

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210225

# 基于改进动态故障树的电力系统广域保护通信系统 可靠性分析方法

魏勇<sup>1</sup>, 崔俊彬<sup>1</sup>, 刘辛彤<sup>1</sup>, 刘昕<sup>2</sup>, 胡家灵<sup>2</sup>, 陈嵘<sup>2</sup>

(1. 国网河北省电力有限公司信息通信分公司, 河北 石家庄 050000;

2. 广州广哈通信股份有限公司, 广东 广州 510663)

**摘要:** 针对广域保护系统对通信网络实时性和可靠性的高要求, 提出了一种将动态故障树和蒙特卡洛算法相结合的广域保护通信系统可靠性分析方法。利用扩展的动态故障树建立了系统模型, 并采用序贯蒙特卡洛方法对系统的可靠性进行分析计算。通过仿真对系统的可靠性和薄弱环节等进行分析。仿真结果表明, 所提出的可靠性分析方法模型简单、适用性强, 能够快速发现影响系统可靠性的因素, 便于快速诊断和维护, 提高了整个网络的可靠性。

**关键词:** 广域保护系统; 通信网络; 动态故障树; 蒙特卡洛算法; 可靠性分析

## A reliability analysis method power system wide area protection communication system based on an improved dynamic fault tree

WEI Yong<sup>1</sup>, CUI Junbin<sup>1</sup>, LIU Xintong<sup>1</sup>, LIU Xin<sup>2</sup>, HU Jialing<sup>2</sup>, CHEN Rong<sup>2</sup>

(1. Information & Telecommunication Branch, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China;

2. GHT Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** There are demanding requirements for real-time activity and reliability of a communication network for a wide area protection system. Thus a reliability analysis method for a wide area protection communication system based on a dynamic fault tree and a Monte Carlo algorithm is proposed. An extended dynamic fault tree is used to establish the system model, and the sequential Monte Carlo method is used to analyze and calculate the reliability of the system. The reliability and weak links of the system are analyzed by simulation. The results show that the proposed reliability analysis method is simple and applicable. It can quickly find the factors affecting system reliability, facilitate rapid diagnosis and maintenance, and improve the reliability of the whole network.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province (No. F2015502047).

**Key words:** wide area protection system; communication network; dynamic fault tree; Monte Carlo method; reliability analysis

## 0 引言

随着我国电网的快速发展, 电网的广域互联格局已经逐步形成<sup>[1]</sup>。同时, 随着跨区域互联网的发展, 跨区域电网的运行管理变得越来越困难。面对全国性的跨区域电网, 实时采集和传输广域信息的可靠性尤为重要<sup>[2]</sup>。广域保护通信系统作为广域保护系统的重要组成部分, 对广域保护通信系统的可靠性分析方法进行研究具有重要的实际意义。

目前, 国内外学者对广域保护系统的可靠性进行了大量研究, 但大多集中在可靠性评估指标和计算模型的构建上, 对通信系统可靠性的研究很少。文献[3]提出了一种广域保护模型, 用于配电网中, 通过仿真对系统信息流进行分析, 为系统构建和选型提供建议和依据。文献[4]对广域保护控制系统受通信中断的影响进行了定性分析, 在此基础上提出了电力-通信组合故障预想产生方法。通过算例验证了该方法的优越性。文献[5]提出一种将 Markov 状态空间法和网格法结合的广域保护通信系统可靠性评估方法, 通过实例验证了该方法的优点。文献[6]

基金项目: 河北省自然科学基金项目资助(F2015502047)

在综合电力系统可靠性模型的基础上,提出一种结合状态估计和可观测性的可靠性评估方法。结果表明,该模型和方法可以准确地描述可观测性变化和状态估计对电力系统可靠性评估的影响。但以上研究在系统的可靠性评估中,并未全面考虑硬件故障、保护原理、保护设置和电力系统运行模式等方面,因此需要进一步提高适应性。

在此基础上,提出了一种将动态故障树和蒙特卡洛算法相结合的广域保护通信系统可靠性分析方法。利用扩展的动态故障树建立了系统模型,并采用序贯蒙特卡洛方法对系统的可靠性进行分析计算。

## 1 系统架构

广域保护通信系统主要由变电站、局域网、广域网、本地保护中心(Local Protection Center, LPC)/系统保护中心(System Protection Center, SPC)等通信系统组成<sup>[7]</sup>。文中主要描述了区域集中式广域保护系统的拓扑结构,如图1所示。

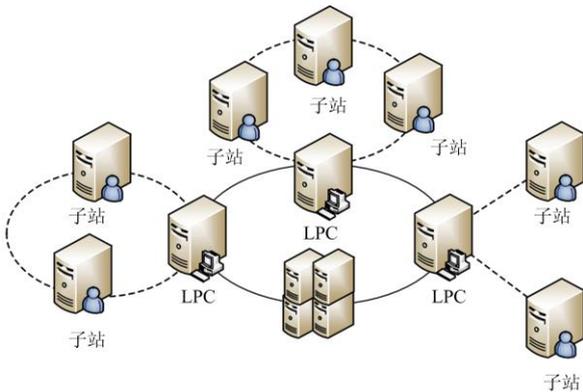


图1 广域保护通信系统拓扑(区域集中式)

Fig. 1 Wide area protected communication system topology (area centralized)

从图1可以看出,区域集中式广域保护通信系统的拓扑是环形拓扑,具有极好的生存能力,采用三层广域保护的分层结构,每一层的可靠性直接影响通信的整体质量。但在实际应用中,不可避免地会受到外界因素的干扰,导致通信设备故障<sup>[8]</sup>。要完成区域集中式广域保护通信系统的可靠性分析,需要先对各层进行可靠性分析,然后结合各层之间的关系来完成整个系统的可靠性分析。

## 2 可靠性模型和评估方法

文中将动态故障树和蒙特卡洛算法相结合用于广域保护通信系统的可靠性分析。将传统故障树的

优势与马尔可夫模型相结合,使用序贯蒙特卡洛方法对系统可靠性进行分析计算。

### 2.1 可靠性指标

可靠性模型是完成通信系统评估的有效方法。在不考虑阻塞和碰撞因素的情况下可以完成系统的可靠性评估<sup>[9]</sup>。可靠性指标是分析的基础,常用的可靠性指标如下所述。

#### 1) 可靠度

在特定时间系统实现其功能的概率,通常以 $R$ 表示,如式(1)所示<sup>[10]</sup>。

$$R(t) = P(T > t) = \int_t^{\infty} f(t)dt \quad (1)$$

式中: $T$ 为系统的寿命,它是一个随机变量; $t$ 为特定时间。

由此,可以进一步推导系统失效事件的不可靠函数 $F(t)$ ,如式(2)所示。

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (2)$$

#### 2) 失效率

在时间 $t$ 后,系统的失效概率称为当前系统在时刻 $t$ 的失效率,失效率 $\lambda(t)$ 如式(3)所示<sup>[11]</sup>。

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t | T > t)}{\Delta t} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3)$$

#### 3) 平均故障时间

平均故障时间(MTTF)是指在不可修复的时间 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 范围内系统元件的可用性,如式(4)所示<sup>[12]</sup>。

$$MTTF = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} R(t)dt = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (4)$$

式中: $n$ 为系统故障数; $t_i$ 为 $i$ 次故障修复后的时间。

#### 4) 平均修复时间

修复系统故障的平均时间,通常以 $MTTR$ 表示,如式(5)表示<sup>[13]</sup>。

$$MTTR = \int_0^{\infty} tg(t)dt \quad (5)$$

#### 5) 平均无故障时间

系统发生 $n$ 次故障,则在修复每个故障后,它将继续像新产品一样工作。工作时间分别为 $t_1, t_2, \dots, t_n$ ,则平均无故障时间 $MTBF$ 如式(6)所示<sup>[14]</sup>。

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t)dt = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (6)$$

#### 6) 可用性和不可用性

在某些条件下,系统在任何时刻正常运行的概率称为可用性,如果 $t \rightarrow \infty$ ,可用度 $A(t)$ 如式(7)所示<sup>[15]</sup>。

$$A(t) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (7)$$

不可用度的函数用 $Q(t)$ 表示,如式(8)所示。

$$Q(t) = 1 - A(t) \quad (8)$$

7) 元件的概率重要度

系统或系统组件的失效概率  $g(Q(t))$  对系统任一组件的求导函数, 如式(9)所示。

$$I_i(t) = \frac{\partial g(Q(t))}{\partial Q_i(t)} \quad (9)$$

### 2.2 可靠性模型

为了对动态逻辑门的问题进行求解, 将动态逻辑门输入事件中的状态组合转化为 Markov 模型的基本状态, 转换过程如下所述<sup>[16]</sup>。

#### 1) 优先与门(PAND)

从 PAND 到 Markov 模型的转换如图 2 所示。

Markov 模型具有三个系统状态: 正常工作系统、元件 A 失效元件 B 工作和系统故障, 表示为 00、01、FL。 $\lambda_A$  和  $\lambda_B$  分别为元件 A 和 B 的失效率, 也是图 2 的状态转换率。

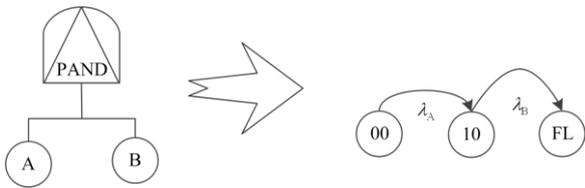


图 2 PAND 向马尔科夫模型转换

Fig. 2 Transformation from PAND to Markov model

#### 2) 功能相关门(FDEP)

从 FDEP 到 Markov 模型的转换如图 3 所示。

$\lambda_A$  和  $\lambda_B$ 、 $\lambda_T$  分别为元件 A 和 B、触发事件 T 的失效率。转换后的模型具有 4 个系统过渡状态: 3 个元件均正常工作、只有元件 B 失效、只有元件 A 失效、系统失效, 表示为 000、001、010、FL。

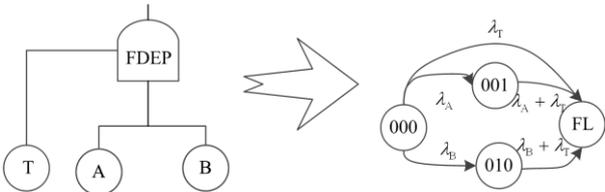


图 3 FDEP 向马尔科夫模型转换

Fig. 3 Transformation from FDEP to Markov model

#### 3) 热备用门(HSP)

如图 4 所示 HSP 被转换为 Markov 模型。A 是基本输入, B 是备件, A 和 B 在运行状态下的失效率分别表示为  $\lambda_A$  和  $\lambda_B$ 。热备用门的每个状态同输入的优先与门状态一样。

系统可靠性分析主要由软件分析和硬件分析组成。软件子系统与保护机制无关, 而硬件子系统与保护机制密切相关<sup>[17]</sup>。建模和计算过程如图 5 所示。

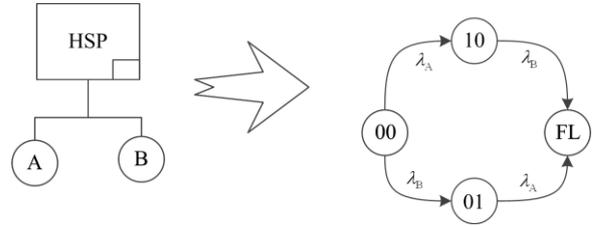


图 4 HSP 向马尔科夫模型转换

Fig. 4 Transformation from HSP to Markov model

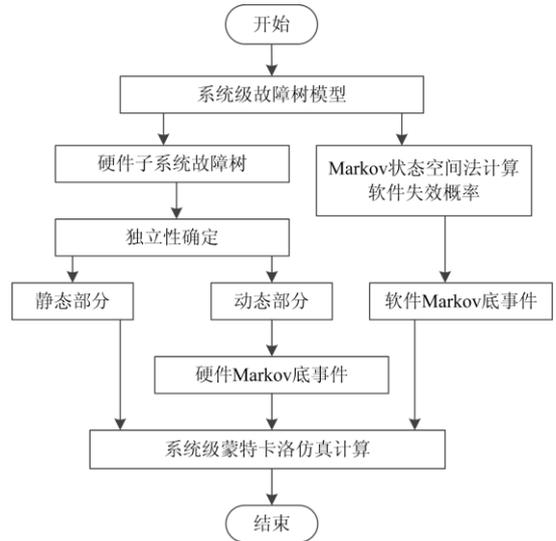


图 5 建模及计算流程

Fig. 5 Modeling and calculation process

由图 5 可知, 模型的建立主要由两个模块组成。由于保护系统的硬件子系统是独立的, 确定动态故障树的静、动态部分。动态部分通过动态逻辑门将各事件向 Markov 状态转移链转换, 以获取其状态空间中的所有故障模式和传输过程, 这是动态故障树的底事件。软件保护系统的可靠性可以通过“Markov 底事件”简单地划分系统的 Markov 状态。采用序贯蒙特卡洛方法对系统的可靠性进行分析计算。

在 Markov 状态转换图中, 每个转换都与相应的元件具有故障关系。如果 Markov 状态链失效, 链中状态转换和序列关系都为故障模式。使用系统故障作为源点, 可以在动态故障树中找到所有相应的故障模式。

### 2.3 模型求解

使用序贯蒙特卡洛算法来计算一段时间内的系统可靠性指标, 这有助于建立可靠且实用的概率模型。动态故障树结构函数将仿真时间划分为几个独立的时段。对于每个分区模块, 设置底事件不变, 即使在失效时也是如此。在仿真过程中对系统进行

了静态处理,并在每个时间点执行了仿真计算。发生故障时,开始修复故障。处理过程如下:等式(10)和式(11)分别给出了第  $j$  个底事件的第  $i$  次失效抽样时间和修复抽样时间。式(12)给出了第  $j$  个底事件抽样时间序列,系统模型的底部事件数设为  $n$ <sup>[18]</sup>。

$$\xi_{ji} = D_{f,j}^{-1}(s_i) \quad (10)$$

$$\xi'_{ji} = D_{r,j}^{-1}(s'_i) \quad (11)$$

$$t_{j,i} = \begin{cases} t_{j,i-1} + \xi, & i=1,3,5,\dots \\ t_{j,i-1} + \xi', & i=2,4,6,\dots \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $D_{r,j}$  和  $D_{f,j}$  分别为第  $j$  个底事件的维修和失效分布函数;  $\xi$  和  $\xi'$  分别为底事件的工作和修复时间结果;  $s_i$  和  $s'_i$  分别为第  $i$  个数字的随机序列。

单次仿真最长时间为  $T_{\max}$ , 以升序排序  $t_{j,i}$ , 如式(13)所示<sup>[19]</sup>。

$$0 = t'_0 \leq t'_1 \leq t'_2 \leq \dots \leq t'_m = T_{\max} \quad (13)$$

对应的时序状态转移情况如图 6 所示。

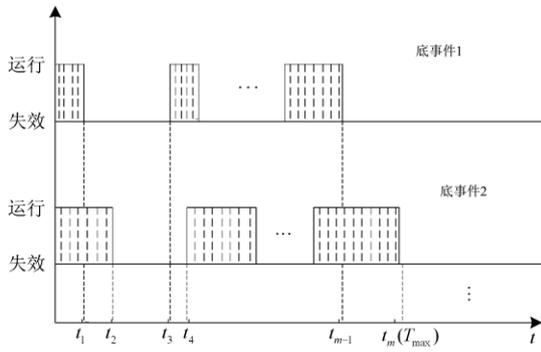


图 6 状态转移图

Fig. 6 State transition diagram

序贯蒙特卡洛方法的单次仿真步骤为:

步骤 1) 设定  $T_s = 0$ , 将最长时间设置为  $T_{\max}$ , 将系统故障数和正常运行值设置为  $F_l = 0$  和  $N_l = 0$ , 并将正常运行时间和系统故障时间设置为  $T_{N,l} = 0$  和  $T_{F,l} = 0$ 。

步骤 2) 设置  $l=1$ , 通过式(10)一式(12)进行模型仿真。

步骤 3)  $l=l+1$ ,  $T_s \in (t'_{l-1}, t'_l)$ , 判断底事件是否在该区域<sup>[20]</sup>。如果系统状态正常, 则结构函数为 0。记录  $T_{N,l}$ ,  $F_l = 0$ ,  $N_l = 1$ ; 否则记录  $T_{F,l}$ ,  $F_l = 1$ ,  $N_l = 0$ 。

步骤 4) 令  $T_s = T_s + t'_l - t'_{l-1}$ , 如果满足式(11), 则转到步骤 3), 否则, 继续下一步。

步骤 5) 计算可靠性指标。平均修复时间和平均无故障时间如式(14)和式(15)所示<sup>[21]</sup>。

$$MTTR = \frac{\sum_{l=1}^m T_{F,l}}{\sum_{l=1}^m N_l} \quad (14)$$

$$MTBF = \frac{\sum_{l=1}^m T_{N,l}}{\sum_{l=1}^m N_l} \quad (15)$$

在 Matlab 中进行多次仿真运算后, 使模型的可靠性指标都可以收敛, 最后对结果进行分析和统计<sup>[22]</sup>。

### 3 仿真结果与分析

#### 3.1 仿真参数

为了验证所提出的广域保护通信系统可靠性评估方法的性能, 以 IEEE 11 节点 WAMS 系统为例, 通过蒙特卡罗仿真, 将系统的通信网络划分为两个区域: A1 和 A2, 结构如图 7 所示。LPC1 与母线 8 连接, LPC2 与母线 9 连接。主干网由 SPC、SDH、LPC1、LPC2 等装置组成, A1 和 A2 使用环形拓扑。每个变电站均通过 SDH 设备连接到网络, SDH 通信光纤的平均修复时间为 24 h, 其他元件的平均修复时间为 48 h, 总仿真时间为 40 年, 总计 350 400 h<sup>[23]</sup>。

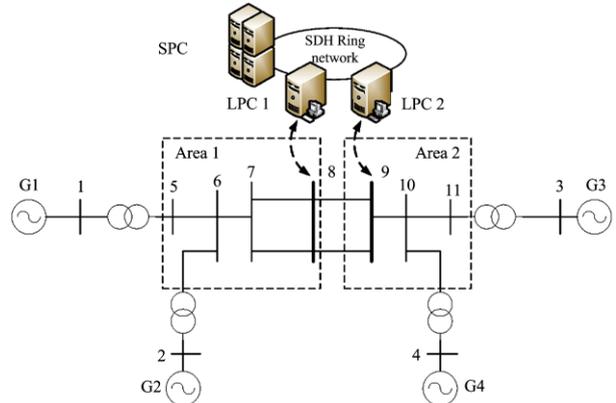


图 7 IEEE11 母线系统划分示意图

Fig. 7 IEEE11 bus system division diagram

#### 3.2 子站通信可靠性

假设通信系统中的每个变电站由 4 个间隔组成, 每个间隔由两个 IED 以太网接口、1 个路由器和 1 个服务器组成<sup>[24]</sup>。所有组件的故障率设置如下:  $\lambda_{RO} = 1.216 \times 10^{-5}/h$ 、 $\lambda_{SER} = 7.991 \times 10^{-6}/h$ 、 $\lambda_{EI} = 1.372 \times 10^{-5}/h$ 、 $\lambda_{SW} = 9.931 \times 10^{-6}/h$ 、 $\lambda_{EI} = 5.939 \times 10^{-6}/h$ 。

计算星型和环形拓扑子站的通信网络和各层的可用度, 如表 1 所示。

从表 1 中可以看出, 子站星形结构通信层可用

性低于环形结构。两种结构的站控层和间隔层可用性相同, 但交换层可用性环形结构更高。以下分析采用环节结构进行分析。

表 1 各通信层可用度

Table 1 Availability of each communication layer

网络结构	子站	站控层	交换层	间隔层
星形	0.983 3	0.997 8	0.996 7	0.972 6
环形	0.983 9	0.997 8	0.991 2	0.972 6

表 2 为各层元件的重要度指标。通过计算比较元件的重要程度, 找到薄弱环节。

表 2 元件重要度 1

Table 2 Component importance 1

子站分层	路由器	服务器	光纤	交换机	以太网接口
站控层	0.308 3	0.214 1	0.210 1	—	—
交换层	—	—	0.091 9	0.972 6	—
间隔层	—	—	0.270 2	—	0.212 1

从表 2 中可以看出, 各层光纤的失效率最高。计算三层光纤的失效率表明, 光纤修复时间将近是其他元件的两倍, 因此, 减少元件修复时间对于提高系统可靠性尤其重要。在间隔层提高光纤的可靠性对提高间隔层通信网络的可靠性非常有利。

### 3.3 LPC 通信系统可靠性

LPC 通信系统可靠性模型如图 8 所示。

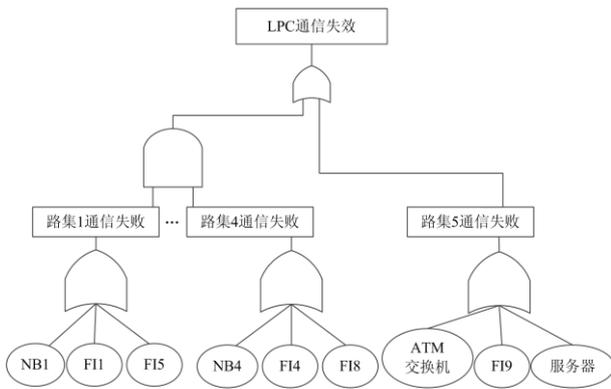


图 8 LPC 通信网可靠性模型

Fig. 8 Reliability model of LPC communication network

设置的各部件失效率有  $\lambda_{ATM} = 9.931 \times 10^{-6}/h$ 、 $\lambda_{NB} = 1.211 \times 10^{-6}/h$ 、 $\lambda_{FI} = 1.372 \times 10^{-5}/h$ 、 $\lambda_{SER} = 1.791 \times 10^{-5}/h$ 。

LPC1 和 LPC2 的可用度分别计算为 0.998 3 和 0.998 3。根据对比, 当使用路由选择集 5 作为主路径时, 子站数对模型可靠性几乎无影响。表 3 所示 LPC1 中各元件概率重要度的计算结果, 路径集 5 的元件概率重要性最高。

表 3 元件重要度 2

Table 3 Component importance 2

元件	网桥	光纤 1-8	ATM 交换机	服务器	光纤 9
重要度	$2.57 \times 10^{-10}$	$1.51 \times 10^{-10}$	0.290 8	0.592 1	0.189 6

### 3.4 主干网可靠性

主干网通信可靠性模型如图 9 所示。

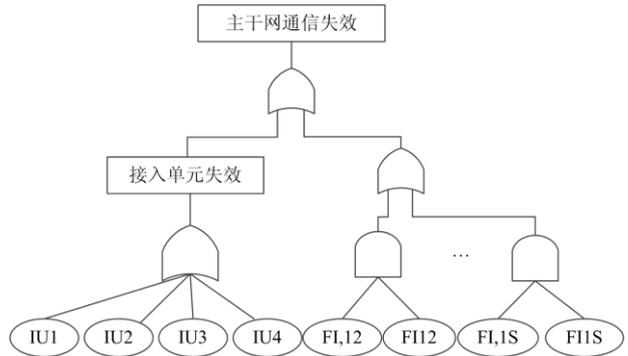


图 9 主干网通信可靠性模型

Fig. 9 Communication reliability model of backbone network

母线 5-8 形成区域网络 A1, 而母线 9-11 形成区域网络 A2。主网由两个 LPC 和一个 SPC 组成, 其可靠性指标如表 4 所示,  $\lambda_{SDH} = 7.28 \times 10^{-5}/h$ 。

表 4 通信网络可靠性指标

Table 4 Reliability index of communication network

网络	可用度	重要度	
		SDH 设备	光纤
A1 或主干网	0.989 6	0.331 4	$2.214 \times 10^{-12}$
A2	0.993 1	0.246 1	$2.598 \times 10^{-12}$

仿真时间越长, 系统的累积失效概率越高, 可靠性指标越低。

### 3.5 区域集中式广域保护系统可靠性

根据广域保护通信系统的层次结构和主要元件的构成, 建立了广域保护通信系统的整体可靠性模型, 如图 10 所示<sup>[25]</sup>。

表 5 所示为 IEEE 11 广域保护通信系统的可用度。

图 11 所示为整个系统和各系统分层网络随时间的累积失效概率曲线。因为 8 000 h 的数据接近 1, 所以仅分析 8 000 h 之前的数据。

从图 11 中可以看出, 在仿真的早期阶段, 区域集中式系统的累积失效率上升最快, 并且通信主干网和子站的曲线非常接近, 变电站三层通信网有一定的差异。交换层最接近主干网和子站, 失效率上升明显, 间隔层和站控层相近。所提出的可靠性分析方法模型简单, 适用性强, 可以快速发现影响系

统可靠性的因素，便于快速诊断和维护，提高整个网络的可靠性。

以上分析表明，元件的可靠性、系统维护和故障检测水平、系统累积失效时间是影响整个广域保护通信系统可靠性的主要因素。

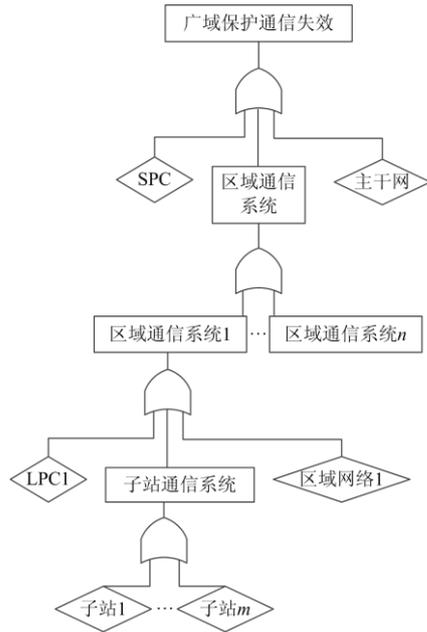


图 10 广域保护通信系统整体可靠性模型

Fig. 10 Overall reliability model of wide area protection communication system

表 5 各分层可用度

Table 5 Availability of each layer

分层	区域 1	区域 2	系统整体
可用度	0.949 4	0.913 8	0.899 4

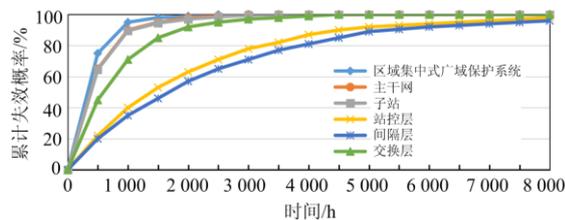


图 11 系统各部分累计失效概率随时间变化曲线

Fig.11 Time varying curve of cumulative failure probability of each part of the system

## 4 结论

文中将动态故障树和蒙特卡洛算法相结合用于广域保护通信网络的可靠性分析。结合传统故障树的优点和马尔可夫模型，采用序贯蒙特卡洛方法对系统的可靠性进行分析和计算。仿真结果表明，文中的可靠性分析方法相对简单，可以快速定位系统

的薄弱环节。从目前的实验设备和数据规模来看，广域保护通信系统的可靠性分析已经有了初步的结果，但仍存在一些问题和不足，如文中采用的蒙特卡洛算法，该算法运算时间长，后期需要对该算法进行改进，提高运算的速度。

## 参考文献

- [1] 徐彬泰, 周洁, 于秋生, 等. 基于协作智能与子梯度优化算法的电力业务差异化 QoS 路由策略[J]. 电测与仪表, 2020, 57(10): 50-57.  
XU Bintai, ZHOU Jie, YU Qiusheng, et al. Differentiated QoS routing strategy for power services based on collaborative intelligence and sub-gradient optimization algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(10): 50-57.
- [2] 李欣悦, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 1-8.  
LI Xinyue, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Transient overvoltage calculation method of sending end system under DC bipolar blocking fault[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 1-8.
- [3] 李艳, 张安龙, 郑曦. 配电网广域保护信息流建模与通信性能分析[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 53-60.  
LI Yan, ZHANG Anlong, ZHENG Xi. Information flow modeling and communication performance analysis of wide area protection in distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 53-60.
- [4] 严佳梅, 许剑冰, 倪明, 等. 通信系统中断对电网广域保护控制系统的影响[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 17-24.  
YAN Jiamei, XU Jianbing, NI Ming, et al. Influence of communication system interruption on wide area protection and control system of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 17-24.
- [5] 崇志强, 戴志辉, 焦彦军. 典型广域保护通信网络的信息传输可靠性评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(4): 20-24.  
CHONG Zhiqiang, DAI Zhihui, JIAO Yanjun. Information transmission reliability evaluation of typical wide area protection communication network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(4): 20-24.
- [6] 毛澍, 张丽, 谈军, 等. 基于马尔科夫链的电力系统运行可靠性快速评估[J]. 微型电网应用, 2021, 37(3): 151-154.  
MAO Shu, ZHANG Li, TAN Jun, et al. Fast evaluation of power system operation reliability based on Markov chain[J]. Microgrid Applications, 2021, 37(3): 151-154.
- [7] 石莹, 罗峥, 胡佳, 等. 基于云计算的电力运行大数据异常值快速检测算法[J]. 电子设计工程, 2020, 28(18): 43-51.  
SHI Ying, LUO Zheng, HU Jia, et al. Fast outlier detection algorithm of power operation big data based on cloud computing[J]. Electronic Design Engineering, 2020, 28(18): 43-51.
- [8] 陆春光, 叶方彬, 赵羚, 等. 基于密度峰值聚类的电力大数据异常值检测算法[J]. 科学技术与工程, 2020,

- 20(2): 654-658.
- LU Chunguang, YE Fangbin, ZHAO Ling, et al. Outlier detection algorithm of power big data based on density peak clustering[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(2): 654-658.
- [9] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 63-72.
- ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated restoration of multi infeed DC systems based on improved VDCOL[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.
- [10] 谢黎, 周华良, 于同伟, 等. 一种智能变电站新型双网冗余设备及实现[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 151-156.
- XIE Li, ZHOU Hualiang, YU Tongwei, et al. A new dual network redundant equipment and its implementation for intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 151-156.
- [11] NAHMAN J, SALAMON D. Mutual interference of neighboring grounding systems and approximate formulation[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 41(12): 151-156.
- [12] MOSES V, HATHERLEY R, BISHOP Ö T. Bioinformatic characterization of type-specific sequence and structural features in auxiliary activity family 9 proteins[J]. Biotechnology for Biofuels, 2016, 9(1): 88-94.
- [13] HOU Kaiyuan, SHAO Guanghui, WANG Haiming, et al. Research on practical power system stability analysis algorithm based on modified SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 119-125. DOI: 10.1186/s41601-018-0086-0.
- [14] PATEL G K, DABHI V K, PRAJAPATI H B. Clustering using a combination of particle swarm optimization and K-means[J]. Journal of Intelligent Systems, 2017, 12(3): 457-469.
- [15] GAUTAM J V, PRAJAPATI H B, DABHI V K, et al. Empirical study of job scheduling algorithms in Hadoop MapReduce[J]. Cybernetics and Information Technologies, 2017, 21(1): 146-163.
- [16] CAETANO C E F, LIMA A B, PAULINO J O S, et al. A conductor arrangement that overcomes the effective length issue in transmission line grounding[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 46(5): 159-162.
- [17] HU Jianjiang, FICHTNER M, BARICCO M. Preparation of Li-Mg-N-H hydrogen storage materials for an auxiliary power unit[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(27): 17144-17148.
- [18] JIA Zhiwei, WANG Lijun, ZHANG Jinchuan, et al. High efficiency, low power-consumption DFB quantum cascade lasers without lateral regrowth[J]. Nanoscale Research Letters, 2017, 12(1): 88-95.
- [19] 张婕, 曾国辉, 赵晋斌, 等. 基于改进冒泡排序的模块化多电平换流器电容电压均衡策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 92-99.
- ZHANG Jie, ZENG Guohui, ZHAO Jinbin, et al. Capacitor voltage equalization strategy for modular multilevel converter based on improved bubble sorting[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 92-99.
- [20] 赵灿明, 李祝红, 闫凡, 等. 电力通信网络中负载均衡的路由协议[J]. 计算机应用, 2016, 36(11): 3028-3032.
- ZHAO Canming, LI Zhuhong, YAN Fan, et al. Load balancing routing protocol in power communication network[J]. Computer Applications, 2016, 36(11): 3028-3032.
- [21] 王利平, 庞晓艳, 朱雨, 等. 基于物联网和移动互联的二次设备运维技术研究与应用[J]. 中国电力, 2019, 52(3): 177-184.
- WANG Liping, PANG Xiaoyan, ZHU Yu, et al. Research and application of secondary equipment operation and maintenance technology based on internet of things and mobile interconnection[J]. Electric Power, 2019, 52(3): 177-184.
- [22] 唐耀华, 郭为民, 崔杨. 水-火发电机组频率控制策略研究[J]. 中国电力, 2020, 53(6): 153-161.
- TANG Yaohua, GUO Weimin, CUI Yang. Study on frequency control strategy of water thermal power unit[J]. Electric Power, 2020, 53(6): 153-161.
- [23] 顾志祥, 孙思宇, 孔飞, 等. 燃气冷热电分布式能源系统设计优化综述[J]. 华电技术, 2019, 41(3): 8-13, 42.
- GU Zhixiang, SUN Siyu, KONG Fei, et al. Design optimization of gas cooling, heating and power distributed energy system[J]. Huadian Technology, 2019, 41(3): 8-13, 42.
- [24] 方顺利, 姚伟, 姚皓, 等. 基于实时入炉煤质数据的在线掺烧优化系统在火电厂的应用[J]. 热力发电, 2021, 50(2): 138-143.
- FANG Shunli, YAO Wei, YAO Hao, et al. Application of online blending and combustion optimization system based on real-time coal quality detection[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(2): 138-143.
- [25] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于限流器与断路器协调的混合直流输电系统故障隔离方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 119-127.
- CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Fault isolation method for hybrid HVDC system based on coordination of current limiter and circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 119-127.

收稿日期: 2021-03-04; 修回日期: 2021-08-25

作者简介:

魏勇(1977—), 男, 硕士, 高级技师, 主要研究方向为通信传输、语音交换、通信基建; Email: asdfk2021@163.com

崔俊彬(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为语音交换、数据网络;

刘辛彤(1991—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为语音交换、数据网络。

(编辑 张爱琴)