

DOI: 10.7667/PSPC151518

# 面向状态检修的智能变电站保护系统可靠性分析

戴志辉, 张天宇, 刘 譞, 焦彦军

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

**摘要:** 以状态检修为目的, 研究了智能变电站保护系统的可靠性评估方法。首先从智能变电站技术特点出发, 提出一种考虑逻辑节点的保护系统监测方法。根据状态检修的需要选取保护系统可靠性指标, 并在此基础上建立了动态 Markov 模型, 利用该模型定量评估保护系统在给定条件下的检修需求。最后以典型 220 kV 智能变电站为例说明了该评估模型的应用方法并做了相关分析。算例结果表明, 该方法具有一定的可操作性, 能够为智能变电站保护系统的检修决策提供一些参考。

**关键词:** 智能变电站; 保护系统可靠性; 动态 Markov 模型; 状态检修

## Research on smart substation protection system reliability for condition-based maintenance

DAI Zhihui, ZHANG Tianyu, LIU Xuan, JIAO Yanjun

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** In order to realize the condition-based maintenance (CBM) of protection systems in smart substation, this paper proposes a new way to assess the reliability of protection systems. Based on the characteristics of smart substations, a monitoring method reflecting the changes of the protection system function in terms of logical nodes is presented. According to the needs of the condition-based maintenance, reliability indices of the protection system are chosen. Along with these indices, a dynamic Markov reliability assessment model is built to quantitatively calculate the maintenance requirement under given conditions. Finally, a typical 220 kV smart substation is utilized to illustrate the application method of the assessment model. The result shows that the method has certain operability, and could provide reference for maintenance decision-making of the protection system in smart substations.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307059), Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2014502065), and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2014MS86).

**Key words:** smart substation; protection system reliability; dynamic Markov model; condition-based maintenance

## 0 引言

随着我国智能电网建设进入全面发展阶段, 智能变电站技术得到大规模应用。作为保障智能电网安全的第一道防线, 保护系统是智能变电站的重要组成部分。保护功能的实现需要相关一次设备、二次回路以及保护装置之间的协调配合, 以发挥其整体性能。然而, 不同厂商设备间存在的互操作性问题阻碍了保护系统的发展。为此国际电工委员会建

立了 IEC 61850 标准<sup>[1-3]</sup>, 规范了智能电子设备的工程实施, 同时也为可靠性分析领域拓展了新的空间。

可靠性是智能变电站的首要性能指标, 智能变电站保护系统的可靠性应不低于常规保护。保护系统可靠性的相关研究可追溯到 70 年代<sup>[4]</sup>, 发展到目前已有大量成果<sup>[5-6]</sup>, 如文献[7]提出一种考虑隐性故障和系统运行状态变化时的保护系统可靠性模型, 并以此计算潮流变化对继电保护系统正常运行的影响。文献[8]在分析数字化变电站继电保护系统构成基础上, 利用最小路集算法和串并联模型对继电保护系统的整体可靠性进行计算。文献[9]结合元件可靠度和系统可靠度两个可靠性指标, 提出了功效评估法用以分析保护系统。文献[10]依据数字保护系

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51307059); 河北省自然科学基金项目(E2014502065); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014MS86)

统的功能和工作特点,建立了 Markov 状态空间法与动态故障树相结合的微机保护系统动态可靠性模型。文献[11]运用可靠性框图法构建了保护系统完备的可靠性评估模型,并对“直采直跳”模式下保护系统的元件灵敏度和重要度进行了评估。文献[12]基于监控系统和装置自检对保护装置可靠性的影响,建立考虑装置暂时性失效以及永久性失效的保护系统可靠性分析模型。该方法将监测技术和可靠性评估相结合,在智能变电站保护系统相关分析中也有较大的参考价值。但由于上述文献研究多数面向硬件设备相关的保护系统可靠性问题,未能充分体现智能变电站功能为导向的建模特点。因此,智能变电站保护系统的可靠性分析仍需进一步完善。

针对上述问题,本文考虑智能变电站技术及其保护系统的特点,在分析智能变电站保护系统具体构成的基础上对保护系统进行了功能上的分解。其次选取合理的可靠性指标,建立了面向状态检修的保护系统可靠性分析模型。最后以典型 220 kV 智能变电站为例进行了相关分析,并将本文计算结果与文献[12]计算结果比较,验证了方法的有效性。

## 1 智能变电站保护系统特点分析

总结智能变电站技术给保护系统可靠性带来的变化,归纳如下所述。

1) 功能监测的需求。保护系统可靠性分析所关心的是保护系统完成功能的能力,但智能变电站中允许保护功能在不同的设备之间自由分配,并且保护系统的功能由硬件系统和逻辑系统共同完成,所以物理装置的故障并不能完全反映系统功能的失效机理<sup>[13-14]</sup>。保护系统监测需要同时考虑硬件系统和逻辑系统,涵盖保护功能实现的各个运行阶段。

2) 基础数据收集方式变化。随着监测技术的提高,目前多数智能变电站自身具有二次设备的自动诊断功能,克服了传统保护中故障巡检需要大量维护人员的缺点<sup>[15-16]</sup>。但另一方面,智能变电站二次系统监测时会产生海量告警信息,导致可靠性基础数据分析仍需较大的工作量,如何用较少的数据来反映较全面的保护系统可靠性有待进一步研究。

3) 检修方式的发展。由于目前以时间周期为特征的变电站计划检修存在“检修过度”和“检修不足”以及需要大量人力物力支撑等问题,已逐渐被建立在设备状态评价基础之上的变电站状态检修所取代<sup>[17-18]</sup>。针对这一变化,可靠性分析中应当考虑状态检修的需求特点。

从上述分析出发,本文将智能变电站保护系统可靠性研究划分为三个步骤: a) 对保护系统功能分

解,将实现保护功能的具体构成作为监测对象; b) 确定所需的可靠性基础数据,结合智能变电站特点计算保护系统可靠性指标; c) 基于前两部份工作,利用动态 Markov 模型分析智能变电站保护系统可靠性及其检修需求。

## 2 保护系统功能分解

通常来说,保护系统的基本功能是在电力系统元件发生故障时发出跳闸命令且在电气元件的不正常运行状态时发出告警信号。智能变电站保护系统是在传统保护基础上的发展,因此仍可根据继电保护的基本原理<sup>[19]</sup>将智能变电站保护系统划分为采样、判断、执行三个独立的子功能系统,三个子系统相互配合共同来完成保护系统的基本功能。对于智能变电站,保护功能实现过程中的最大变化在于逻辑系统的影响:智能变电站中逻辑系统可分解为多个分布在不同硬件设备中相互通信的逻辑节点,当一个逻辑节点或多个逻辑节点不能正常工作时,功能可能被完全闭锁或出现较大降级<sup>[2]</sup>。可见,智能变电站保护系统功能监测需要兼顾逻辑系统和硬件系统对保护功能的影响。故此本文参考文献[3]确定了智能变电站保护硬件系统和逻辑系统的具体构成,以此作为功能监测的对象,保证可靠性基础数据收集工作的顺利进行。

保护功能分解是指将保护的整体功能逐层细化,最终对应到具体的系统构成上。如表 1 所示。

保护功能分解将保护系统为 4 层,第 1 层为目标层,代表保护系统的基本功能;第 2 层为子功能层,保护功能按运行特点划分为采样子功能、判断子功能和执行子功能,三个子功能共同完成保护系统的基本功能;第 3 层为功能载体层,物理系统和逻辑系统作为载体承担完成子功能实现的任务;第 4 层为系统构成层,该层详细划分了各子功能的物理系统和逻辑系统构成,确定了保护功能监测对象。

## 3 保护系统可靠性指标的获取

### 3.1 可靠性基础数据收集

#### 3.1.1 可靠性基础数据内容

智能变电站的可靠性基础数据在传统保护数据(装置投运时间、动作记录、维修记录以及二次电缆缺陷、时间及类型<sup>[20]</sup>)的基础上增加了保护系统逻辑节点的降级运行时间、逻辑节点降级次数等内容。同时,由于二次电缆被通信网络所代替,减少了二次电缆回路的相关数据<sup>[21]</sup>。

表 1 保护系统功能分解

Table 1 Functional decomposition of protection systems

目标	子功能	功能载体	系统构成
采样功能	硬件系统		合并单元
			采样通道
			SV 过程层接口
			保护开入接口
			MMXU
	逻辑系统		RDRE
			PSCH
			GGIO
			跳闸判断装置
			控制及操作电源
判断功能	硬件系统		PDIF
			PDIS
			PDIR
			PTOC
			PPDP
	逻辑系统		PTOV
			RFLO
			RPSB
			智能终端
			GOOSE 过程层接口
执行功能	硬件系统		PTRC
			RREC
	逻辑系统		GGIO

### 3.1.2 可靠性基础数据来源

在现场运行中，传统保护的可靠性基础数据大多来自故障信息管理系统、维修检修报告、调度中心运行报告、能量管理系统信息、现场运行信息、预试检修信息、经验信息以及故障录波数据等<sup>[22]</sup>。智能变电站监测技术的提高，应增加网络分析记录仪、综合应用服务器信息等智能告警信息源<sup>[23]</sup>。

### 3.1.3 保护系统功能监测

可靠性基础数据的收集通过保护系统功能监测来实现。结合可靠性基础数据的内容和来源，保护功能监测将分解后保护功能作为监测对象，从表 1 第 4 层出发按照图 1 的监测流程进行可靠性基础数据收集。相较于传统的监测方法，以保护系统功能为对象的监测方法旨在提高可靠性基础数据收集效率，并更加准确地获得反应保护系统性能的可靠性基础数据。

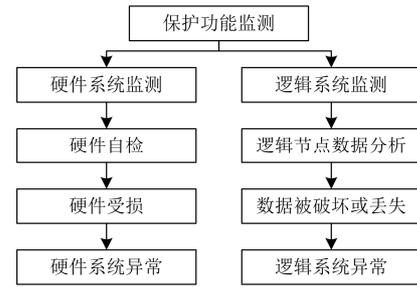


图 1 保护系统功能监测流程图

Fig. 1 Monitoring function flow of protection systems

### 3.2 可靠性指标计算

如上所述，可靠性基础数据收集工作主要是确定影响保护系统可靠性的内容和来源，并从监测系统中提取出所需数据的过程。收集的最终目的是为可靠性指标的计算提供数据基础。

可靠性指标给可靠性评估提供更为科学的考核依据。但由于可靠性评估分析的角度不同，确定选取的可靠性指标也应有所区别，所选指标是否科学、合理直接关系到可靠性评估质量。

本文从故障原因出发统计智能变电站保护系统可靠性指标，认为保护的误动和拒动是由于保护系统中硬件或逻辑节点出现突发性故障或者异常状态触发引起的。其中突发性故障是指严重程度能直接引起保护误动或拒动的故障，如电源损坏、通信中断等情况。而异常状态是指保护系统虽然存在故障隐患但仍能运行一段时间的状态，如逻辑节点丢失、硬件老化损坏等<sup>[24]</sup>。

总结智能变电站保护系统可靠性指标如下。

保护系统功能异常的检出率为

$$\begin{cases} \lambda_{d1} = n_{d1}/T_0 \\ \lambda_{d2} = n_{d2}/T_0 \\ \lambda_{d3} = n_{d3}/T_0 \end{cases} \quad (1)$$

突发性故障导致的保护误动率为

$$\lambda_{zw} = n_{zw}/T_0 \quad (2)$$

突发性故障导致的保护拒动率为

$$\lambda_{zj} = n_{zj}/T_0 \quad (3)$$

保护功能异常发生率为

$$\begin{cases} \lambda_{un1} = n_{un1}/T_0 \\ \lambda_{un2} = n_{un2}/T_0 \\ \lambda_{un3} = n_{un3}/T_0 \end{cases} \quad (4)$$

保护功能异常触发引起的保护误动率为

$$\begin{cases} \lambda_{tw1} = n_{tw1}/T_0 \\ \lambda_{tw2} = n_{tw2}/T_0 \\ \lambda_{tw3} = n_{tw3}/T_0 \end{cases} \quad (5)$$

保护功能异常触发引起的保护拒动率为

$$\begin{cases} \lambda_{ij1} = n_{ij1}/T_0 \\ \lambda_{ij2} = n_{ij2}/T_0 \\ \lambda_{ij3} = n_{ij3}/T_0 \end{cases} \quad (6)$$

保护功能异常后的修复率为

$$\begin{cases} \mu_{d1} = 1/T_{d1} \\ \mu_{d2} = 1/T_{d2} \\ \mu_{d3} = 1/T_{d3} \end{cases} \quad (7)$$

保护误动后的修复率为

$$\mu_{wr} = 1/T_{wr} \quad (8)$$

保护拒动后的修复率为

$$\mu_{jr} = 1/T_{jr} \quad (9)$$

式中:  $T_0$  为保护系统累计运行时间;  $n_{d1}$ 、 $n_{d2}$ 、 $n_{d3}$  分别为采样、判断、执行功能异常被监测系统发现次数;  $n_{zw}$  为突发性故障导致的保护误动次数;  $n_{zj}$  为突发性故障导致的保护拒动次数;  $n_{tw1}$ 、 $n_{tw2}$ 、 $n_{tw3}$  分别为采样、判断、执行功能异常导致的保护误动次数;  $n_{ij1}$ 、 $n_{ij2}$ 、 $n_{ij3}$  分别为采样、判断、执行功能异常导致的保护拒动次数;  $n_{un1}$ 、 $n_{un2}$ 、 $n_{un3}$  分别为采样、判断、执行功能异常总次数;  $T_{d1}$ 、 $T_{d2}$ 、 $T_{d3}$  分别为采样、判断、执行功能发现异常后的累积维修时间;  $T_{wr}$  为保护误动后的累积维修时间;  $T_{jr}$  为保护拒动后的累积维修时间。

由历史记录或运行维护人员现场经验可获得保护系统自检成功率, 在此设为  $\eta$ 。若将未检出的子功能系统异常视为潜在故障, 则在已知  $\eta$  的情况下可推导保护系统的潜在失效率<sup>[12]</sup>为

$$\begin{cases} \lambda_{h1} = (1-\eta) \times \lambda_{un1} \\ \lambda_{h2} = (1-\eta) \times \lambda_{un2} \\ \lambda_{h3} = (1-\eta) \times \lambda_{un3} \end{cases} \quad (10)$$

## 4 保护系统可靠性分析

### 4.1 异常状态的描述

在线监测技术的发展使智能变电站中的很多异常情况都能在故障发生前被发现<sup>[25]</sup>。根据这一特点本文引入了三态累进模型, 如图 2 所示。三态累进模型认为保护系统在正常运行状态和完全失效外还具有一种可能的异常状态, 该状态时保护系统已经有了故障征兆但尚未出现真正故障。在可靠性分析理论中<sup>[26]</sup>, 当存在影响保护系统生存预知结果的中间事件时, 三态累进模型具有优势。

根据三态累进模型, 保护系统处在异常状态时仍能够运行并实现自身功能, 但此时保护系统已经

存在故障隐患, 出现一定条件就会触发真正的故障发生。由于异常状态并非真正的故障, 通常认为异常状态存在两种情况: 即被监测系统检出的异常和未被监测系统发现的异常。出现异常的原因是由于保护系统中存在受损硬件以及数据被破坏或丢失的逻辑节点。

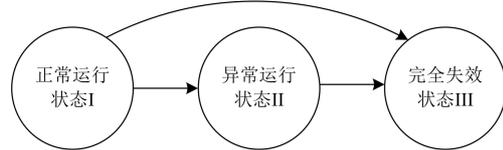


图 2 三态累进模型

Fig. 2 Three-state model of progressive

### 4.2 动态 Markov 可靠性分析模型

IEC 61850 标准中常采用状态机来定义和描述智能电子设备、逻辑节点的功能行为<sup>[2]</sup>。本文沿用状态机的思路应用动态 Markov 模型分析保护系统可靠性。

#### 4.2.1 Markov 动态概率求解方法

根据随机过程原理, 对于  $n$  状态系统, 转移概率  $p_{ij}$  可形成矩阵, 记为

$$\mathbf{P}(\Delta t) = \begin{bmatrix} p_{11}(\Delta t) & p_{12}(\Delta t) & \cdots & p_{1n}(\Delta t) \\ p_{21}(\Delta t) & p_{22}(\Delta t) & \cdots & p_{2n}(\Delta t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1}(\Delta t) & p_{n2}(\Delta t) & \cdots & p_{nn}(\Delta t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

转移密度矩阵  $\mathbf{A}$  定义为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1n} \\ q_{21} & -q_{22} & \cdots & q_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{n1} & q_{n2} & \cdots & -q_{nn} \end{bmatrix} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\mathbf{P}(\Delta t) - \mathbf{I}}{\Delta t} \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{P}(\Delta t)$  称为转移概率矩阵; 方阵中元素  $q$  均为非负值并且每行元素之和为 1;  $\mathbf{I}$  为单位矩阵;  $\mathbf{A}$  中矩阵每行的元素相加为 0。

由式(12)可知转移密度矩阵  $\mathbf{A}$  与 Markov 动态概率矩阵  $\mathbf{P}(t)$  存在关系<sup>[27]</sup>:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{P}(t) = \mathbf{P}(t) \mathbf{A} \quad (13)$$

式中,  $\mathbf{P}(t) = [p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)]$  为行向量。

$t \rightarrow \infty$  时由式(13)可推导并求解 Markov 稳态概率:

$$\begin{cases} \mathbf{P} \mathbf{A} = 0 \\ \sum P_i = 1 \end{cases} \quad (14)$$

将式(14)求出的 Markov 稳态概率  $\mathbf{P}$  作为 Markov 动态概率矩阵  $\mathbf{P}(t)$  的初始状态矩阵  $\mathbf{P}(0)$  可

以求解微分方程式(13), 从而得到:

$$P(t) = P(0)e^{At} \quad (15)$$

由式(15)得到 Markov 动态概率矩阵  $P(t)$ 。

#### 4.2.2 保护系统状态划分

首先将保护系统分成三个独立的子功能系统, 并以三态累进模型为基础, 区分两种异常状态。进一步, 将子功能系统故障原因归为两种, 一是子功能异常在一定条件触发引起的保护误动或拒动, 二是突发性系统故障直接引起的保护误动或拒动。

按以上思路, 可将保护系统状态划分如下:

1) 保护系统正常运行状态, 对应状态 0, 此时保护系统不存在任何异常或失效。

2) 保护系统采样子功能存在异常且被检出的状态对应状态 1, 保护系统判断子功能存在异常且被检出的状态对应状态 2, 保护系统执行子功能存在异常且被检出的状态对应状态 3, 保护系统采样子功能存在异常但未被检出的状态对应状态 4, 保护系统判断子功能存在异常但未被检出的状态对应状态 5, 保护系统执行子功能存在异常但未被检出的状态对应状态 6。

3) 保护误动状态对应状态 7, 保护拒动状态对应状态 8。

#### 4.2.3 基于保护系统状态概率的检修决策分析

图 3 所示为保护系统状态转移图, 其中 Up 表示保护系统处于正常运行状态, Du 表示保护系统出现了异常, Dn 表示保护系统失效。保护系统大部分时间都处于正常运行状态(状态 0), 此时各子功能共同完成保护系统的任务。当出现突发性故障时, 保护系统会由正常运行状态直接进入失效状态引起保护的误动或拒动(状态 7、8), 经修复之后保护系统恢复到状态 1 重新开始运行。当保护系统出现异常状态时, 监测系统能够发现一部分异常(状态 1、2、3), 这部分异常可以通过修复回到正常运行状态, 而另一部份异常并未被发现(状态 4、5、6), 满足一定条件后被触发引起保护的误动或拒动(状态 7、8)。

状态转移图中,  $\lambda_{d1}$ 、 $\lambda_{d2}$ 、 $\lambda_{d3}$  表示保护子功能异常的检出率;  $\mu_{d1}$ 、 $\mu_{d2}$ 、 $\mu_{d3}$  表示保护子功能异常的修复率;  $\lambda_{h1}$ 、 $\lambda_{h2}$ 、 $\lambda_{h3}$  表示保护子功能潜在在失效率;  $\lambda_{tw1}$ 、 $\lambda_{tw2}$ 、 $\lambda_{tw3}$  表示保护子功能异常状态触发引起的保护误动率;  $\lambda_{tj1}$ 、 $\lambda_{tj2}$ 、 $\lambda_{tj3}$  表示未检出的保护子功能异常状态触发引起的保护拒动率;  $\lambda_{zw1}$ 、 $\lambda_{zw2}$ 、 $\lambda_{zw3}$  表示突发性故障直接引起的保护误动率;  $\lambda_{zj1}$ 、 $\lambda_{zj2}$ 、 $\lambda_{zj3}$  表示突发性故障直接引起的保护拒动率;  $\mu_{wr}$  为保护误动后的修复率;  $\mu_{jr}$  为保护拒动后的修复率。

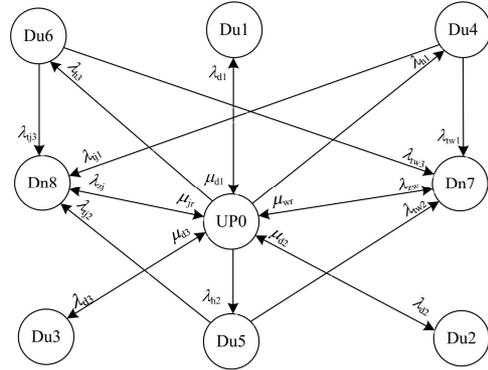


图 3 保护系统状态转移图

Fig. 3 State transition diagram of protection systems

上述可靠性指标由式(1)~式(10)计算得出后, 可求得保护系统 Markov 转移密度矩阵, 如式(16)所示。

$$A = \begin{bmatrix} -a_0 & \lambda_{d1} & \lambda_{d2} & \lambda_{d3} & \lambda_{h1} & \lambda_{h2} & \lambda_{h3} & \lambda_{zw} & \lambda_{zj} \\ \mu_{d1} & -\mu_{d1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{d2} & 0 & -\mu_{d2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{d3} & 0 & 0 & -\mu_{d3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -a_4 & 0 & 0 & \lambda_{tw1} & \lambda_{tj1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_5 & 0 & \lambda_{tw2} & \lambda_{tj2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_6 & \lambda_{tw3} & \lambda_{tj3} \\ \mu_{wr} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_{wr} & 0 \\ \mu_{jr} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_{jr} \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中:

$$\begin{cases} a_0 = \lambda_{d1} + \lambda_{d2} + \lambda_{d3} + \lambda_{h1} + \lambda_{h2} + \lambda_{h3} + \lambda_{zw} + \lambda_{zj} \\ a_4 = \lambda_{tw1} + \lambda_{tj1} \\ a_5 = \lambda_{tw2} + \lambda_{tj2} \\ a_6 = \lambda_{tw3} + \lambda_{tj3} \end{cases} \quad (17)$$

联立方程组

$$\begin{cases} PA = 0 \\ \sum_{i=0}^8 P_i = 1 \end{cases} \quad (18)$$

可求得智能变电站保护系统稳态概率矩阵为

$$P(0) = [p_0 \ p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4 \ p_5 \ p_6 \ p_7 \ p_8] \quad (19)$$

进而可由式(15)求得 Markov 动态概率矩阵  $P(t)$ 。

最后, 根据概率矩阵  $P(t)$  可求得三态累进模型中的状态概率, 如式(20)所示。

$$\begin{cases} P(I) = p_0(t) \\ P(II) = p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) + p_4(t) + p_5(t) + p_6(t) \\ P(III) = p_7(t) + p_8(t) \end{cases} \quad (20)$$

并确定保护系统检修需求概率:

$$P_{cbm} = P(II) + P(III) \quad (21)$$

根据检修需求概率, 检修决策可在  $P_{cbm}$  过高时提前采取措施, 达到在故障发生前加以预防, 并在最大限度提高保护系统可靠性的同时将故障可能性降至最低的目的。

## 5 算例分析

### 5.1 可靠性指标设定

根据 DL/T 860 标准对智能变电站的定义, 智能化变电站分为过程层、间隔层和站控层, 各层内部以及层与层之间均采用高速以太网进行数据通信。下面以图 4 中典型智能变电站 220 kV 保护系统模型作为计算实例进行分析。

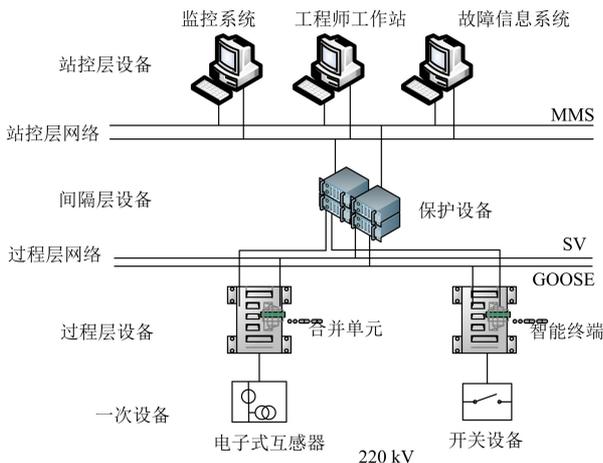


图 4 典型 220 kV 智能变电站

Fig. 4 A typical 220 kV smart substation

在现场实际运行中, 可以根据保护的不正确动作记录、异常告警信息以及故障原因分析记录等确定相应的可靠性基础数据。本文设定保护系统自检成功率  $\eta$  为 90%, 参考现有资料<sup>[12]</sup>并结合智能变电站的实际情况<sup>[2-3]</sup>设定保护系统失效率数据如表 2 及表 3 所示。

表 2 失效率数据 1

Table 2 Failure rate data 1 ( $10^{-5}h^{-1}$ )

$\lambda_{d1}$	$\lambda_{d2}$	$\lambda_{d3}$	$\lambda_{h1}$	$\lambda_{h2}$	$\lambda_{h3}$	$\lambda_{zw}$
53.7	32.6	0.05	5.53	4.12	0.01	130.5

表 3 失效率数据 2

Table 3 Failure rate data 2 ( $10^{-5}h^{-1}$ )

$\lambda_{tw1}$	$\lambda_{tw2}$	$\lambda_{tw3}$	$\lambda_{yj1}$	$\lambda_{yj2}$	$\lambda_{yj3}$	$\lambda_{zj}$
4.52	3.78	5.13	7.36	4.58	7.13	147.7

### 5.2 不同修复率下的检修需求分析

修复率反映了设备维护水平和检修效率。以下

列举了三组数量级的修复率数据来反映保护可靠性和检修需求随修复率的变化, 各组数据记为第  $i$  ( $i=1,2,3$ ) 级, 具体如表 4 所示。

表 4 修复率数据

Table 4 Repair rate data ( $10^{-5}h^{-1}$ )

修复率	$\mu_{d1}$	$\mu_{d2}$	$\mu_{d3}$	$\mu_{wr}$	$\mu_{jr}$
第 1 级	15.73	16.86	20.54	13.74	15.34
第 2 级	157.3	168.6	205.4	137.4	153.4
第 3 级	1 573	1 686	2 054	1 374	1 534

将表 2~表 4 的数据代入式(18)可获得稳态的保护系统的检修需求概率, 见表 5。可以看出, 随着修复率的提高, 保护系统检修需求概率逐渐减少, 若将 0.7 视为  $P_{cbm}$  的概率阈值(即保护系统大于该值时需要检修), 则在修复率等级较低(第 1、2 级)时保护系统有检修的必要性。为了提高可靠性, 保护系统应尽量缩短维修时间。

表 5 保护系统状态概率

Table 5 State probability of protection systems

修复率	保护系统状态概率			
	$P(I)$	$P(II)$	$P(III)$	$P_{cbm}$
第 1 级	0.038 1	0.213 5	0.748 4	0.961 9
第 2 级	0.266 4	0.210 3	0.523 4	0.733 6
第 3 级	0.664 7	0.204 7	0.130 6	0.335 3

### 5.3 自检成功率变化对检修需求的影响

以 5.2 节中第 3 级修复率的计算结果作为初始状态概率, 通过保护系统 Markov 模型可得检修需求概率  $P_{cbm}$  随时间变化的特点。在此基础上改变自检成功率  $\eta$  的大小, 可进一步分析  $\eta$  对保护系统检修需求的影响。

图 5 为根据动态 Markov 概率分析法计算得到的 30 天内保护系统检修需求概率的变化曲线, 在计算时将自检成功率  $\eta$  由 90%降低到了 50%。可以看

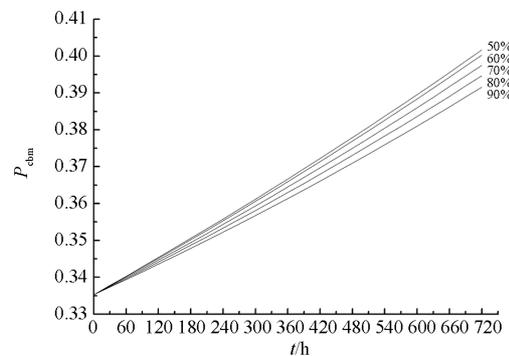


图 5 检修需求概率曲线

Fig. 5 Maintenance demand probability curve

出, 随着自检成功率的降低, 保护系统的检修需求逐渐增加。此外, 根据曲线变化趋势, 当自检成功率为 90%时, 所研究的保护系统约在 4 000 h 需要进行一次检修, 这与文献[12]中算例的结论一致。

综合上述分析可以知: 文中求出的保护系统检修需求概率基本符合装置运行情况。因此, 该指标对于保护装置检修决策具有一定的参考价值。

## 6 结论

智能变电站技术对保护系统有着诸多方面的影响。本文从智能变电站保护系统可靠性分析的需求出发, 在总结可靠性分析中以下几个重要问题的基础上研究了其定量评估模型。

1) 保护系统整体功能由采样、判断和执行三个子功能相互配合完成, 每个子功能出现问题均有可能引起保护系统的误动或者拒动。

2) 导致保护系统故障的情况有两种, 一种由突发性事故引起; 一种由非突发性的异常状态在一定条件下触发引起。

3) 硬件设备能引起保护系统的异常或失效, 高度信息化的智能变电站中逻辑系统对保护系统的影响同样不可忽视。

算例分析结果表明, 文中的智能变电站保护系统可靠性分析能够为当前条件下的状态检修决策提供一些参考。但由于分析中对智能变电站通信系统的考虑尚不够详细, 需进一步关注其对保护的影响。

### 参考文献

[1] 李孟超, 王允平, 李献伟, 等. 智能变电站及技术特点分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 59-62.  
LI Mengchao, WANG Yunping, LI Xianwei, et al. Smart substation and technical characteristics analysis[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 59-62.

[2] IEC 61850 communication networks and systems in substations[S].

[3] Q/GDW 1396-2012 IEC 61850工程继电保护应用模型[S].

[4] GRIMES J D. On determining the reliability of protective relay systems[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1970, 19(3): 82-85.

[5] 戴志辉, 王增平. 保护可靠性研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 161-167.  
DAI Zhihui, WANG Zengping. Overview of research on protection reliability[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 160-167.

[6] 熊小伏, 陈星田, 郑昌圣, 等. 继电保护系统状态评价研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 51-58.

XIONG Xiaofu, CHEN Xingtian, ZHENG Changsheng, et al. Overview of research on state evaluation of relaying protection system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 51-58.

[7] 罗泳, 李永丽, 李仲青, 等. 考虑隐性故障的继电保护系统可靠性分析及评估[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 84-89.  
LUO Yong, LI Yongli, LI Zhongqing, et al. Assessment of the reliability of protection system considering hidden failure[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 84-89.

[8] 王超, 王慧芳, 张弛, 等. 数字化变电站继电保护系统的可靠性建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 8-13.  
WANG Chao, WANG Huifang, ZHANG Chi, et al. Study of reliability modeling for relay protection system in digital substations[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 8-13.

[9] 张旒玺, 房鑫炎, 倪振华. 基于系统功效的保护及控制系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 63-67.  
ZHANG Liuxi, FANG Xinyan, NI Zhenhua. Reliability analysis of protection and control systems based on the effectiveness[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 63-67.

[10] 戴志辉, 王增平, 焦彦军. 基于动态故障树与蒙特卡罗仿真的保护系统动态可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19): 105-113.  
DAI Zhihui, WANG Zengping, JIAO Yanjun. Dynamic reliability assessment of protection system based on dynamic fault tree and Monte Carlo simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 105-113.

[11] 王同文, 谢民, 孙月琴, 等. 智能变电站继电保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 58-66.  
WANG Tongwen, XIE Min, SUN Yueqin, et al. Analysis of reliability for relay protection systems in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 58-66.

[12] BILLINTON R, FOTUHI-FIRUZABAD M, SIDHU T, et al. Determination of the optimum routine test and self-checking intervals in protective relaying using a reliability model[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 17(3): 663-669.

[13] 王冬青, 李刚, 曹楠, 等. 智能变电站保护功能自动校验研究[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 7-11.  
WANG Dongqing, LI Gang, CAO Nan, et al. Research on automatic checking of protection functions for smart substation[J]. Power System Technology, 2012, 36(1):

- 7-11.
- [14] 徐长宝, 庄晨, 蒋宏图. 智能变电站二次设备状态监测技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 127-131.  
XU Changbao, ZHUANG Chen, JIANG Hongtu. Technical research of secondary equipment state monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 127-131.
- [15] 杜双育, 王先培, 谢光彬, 等. 基于IEC 61850的变电站自动化系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 45(5): 32-36.  
DU Shuangyu, WANG Xianpei, XIE Guangbin, et al. Reliability evaluation of substation automation system based on IEC 61850[J]. Power System Protection and Control, 2012, 45(5): 32-36.
- [16] 秦红霞, 武芳琪, 彭世宽, 等. 智能电网二次设备运维新技术研讨[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 35-40.  
QIN Hongxia, WU Fangying, PENG Shikuan, et al. New technology research on secondary equipment operation maintenance for smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 35-40.
- [17] 李明, 韩学山, 王勇, 等. 变电站状态检修决策模型与求解[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 196-202.  
LI Ming, HAN Xueshan, WANG Yong, et al. Decision-making model and solution of condition-based maintenance for substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 196-202.
- [18] 刘永欣, 师峰, 姜帅, 等. 智能变电站继电保护状态监测的一种模糊评估算法[J]. 电工技术学报, 2014, 42(3): 37-41.  
LIU Yongxin, SHI Feng, JIANG Shuai, et al. A fuzzy evaluation algorithm for condition monitoring of smart substation relay protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 43(3): 37-41.
- [19] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [20] 戴志辉, 王增平, 焦彦军. 保护可靠性数据收集系统设计[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15): 47-51.  
DAI Zhihui, WANG Zengping, JIAO Yanjun. Design of relay reliability data acquisition system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15): 47-51.
- [21] 王丽华, 江涛, 盛晓红, 等. 基于IEC 61850标准的保护功能建模分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 55-59.  
WANG Lihua, JIANG Tao, SHENG Xiaohong, et al. Analysis on protection function modeling based on IEC 61850 standard[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(2): 55-59.
- [22] 李芷筠, 戴志辉, 焦彦军, 等. 保护可靠性管理系统设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 115-119.  
LI Zhijun, DAI Zhihui, JIAO Yanjun, et al. Design and accomplishment of protection reliability management system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 115-119.
- [23] 稽建飞, 袁宇波, 王立辉, 等. 某 110 kV 智能变电站合并单元异常情况分析及对策[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 255-260.  
JI Jianfei, YUAN Yubo, WANG Lihui, et al. Analysis and countermeasure on abnormal operation of one 110 kV intelligent substation merging unit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 255-260.
- [24] 陈为化, 江全元, 曹一家. 考虑继电保护装置缺陷的电力系统连锁故障风险评估[J]. 电网技术, 2006, 30(13): 14-19.  
CHEN Weihua, JIANG Quanyuan, CAO Yijia. Risk assessment of power system cascading failure considering hidden failures of protective relaying[J]. Power System Technology, 2006, 30(13): 14-19.
- [25] 张懿议, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 综合考虑可靠性与经济性的电力变压器检修方案优选[J]. 电工技术学报, 2014, 29(11): 191-200.  
ZHANG Yiyi, LIAO Ruijin, YANG Lijun, et al. Maintenance decision making of power transformer by integrated considering reliability and economy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(11): 191-200.
- [26] DATTA S, SATTEN G A. Nonparametric estimation for the three-stage irreversible illness-death model[J]. Biometrics, 2000, 56(3): 113-127.
- [27] RANJBAR A H, KIANI M, FAHIMI B. Dynamic Markov model for reliability evaluation of power electronic systems[C] // Proceedings of the 2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2011: 1-6.

收稿日期: 2015-08-27; 修回日期: 2015-12-04

作者简介:

戴志辉(1980-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: protectiverelaying@163.com

张天宇(1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为智能变电站保护可靠性; E-mail: smart\_substation@163.com

刘 让(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。

(编辑 周金梅)