

DOI: 10.7667/PSPC180591

# 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

郭升<sup>1</sup>, 童晓阳<sup>1</sup>, 王洪彬<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123)

**摘要:** 为了实现对智能变电站保护系统进行可靠性评估的目的, 建立精确的保护系统可靠性评估模型至关重要。采用威布尔分布来表征设备老化时设备故障率随时间的变化情况。结合保护系统的计划检修行为, 用改善因子来表征计划检修对设备故障率的降低作用, 建立了计及设备老化与不完全计划检修的智能变电站保护系统可靠性评估模型。以线路保护系统为例, 通过绘制线路保护系统可靠性时变曲线, 计算线路保护系统的平均无故障工作时间和计划检修成本等指标对线路保护系统进行可靠性评估。结果表明所提方法能较为准确地反映设备老化与实际检修效果。

**关键词:** 智能变电站; 保护系统; 可靠性; 设备老化; 计划检修

## Intelligent substation protection system reliability assessment method considering the aging of equipment and planned maintenance

GUO Sheng<sup>1</sup>, TONG Xiaoyang<sup>1</sup>, WANG Hongbin<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. State Grid Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China)

**Abstract:** In order to realize the reliability evaluation of the intelligent substation protection system, it is very important to establish an accurate reliability evaluation model of the protection system. In this paper, Weibull distribution is used to characterize the change of equipment failure rate over time when the equipment is aging. Combined with the planned maintenance behavior of the protection system, the improvement factor is used to characterize the reduction effect of planned maintenance on the equipment failure rate, establishing the reliability evaluation model of intelligent substation protection system with incompletely planned maintenance and the aging of the equipment. Taking the line protection system as an example, the reliability of the line protection system is evaluated by plotting the time-varying curve of the line protection system reliability and calculating the mean time between failure and planned maintenance cost of the line protection system. The results show that the proposed method can more accurately reflect the aging of equipment and the actual maintenance effect.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377137) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52199916024N).

**Key words:** intelligent substation; protection system; reliability; the aging of equipment; planned maintenance

## 0 引言

基于 IEC61850 标准的智能变电站作为智能电网建设的重要组成部分, 采用标准化的传感器数据

经高速通信网实现信息的全站共享<sup>[1-5]</sup>, 其可靠运行是电网正常工作的重要保障, 越来越受到人们的重视<sup>[6-8]</sup>。

文献[9]研究了温度对核电机组运行可靠性的影响。文献[10]通过对设备进行状态划分, 对设备的可靠性进行评估。文献[11]对智能变电站保护系统进行分解, 建立各保护功能子系统的整体可靠性模型。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助 (51377137); 国家电网公司科技项目资助 (52199916024N)

文献[12]利用 Markov 模型分析输电线路保护装置的不同状态,分析线路保护系统可靠性。文献[13]从风险传递的角度对智能变电站二次系统可靠性进行了评估。文献[14-16]研究人因、环境、信息系统等失效因素对变电站保护系统可靠性的影响。传统智能变电站二次系统可靠性评估模型假设二次设备寿命服从指数分布,故障率采用恒定值,忽略了设备故障率会受到设备老化作用的影响,尤其当设备长时间运行时,其实际故障率与初始故障率差值变大<sup>[17]</sup>。文献[18]采用指数模型,通过改变函数的参数来模拟元件故障率随时间的变化情况。文献[19]采用威布尔分布函数描述设备随时间增长的老化情况,但忽略了检修对设备故障率的降低作用。文献[20]采用阶梯模型反映考虑检修时设备故障率在不同时间段的变化情况,认为检修为完全检修,从而导致评估结果过于理想。工程实际中,设备检修只会使设备运行状况得到改善,并不会修复如新<sup>[21]</sup>。文献[21-23]同时考虑了设备老化与检修作用对电力系统一次设备故障率的影响,对电力系统一次侧进行可靠性评估,本文受到该文章的启发,将设备的老化作用与计划检修因素考虑到智能变电站保护系统的可靠性评估中。

本文采用威布尔分布函数设置合理的参数来表征设备随时间增长的老化情况,通过改善因子和有效工龄的概念来描述检修对设备故障率的改善作用,以智能变电站线路保护系统为例,利用可靠性框图法来建立线路保护系统的可靠性评估模型,并利用平均无故障工作时间(Mean Time Between Failure, MTBF)和计划检修成本来验证该方法的准确性。

## 1 时变故障率模型

在智能变电站保护系统中,各保护设备的故障率曲线呈现浴盆特性<sup>[24]</sup>。第一阶段为设备磨合期,故障率较高,这一阶段设备出现故障的主要原因是设备的材料及制造的缺陷,随着设备在运行过程中的调试与磨合,故障率随着时间呈递减趋势,时间较短。第二阶段为设备稳定运行期,故障率趋于稳定的常值,这段时期设备失效主要是由于随机故障引起。第三阶段为设备损耗期,随着服役时间增加,设备内部日益老化,故障率逐渐上升。由于设备处于第一阶段时间短,且设备普遍受到老化影响较大,故实际中主要考虑设备运行的第二、三阶段。

本文采用两参数的威布尔模型来表征设备老化作用以及计划维修的更新作用对设备故障率的影响。

### 1.1 智能变电站保护设备的时变故障率模型建模

基于威布尔模型的设备寿命分布函数:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (1)$$

通过设备寿命分布函数对时间的微分即可得到设备寿命密度函数:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (2)$$

由式(1)与(2)可得设备的故障率函数:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \quad (3)$$

$\alpha$  与  $\beta$  分别为威布尔分布的尺度参数和形状参数。当  $\beta > 1$  时,故障率随着时间递增,能够表征元件的老化情况。

一般厂家给出的设备故障率  $\lambda_m$  为 0~10 年内设备故障率的统计期望值<sup>[22]</sup>,因此对满足威布尔分布的设备故障率函数进行如下处理:

$$\frac{\int_0^{10} \lambda(t) dt}{10} = \frac{\int_0^{10} \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1}}{10} = \lambda_m \quad (4)$$

经计算可得:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{10^{\beta-1}} t^{\beta-1} \lambda_m \quad (5)$$

在工程实际中,为了保障智能变电站安全稳定运行,需要对智能变电站保护系统进行定期检修<sup>[25]</sup>,本文假设智能变电站保护系统检修为等周期计划检修,检修内容包括保护相关的设备。

基于不完全检修的原则,设备在检修之后并非修复如新,通常用有效工龄和改善因子来表征不完全检修对设备运行状态的改善效果<sup>[22]</sup>。

设  $\tau$  为设备运行的有效工龄,由于考虑了计划检修对设备运行状态的改善作用,则在每次检修之后设备会变得“年轻”,表现为工龄上的回退,则设备的有效工龄表示为

$$\begin{cases} \tau_0 = t & 0 < T \\ \tau_1 = t - q_1 T & T \leq t < 2T \\ \vdots & \vdots \\ \tau_k = t - \sum_{i=1}^k q_i T & kT \leq t < (k+1)T \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $T$  为计划维修的周期;  $t$  为设备的实际年龄;  $q_i$  为改善因子<sup>[23]</sup>:

$$q_k = q_1 \frac{l_1 k + l_2}{l_3 k + l_4} \quad 0 < q_k < 1 \quad (7)$$

式中,  $l_i$  为与设备相关的常数, 具体值应该由专家根据设备特性以及历史统计数据进行整定。

则考虑设备老化与计划检修的设备故障率为

$$\lambda(t) = \begin{cases} \frac{\lambda_m \beta}{10^{\beta-1}} t^{\beta-1} & t < T \\ \frac{\lambda_m \beta}{10^{\beta-1}} (t - \sum_{i=1}^k (q_i T))^{\beta-1} & t \geq T \end{cases} \quad (8)$$

设备的可靠运行概率与故障的关系为

$$P(t) = \exp[-\int_0^t \lambda(u) du] = \begin{cases} \exp[-\frac{\lambda_m}{10} t^\beta] & t < T \\ \frac{\lambda_m (\sum_{i=1}^k ((kT - \sum_{i=1}^{k-1} (q_i T))^\beta - ((k-1)T - \sum_{i=1}^{k-1} (q_i T))^\beta))}{10^{\beta-1}} - \exp[-\frac{\lambda_m ((t - \sum_{i=1}^k (q_i T))^\beta - (kT - \sum_{i=1}^k (q_i T))^\beta)}{10^{\beta-1}}]} & t \geq T \end{cases} \quad (9)$$

## 1.2 智能变电站线路保护系统的时变可靠性评估模型建模

智能变电站保护系统的采样跳闸模式主要有三种, 分别是“直采直跳”、“网采直跳”、“网采网跳”。以线路保护系统为例, 不同采样跳闸模式下智能变电站线路保护的典型结构如图1—图3所示<sup>[26]</sup>。

智能变电站中线路保护功能需要借助网络由本间隔的合并单元、保护装置、智能终端等设备配合完成。本文以“直采直跳”模式下单套线路保护系统为例, 利用可靠性框图法, 绘制单套线路保护系统的RBD(Reliability Block Diagram)可靠性结构框图如图4所示。其中, MU为合并单元, FB为光纤, PL为线路保护装置, IT为线路智能终端, PM为母差保护装置, SW为交换机, MU1为母线合并单元, MU2为本间隔线路合并单元, TS为同步时钟源。

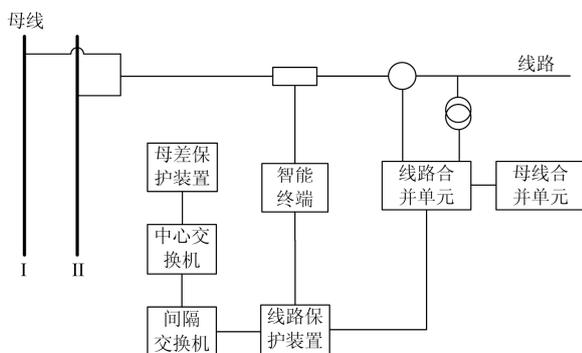


图1 “直采直跳”模式下单套线路保护系统连接图

Fig. 1 Connection diagram of single line protection system in direct-sampling-direct-tripping mode

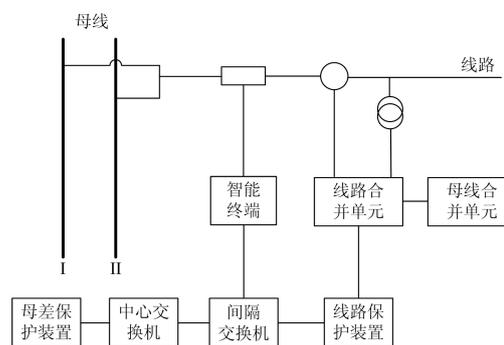


图2 “直采网跳”模式下单套线路保护系统连接图

Fig. 2 Connection diagram of single line protection system in direct-sampling-net-tripping mode

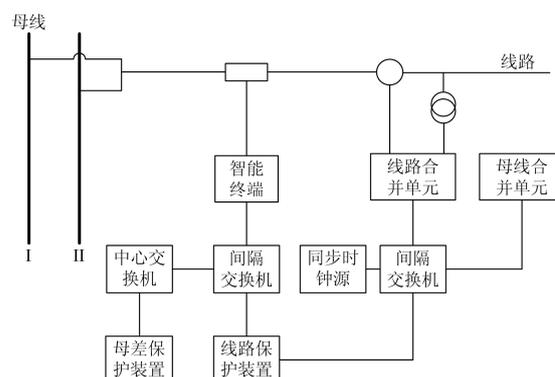


图3 “网采网跳”模式下单套线路保护系统连接图

Fig. 3 Connection diagram of single line protection system in net-sampling-net-tripping mode

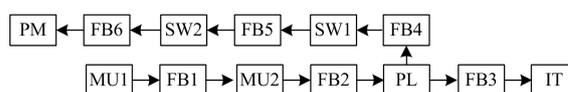


图4 “直采直跳”单套线路保护系统的可靠性结构框图

Fig. 4 Reliability block diagram of direct-sampling-direct-tripping mode single line protection system

220 kV 线路保护功能是由 MU1、MU2、PL、IT 等完成, PL 通过间隔交换机 SW1、中心交换机 SW2 向母差保护装置 PM 发启失灵信号。

同理可得到“直采网跳”和“网采网跳”模式下的单套线路保护可靠性框图如图5、图6。

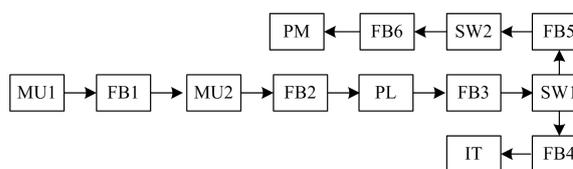


图5 “直采网跳”单套线路保护系统的可靠性结构框图

Fig. 5 Reliability block diagram of direct-sampling-net-tripping mode single line protection system

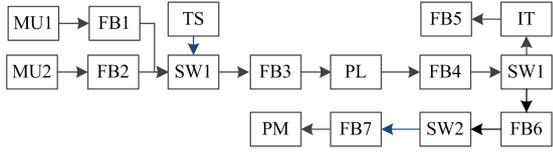


图 6 “网采网跳”单套线路保护系统的可靠性结构框图  
Fig. 6 Reliability block diagram of net-sampling-net-tripping mode single line protection system

单套线路保护各保护相关设备在功能逻辑上属于串联系统，因此单套线路保护的可靠性等于各类设备等效可靠运行概率  $P'_i(t)$  的乘积。

各类设备的等效失效率函数为

$$\lambda'(t) = \begin{cases} \frac{n\lambda_m\beta}{10^{\beta-1}} t^{\beta-1} & t < T \\ \frac{n\lambda_m\beta}{10^{\beta-1}} (t - \sum_{i=1}^k (q_i T))^{\beta-1} & t \geq T \end{cases} \quad (10)$$

式中： $n$  为该类设备的数目； $\lambda_m$  为设备的故障率期望值。

则由式(9)可得到各类设备的等效可靠运行概率函数：

$$P'(t) = \exp[-\int_0^t \lambda(u) du] = \begin{cases} \exp[-\frac{n\lambda_m}{10} t^\beta] & t < T \\ \exp[-\frac{n\lambda_m(\sum_{i=1}^k ((kT - \sum_{i=1}^{k-1} (q_i T))^\beta - ((k-1)T - \sum_{i=1}^{k-1} (q_i T))^\beta))}{10^{\beta-1}}] & t < T \\ \exp[-\frac{n\lambda_m((t - \sum_{i=1}^k (q_i T))^\beta - (kT - \sum_{i=1}^k (q_i T))^\beta)}{10^{\beta-1}}] & t \geq T \end{cases} \quad (11)$$

则可以得到单套线路保护的可靠性时间函数为  $P_L(t) = P'_{MU}(t)P'_{FB}(t)P'_{IL}(t)P'_{PL}(t)P'_{SW}(t)P'_{PM}(t)$  (12)

## 2 计及计划检修的平均无故障工作时间与检修成本分析

在对智能变电站保护系统进行可靠性评估时，一个重要的评估指标为平均无故障工作时间 MTBF<sup>[27]</sup>，一般超过该时间，则认为必须要对保护系统进行大修，大修内容一般包括设备的换新等。

式(2)的设备寿命密度函数可改写为

$$f(t) = \lambda(t)e^{-\int_0^t \lambda(u) du} \quad (13)$$

设备的平均无故障工作时间 MTBF 与设备的寿命密度函数关系为

$$MTBF = \int_0^\infty t f(t) dt = \int_0^\infty t \lambda(t) e^{-\int_0^t \lambda(u) du} dt \quad (14)$$

将式(8)代入式(14)计算得：

$$MTBF = \begin{cases} \int_0^T \frac{\lambda_m \beta}{10^{\beta-1}} t^\beta \exp[-\frac{n\lambda_m}{10} t^\beta] dt \\ \int_T^\infty \frac{\lambda_m \beta}{10^{\beta-1}} t (t - \sum_{i=1}^k (q_i T))^{\beta-1} \exp[-\frac{n\lambda_m(\sum_{i=1}^k ((kT - \sum_{i=1}^{k-1} (q_i T))^\beta - ((k-1)T - \sum_{i=1}^{k-1} (q_i T))^\beta))}{10^{\beta-1}}] dt \\ \int_T^\infty \frac{n\lambda_m((t - \sum_{i=1}^k (q_i T))^\beta - (kT - \sum_{i=1}^k (q_i T))^\beta)}{10^{\beta-1}} dt \end{cases} \quad (15)$$

本文假设智能变电站的保护系统寿命为一个平均无故障工作时间 MTBF，在一个经过 MTBF 之后必须对智能变电站保护系统内的所有设备进行更换，通过计算整个 MTBF 时间内智能变电站保护系统的年平均成本，作为智能变电站保护系统可靠性的评价指标。

为了简化计算模型，假设每个计划检修周期  $T$  与计划检修周期内各设备的计划检修成本  $C_{pm}$  为固定值，则有如下关系。

系统在 MTBF 内的总成本为

$$C_{total} = \sum_i^K N \cdot C_{pm}^i + \sum_i^K C_{mr}^i \cdot \int_0^{MTBF} \lambda_i(t) dt + \sum_i^K C_{pr}^i \quad (16)$$

式中： $K$  为系统内设备的种类； $N$  为计划检修周期数； $\lambda_i(t)$  为第  $i$  类设备的等效故障率函数； $C_{mr}^i$  为第  $i$  类设备的故障维修成本； $C_{pr}^i$  为第  $i$  类设备的更换成本。

$$N = \text{floor}[\frac{MTBF}{T}] \quad (17)$$

式中， $\text{floor}[]$  为向下取整函数，即  $NT \leq MTBF$ 。

则系统在整个 MTBF 内的年平均成本为

$$c(T, N) = \frac{C_{total}}{MTBF} \quad (18)$$

## 3 算例分析

基于上述模型，在 Matlab2014 软件平台上进行仿真，由于智能变电站保护系统中设备可靠性参数缺乏长期统计数据，因此本文参照文献[22]的参数设置如表 1。

表 1 仿真参数表

Table 1 Simulation parameters table					
$\beta$	$q_1$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$
1.7	0.8	5	2	6	1

### 3.1 智能变电站保护系统的时变可靠性仿真分析

根据智能变电站保护系统存在每年“春检”的这一事实，本文将计划检修周期  $T$  取值为 1 年。智能变电站保护系统内各保护相关设备的故障率期望值如表 2<sup>[25]</sup>。

根据所建立的模型，以智能变电站单套线路保护系统为例进行仿真，得到 3 种不同跳闸采样方式

下, 线路保护系统在考虑计划检修和没考虑计划检修情况下的可靠性概率的时变曲线, 如图 7—图 9 所示。

表 2 保护元件可靠性数据

保护元件	故障率 $\lambda$ /年
MU 合并单元	0.006 7
IED 智能保护设备	0.006 7
TS 同步时钟源	0.006 7
SW 交换机	0.02
IT 智能终端	0.006 7
FB 光纤	0.001

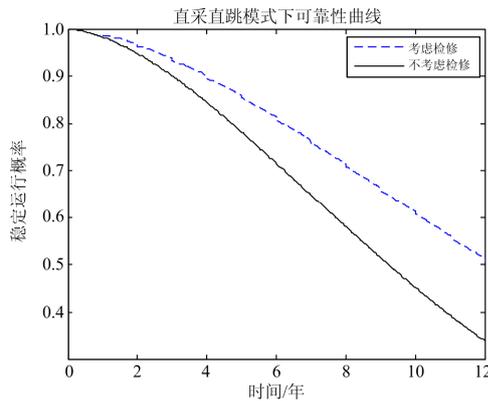


图 7 “直采直跳”模式下线路保护系统可靠性曲线

Fig. 7 Line protection system reliability curve in direct-sampling-direct-tripping mode

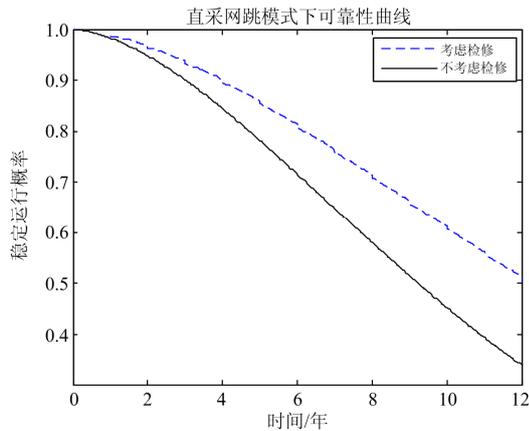


图 8 “直采网跳”模式下线路保护系统可靠性曲线

Fig. 8 Line protection system reliability curve in direct-sampling-net-tripping mode

从上述仿真结果可以看出:

1) 线路保护系统的可靠性在不同的采样跳闸模式下, 随时间变化均呈衰减的趋势, 这一点也符合线路保护系统可靠性变化的一般规律。考虑计划检修的情况下, 线路保护系统的可靠性衰减速度比没有考虑计划检修的情况要慢, 因此计划检修能有

效地提高保护系统的可靠性。

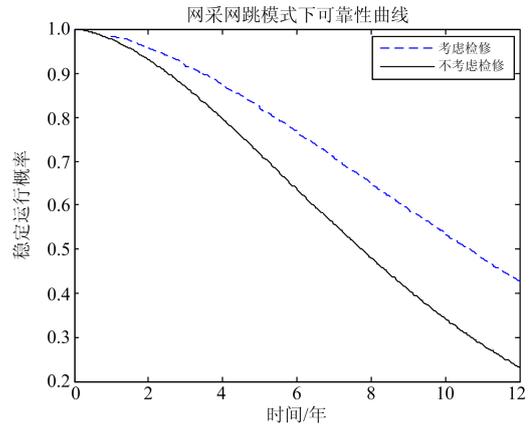


图 9 “网采网跳”模式下线路保护系统可靠性曲线

Fig. 9 Line protection system reliability curve in direct-sampling-direct-tripping mode

2) 在“直采直跳”和“直采网跳”这两种采样跳闸模式下, 线路保护系统可靠性随时间的变化规律是相同的。导致这一结果的主要原因是这两种模式下的设备类别和数目是相同的, 本文单从设备的角度分析这两种采样跳闸模式下的线路保护系统可靠性随时间的变化规律, 而没有考虑线路保护系统在这两种采样跳闸模式下的通信网络结构。“网采网跳”模式下线路保护系统可靠性随时间衰减的速度要快于其他两种模式, 这是“网采网跳”模式下保护相关设备数量增多的原因导致的。

3) 3 种采样跳闸模式下, 线路保护系统工龄达到 10 年左右时, 考虑检修情况的可靠性降幅都在 50%左右, 符合智能变电站二次设备十年换新的实际情况。

### 3.2 智能变电站线路保护系统的平均无故障时间分析仿真

根据所建立的平均无故障工作时间 MTBF 计算模型, 对线路保护系统相关的各设备 MTBF 以及不同采样跳闸模式下线路保护系统的 MTBF 进行仿真计算, 仿真结果如表 3、表 4 所示。

从上述仿真结果可以看出:

1) 不同采样跳闸模式下线路保护系统的 MTBF 小于其系统内各组成设备的 MTBF, 这与实际情况相符。计划检修可以提高线路保护系统的 MTBF。

表 3 各保护相关设备的平均无故障工作时间

MTBF/年	MU	PR	IT	FB	SW	TS
不考虑检修	38.90	38.90	38.90	120.12	20.32	38.90
考虑检修	43.76	43.76	43.76	133.95	23	43.76

表 4 各采样跳闸模式下线路保护系统平均无故障工作时间  
Table 4 Mean time between failure of line protection system in each sampling trip mode

MTBF/年	直采直跳	直采网跳	网采网跳
不考虑检修	10.21	10.21	8.56
考虑检修	14.71	14.71	12.34

2) 在“直采直跳”和“直采网跳”这两种采样跳闸模式下，线路保护系统在考虑检修和未考虑检修两种情景的 MTBF 对应相等。这是由于本文是单从设备的角度分析这两种采样跳闸模式下的线路保护系统 MTBF，而未考虑线路保护系统在这两种采样跳闸模式下的通信网络结构。“网采网跳”模式下线路保护系统的 MTBF 要小于其他两种模式，主要是“网采网跳”模式下线路保护系统保护相关设备数量增多导致的。

3) 考虑计划检修的情况时，线路保护系统在三种采样跳闸模式下的 MTBF 均大于 10 年，这与实际情况相符。

### 3.3 智能变电站线路保护系统的成本仿真分析

由于保护设备的相关费用没有统一标准，为了简化计算模型，本文采用来自某厂家提供的更换成本以及故障维修成本的经验值，其中计划维修成本为假设值如表 5 所示。

表 5 保护设备相关费用

Table 5 Cost of protection equipment

设备	更换成本/元	故障维修成本/元	计划检修成本/元
MU 合并单元	26 000	3 000	400
线路保护装置	200 000	10 000	1 000
母线保护装置	250 000	10 000	1 000
TS 同步时钟源	3 000	600	100
SW 交换机	5 000	800	100
IT 智能终端	26 000	3 000	400
FB 光纤	200	200	0

根据上述计划维修成本分析模型进行仿真，仿真结果如表 6。

表 6 各采样跳闸模式下线路保护系统总成本和年平均成本  
Table 6 Total cost and annual average cost of line protection system in each sampling trip mode

类别	未考虑检修	考虑检修
直采直跳	总成本/元	539 200.82
	年平均成本/元	52 811.05
直采网跳	总成本/元	539 200.82
	年平均成本/元	52 811.05
网采网跳	总成本/元	547 400.82
	年平均成本/元	63 948.69

从上述仿真结果可以看出：

1) 3 种采样跳闸模式下，由于线路保护系统的计划检修作用延长了其平均无故障工作时间 MTBF，因此，虽然线路保护系统在平均无故障工作时间 MTBF 内考虑计划检修时的总成本要高于没有考虑计划检修时的总成本，但线路保护系统考虑计划检修时在 MTBF 内的年平均成本要低于没有考虑计划检修时的年平均成本。

2) “网采网跳”模式下线路保护系统的总成本和年平均成本均高于另外两种模式；“直采直跳”和“直采网跳”模式下线路保护系统的总成本和年平均成本相同。这主要是由于本文是单从设备的角度分析线路保护系统的总成本和年平均成本，“网采网跳”模式下线路保护系统的设备数量要多于另外两种模式，另外两种模式下线路保护系统的设备数量相同。

## 4 结论

本文研究了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，得到以下结论：

1) 本文通过考虑设备老化与计划检修对智能变电站线路保护系统可靠性的影响，利用改进的威布尔分布函数描述线路保护系统可靠性随时间的变化情况，与工程实际较为吻合，也弥补了以往采用定值评估方法如马尔科夫过程法、故障树法等对智能变电站保护系统进行可靠性评估的不足。

2) 通过建立基于设备老化和计划检修的线路保护系统平均无故障工作时间 MTBF 计算模型和检修成本模型，证明了计划检修对智能变电站保护系统可靠性有提高作用，也从侧面验证了该评估方法的可行性。

3) 由于目前本文只从保护设备和检修层面考虑智能变电站保护系统可靠性时变特性，忽略了保护系统通信网络结构影响，在评估模型建立上略显粗糙，本文下一步将加入保护系统通信网络结构这一影响因素，使评估模型得到进一步完善。

由于目前现场数据资料的缺乏，本文只能从理论层面分析，通过假设仿真参数的方式进行模拟实验，验证该方法的可行性。待后续工程实际中，现场长期统计的数据资料得到补充，通过对本文仿真参数进行切合实际的调整，从而得到更为符合工程实际的可靠性变化规律及评估效果。

## 参考文献

[1] 高翔, 张沛超. 数字化变电站的主要特征和关键技术[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 67-71.

- GAO Xiang, ZHANG Peichao. Main features and key technologies of digital substation[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 67-71.
- [2] 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, 79.  
LI Mengchao, WANG Yunping, LI Xianwei, et al. Smart substation and technical characteristic analysis[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 59-62, 79.
- [3] 曹楠, 李刚, 王冬青. 智能变电站关键技术及其构建方式的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 63-68.  
CAO Nan, LI Gang, WANG Dongqing. Key technologies and construction methods of smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 63-68.
- [4] 刘世丹, 袁亮荣, 曾耿晖, 等. 一种基于 IEC 61850 统一建模的多智能变电站数据共享方案[J]. 广东电力, 2017, 30(8): 109-112.  
LIU Shidan, YUAN Liangrong, ZENG Genghui, et al. Unified modeling data sharing plan for multi-intelligent substations based on IEC61850[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(8): 109-112.
- [5] 陈锦山, 唐志军, 何燕玲, 等. 智能变电站二次系统信息安全测试方法[J]. 广东电力, 2017, 30(9): 75-80.  
CHEN Jinshan, TANG Zhijun, HE Yanling, et al. Testing method for information security of secondary system of intelligent substation[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(9): 75-80.
- [6] 胡斌, 郭亚飞, 杨彬, 等. 智能变电站技术的现状与发展趋势研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(3): 87-90.  
HU Bin, GUO Yafei, YANG Bin, et al. Research on status and development trend of smart substation technology[J]. Smart Power, 2018, 46(3): 87-90.
- [7] 王喜, 赵宵凯, 熊斌宇. 一种基于数据挖掘技术的智能变电站故障诊断方法[J]. 智慧电力, 2018, 46(4): 39-43.  
WANG Xi, ZHAO Xiaokai, XIONG Binyu, et al. Intelligent substation fault diagnosis method based on data mining technology[J]. Smart Power, 2018, 46(4): 39-43.
- [8] 胡学浩. 智能电网——未来电网的发展态势[J]. 电网技术, 2009, 33(14): 1-5.  
HU Xuehao. Smart grid—a development trend of future power grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(14): 1-5.
- [9] 白翎. 火电厂重要辅助设备可靠性状态识别研究[J]. 热力发电, 2017, 46(11): 25-31.  
BAI Ling. Reliability state identification for key auxiliary equipments in thermal power units[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(11): 25-31.
- [10] 鲍旭东, 颜铁光. 再热蒸汽温度控制对核电机组运行可靠性的影响[J/OL]. 热力发电: 1-5 [2019-04-18]. <https://doi.org/10.19666/j.rlfd.201810203>.  
BAO Xudong, YAN Tieguang. Effect of reheat steam temperature control on operation reliability of nuclear power unit[J]. Thermal Power Generation: 1-5 [2019-04-18]. <https://doi.org/10.19666/j.rlfd.201810203>.
- [11] 刘海峰, 肖繁, 赵永生, 等. 智能变电站集中式站域保护系统的可靠性分析[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 157-164.  
LIU Haifeng, XIAO Fan, ZHAO Yongsheng, et al. Reliability evaluation for centralized protection system of smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 157-164.
- [12] 薛安成, 罗麟, 景琦, 等. 基于 Markov 模型的高压输电线路继电保护装置风险评估[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1995-2000.  
XUE Ancheng, LUO Lin, JING Qi, et al. Research on Markov model based risk assessment of protective relaying for high voltage transmission line[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1995-2000.
- [13] 王力军, 周凯, 吴迪, 等. 基于风险传递网络的智能变电站二次系统风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 97-105.  
WANG Lijun, ZHOU Kai, WU Di, et al. Risk assessment for smart substation secondary system using risk transfer network model[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 97-105.
- [14] XU X, MITRA J, WANG T, et al. An evaluation strategy for microgrid reliability considering the effects of protection system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 31(5): 434-450.
- [15] DAI Z, WANG Z, JIAO Y. Bayes Monte-Carlo assessment method of protection systems reliability based on small failure sample data[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 1841-1848.
- [16] PAUL D, CHAVDARIAN P B R. Undercurrent protection power system: a novel ground-fault protection relay scheme[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2015, 21(1): 23-32.
- [17] CHAIDEE E, TIPPACHON W. Failure statistics and condition evaluation for power transformer maintenance[C] // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, IEEE, 2011: 1-4.
- [18] RETTERATH B, VENKATA S S, CHOWDHURY A A. Impact of time-varying failure rates on distribution reliability[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2005, 27(9): 682-688.

[19] 张翔, 宋子彤, 杨致慧, 等. 一种基于负载率和设备检测信息的油浸式变压器故障率模型[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1159-1165.  
ZHANG Xiang, SONG Zitong, YANG Zhihui, et al. A failure model for oil-immersed transformer based on load factor and equipment inspection information[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1159-1165.

[20] BERTLING L, ALLAN R, ERIKSSON R. A reliability-centered asset maintenance method for assessing the impact of maintenance in power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1): 75-82.

[21] CASTRO I T. Model of imperfect preventive maintenance with dependent failure modes[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 196(1): 217-224.

[22] 邓奥攀, 胡志坚, 胡美玉. 同时计及设备老化与不完全维修的电力系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 69-74.  
DENG Aopan, HU Zhijian, HU Meiyu. Power system reliability evaluation considering deterioration and imperfect maintenance of equipment[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 69-74.

[23] 肖繁, 王紫薇, 张哲, 等. 基于状态监测的继电保护系统检修策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 74-83.  
XIAO Fan, WANG Ziwei, ZHANG Zhe, et al. Study on maintenance strategy of relay protection system based on condition monitoring[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 74-83.

[24] 赵渊, 张煦, 王洁, 等. 多级检修模式下电网计划检修周期协调优化[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 71-81.  
ZHAO Yuan, ZHANG Xu, WANG Jie, et al. Coordination and optimization of power-grid preventive maintenance cycle in multi-level maintenance mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 71-81.

[25] 何旭, 姜宪国, 张沛超, 等. 考虑检修策略的智能变电站保护系统可用性分析[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 1121-1128.  
HE Xu, JIANG Xianguo, ZHANG Peichao, et al. Availability analysis of smart substation protection system considering maintenance strategies[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 1121-1128.

[26] 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.

[27] 戴志辉. 继电保护可靠性及其风险评估研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2012.  
DAI Zhihui. Research on reliability and risk assessment of protection systems[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2012.

收稿日期: 2018-05-17; 修回日期: 2018-07-13

作者简介:

郭升(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能变电站可靠性; E-mail: 482806874@qq.com

童晓阳(1970—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为电网故障诊断、广域后备保护、智能变电站; E-mail: xytong@swjtu.cn

王洪彬(1984—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为智能变电站继电保护技术。E-mail: whbleehomwhb@163.com

(编辑 葛艳娜)