

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200867

变电站继电保护设备状态检修可靠性分析方法研究

叶远波¹, 刘宏君², 黄太贵¹, 谢民¹, 赵子根²

(1. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230022; 2. 长园深瑞继保自动化有限公司, 广东 深圳 518057)

摘要: 为进一步提高保护系统的可靠性, 节约供电企业检修成本, 需要对变电站继电保护设备状态检修的可靠性进行评估。首先, 根据失效模式与影响分析法, 分析设备的失效风险因素及影响, 选取设备失效的可检度、发生度、严重度三项指标, 以变电站线路保护装置本体为例进行风险评估, 并提出风险应对策略, 以提高继电保护设备的可靠性。其次, 引入了状态空间法, 分别建立变电站继电保护设备定期检修、状态检修马尔科夫模型, 应用220 kV线路保护实例数据验证模型合理性, 得出状态检修可提高保护设备可用度的结论。最后, 通过仿真对设备可靠性进行综合分析, 验证定期检修效率、状态评价系数及定期检修周期对保护设备可靠性的影响。

关键词: 继电保护; 状态检修; 可靠性分析; 状态空间法

Research on the reliability analysis method of condition-based maintenance of relay protection equipment in substation

YE Yuanbo¹, LIU Hongjun², HUANG Taigui¹, XIE Min¹, ZHAO Zigen²

(1. State Grid Anhui Electric Power Limited Company, Hefei 230022, China;

2. CYG SUNRI CO., LTD., Shenzhen 518057, China)

Abstract: To improve the reliability of the protection system and reduce the maintenance cost of the power supply enterprise, it is necessary to evaluate the reliability of the state maintenance of the relay protection equipment in the substation. First, according to the failure mode and impact analysis method, the failure risk factors and influences of equipment are analyzed. Three aspects of equipment failure, namely, detectability, occurrence and severity, are selected. Taking the substation line protection device itself as an example, risk assessment is carried out and risk countermeasures are proposed to improve the reliability of relay protection equipment. Secondly, the state space method is introduced to establish the Markov model of substation relay protection equipment regular and state maintenance respectively. The rationality of the model is verified by a 220 kV line protection example data, and the conclusion is drawn that state maintenance can improve the availability of protection equipment. Finally, a comprehensive analysis of equipment reliability is carried out through simulation to verify the impact of periodic maintenance efficiency, the condition evaluation coefficient and the periodic maintenance cycle on the reliability of protective equipment.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5212001900813).

Key words: relay protection; condition maintenance; reliability analysis; state space method

0 引言

虽然投运变电站数目不断增长, 设备规模逐年扩大, 但是变电站继电保护设备的状态检修研究仍未真正地深入开展, 仅仅停留在探究阶段, 缺乏成熟的规程、导则。为加快建立健全变电站一体化、科学化、规范化的状态检修机制, 提高供电可靠性、

发展优质电能, 变电站继电保护设备的状态检修研究探索迫在眉睫、意义重大^[1]。

针对变电站继电保护设备的状态检修评估, 国内外已有较多学者开展了相应的研究^[2-16]。文献[2]利用马尔科夫模型建立了较为详细的状态空间模型, 确定了继电保护装置的最佳检修周期; 文献[3]围绕继电保护全面实时状态评估和可靠有效运检的目标, 提出全景信息开放和在线运检的需求; 文献[5]利用威布尔分布模型建立了计及设备老化与不

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(5212001900813)

完全计划检修的智能变电站保护系统可靠性评估模型; 文献[8]利用一种基于三参数威布尔分布的灰色估计法解决了小样本使得评估结果不可靠的问题; 文献[9]利用站内冗余信息实现了保护系统的可靠性评估。虽然已有较多学者针对此问题开展了研究, 但是仍存在一些未被解决的问题。

本文基于前人的研究成果, 从变电站继电保护设备状态检修在实际应用中面临的关键问题出发, 分析其具体影响因素, 探究状态检修最佳方案, 为推进状态检修在变电站继电保护设备的实际应用提供支撑。首先根据失效模式与影响分析法, 对设备的失效风险因素及影响进行了分析, 选取了设备失效的可检度、发生度、严重度三项指标, 以变电站线路保护装置本体为例进行风险评估。其次, 应用马尔科夫随机过程及其数学模型, 建立变电站继电

保护设备定期检修、状态检修马尔科夫模型, 应用220 kV线路保护实例数据验证模型合理性, 并通过仿真对设备可靠性进行综合分析验证。最后, 建立考虑隐性故障的变电站继电保护设备概率模型, 分析隐性故障对变电站继电保护设备可靠性的影响。

1 继电保护设备的失效分析与风险评估

1.1 继电保护设备的失效分析

1.1.1 变电站继电保护设备的结构组成

以传统变电站为例, 继电保护设备硬件设计采取插件结构, 基于硬件平台针对不同的保护对象加载相应软件实现保护功能^[7]。其典型的硬件系统结构如图1所示, 按照模块功能主要可以分为以下7个部分。

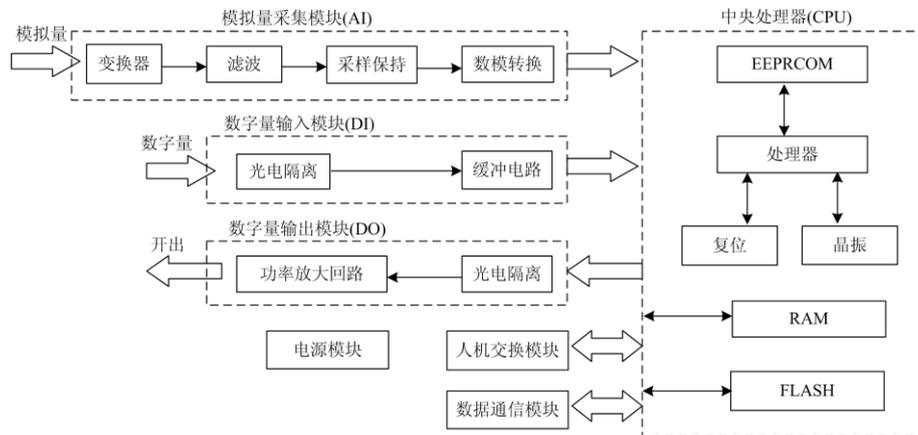


图1 典型变电站继电保护设备硬件结构图

Fig. 1 Hardware structure diagram of typical substation relay protection equipment

1) 中央处理器: 联系与控制各个模块, 确保设备正常运行并完成预定的各项功能。

2) 模拟量采集模块: 采集电压电流等模拟量, 通过输入变换、滤波、保持、多路及数模转换等环节实现模拟量与数字量之间的转换。

3) 数字量输入模块: 收集触点信息, 做好设备间的光电隔离和缓冲。

4) 数字量输出模块: 实现保护动作, 发出跳合闸或告警信号。

5) 电源模块: 提供设备工作电源。

6) 数据通信模块: 实现与其他设备或网络层间的数据传输。

7) 人机交互模块: 显示设备信息, 便于工作人员进行操作。

1.1.2 变电站继电保护设备的失效影响

变电站继电保护设备失效的影响主要包括操作

异常、告警错误、误动作、拒动作等, 根据失效对设备运行影响的严重性可以分为四个级别:

1) 可维持继保设备正常运行: 如设备同步时钟不正确、信号异常、回路故障但不影响跳合闸出口和断路器开合等。

2) 影响设备正常运行: 如显示面板或采样异常等。

3) 导致设备拒动作: 如回路断线、保护设备无法正常动作等。

4) 导致设备误动作: 如直流接地、保护异常等。

1.2 变电站继电保护设备的风险评估

1.2.1 风险评价指标

对于变电站继电保护设备的风险评估应当包括设备自身的风险以及因继保设备故障导致的一次设备风险。为此变电站继电保护设备风险指标应当包括设备失效的可能性以及造成危害的严重性^[2,4,17-20]。

与此同时及时有效地检测和发现故障可以减少和避免设备失效情况的发生,因此选择变电站继电保护设备实效的可检度、发生度、严重度作为风险评价指标,风险(R)可用可检度(D)、发生度(O)、严重度(s)相乘表示。

$$R = D \times O \times S \quad (1)$$

1.2.2 风险评估

运用失效模式与影响分析法(FMEA)可对变电站继电保护设备状态进行风险评估,以失效风险因素作为对象分析设备失效模式及影响,按照风险指标的等级划分算出风险数值后根据因素所在模块加权计算^[13],得到变电站继电保护设备各模块的风险并采取相应措施,再进入流程进行甄别,不断优化改进,具体流程如图2所示。

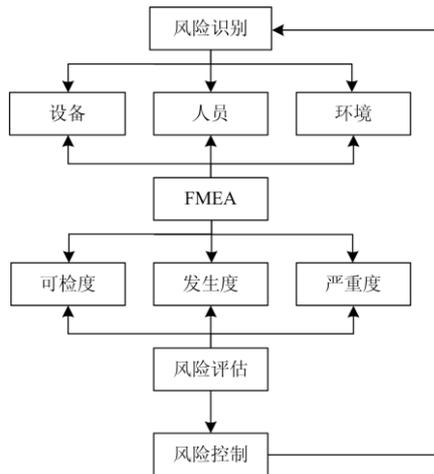


图2 风险分析流程图

Fig. 2 Risk analysis flowchart

以 1.1.1 节所述的典型变电站继电保护设备硬件结构为例,针对这类变电站各模块存在的异常或失效模式进行风险识别和评估,如表1所示。

三项评价指标中严重度直接关系变电站继电保护设备失效影响情况,故此以严重度作为权重对设备模块进行加权计算:

$$\left\{ \begin{aligned} R_{CPU} &= (24 \times 3 + 20 \times 4) / (3 + 4) = 21.74 \\ R_{AI} &= (6 \times 2 + 12 \times 3 + 20 \times 4) / (2 + 3 + 4) = 14.22 \\ R_{DI} &= (12 \times 3 + 8 \times 4) / (3 + 4) = 9.71 \\ R_{DO} &= (3 \times 1 + 18 \times 3 + 20 \times 4) / (1 + 3 + 4) = 17.13 \\ R_{PSU} &= (12 \times 1 + 23 \times 3) / (1 + 3) = 21 \\ R_{CU} &= (12 \times 3 + 12 \times 1) / (3 + 1) = 12 \\ R_{MMI} &= (8 \times 2 + 6 \times 2) / (2 + 2) = 7 \end{aligned} \right. \quad (2)$$

表1 变电站继电保护设备本体失效模式与影响
Table 1 Failure mode and influence of substation relay protection equipment

模块名称	失效模式	影响	D	S	O	R
中央处理器	元件损坏	拒动作	4	3	2	24
模拟量采集模块	采样/转换故障	采样异常	1	2	3	6
	采样/转换故障	拒动作	2	3	2	12
	采样/转换故障	误动作	5	4	1	20
数字量输入模块	光耦损坏	拒动作	2	3	2	12
	变位异常	误动作	2	4	1	8
数字量输出模块	信号出口故障	告警错误	3	1	1	3
	跳闸出口故障	拒动作	3	3	2	18
	跳闸出口故障	误动作	5	4	1	20
电源模块	断电	拒动作	4	3	2	24
	电压不稳	告警错误	4	1	3	12
数据通信模块	元件损坏	拒动作	2	3	2	12
	抗干扰性能差	告警错误	4	1	3	12
人机交互模块	按键困难	难以操作	2	2	2	8
	显示不佳	难以操作	1	2	3	6

按照综合风险数值排序:中央处理器>电源模块>数字量输出模块>模拟量采集模块>数据通信模块>数字量输入模块>人机交互模块,为提高设备可靠度,应当在日常工作中侧重综合风险更大的模块,采取必要的防范措施,以提高变电站继电保护设备的可靠性。

2 继电保护设备状态检修可靠性分析

2.1 继电保护设备状态检修马尔科夫模型的建立

本节引入自检系数、状态评价系数,分别表示微机保护自检功能和状态评价的效率,在运用状态空间法分析变电站继电保护设备可靠性之前,进行如下假设:

- 1) 检修工作中将确认设备中存在的全部故障并修复完好,同时不会因检修过程中存在误操作带来其他故障。
- 2) 变电站继电保护设备在定期检修过程中,设备需停电并退出运行。
- 3) 变电站继电保护设备的自检功能不影响设备正常运行。
- 4) 变电站继电保护设备处于状态监测与评估的情况下设备保持运行状态。
- 5) 不将人为原因和软件故障纳入分析考虑。
- 6) 变电站继电保护设备发生各类故障检修人员应急效率均相等。
- 7) 变电站继电保护设备在各个状态之间转移的时长需符合指数分布。

在上述假设基础之上, 分别建立变电站继电保护设备定期检修、状态检修马尔科夫模型, 分析采取不同的检修方式对设备可靠性的影响。建立变电站继电保护设备采取定期检修方式下的马尔科夫模型如图 3 所示。

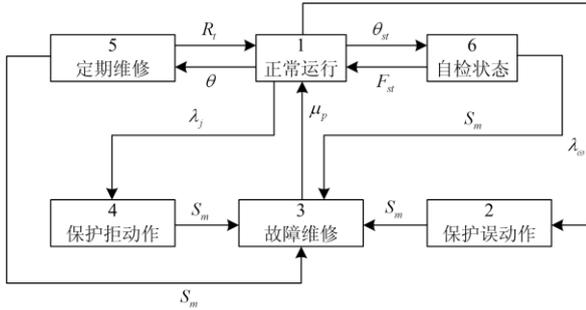


图 3 变电站继电保护设备定期检修状态空间模型

Fig. 3 State space model for periodic maintenance of relay protection equipment in substations

继电保护状态检修主要依据变电站保护设备的在运时间以及运行状态来确定设备的检修项目与时间。故此在变电站继电保护设备采取状态检修的基础上, 考虑状态监测与评估效率, 建立变电站继电保护设备采取状态检修方式下的马尔科夫模型如图 4 所示。

依据上述空间状态模型, 可分别列出变电站继电保护设备在定期检修和状态检修下的状态转移矩阵, 分别用 T 和 T' 表示。

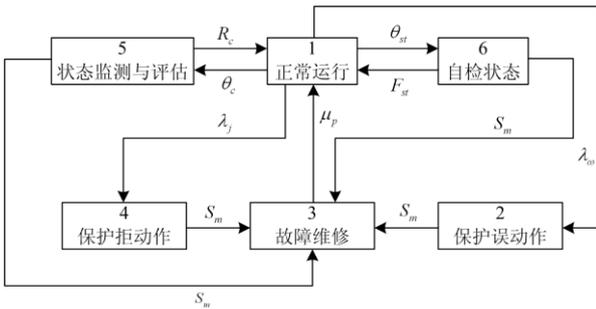


图 4 变电站继电保护设备状态检修状态空间模型

Fig. 4 State space model for condition-based maintenance of relay protection equipment in substations

$$T = \begin{bmatrix} -a'_{11} & \lambda_{\omega} & 0 & \lambda_j & \theta & \theta_{st} \\ 0 & -a'_{22} & S_m & 0 & 0 & 0 \\ \mu_p & 0 & -a'_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_m & -a'_{44} & 0 & 0 \\ R_i & 0 & S_m & 0 & -a'_{55} & 0 \\ F_{st} & 0 & S_m & 0 & 0 & -a'_{66} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T' = \begin{bmatrix} -a'_{11} & \lambda_{\omega} & 0 & \lambda_j & \theta & \theta_{st} \\ 0 & -a'_{22} & S_m & 0 & 0 & 0 \\ \mu_p & 0 & -a'_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_m & -a'_{44} & 0 & 0 \\ R_i & 0 & S_m & 0 & -a'_{55} & 0 \\ F_{st} & 0 & S_m & 0 & 0 & -a'_{66} \end{bmatrix} \quad (4)$$

在式(3)、式(4)中, 状态转移矩阵每行的元素之和为 0。

变电站继电保护设备分别采取定期检修方式和状态检修方式下 6 个状态的驻留概率矩阵分别为

$$P = [p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4 \ p_5 \ p_6] \quad (5)$$

$$P' = [p'_1 \ p'_2 \ p'_3 \ p'_4 \ p'_5 \ p'_6] \quad (6)$$

变电站继电保护设备的状态转移矩阵与驻留概率矩阵有如下关系:

$$P \times T = 0 \quad (7)$$

$$P' \times T' = 0$$

根据上面分析, 分别计算获得两种方式下各个状态的概率。

本文假定变电站继电保护设备的自检功能不影响设备正常运行, 而在定期检修过程中, 设备需停电并退出运行, 因此变电站继电保护设备采取定期检修方式时设备的可用度为

$$A = p_1 + p_6 \quad (8)$$

上文假定变电站继电保护设备在状态监测与评估的情况下保持运行状态, 因此变电站继电保护设备采取状态检修方式时设备的可用度为

$$A' = p'_1 + p'_5 + p'_6 \quad (9)$$

2.2 实例计算与分析

本文以某供电公司 220 kV 线路保护装置为例, 收集并统计保护相关数据, 结合有关文献资料形成的变电站继电保护设备定期检修和状态检修方式下马尔科夫模型数据参数见表 2。

将上述参数代入式(8)可以算出变电站继电保护设备采取定期检修方式下设备可用度为 $A = 99.563\%$, 2017 年度至 2019 年度该供电公司 220 kV 线路保护装置实际正确动作率数值如表 3 所示。

经过对比, 可用度的计算结果与变电站继电保护设备实际数值较为接近, 说明模型建立过程与计算分析比较合理。

将上述参数代入式(9)可以算出变电站继电保护设备状态检修方式下的设备可用度为 $A' = 99.624\%$, 由此可见, 变电站继电保护设备状态检修方式下的可用度相比定期检修方式下的可用度有所提升, 进一步证明了上述模型的合理性。

表 2 变电站继电保护设备马尔科夫模型数据参数
Table 2 Data parameters of Markov model for relay protection equipment in substation

参数名称	参数取值
保护误动作失效率 λ_w	16.987×10^{-6} 次/h
保护拒动作失效率 λ_j	12.154×10^{-6} 次/h
保护平均修复效率 μ_p	0.2 次/h
保护检修人员平均应急效率 S_m	0.5 次/h
保护定期检修频率 θ	38.052×10^{-6} 次/h
保护定期检修效率 R_l	0.25 次/h
保护状态评价系数 c	0.9
保护状态评价周期 T_c	9×10^3 次/h
保护状态评价频率 θ_c	1×10^{-4} 次/h
保护状态评价效率 R_c	0.4 次/h
保护自检成功系数 s	0.9
保护故障概率 θ_p	4.444 次/h
保护自检功能频率 θ_{st}	4 次/h
保护自检频率 F_{st}	3 600 次/h

表 3 2017—2019 年度 220 kV 线路保护装置正确动作率数值
Table 3 2017—2019 220 kV line protection device correct operation rate value

年度	保护装置正确动作率/%
2017	99.328
2018	99.469
2019	99.607

2.3 仿真分析

以变电站 220 kV 线路保护设备为例,根据站内各个设备参数及数据进行仿真建模,分为 3 种情形对上述模型进行分析:

1) 以变电站 220 kV 线路保护设备定期检修的效率 R_l 为自变量,以变电站 220 kV 线路保护设备可用度 A 为因变量,考察两者间的关系,曲线如图 5 所示。

分析得出结论如下:在变电站继电保护设备采取定期检修的情形之下,随着定期检修效率的增加,变电站继电保护设备的可用度提高,且增长率逐步下降,直至定期检修效率增长到一定程度时,保护设备的可用度不再提高。

2) 以变电站 220 kV 线路保护设备状态评价的效率 R_c 为自变量,以变电站 220 kV 线路保护设备可用度 A 为因变量,考察两者间的关系,曲线如图 6 所示。

分析得出结论如下:在变电站继电保护设备采取状态检修的情形下,保护设备其余参数保持不变时,相比保护设备采取定期检修方式,变电站继电保护设备的可用度将得到较大提升。

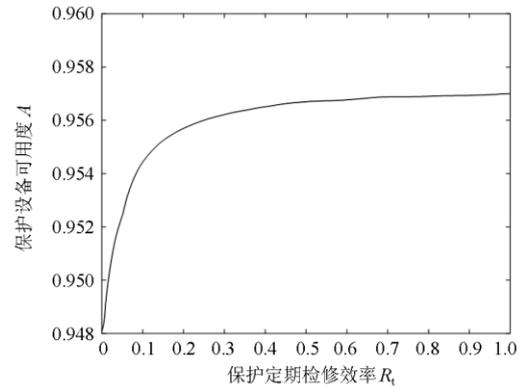


图 5 定期检修下检修效率对变电站继电保护设备可用度的影响曲线

Fig. 5 Effect of maintenance efficiency on the availability of relay protection equipment in substations under regular maintenance

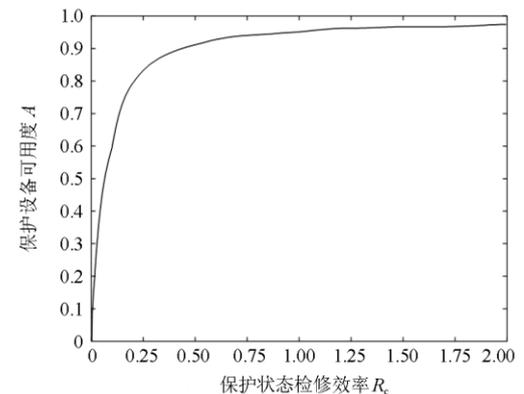


图 6 状态检修下检修效率对变电站继电保护设备可用度的影响曲线

Fig. 6 Effect of maintenance efficiency on the availability of relay protection equipment in substations under condition maintenance

3 变电站继电保护设备的隐性故障分析

变电站继电保护设备的隐性故障因出现在设备的运行阶段,而状态监测是状态检修的基础和重要组成部分^[21-23],本节针对变电站继电保护设备的隐性故障建立以下马尔科夫状态空间模型,如图 7 所示。

图 7 中变电站继电保护设备存在隐性故障的马尔科夫模型中 7 个状态具体含义按顺序分别为:正常稳定运行状态、设备中存在可导致保护拒动的隐性故障状态、设备中存在拒动故障状态、设备状态监测及评估状态、备修复状态、设备中存在误动故障状态、设备中存在可导致保护拒动的隐性故障状态。

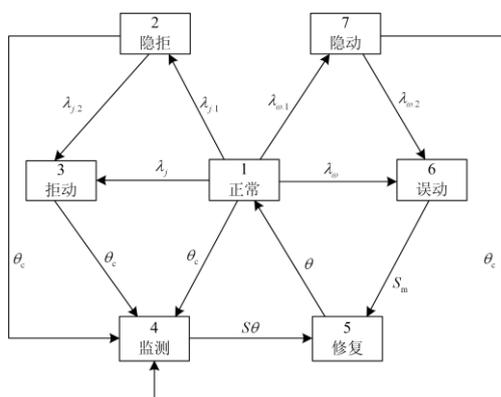


图 7 变电站继电保护设备存在隐性故障的马尔科夫模型

Fig. 7 Markov model of hidden faults in relay protection equipment of substation

依据上述马尔科夫空间状态模型, 可以列出变电站继电保护设备存在隐性故障的状态转移矩阵 T 。

$$T = \begin{bmatrix} -a_{11} & \lambda_{j,1} & \lambda_j & \theta_c & 0 & \lambda_w & \lambda_{w,1} \\ 0 & -a_{22} & \lambda_{j,2} & \theta_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -a_{33} & \theta_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -a_{44} & s\theta & 0 & 0 \\ \theta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \theta & -a_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \theta_c & 0 & \lambda_{w,2} & -a_{77} \end{bmatrix} \quad (10)$$

变电站继电保护设备存在隐性故障的 7 个状态的驻留概率矩阵可用式(11)表示, 同时各元素之间还存在 $\sum_{i=1}^7 p_i = 1$

$$P = [p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4 \ p_5 \ p_6 \ p_7] \quad (11)$$

分别解得变电站继电保护设备存在隐性故障时各个状态的稳态概率。

以某供电公司 220 kV 线路保护装置为例, 收集并统计保护相关数据结合有关文献资料形成的变电站继电保护设备存在隐性故障时的马尔科夫模型数据参数见表 4 所示。

下面将采用参数变化法分别对 λ_w 、 λ_j 、 $\lambda_{w,1}$ 、 $\lambda_{j,1}$ 、 $\lambda_{w,2}$ 、 s 、 θ_c 、 θ 、 S_m 9 个参数进行参数的灵敏度分析。分析方法具体为: 在其他参数保持不变的前提下, 分别将上述 9 个参数取值乘以 1.1 和 0.9 两个浮动系数, 求得保护设备可用度, 通过比较两个求得的可用度数值, 分析各个参数变化对变电站继电保护设备可用度的影响程度, 即参数变化的灵敏度, 通过对上述参数的灵敏度分析, 可以为进一步提高变电站继电保护设备的可用度和可靠性提供有力依据。

表 4 设备存在隐性故障时马尔科夫模型数据参数取值

Table 4 Values of Markov model data parameters when the devices have hidden fault

参数名称	参数取值
设备误动作的故障率 λ_w	16.987×10^{-6} 次/h
设备拒动作的故障率 λ_j	12.154×10^{-6} 次/h
隐性误动状态的概率 $\lambda_{w,1}$	10^{-8} 次/h
设备转移至隐性拒动状态的概率 $\lambda_{j,1}$	10^{-8} 次/h
设备隐性误动状态显现的转移概率 $\lambda_{w,2}$	0.9 次/h
设备隐性拒动状态显现的转移概率 $\lambda_{j,2}$	0.9 次/h
设备状态评价发现故障率 s	0.9
设备的状态评价频率 θ_c	9×10^3 h
设备的修复效率 θ	1×10^{-6} 次/h
设备检修人员的平均应急效率 S_m	0.4 次/h

当参数浮动系数为 1.1 时变电站继电保护设备的可用度如图 8 所示。

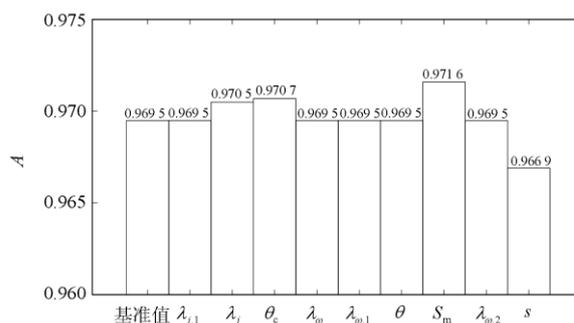


图 8 参数浮动系数为 1.1 时变电站继电保护设备的可用度

Fig. 8 Availability of relay protection equipment when the parameter floating coefficient is 1.1

当参数浮动系数为 0.9 时变电站继电保护设备的可用度如图 9 所示。

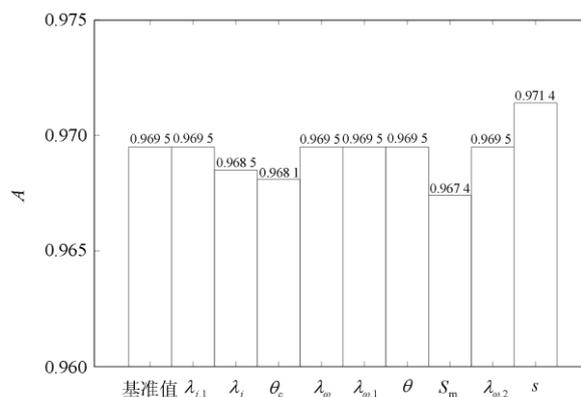


图 9 参数浮动系数为 0.9 时变电站继电保护设备的可用度

Fig. 9 Availability of relay protection equipment when the parameter floating coefficient is 0.9

通过上述参数变化对变电站继电保护设备可用度影响的灵敏度分析来看,其中 λ_j 、 θ_c 、 s 、 S_m 4个参数对变电站继电保护设备的可靠性影响较大,因此在变电站继电保护设备状态检修的实际工作中,更多地关注和提升以上4个参数,可以更好地提高变电站继电保护设备的可靠性。

4 结束语

综上所述,本文在可靠性数学理论及现有变电站继电保护设备状态检修的理论之上,深入研究变电站继电保护设备状态检修的可靠性,经过分析与总结,得出以下重要结论:

1) 通过对变电站继电保护设备的失效分析,提出以可检度、发生度、严重度进行风险评价,并完成了站内各个模块的风险数值排序。

2) 建立了变电站继电保护设备定期检修、状态检修马尔科夫模型,分析采取不同的检修方式对设备可靠性的影响,获得了不同状态下设备的可用度,并利用实例验证了模型的合理性,得到了保护设备定期检修效率和定期评价效率与设备可用度之间的关系。

3) 完成了变电站继电保护设备的隐性故障马尔科夫状态空间模型的建立,并研究不同参数对可靠性的影响程度,其中拒动故障率 λ_j 、状态评价频率 θ_c 、状态评价发现故障率 s 、保护设备检修人员的平均应急效率 S_m 4个参数对变电站继电保护设备的可靠性影响较大。

参考文献

- [1] 王嘉琦. 智能变电站继电保护实时可靠性及风险评估研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
WANG Jiaqi. Research on real-time reliability and risk assessment of relay protection in smart substations[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [2] 张雪松, 王超, 程晓东. 基于马尔可夫状态空间法的超高压电网继电保护系统可靠性分析模型[J]. 电网技术, 2008, 32(13): 94-99.
ZHANG Xuesong, WANG Chao, CHENG Xiaodong. Reliability analysis model for protective relaying system of UHV power network based on Markov state-space method[J]. Power System Technology, 2008, 32(13): 94-99.
- [3] 刘琨, 黄明辉, 李一泉, 等. 智能变电站继电保护在线运检方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(7): 58-65.
LIU Kun, HUANG Minghui, LI Yiquan, et al. Research on online operation method for protective relay of smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 58-65.
- [4] 叶远波, 谢民, 王嘉琦, 等. 基于Markov模型与GO法的智能变电站继电保护系统实时可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 47-55.
YE Yuanbo, XIE Min, WANG Jiaqi, et al. Real time reliability analysis of relay protection system in intelligent substation based on Markov model and GO method[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 47-55.
- [5] 郭升, 童晓阳, 王洪彬. 计及设备老化与计划检修的智能变电站保护系统可靠性评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 97-104.
GUO Sheng, TONG Xiaoyang, WANG Hongbin. Intelligent substation protection system reliability assessment method considering the aging of equipment and planned maintenance[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 97-104.
- [6] 杨勤, 张震伟, 杨茉, 等. 基于故障预警系统的燃煤发电设备状态检修[J]. 中国电力, 2019, 52(3): 109-114.
YANG Qin, ZHANG Zhenwei, YANG Mo, et al. Conditional maintenance of coal-fired power generation equipment based on early fault warning system[J]. Electric Power, 2019, 52(3): 109-114.
- [7] 王文焕, 杨国生, 周泽昕, 等. 基于随机截尾数据及极大似然估计的继电保护可靠性分布[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 125-131.
WANG Wenhuan, YANG Guosheng, ZHOU Zexin, et al. Reliability distribution of relay protection based on random truncation data and maximum likelihood estimation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 125-131.
- [8] 王嘉琦, 徐岩, 彭雅楠, 等. 基于灰色-三参数威布尔分布模型的继电保护装置可靠性参数估计[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1354-1360.
WANG Jiaqi, XU Yan, PENG Yanan, et al. Estimation of reliability parameters of protective relays based on grey-three-parameter Weibull distribution model[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1354-1360.
- [9] 殷伟斌, 金山红, 方榆冬, 等. 基于虚拟支路的智能变电站继电保护系统可靠性评估方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2018(10): 206-210.
YIN Weibin, JIN Shanhong, FANG Yudong, et al. Reliability evaluation of the relay protection system in smart substation considering virtual branch[J]. Automation & Instrumentation, 2018(10): 206-210.
- [10] DE MAGALHA E S, CARALHO L, GONZALEZ-FERNANDEZ R A, et al. Simplified cross-entropy based

- approach for generating capacity reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1609-1616.
- [11] ZHANG T, LUO H L, WANG Q. Research and application of wireless private network in power transmission line video monitoring[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2013, 32(5): 58-63.
- [12] ZHANG Jinsong, CHEN Jinmu, ZHANG Yueli, et al. Secondary system reliability assessment of intelligent substation based on fault tree analysis and effect assessment method[C] // 2012 China International Conference on Electricity Distribution, September 10-14, 2012, Shanghai, China: 1-5.
- [13] ZHANG J, KANG Q, HUANG D, et al. Reliability evaluation of the new generation smart substation considering relay protection system[C] // 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), October 25-28, 2016, Xi'an, China: 1164-1168.
- [14] LEI H, SINGH C, SPRINTSON A. Reliability modeling and analysis of IEC 61850 based substation protection systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2194-2202.
- [15] QI W, YAN X, BIN Q, et al. A risk assessment method of intelligent substation relay protection device based on severity index[C] // 2019 IEEE 2nd International Conference on Electronics Technology (ICET), May 10-13, 2019, Chengdu, China: 381-386.
- [16] LEI H, SINGH C. Power system reliability evaluation considering cyber-malfunctions in substations[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 129: 160-169.
- [17] 金能, 梁宇, 邢家维, 等. 提升配电网线路保护可靠性的远方保护及其与就地保护优化配合方案研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(24): 5221-5233.
JIN Neng, LIANG Yu, XING Jiawei, et al. Ultra-short term prediction model of photovoltaic output power based on Chaos-RBF neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(24): 5221-5233.
- [18] 魏霖, 童宁, 林湘宁, 等. 面向多端直流电网的高可靠性允许式纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(增刊 1): 95-108.
WEI Lin, TONG Ning, LIN Xiangning, et al. VSC-MTDC oriented high reliable permissive pilot protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(S1): 95-108.
- [19] 代杰, 孔祥发, 王文豪, 等. 智能变电站继电保护系统可靠性的相关分析[J]. 石化技术, 2019, 26(3): 183, 203.
DAI Jie, KONG Xiangfa, WANG Wenhao, et al. Reliability analysis of relay protection system in intelligent substation[J]. Petrochemical Technology, 2019, 26(3): 183, 203.
- [20] 毕小熊, 颜红得, 施迎春. 基于 LM 法参数估计的继电保护装置可靠性分析[J]. 电气自动化, 2019, 41(4): 89-91.
BI Xiaoxiong, YAN Hongde, SHI Yingchun. Reliability analysis for relay protection devices based on LM parameter estimation[J]. Automation Devices & Equipments, 2019, 41(4): 89-91.
- [21] 王建楠. 继电保护设备可靠性与状态评估决策研究[D]. 昆明: 广西大学, 2019.
WANG Jiannan. Research on reliability and condition evaluation decision of relay protection equipment[D]. Kunming: Guangxi University, 2019.
- [22] 朱卫列, 王智微, 李振华. 基于设备特征值的电站设备状态检修[J]. 热力发电, 2018, 47(12): 72-76.
ZHU Weilie, WANG Zhiwei, LI Zhenhua. Condition based maintenance for power station equipments based on equipment characteristic value[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(12): 72-76.
- [23] 张理, 赵冬梅, 张旭. 计及继电保护装置可靠性评估的电网故障诊断方法[J]. 现代电力, 2018, 35(2): 80-86.
ZHANG Cheng, ZHAO Dongmei, ZHANG Xu. Fault diagnosis method of power grid considering reliability assessment of relay protection devices[J]. Modern Electric Power, 2018, 35(2): 80-86.

收稿日期: 2020-07-20; 修回日期: 2020-09-14

作者简介:

叶远波(1973—), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: yeyb7079@ah.sgcc.com.cn

刘宏君(1974—), 男, 硕士, 教授级工程师, 研究方向为电力系统继电保护; Email: liuhj@sznari.com

黄太贵(1963—), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为电力系统自动化。E-mail: yeyb7079@ah.sgcc.com.cn

(编辑 张爱琴)