

DOI:10.7667/PSPC171637

# 基于动态贝叶斯网络的智能变电站监控系统可靠性分析

戴志辉<sup>1</sup>, 谢军<sup>1</sup>, 陈曦<sup>2</sup>, 王增平<sup>1</sup>

(1. 河北省分布式储能与微网重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003;

2. 国网保定供电公司, 河北 保定 071000)

**摘要:** 通过分析智能变电站监控系统的工作机制, 提出运用动态贝叶斯网络评估其可靠性。首先, 将监控系统的功能划分为三类, 并建立了相应的功能可靠性框图。其次, 在建立的功能可靠性框图的基础上, 构建了监控系统动态贝叶斯网络模型及其求解方法。最后, 以算例验证了所提方法的有效性。结果表明, 该方法能较好地描述监控系统的动态特性, 为系统的优化配置、故障诊断提供参考。

**关键词:** 智能变电站; 监控系统; 动态贝叶斯网络; 动态特性; 可靠性评估

## Dynamic Bayesian network based reliability evaluation of supervision and control system in smart substations

DAI Zhihui<sup>1</sup>, XIE Jun<sup>1</sup>, CHEN Xi<sup>2</sup>, WANG Zengping<sup>1</sup>

(1. Hebei Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid (North China Electric Power University),

Baoding 071003, China; 2. State Grid Baoding Power Supply Company, Baoding 071000, China)

**Abstract:** Based on analysis of operating mechanism of smart Substation Supervision and Control System (SSCS), Dynamic Bayesian Network (DBN) is introduced to evaluate the reliability of SSCS. First, the function of SSCS is divided to three types and the corresponding functional Reliability Block Diagrams (RBD) are established. Secondly, the DBN model and its solution of SSCS are implemented based on the functional RBD. Finally, a study case is presented to demonstrate the effectiveness of the proposed method. The results show that dynamic characteristics of SSCS could be well described by DBN and hence provide reference for the system configuration optimization and fault diagnosis.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877084), Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2018502063), National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900203), and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2017MS096).

**Key words:** smart substation; supervision and control system; dynamic Bayesian network; dynamic characteristics; reliability evaluation

## 0 引言

监控系统是智能变电站二次系统中的关键环节<sup>[1-2]</sup>。国外的数次大停电(如美加大停电及意大利大停电等)后的事故追忆表明监控系统的失效是事故产生与发展的重要原因之一<sup>[3]</sup>, 评估监控系统的可靠性具有重要意义。目前评估智能变电站可靠性

的研究中, 多数集中于对变电站内保护系统的可靠性分析。如文献[4]根据变电站保护系统的需求选取相应可靠性指标, 并通过动态马尔科夫模型定量分析了保护系统在给定条件下的检修需求。文献[5]提出了一种基于 SV、GOOSE 以及 IEC61850 信息流的继电保护系统建模方法, 并用可靠性框图计算了系统的可靠性。文献[6]提出一种蒙特卡洛与动态故障树结合的继电保护系统可靠性评估方法。文献[7]将故障树与蒙特卡洛法相结合, 定量评估了智能站域保护系统的可靠性。然而, 针对智能变电站监控系统可靠性评估的研究尚不多见。

为此, 本文首先将监控系统的主要功能划分为

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51877084); 河北省自然科学基金项目资助(E2018502063); 国家重点研发计划专项课题资助(2016YFB0900203); 中央高校基本科研业务费资助(2017MS096)

三类: 监视功能、控制功能、状态校验功能, 并构建了相应的功能可靠性框图。然后依据报文的传输机制, 提出一种报文可靠性评估方法。最后运用动态贝叶斯网络对监控系统进行双向推理, 正向得到监控系统与功能的可靠性动态变化曲线; 反向对系统进行灵敏度分析, 用以寻求系统中的薄弱环节, 指导系统的故障诊断。

## 1 监控系统的功能与架构

在 IEC61850 标准<sup>[8]</sup>下, 智能变电站监控系统可分为“三层两网式”结构, 依据《智能变电站监控系统技术规范 DL/T 1403—2015》, 全站可被分为安全 I 区和安全 II 区。较之安全 I 区, 安全 II 区内的元件多为辅助性装置, II 区内元件的失效并不会直接影响监控系统的稳定运行, 如故障录波装置的失效仅会影响对事故后的追忆, 对整个系统的破坏程度较低。因此, 本文集中于 I 区的可靠性评估研究。

变电站监控系统的控制多以单间隔操作为主, 因此本文以单间隔监控系统为研究对象, 同时为保证通信网络的可靠性, 采用冗余双网结构, 变电站典型监控系统架构如图 1 所示。

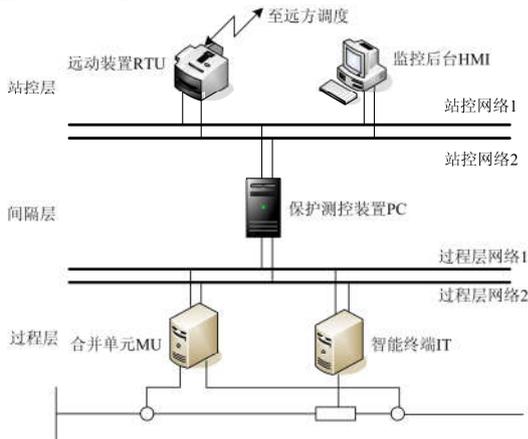


图 1 变电站监控系统架构

Fig. 1 Architecture of substation supervision and control system

以建设监控系统的目的而言, 其核心功能应能完成对一、二次系统运行工况的实时监视以及在人机交互界面下对相关设备的操作控制。在无人值班以及广域调控的管理要求下, 变电站应具备有“一键式”的程序化操作的能力。变电站的程序化操作, 首要是对开关设备运行 4 态(正常运行、热备用、冷备用、检修)进行切换, 在程序化操作模式下, 每步操作完成后, 都必须校验设备状态, 只有设备操作满足要求后, 才能进行下一步操作<sup>[9]</sup>。据此, 将变电站监控系统的功能划分为对实时数据采集与处理的监视功能、对相关设备的控制功能以及程序化操

作下的状态校验功能。

## 2 监控系统功能可靠性模型

变电站运行人员或远方调度员通过监控后台掌握一次系统及二次系统的运行状态, 并实现“一键式”的程序化操作。程序化操作具有多种操作模式: 集中式模式、分布式模式、集中与分布相结合模式。以对通信要求较小、快速可靠的分布式程序化操作为例, 重点分析在此模式下的监控系统可靠性。监控系统中包含多种功能, 某一功能的完成需要多套装置的协同运作, 某一装置也可能参与多个功能, 单一笼统地将监控系统的失效等效为设备在逻辑上的组合失效无法准确描述监控系统内各功能的特性。为此, 本文通过分析变电站监控系统功能机理, 构建监控系统功能可靠性框图, 进而完成监控系统可靠性模型的建立。

本文在系统模型的构建以及可靠性分析时, 也做了一些假设: 1) 光纤失效的概率很低, 令其充分可靠; 2) 监控系统中物理装置的失效时间呈指数分布, 且元件间失效相互独立; 3) 同一类型的元件可靠性基本参数相同。

### 2.1 报文可靠性

智能变电站以报文的传递进行信息的交互, 信息报文是变电站内各项业务功能的载体<sup>[10]</sup>, 如监控系统中一次系统原始电气量信息的采集体现为 SV 报文的传递, 功能的完成不仅需要相应设备的正确运行, 同样需要传输报文的准确、可靠。报文可靠性是构建监控系统功能模型不可忽略的一个因素, 为此, 本文将首先建立报文可靠性的评估模型。

变电站内各功能完成的前提是携带有功能信息的数据流能在规定时间内从源节点到达宿节点且所携带信息能被宿节点正确识别。在规定的时间内到达即要求报文传输延时须满足网络服务质量所规定的实时性要求, 数据能被源节点正确识别即要求所传数据不丢包、不误码或当发生丢包、误码时能被检测、重传。网络环境的复杂性、不可预测性以及噪音或中断的干扰, 有时会导致传输的报文发生丢包、误码的情况, 为保证报文内数据内容传输的正确性, 变电站内的报文数据帧末端都嵌有 4 字节的帧校验序列, 接收端可通过对帧校验序列进行循环冗余校验, 识别错误信息, 并要求重传。

当网络中报文的数据信息发生丢包、误码时, 在差错校验重传机制下, 丢包与误码的发生最终将体现为报文延时。从变电站内功能实现的角度看, 丢包与误码是无法被功能“感知”的, 功能所“感知”的是报文重传所带来延时值的增大<sup>[11]</sup>。为此,

本文从延时特征入手描述报文的可靠性。报文的延时特性可用传输平均延时和延时波动反映。其中,传输平均延时越接近于延时阈值,报文可靠性越低;延时波动则反映了报文传输延时的不稳定水平,可用传输延时的方差进行衡量。方差值越大,延时的波动越剧烈,报文的可靠性也越差。文献[12]利用美国道路局开发的 BPR 函数分析了道路行程时间可靠性。本文将通信链路 with 道路、链路上传输的报文与行驶车辆相对比,描述报文在规定时间内到达规定地点的能力时借鉴了其路段行程时间可靠性的评估方法,用式(1)衡量报文可靠度  $P_{i-\text{inf}}$ 。

$$P_{i-\text{inf}} = P(t \leq T_{i-\text{Delay}}) = \Phi\left(\frac{T_{i-\text{Delay}} - T_{i-\text{ave}}}{\sigma_{i-t}}\right) \quad (1)$$

式中:  $T_{i-\text{Delay}}$  表示  $i$  报文在 QoS 下的延时阈值;  $P(t \leq T_{i-\text{Delay}})$  为报文的传输延时不大于延时阈值的概率;  $\Phi(\cdot)$  为标准正态分布;  $T_{i-\text{ave}}$  为  $i$  报文的平均延时;  $\sigma_{i-t}$  为延时标准方差。式(1)以报文传输的平均延时以及延时方差作为输入量用以反映报文的可靠性水平,二者数值越大,报文的可靠性水平越低,为量化报文的可靠性提供了一种思路。

报文传输延时与网络中的通信流量的状况息息相关,如当发生网络风暴时,网络流量会突增甚至数倍于正常流量,此时大量报文堆积于交换机,无法被及时处理、发送,传输延时大大增加。因此,评估报文的延时可靠性时,本文从网络流量正常、异常两方面考虑,并修正式(1)得

$$\begin{cases} P_{i-\text{inf}}' = P(\text{nor} = 1)P_{i-\text{inf}}^1 + P(\text{eve} = 1)P_{i-\text{inf}}^2 \\ P(\text{nor} = 1) + P(\text{eve} = 1) = 1 \\ P_{i-\text{inf}}^1 = \Phi\left(\frac{T_{i-\text{Delay}} - T_{i-\text{ave}}^1}{\sigma_{i-t}^1}\right) \\ P_{i-\text{inf}}^2 = \Phi\left(\frac{T_{i-\text{Delay}} - T_{i-\text{ave}}^2}{\sigma_{i-t}^2}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $P_{i-\text{inf}}'$  表示报文可靠的综合概率;  $P(\text{nor} = 1)$  表示网络流量正常的概率;  $P(\text{eve} = 1)$  为流量异常的概率;  $P_{i-\text{inf}}^1$  为流量正常时报文可靠的概率,  $P_{i-\text{inf}}^2$  为流量异常时报文可靠的概率;  $T_{i-\text{ave}}^1$ 、 $\sigma_{i-t}^1$  分别为网络流量正常时的平均延时与延时方差;  $T_{i-\text{ave}}^2$ 、 $\sigma_{i-t}^2$  分别为网络流量异常时的平均延时与延时方差。

通过上述分析可见,报文可靠性与报文的实时要求密切相关。SV 报文与 GOOSE 跳闸报文在变电站内所有报文中的实时性要求最高,一般为 3 ms。GOOSE 报文具有重传机制、传输优先级一般大于

SV 报文<sup>[13]</sup>,跳闸报文的实时性以及可靠性能得以保证。由此在后文的可靠性评估中,将重点关注 SV 报文,设定 GOOSE 报文与 MMS 报文充分可靠。SV 报文是监视功能中一次系统电压、电流模拟量采集以及状态校验功能中遥测量的载体,其对系统模型的影响体现于监视功能可靠性框图以及状态校验功能可靠性框图中。

## 2.2 监视功能可靠性框图

监视功能完成数据的采集与处理,采集的数据量主要为模拟量与开关量,模拟量信号与开关量信号分别经合并单元、智能终端收集处理,并按照标准报文的形式经保护测控装置上送至站端监控后台或远方调度中心。通过 2.1 节分析,构建功能可靠性框图<sup>[14]</sup>如图 2 所示。图 2 中, Mes 表示传输的 SV 报文, MU 为合并单元, IT 表示智能终端, PC 表示保护控制装置, RTU 表示远动装置, HMI 为监控后台, SW 为交换机, SW1、SW2 与 SW3、SW4 分别对应图 1 中的过程层双网与站控层双网。F<sub>HMI-mon</sub> 为站端监视功能, F<sub>RTU-mon</sub> 为远端监视功能。

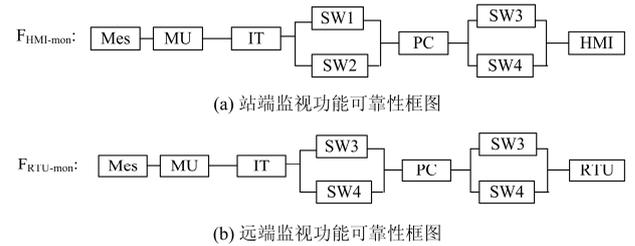
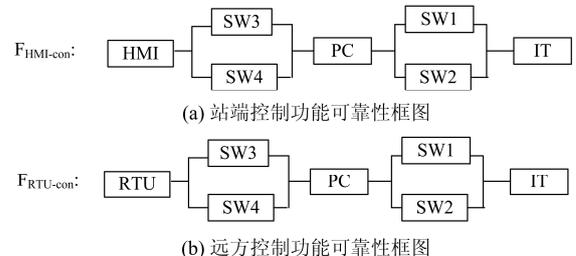


图 2 监视功能可靠性框图

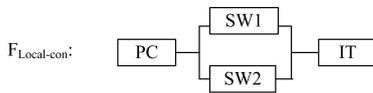
Fig. 2 Reliability block diagram of supervision function

## 2.3 控制功能模型

当需对设备进行相关的控制操作,如将某一段线路由运行态转为检修态,调度人员或站内操作员可通过监控平台调取操作票,实现“一键式”操作。同时,当监控系统故障或通信网络异常时,测控装置也支持操作人员在现场通过键盘进行就地操作。就控制功能实现的方式而言,操作功能可由三种方式实现:就地操作、站端操作以及远方操作,三种操作方式均能完成对开关设备的操作。三种操作方式下的功能可靠性框图如图 3 所示。



(b) 远方控制功能可靠性框图



(c) 就地控制功能可靠性框图

图 3 控制功能可靠性框图

Fig. 3 Reliability block diagram of control function

图 3 中,  $F_{HMI-con}$  为站端控制功能,  $F_{RTU-con}$  为远端控制功能,  $F_{Local-con}$  为就地控制功能。

在程序化操作模式下, 变电站操作人员进行“一键式”操作, 从原始态到目标态仅需一条程序化操作指令, 减少了人为原因对系统运行的干预, 同时可采用在线微机防误系统的嵌入、操作的模拟预演等措施, 尽量杜绝误操作的发生<sup>[9]</sup>。基于此, 暂不考虑人为因素对系统模型的影响。

#### 2.4 状态校验功能模型

程序化操作模式下, 每项步骤完成后, 都须校验电气设备的状态, 只有每步操作到位后才能开始下一步操作。在分布式操作模式下, 间隔设备实时采集遥测量、遥信量, 并独立完成对状态信息的校验, 以 Mes 表示采集到的遥测量(即 SV 报文), 有状态校验功能可靠性框图如图 4 所示,  $F_{check}$  为状态校验功能。

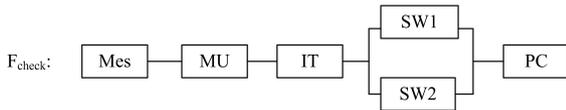


图 4 状态校验功能可靠性框图

Fig. 4 Reliability block diagram of state-check function

#### 2.5 监控系统整体功能模型

综合 2.2—2.4 节的内容, 得监控系统整体可靠性框图如图 5 所示。

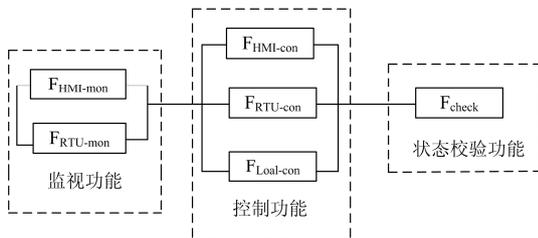


图 5 监控系统可靠性框图

Fig. 5 Reliability block diagram of supervision and control system function

### 3 动态贝叶斯模型

通过第 2 节的分析可见, 监控系统中功能较多, 功能的完成需要多个装置共同参与, 某一个装置又可能涉及多个功能, 以各功能的可靠性框图进行系

统可靠性计算时, 不可避免地需要对可靠性框图进行不变化处理以及最小集计算, 计算过程较为繁杂, 进而利用可靠性框图法难以给出元件、功能、系统间相互影响的程度, 而这种影响程度的大小往往是制定系统可靠性优化策略、薄弱环节识别的依据。为此, 本文引入动态贝叶斯网络构建监控系统可靠性模型并进行相关的求解、分析。

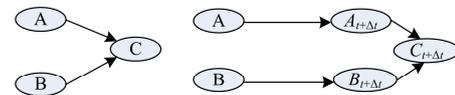
#### 3.1 动态贝叶斯基础

动态贝叶斯是一种基于静态贝叶斯与隐马尔科夫过程的不确定概率推理网络, 按其时间属性可分为动态网络与静态网络。静态贝叶斯网络具有描述多态事件与故障逻辑关系不确定模型的强大建模能力, 由网络结构与相关参数组成, 网络结构是由节点与有向边组成的无环图, 表示了节点间的相互逻辑关系, 相关参数是每个节点的条件概率表, 表示节点间相互影响的程度<sup>[14]</sup>。但是, 静态贝叶斯网络不具有系统时序性的表达能力。为此, 对静态贝叶斯网络在时间上进行拓展, 形成了动态贝叶斯方法。其在基于隐 Markov 模型的基础上能很好地处理系统所具有的时序信息, 建立动态贝叶斯网络必须首先定义初始网络与转移网络<sup>[15-17]</sup>。图 6 为两个时间片的贝叶斯网络。动态贝叶斯网络可用  $(B_0, B_{-})$  表示, 其中  $B_0$  表示初始状态下的贝叶斯网络, 表示第一个时间片, 如图 6 中的(a)所示;  $B_{-}$  表示两个时间片的贝叶斯网络, 如图 6 中的(b)所示, 两个时间片内的条件概率有

$$P(X_{t+\Delta t} | X_t) = \prod_{i=1}^N P(X_{t,i} | Pa(X_{t,i})) \quad (3)$$

式中:  $X_{t+\Delta t}$  为  $t+\Delta t$  时刻的节点变量;  $X_t$  表示  $t$  时刻的节点变量;  $X_{t,i}$  表示  $t$  时刻  $i$  节点的节点变量;  $Pa(X_{t,i})$  表示  $t$  时刻  $i$  节点的父节点;  $N$  为父节点数量。

图 6 中,  $A_{t+\Delta t}$ 、 $B_{t+\Delta t}$ 、 $C_{t+\Delta t}$  分别为 A、B、C 节点在  $t+\Delta t$  时刻的状态量。为求取系统在某个时间段内的动态特性, 只需将这个时间段划分为多个小区间时间段, 形成级联的时间片段, 通过单片段特性的求解, 进而得到整体片段的特性。



(a) 静态贝叶斯模型 (b) 动态贝叶斯模型

图 6 简单动态贝叶斯实例

Fig. 6 Simple instance of dynamic Bayesian

#### 3.2 监控系统动态贝叶斯模型

依据第 2 节所建立的监控系统及各功能可靠性框图, 可得元件、功能以及系统间的相互逻辑关系。

将元件模块当作基本节点，逻辑关系转化为相应的逻辑节点，同时加入时间属性信息，构建如图 7 所示的变电站监控系统可靠性动态贝叶斯评估模型。图中，ESW 表示并联的 SW1、SW2 的等效节点，WSW 表示并联的 SW3、SW4 的等效节点；MUT 表示 MU 节点下一时间点的状态量，ITT、SW1T 等节点相类似；F<sub>mon</sub> 表示监控功能，F<sub>con</sub> 表示控制功能，sys 表示整个监控系统。

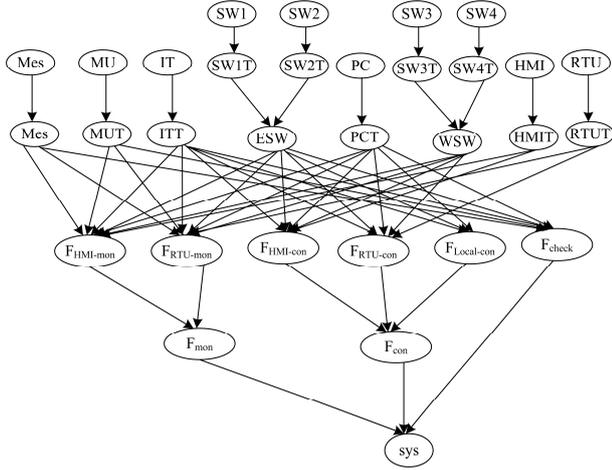


图 7 监控系统动态贝叶斯模型

Fig. 7 Dynamic Bayesian model of supervision and control system

求解动态贝叶斯网络的关键在于条件概率的建立，而动态贝叶斯网络的条件概率分为两类，一类为同一时间片内的静态条件概率，一类为不同时间片间转移网络的动态条件概率。对于同一时间片内，父、子节点间的关系主要为“与”和“或”的静态逻辑关系，其条件概率的建立较为简单，不再赘述；对于动态条件概率，对其的建立基于隐 Markov 过程。以交换机 SW 元件为例，当 SW 只有正常(0)与故障(1)两种状态时，有状态转移矩阵如式(4)所示，其对应的二状态 Markov 过程如图 8 所示。图 8 中，λ 为元件失效率，Δt 为两个时间片间的时间间隔。

$$P_{MC} = \begin{bmatrix} 1-p_{01} & p_{01} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

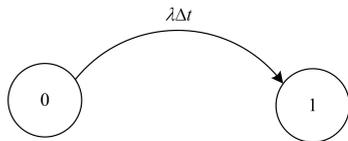


图 8 二状态 Markov 过程

Fig. 8 Markov process of two-state

式(4)中，p<sub>01</sub> 为元件从正常状态 0 转换为故障状态 1

的概率。当 p<sub>01</sub> 约等于 λΔt 时，有条件概率：

$$\begin{cases} P(SWT = 1|SW = 1) = 1 \\ P(SWT = 0|SW = 1) = 0 \\ P(SWT = 1|SW = 0) = \lambda\Delta t \\ P(SWT = 0|SW = 0) = 1 - \lambda\Delta t \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \text{元件 } SW \text{ 在未来 } T \text{ 时刻处于正常状态的概率为} \\ & P(SWT = 0) = P(SW = 0) \cdot P(SWT = 0|SW = 0) + \\ & P(SW = 1) \cdot P(SWT = 0|SW = 1) = \\ & P(SW = 0) \cdot (1 - \lambda\Delta t) \end{aligned} \quad (6)$$

## 4 算例分析

### 4.1 仿真实验

为获得报文可靠性评估中的 SV 报文延时值，采用 OPNET 软件对图 1 所示的监控系统中的过程层网络进行了仿真，仿真参数如表 1 所示<sup>[18-19]</sup>。

表 1 模型主要参数

Table 1 Major parameters of the model

报文类型	产生节点	目的节点	报文长度 /Byte	发送间隔/s	优先级
SV 报文	MU	PC	226	constant(0.000 25)	6
设备状态报文	IT	PC	230	constant(0.02)	5
跳闸报文	PC	IT	230	Poisson(500)	7

仿真中选用 16 路交换机 ethernet16\_switch，链路模型选用 100 BaseT，模型场景大小设置为 1 000 m × 1 000 m。MU 选用 OPNET 中的三层网络模型 ethernet\_station\_adv 进行建模；IT 以及 PC 选用七层网络模型 ethernet\_wkstn\_adv 进行建模。为获得 SV 传输延时在网络流量突增时的特性，另增添一个 ethernet\_wkstn\_adv 模型，此节点模型基于 OPNET 中的 FTP 业务模型，向 PC 装置传送一突发报文，具体 FTP 配置参数为

Command Mix(Get/Total):75%;

Inter-Request Time(Seconds):constant(60);

File Size(bytes):constant(1000000)。

经仿真得，网络流量正常时，SV 报文平均延时约为 0.924 ms，延时方差为 0.002 ms；网络流量突增时，SV 报文平均延时约为 2.1 ms，延时方差约为 0.37 ms。取网络流量突增的概率为 0.000 1，此时由式(2)得报文可靠度为 0.999 999 25。

### 4.2 系统可靠性

元件故障信息是系统可靠性评估的基础。由于目前智能变电站并未建立长期、完备的设备故障信

息库, 故监控系统可靠性评估中, 各元件可靠性基本参数参照文献[20-21], 具体如表 2 所示。

表 2 元件可靠性基本参数

元件	失效率 $\lambda/h$
MU	$7.65 \times 10^{-7}$
IT	$7.65 \times 10^{-7}$
SW	$9.93 \times 10^{-6}$
PC	$1.14 \times 10^{-6}$
HMI	$1.14 \times 10^{-5}$
RTU	$7.98 \times 10^{-6}$

利用表 2 中的元件可靠性基本参数以及仿真实验所得的报文可靠性概率值, 对监控系统以及监控系统内各个功能在 0~10 000 h 内可靠性(为突出系统可靠性变化趋势及各元件重要度, 暂不考虑修复)变化进行动态预测, 结果如图 9 所示。

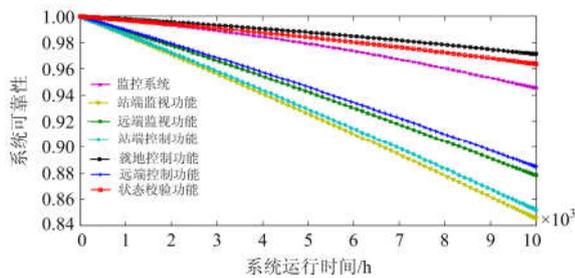


图 9 可靠性动态变化

Fig. 9 Dynamic change of reliability

为验证动态贝叶斯网络的求解精度, 对比分析其与可靠性框图法对监控系统在多个时间点上的可靠性求解结果, 如表 3 所示。从表 3 中可以看出, 随着时间的推移, 利用动态贝叶斯网络所得结果与可靠性框图所得结果间的差异虽然会逐渐变大, 但最大的差异值仅为 0.000 21, 差异值很小, 说明了动态贝叶斯网络具有较高的计算精度。且在整个动态贝叶斯网络的求解计算中, 不需进行不变化以及最小集求解的复杂过程, 即可方便地对系统进行灵敏度分析(下节介绍), 整个系统可靠性指标的计算使用 Matlab 语言编程, 与 FullBNT 工具箱<sup>[22]</sup>结合, 实现模型的自动求解。

表 3 求解结果对比

	1 000 h	4 000 h	8 000 h	10 000 h
动态贝叶斯	0.997 04	0.984 83	0.960 82	0.945 72
可靠性框图	0.997 10	0.984 93	0.960 96	0.945 93
差异值	0.000 06	0.000 10	0.000 14	0.000 21

#### 4.3 灵敏度分析

不同元件对功能、不同功能对系统以及不同元件对系统的影响都不相同, 为了描述这种影响力的大小, 引入条件灵敏度指标<sup>[23]</sup>对系统进行灵敏度分析。其在动态贝叶斯网络中的计算公式为

$$P(A(T)=1|B(T)=1) = \frac{P(A(T)=1)}{P(A(T)=1, B(T)=1)} \quad (7)$$

式中:  $A(T)=1$  表示元件或功能在  $T$  时刻失效;  $B(T)=1$  表示功能或系统在  $T$  时刻失效。通过式(7)可以看出, 条件灵敏度可用于系统故障时的运维检修, 优化检修策略时参考。利用动态贝叶斯网络的反向推理能力, 选取站端监视、站端控制以及状态校验功能为例, 得各条件灵敏度如图 10—图 12 所示。

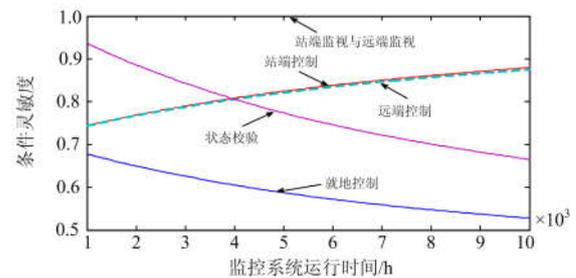
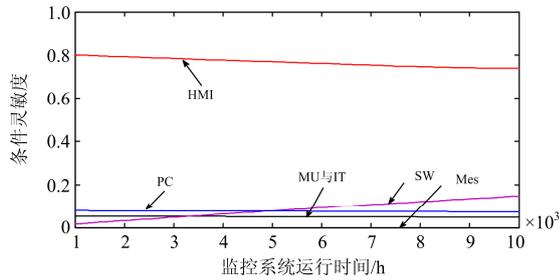


图 10 功能对监控系统的条件灵敏度

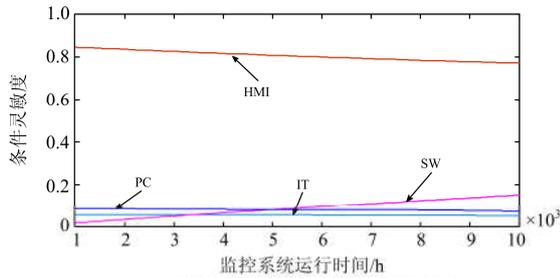
Fig. 10 Condition sensitivity of function to supervision and control system

通过图 10 可看出, 站端监视与远端监视功能的条件灵敏度最大, 造成此现象的原因在于, 两种功能较其他功能涉及环节较多, 可靠性对系统整体可靠性影响大(由图 9 可看出)。因此当监控系统整体故障时应先考虑监视功能是否正常; 变化趋势上, 站端控制与远端控制的条件灵敏度逐渐增大, 就地控制与状态校验条件灵敏度逐渐减小, 随着系统的运行, 应对站端控制功能与远端控制功能加强重视。

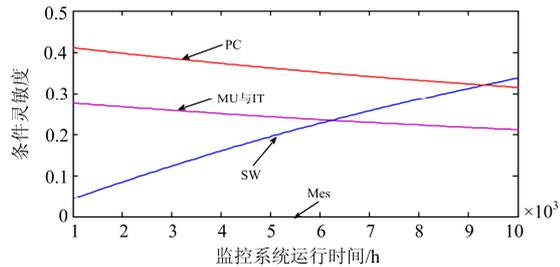
由图 11、图 12 可见: 1) 报文对系统及功能的条件灵敏度十分小, 在系统或功能失效时可对其安排较低检修等级。2) 同一元件在系统及功能失效时的检修次序不一, 如在站端监视功能中, HMI 具有最大的条件灵敏度, 其检修优先级最高; 而在整个监控系统中, 大部分时间内都是 PC 具有最大的条件灵敏度, 其检修优先级最高。因此对日常运维检修时, 应注意功能失效以及整体系统失效下的检修情况的不同。3) 整体变化趋势上, 对各项功能而言, SW 条件灵敏度逐渐增大, 其余元件逐渐降低, 对系统而言, SW、HMI、RTU 的条件灵敏度逐渐增大, 其余元件逐渐降低, 因此在进行检修时, 也应当注意随着系统运行各元件检修次序的变化。



(a) 元件对站端监视功能的条件灵敏度



(b) 元件对站端控制功能的条件灵敏度



(c) 元件对状态校验功能的条件灵敏度

图 11 元件对功能的条件灵敏度

Fig. 11 Condition sensitivity of unit to function

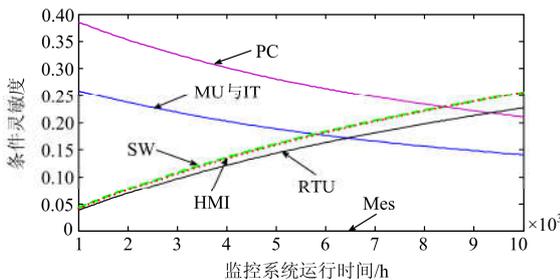


图 12 元件对监控系统的条件灵敏度

Fig. 12 Condition sensitivity of unit to supervision and control system

综合图 10—图 12，元件对功能、元件对系统、功能对系统的条件灵敏度是动态变化的，刚开始某一元件在系统失效时的故障概率较小，但随着时间的推移，这一概率值可能逐渐增大，甚至成为系统或功能失效时运维检修需要首先考虑的因素。如图 12 中的 SW 在约 8 500 h 后的条件灵敏度成为监控

系统中所有元件中的最大值。此时运用静态的评估方法求取一定值用以指导系统的运维检修可能会造成指导方案的不准确，从而浪费人力物力。这也体现了本文动态贝叶斯方法相比常规静态方法的优势：能较好地描述系统的时序信息，从而对系统的某些特性做出动态预测，使评估结果更具实际意义。

监控系统中某些功能并非同时存在，如就地控制、站端控制以及远端控制功能通过使能开关相互闭锁，同一时刻只有一种控制方式存在，此时区分不同功能进行具体功能下的元件灵敏度分析，更能贴合实际，为监控系统的故障诊断、系统优化配置提供借鉴。

### 5 结论

为评估监控系统的可靠性，本文通过分析监控系统的运行特性，依据系统内的功能构建了监控系统可靠性模型，并综合考虑报文可靠性的影响。通过引入动态贝叶斯网络对监控系统进行可靠性求解分析，避免了运用可靠性框图带来的不变化以及最小集计算，且能方便地对系统进行各种灵敏度的分析，同时较好地描述了系统的时序信息。

利用动态贝叶斯网络的正向推理能力，得到了监控系统以及系统内各功能的可靠性变化趋势；利用动态贝叶斯网络的反向推理能力，得到了元件对功能、元件对系统、功能对系统的条件灵敏度的动态曲线。通过所得结果发现，当进行系统或功能的运维检修时，元件的检修次序在不同时间段内可能会不同，此时利用传统的静态的可靠性计算方法进行灵敏度分析时，将无法体现系统的这一特性，使得评估结果具有一定的局限性，而动态贝叶斯网络加入了时间属性，计算分析过程简便灵活，能直观地表征监控系统某一特性在时间轴上的发展规律。

### 参考文献

[1] 赵雨田, 都晨, 程青青, 等. 基于 SCD 文件的智能变电站二次系统 C#模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 126-132.  
ZHAO Yutian, DU Chen, CHENG Qingqing, et al. Research on C# model for smart substation secondary system based on SCD file[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 126-132.

[2] 李妍, 车勇, 单强, 等. 智能变电站二次系统在线监测评估的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 66-70.  
LI Yan, CHE Yong, SHAN Qiang, et al. Research on secondary system on-line monitoring and evaluation in

- smart substation[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(10): 66-70.
- [3] 郭嘉, 韩宇奇, 郭创新, 等. 考虑监视与控制功能的电网信息物理系统可靠性评估[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(8): 2123-2130.  
GUO Jia, HAN Yuqi, GUO Chuangxin, et al. Reliability assessment of cyber physical power system considering monitoring function and control function[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(8): 2123-2130.
- [4] 戴志辉, 张天宇, 刘譞, 等. 面向状态检修的智能变电站保护系统可靠性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(16): 14-21.  
DAI Zhihui, ZHANG Tianyu, LIU Xuan, et al. Research on smart substation protection system reliability for condition-based maintenance[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(16): 14-21.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] APOSTOLOV A. Efficient maintenance testing in digital substations based on IEC 61850 edition 2[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(2): 407-420. DOI: 10.1186/s41601-017-0054-0.
- [9] 王永明, 郭碧媛, 张丰. 分布式变电站程序化操作系统的实现[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(4): 91-94.  
WANG Yongming, GUO Biyuan, ZHANG Feng. Implementation of distributed programmed operation system in substation[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(4): 91-94.
- [10] 王海柱, 蔡泽祥, 张延旭, 等. 提升智能变电站信息流实时性和可靠性的定质交换技术[J]. *电力自动化设备*, 2014, 34(5): 156-162.  
WANG Haizhu, CAI Zexiang, ZHANG Yanxu, et al. Custom switching technology to improve reliability and real-time performance of information flow in smart substation[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 34(5): 156-162.
- [11] 李硕, 黄宁, 李瑞莹, 等. 通信网络服务可靠性参数分析[J]. *系统工程与电子技术*, 2012, 34(9): 1946-1950.  
LI Shuo, HUANG Ning, LI Ruiying, et al. Analysis for service reliability parameters of communication network[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(9): 1946-1950.
- [12] 刘洪, 李荣, 葛少云, 等. 考虑出租车随机行为特性及路网行程时间可靠性的充电站多目标规划[J]. *电网技术*, 2016, 40(2): 433-440.  
LIU Hong, LI Rong, GE Shaoyun, et al. Multiple objective planning for electric taxi charging station considering random-probability behavioral trait of taxi and travel time reliability[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(2): 433-440.
- [13] KANABAR M G, SIDHU T S, ZADEH M R D. Laboratory investigation of IEC 61850-9-2-based busbar and distance relaying with corrective measure for sampled value loss/delay[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, 26(4): 2587-2595.
- [14] 侯伟宏, 张沛超, 胡炎. 数字化变电站系统可靠性与可用性研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(14): 34-38.  
HOU Weihong, ZHANG Peichao, HU Yan. Reliability and availability study of the digital substation system[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(14): 34-38.
- [15] 苏傲雪, 范明天, 李仲来, 等. 基于动态贝叶斯网络的配电系统可靠性分析[J]. *华东电力*, 2012, 40(11): 1912-1915.  
SU Aoxue, FAN Mingtian, LI Zhonglai, et al. Reliability analysis of distribution system based on dynamic Bayesian network[J]. *East China Electric Power*, 2012, 40(11): 1912-1915.
- [16] DEGHANPOUR K, NEHRIR M H, SHEPPARD J W, et al. Agent-based modeling in electrical energy markets

- using dynamic bayesian networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 4744-4754.
- [17] REN Yi, FAN Dongming, MA Xinrui, et al. A GO-FLOW and dynamic bayesian network combination approach for reliability evaluation with uncertainty: a case study on a nuclear power plant[J]. IEEE Access, 2017(6): 7177-7189.
- [18] 黄灿, 肖驰夫, 方毅, 等. 智能变电站中采样值传输延时的处理[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 5-10.  
HUANG Can, XIAO Chifu, FANG Yi, et al. A method to deal with packet transfer delay of sampled value in smart substation[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 5-10.
- [19] 秦川红, 王宁, 任宏达, 等. 采用虚拟局域网的数字化变电站数据通信仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 126-131.  
QIN Chuanhong, WANG Ning, REN Hongda, et al. Simulation and study on data communication in digital substation based on virtual local area network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 126-131.
- [20] 张智锐, 肖繁, 焦邵麟, 等. 不同过程层网络结构的保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 142-148.  
ZHANG Zhirui, XIAO Fan, JIAO Shaolin, et al. Reliability evaluation of protective relay system based on process layer network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 142-148.
- [21] HAMZE H H. Availability comparison of various power substation automation architectures[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 566-574.
- [22] 董雷, 周文萍, 李伟迪, 等. 基于动态贝叶斯网络的光伏发电短期概率预测[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(增刊 1): 38-45.  
DONG Lei, ZHOU Wenping, LI Weidi, et al. Short-term photovoltaic output forecast based on dynamic bayesian network theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(S1): 38-45.
- [23] 张沛超, 高翔. 全数字化保护系统的可靠性及元件重要度分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 77-82.  
ZHANG Peichao, GAO Xiang. Analysis of reliability and component importance for all-digital protective systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 77-82.

收稿日期: 2017-11-15; 修回日期: 2018-02-26

作者简介:

戴志辉(1980—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为交直流输电系统保护与控制, 电力二次系统可靠性和风险评估, 智能配电网等; E-mail: daihuadian@163.com

谢军(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力二次系统可靠性评估。

(编辑 魏小丽)