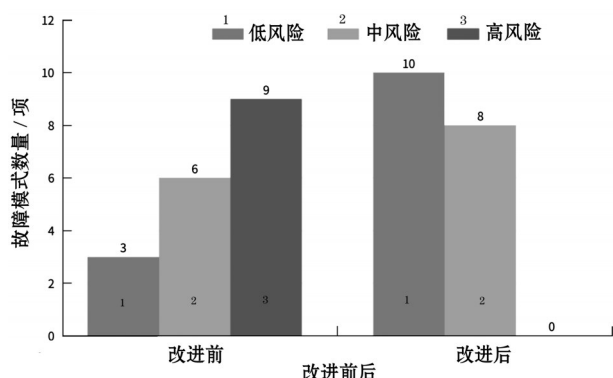


图6 改进前后风险等级数量变化

风险状态转向中低风险状态,配电系统运维安全裕度得到提升。

研究表明,直流系统失电、主变绝缘下降、接头过热、断路器拒动、电缆绝缘老化和保护装置拒动或误动等故障模式风险优先数较高,是水闸配电系统运维管理中的重点控制对象。经蓄电池容量测试、开关柜预防性试验、红外测温、保护定值复核、二次回路检查和备品备件优化等措施后,系统整体风险水平明显降低。

4.3 运维管理建议

(1)建立配电系统高风险故障清单。将直流电源、主变压器、高低压开关柜、电缆绝缘、低压柜接头和继电保护装置纳入重点隐患清单,并在汛前检查和年度检修中优先安排。

(2)完善状态监测与预防性试验。对高低压柜开展红外测温,对主变压器、电缆和接地系统开展绝缘及接地测试,对直流系统开展容量核验和充放电检查,形成可追溯的试验记录。

(3)加强潮湿环境治理。针对水利工程厂房湿度高、季节性凝露明显等特点,应完善柜体密封、除湿加热、通风和电缆沟排水措施,减少绝缘劣化和端子锈蚀。

(4)强化二次回路图实一致性管理。定期核对端子编号、回路标识、保护定值和现场接线状态,避免因二次回路接触不良或图纸不一致造成误判和延误处置。

(5)优化备品备件配置。对充电模块、继电器、断路器辅助触点、熔断器、端子排、温湿度控制器等易损且影响较大的备品备件设置最低库存,提高故障恢复效率。

5 结 论

(1)本文以桑墟水电站为案例,建立了适用于

小型水闸和闸站配电系统的FMEA分析流程。通过系统划分、故障模式识别、RPN计算和风险等级划分,可将配电系统运行风险由经验判断转化为相对量化的风险排序结果。

(2)案例计算结果表明,直流系统失电、主变绝缘下降、接头过热、断路器拒动、电缆绝缘老化、保护装置拒动或误动、低压开关频繁跳闸、站用电源切换失败和开关柜局部放电为配电系统主要高风险故障模式。这些故障具有影响范围大、隐蔽性强或受潮湿环境影响明显等特点。

(3)针对高风险故障提出的蓄电池容量核验、红外测温、柜内防潮、绝缘预防性试验、断路器动作试验、二次回路校验和备品备件优化等措施,可有效降低故障发生度和探测度,提高配电系统运行可靠性。

(4)本文数据为基于工程背景和运维经验的案例化评分,后续研究应结合现场故障台账、在线监测数据和行业专家评分结果,进一步修正发生度、探测度及风险阈值,并可引入层次分析法、模糊综合评价等方法提高FMEA评价的客观性。

参考文献:

- [1] International Electrotechnical Commission. IEC 60812: 2018 Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA)[S]. Geneva:IEC,2018.
- [2] 全国电工电子产品可靠性与维修性标准化技术委员会. 系统可靠性分析技术 失效模式和影响分析(FMEA)程序:GB/T 7826—2012[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- [3] 中华人民共和国水利部. 水闸技术管理规程:SL 75—2014[S]. 北京:中国水利水电出版社,2014.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 电气装置安装工程电气设备交接试验标准:GB 50150—2016[S]. 北京:中国计划出版社,2016.
- [5] 国家能源局. 电力设备预防性试验规程:DL/T 596—2021[S]. 北京:中国电力出版社,2021.
- [6] 李志强,王建华,刘鹏. 基于FMEA的变电站设备风险评价方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(12):157-164.
- [7] 陈晓峰,周明,赵磊. 水利工程电气设备运行维护风险分析与对策[J]. 水利技术监督,2021(6):82-86.
- [8] 张海波,刘文涛,郭伟. 配电系统故障模式识别及状态检修策略研究[J]. 电工技术,2022(18):95-98.
- [9] 王磊,朱宁,黄海. 小型水电站电气设备安全运行管理探讨[J]. 小水电,2020(4):56-60.
- [10] STAMATIS D H. Failure mode and effect analysis:FMEA from theory to execution [M]. 2nd ed. Milwaukee: ASQ Quality Press,2003.