

# 智能变电站保护系统可靠性的自动分析方法

高吉普<sup>1</sup>, 张沛超<sup>2</sup>, 何旭<sup>2</sup>, 徐长宝<sup>1</sup>

(1. 贵州电力试验研究院, 贵州 贵阳 550002; 2. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

**摘要:** 提出一种利用变电站配置描述文件自动进行智能变电站保护系统可靠性分析的方法。通过解析 SCD 文件, 形成虚端子和虚回路的谓词表达式, 进而生成保护系统的逻辑连接图。然后, 在给出以太网交换机和光纤的描述模型的基础上, 通过谓词演算识别出物理连接, 并形成保护系统的物理连接图。最后, 将物理连接图转换为可靠性框图并进行可靠性计算。以一个典型的 110 kV 主变保护系统为例, 验证了上述保护系统可靠性自动分析方法的有效性。

**关键词:** 智能变电站; 保护; 可靠性; 变电站配置描述文件; 逻辑连接; 物理连接

## An automatic reliability analysis method for protection systems in smart substations

GAO Ji-pu<sup>1</sup>, ZHANG Pei-chao<sup>2</sup>, HE Xu<sup>2</sup>, XU Chang-bao<sup>1</sup>

(1. Guizhou Research Institute of Electric Power Experiment, Guiyang 550002, China; 2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education (Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University), Shanghai 200240, China)

**Abstract:** This paper proposes an automatic method to analyze the reliability of the protection system in smart substation utilizing the Substation Configuration Description (SCD) file. First, the predicate expressions for virtual terminals and virtual circuits are derived from the SCD file, and the graph of logical connections of the protection system is constructed accordingly. Then, based on the modeling of Ethernet switch and optical fiber, the physical connections are recognized through predicate calculus, and the graph of physical connections is then constructed. Last, the graph of physical connections is transformed to reliability block diagram, thus the reliability calculations can be carried out. A typical 110 kV power transformer protection system is used as an example to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** smart substation; protection; reliability; substation configuration description; logical connection; physical connection

中图分类号: TM77      文献标识码: A      文章编号: 1674-3415(2014)15-0107-06

## 0 引言

智能变电站系统除了要满足所需的功能性要求外, 还需满足各种性能要求。例如, 文献[1]研究并提出了涵盖了可靠性、可用性、实时性和经济性的系统有效度指标; 文献[2]从复杂网络理论出发, 以逻辑节点为节点、逻辑连接为边, 将智能变电站抽象成一个复杂网络, 初步揭示了逻辑节点的故障在系统中的传播规律; 文献[3]基于 IEC 61850 标准, 将系统功能分解成由逻辑节点和逻辑连接构成的逻辑节点连接图, 根据系统功能的可靠性框图, 计算系统的可用率。但上述文献存在的共性问题是在进行系统性能分析之前, 需要以人工方式建立相应

的性能评估模型。由于智能变电站具有复杂多变的网络结构, 使得上述性能评估的效率较低。

智能变电站和常规变电站的一个重要区别是, 前者在工程配置中广泛采用变电站配置描述 (Substation Configuration Description, SCD)<sup>[4]</sup>文件。与变电站所采用的其他配置文件相比, SCD 文件具有两点重要区别, 其一是该文件具有严谨的语法结构和语义描述, 因而实现了“机器可读” (machine readable); 其二是该文件完整描述了变电站的一次系统拓扑、智能电子装置 (Intelligent Electronic Device, IED) 内的功能拓扑以及全站的通信拓扑。这样, SCD 文件的作用将不仅仅局限于工程配置, 还可用于对智能变电站进行自动的性能评估。

本文以智能变电站保护系统的可靠性分析为例, 提出一种利用 SCD 文件进行自动的系统性能评估的方法, 可以对采用不同组网方式的保护系统的

可靠性进行自动分析，从而有助于发现系统可靠性的薄弱环节并改善设计；由于评估的输入仅是 SCD 文件，使得这种方法在显著提高分析效率的同时，分析结果更具客观性。

### 1 SCD 建模

在 SCD 文件所描述的智能变电站系统中，包含了逻辑和物理两个子系统，如图 1 所示。

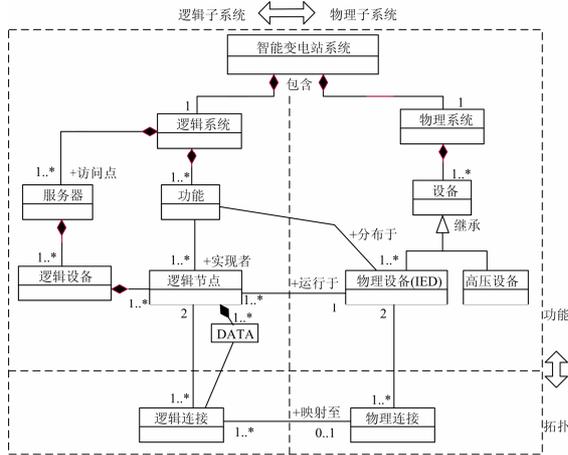


图 1 SCD 中描述的逻辑与物理子系统

Fig. 1 Logical and physical subsystems described in SCD

逻辑子系统以逻辑节点 (LN) 为核心。为了完成各种智能变电站功能，LN 之间需要进行数据交换。在 IEC 61850 中，利用逻辑连接 (Logical Connection, LC) [5] 表示 LN 之间的虚拟通信连接。LC 可通过多种服务方式实现，如 Report、GOOSE、SV 等；而物理子系统则以 IED 为核心。在 IEC 61850

中，利用物理连接 (Physical Connection, PC) 表示 IED 之间真实的通信连接。对于过程层网络，物理连接由光纤、以太网交换机等元件组成。

为了能够适应不断发展的通信技术，IEC 61850 标准弱化了对物理通信介质和网络设备的描述，这使得 SCD 文件中对逻辑连接描述的详细程度明显高于物理连接。但从可靠性分析的角度，物理连接是不可忽略的。但是，从 SCD 文件中完整地提取出可靠性分析所需的物理连接是比较困难的，这可用图 2 说明。图 2 所示的保护系统采用了“直采网跳”的结构。其中，合并单元 U1、U2 与保护装置 R1 之间通过直连光纤传输 SV 信号，而 R1 与智能终端 T1 之间则通过冗余网络传输 GOOSE 信号。图中利用虚线和实线同时表示了逻辑连接 (GOOSE、SV 虚回路) 和物理连接 (交换机、光纤)。逻辑连接最终需通过物理连接才能完成实际数据交换，SCD 文件对前者的描述是直接的、充分的，而对后者的描述是间接的、不充分的。例如，U1 和 R1 之间的 SV 信号是通过哪些光纤传输的？采用点对点方式还是交换机组网方式？通信回路是否存在冗余？

文献[3]在基于 IEC 61850 标准进行变电站可靠性评估方面做了很好的尝试，但该文仅考虑了图 1 中的逻辑子系统，这使其在进行可靠性分析时需要做出如下假设：(1) 不考虑光纤、交换机等通信设备；(2) 不考虑通信冗余配置；(3) 不考虑物理装置，假设所有 LN 具有与物理装置相同的故障率。显然，上述假设与实际情况存在很大差距。

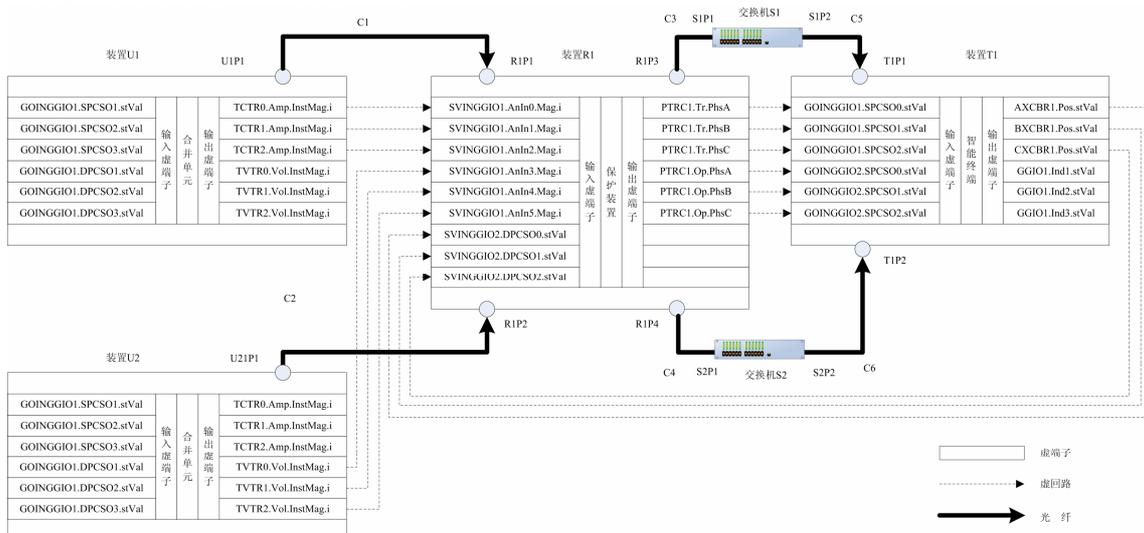


图 2 典型保护系统中的逻辑连接与物理连接

Fig. 2 Logical and physical connections in a typical protection system

## 2 逻辑连接的自动识别

IEC 61850 标准对于逻辑连接有着详尽的定义和描述。我国根据工程实践, 采用虚端子(Virtual Terminal, VT)和虚回路(Virtual Circuit, VC)<sup>[6]</sup>表示 GOOSE 和 SV, 使之在设计、配置等环节更易于理解与使用, 但虚端子所依据的对象模型仍是完全兼容于 IEC 61850 标准的。这样, 自动识别出保护所依赖的逻辑连接, 进而找出与之关联的其他 IED 就非常容易。

IED 的输入虚端子可以表示为 4 元谓词公式, 如式(1)。

$$VTIN(IED, AP, VTIN\_id, FCDA) \quad (1)$$

其中: IED 为 SCD 文件中 IED 的命名, 全站唯一; AP 为访问点 (Access Point) 名称; VTIN\_id 为输入虚端子序号; FCDA 为带功能约束的数据属性, 其格式为 LD/LN.DO.DA。式(2)为图 2 中保护装置 R1 所包含的一个输入虚端子。

$$VTIN(R1, M1, 1, SVINGGIO1.AnIn0.Mag.i) \quad (2)$$

IED 的输出虚端子可以表示为 5 元谓词公式, 如式(3)。

$$VTOUT(IED, AP, VTOUT\_id, FCDA, CB) \quad (3)$$

其中: VTOUT\_id 为输出虚端子序号; CB 为该 FCDA 所对应的 GOOSE 或 SV 控制块名称。式(4)为图 2 中合并单元 U1 的一个输出虚端子。

$$VTOUT(U1, M1, 1, TCTR0.Amp.InstMag.i, AmpSVCB) \quad (4)$$

GOOSE 和 SV 虚回路可表示为如式(5)谓词公式。

$$VC(IED1, AP1, CB, VTOUT\_id, IED2, AP2, VTIN\_id) \quad (5)$$

其中: IED1 为输出虚端子所在的 IED, 即 GOOSE 或 SV 的发布方; CB 为输出虚端子所属的 GOOSE 或 SV 控制块; IED2 为接收方; AP1、AP2 分别为 IED1、IED2 的访问点名称。

图 2 中, 与保护装置 R1 相关的虚回路有

$$\begin{aligned} VC(U1, M1, AmpSVCB, 1, R1, M1, 1) \\ VC(U2, M1, VolSVCB, 1, R1, M1, 1) \\ VC(R1, G1, TripGOCB1, 1, T1, G1, 1) \\ VC(T1, G1, PosGOCB1, 1, R1, G1, 1) \end{aligned} \quad (6)$$

其中: AmpSVCB 和 VolSVCB 分别为合并单元 U1、U2 的 SV 控制块; TripGOCB1 为保护 R1 跳闸 GOOSE 控制块; PosGOCB1 为智能终端 T1 的断路器位置 GOOSE 控制块。

以 IED 为节点, 以虚回路为边, 将式(6)所描述的虚回路转化为有向图, 图中边的方向是从输出虚端子指向输入虚端子; 然后将所有边以其控制块名

称代替, 删除冗余的边, 使得同名的边仅保留一个。以图 2 为例, 经上述处理后形成图 3 所示的逻辑连接图, 图中的有向边为逻辑连接, 其谓词公式为

$$LC(IED1, AP1, CB, IED2, AP2) \quad (7)$$

图 3 中的四个有向边分别为

$$\begin{aligned} LC(U1, M1, AmpSVCB1, R1, M1) \\ LC(U2, M1, VolSVCB1, R1, M1) \\ LC(R1, G1, TripGOCB1, T1, G1) \\ LC(T1, G1, PosGOCB1, R1, G1) \end{aligned} \quad (8)$$

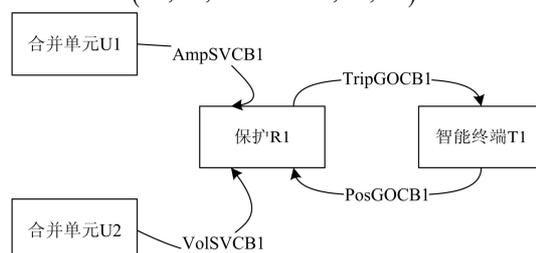


图 3 保护系统的逻辑连接图

Fig. 3 Graph of logical connections of the protection system

## 3 物理连接的自动识别

在图 3 中, SV 控制块 AmpSVCB1 和 VolSVCB1 分别经由直连光纤 C1、C2 实现; GOOSE 控制块 TripGOCB1、PosGOCB1 则经由交换机 S1、S2 实现, 而且交换机 S1 和 S2 构成了冗余的通信回路。必须根据图 3 的逻辑连接进一步识别出上述物理连接信息, 才能进行准确的可靠性分析。

### 3.1 以太网交换机建模

IEC 61850 标准主要针对保护、测控等 IED 建立了对象模型, 对交换机建模考虑甚少。文献[7-8]等基于语义扩展的方法, 对交换机进行建模并将其作为独立的 IED 进行管理。本文利用 IEC 61850 Ed2.0 中新增的 LCCH 逻辑节点, 建立了图 4 所示的交换机最小化模型。图中除了 LPHD、LLN0 等系统逻辑节点之外, 还包括多个 LCCH 逻辑节点, 每个 LCCH 实例对应交换机的一个物理端口, 包含该端口的访问点名称、VLAN 标识、端口编号以及远方端口号等重要属性。

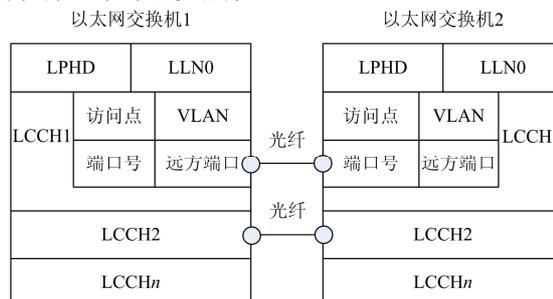


图 4 交换机 IED 的对象模型

Fig. 4 Object model of switch IED

有了上述对象模型,以太网交换机也可作为 IED 并被包含到 SCD 文件中。

### 3.2 光纤的描述

在 SCD 文件的通信(Communication)部分提供了对通信介质的描述机制。以图 2 中保护 R1 为例,其 R1P3 和 R1P4 两个冗余端口分别接入光纤 C3、C4。描述信息如图 5 所示。其中, Connection 和 RedConn 分别描述主物理连接和冗余物理连接<sup>[4]</sup>。

```

<ConnectedAP iedName= "R1" apName= "G1" >
  <Address>
    <P type= "IP" >10.10.8.1</P>
    ... ..
  </Address>
  <GSE IdInst= "G1" cbName= "TripGOCB1" >
    <Address>
      <P type= "MAC-Address" >01-0C-CD-01-00-01</P>
      <P type= "APPID" >3001</P>
      <P type= "VLAN-PRIORITY" >4</P>
      <P type= "VLAN-ID" >123</P>
    </Address>
    ... ..
  </GSE>
  <PhysConn type= "Connection" >
    <P type= "Type" >FOC</P>
    <P type= "Cable" >C3</P>
    <P type= "Port" >R1P3</P>
  </PhysConn>
  <PhysConn type= "RedConn" >
    <P type= "Type" >FOC</P>
    <P type= "Cable" >C4</P>
    <P type= "Port" >R1P4</P>
  </PhysConn>
</ConnectedAP>
    
```

图 5 保护 R1 的物理连接描述

Fig. 5 Description of the physical connections of R1

光纤连接可用如式(9)六元谓词表示。

$$FC(IED, AP, Port, Cable, RedPort, RedCable) \quad (9)$$

其中: AP 为访问点名称; Port、Cable、RedPort、RedCable 分别为主物理连接和冗余物理连接的通信端口号和光缆名称。如果无冗余物理连接,则 RedPort、RedCable 为空。例如,图 2 中光纤 C1 的描述为

$$FC(U1, M1, U1P1, C1) \quad (10)$$

### 3.3 物理连接的识别

物理连接用如式(11)谓词表示。

$$PC(IED1, Port1, IED2, Port2, Cable) \quad (11)$$

根据式(7)、式(9),建立如式(12)谓词演算公式。

$$\begin{aligned}
 &LC(?IED1, ?AP1, ?CB1, ?IED2, ?AP2) \wedge \\
 &FC(?IED1, ?AP1, ?Port1, ?Cable) \wedge \quad (12) \\
 &FC(?IED2, ?AP2, ?Port2, ?Cable) \wedge \\
 &\Rightarrow PC(?IED1, ?Port1, ?IED2, ?Port2, ?Cable)
 \end{aligned}$$

上述公式中,以问号作为前导的谓词参量(如?IED1)代表变量,同名变量代表同一个体。在推理过程中,通过模式匹配将常量赋值给变量。本文利用专家系统工具 CLIPS<sup>[9]</sup>完成上述谓词表示

和谓词演算。通过推理,识别出图 2 中的如式(13)物理连接。

$$\begin{aligned}
 &PC(U1, U1P1, R1, R1P1, C1) \\
 &PC(U2, U2P1, R1, R1P2, C2) \\
 &PC(R1, R1P3, S1, S1P1, C3) \quad (13) \\
 &PC(R1, R1P4, S2, S2P1, C4) \\
 &PC(T1, T1P1, S1, S1P2, C5) \\
 &PC(T1, T1P2, S2, S2P2, C6)
 \end{aligned}$$

以 IED 为节点,以物理连接为边,可将式(13)描述的物理连接转化为无向图,如图 6。对比图 3 与图 6 可见,图 3 中的 TripGOCB1 和 PosGOCB1 逻辑连接皆通过图 6 中的光纤 C3、C5 和交换机 S1 实现物理连接;而图 6 中的光纤 C4、C6 和交换机 S2 则是为上述逻辑连接提供的冗余通信通道。需注意的是,从可靠性角度,图 3 中 R1 与 T1 之间的两个逻辑连接是串行的,而在图 6 中, R1 与 T1 之间的两个通信通道则是并行的。

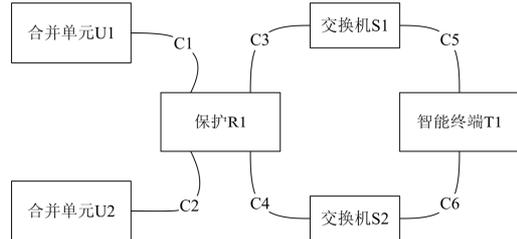


图 6 保护系统的物理连接图

Fig. 6 Graph of physical connections of the protection system

在图 6 中,如果光纤 C3 与 C5 之间通过多级交换机互联,则形成无向图的过程稍微复杂些。此时,可将问题转换为搜索 C3 与 C5 之间的物理通信路径,并以该路径中的交换机端口应属于相同 VLAN 作为约束条件。因篇幅所限,对此不再详述。

## 4 可靠性计算方法

### 4.1 可靠性框图

可靠性框图(Reliability Block Diagram, RBD)<sup>[10]</sup>方法能够描述完成特定系统功能的所有元件之间的连接关系。按如下规则将图 6 变换为图 7 所示的 RBD 图:(1)将图 6 中冗余通信回路中的元件转换为并联结构;(2)将其余元件(含节点和边)转换为串联结构。

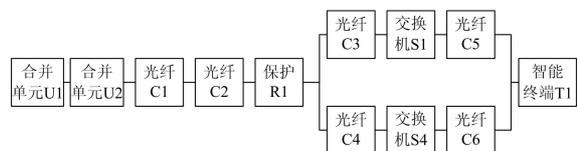


图 7 保护系统的可靠性框图

Fig. 7 RBD of the protection system

可以利用结构函数描述 RBD。结构函数方法详见文献[10]。一旦建立了系统 RBD, 即可进行各种可靠性分析计算。

### 4.2 可靠性计算

假设智能变电站保护系统为不可修复系统, 此时, 用各元件的可靠性函数代入保护系统的结构函数即得到系统可靠性函数  $R_{sys}(t)$ , 继而可求出系统的平均故障时间 (MTTF) [10]。

实际的智能变电站保护系统皆为可修复系统。此时, 可以将蒙特卡罗法<sup>[11]</sup>和 RBD 方法结合起来, 通过大量的统计实验进行可靠性仿真, 从而计算系统的平均可用性、平均首次故障时间 (MTTF) 以及停运次数等可用性指标。

## 5 算例

### 5.1 典型组网方式

图 8 为一座典型 110 kV 智能变电站的主变间隔, 采用内桥接线, 主变保护为主后备一体化装置, 采用“直采网跳”方式。变电站配置信息利用 SCD 文件描述。通过解析 SCD 文件, 利用本文提出的方法, 通过“逻辑连接图—物理连接图—功能方框图”的自动变换, 形成图 9 的 RBD 图。为方便绘图, 图 9 中用四取四模块“4/4”代表串联关系。

### 5.2 可靠性计算

虽然 SCD 文件中并不记录 IED 的可靠性参数, 但包含了各 IED 的型号、制造厂等铭牌信息。这样, 就可以首先建立专门的 IED 可靠性数据库, 然后以 IED 的型号为关键字检索可靠性参数。本文分析中采用表 1 所示的可靠性参数。

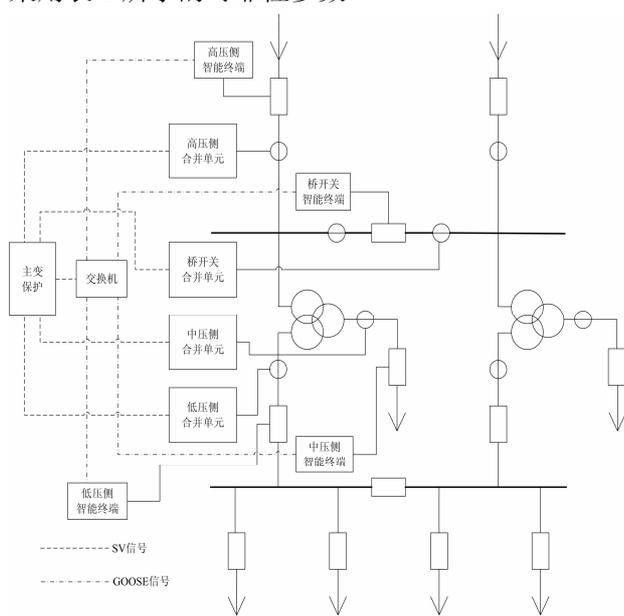


图 8 系统结构图

Fig. 8 Structure diagram of the system

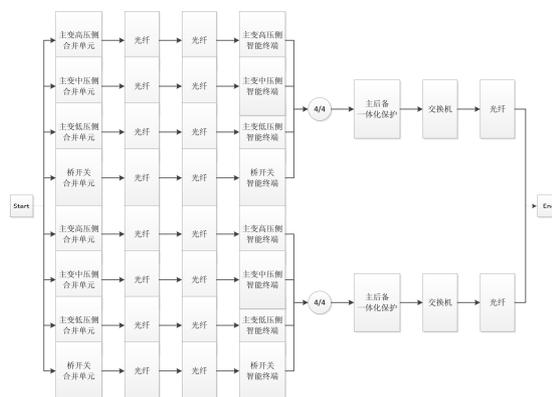


图 9 示例保护系统的功能方框图

Fig. 9 RBD of the sample protection system

表 1 可靠性分析参数

Table 1 Parameters for reliability analysis

IED/元件	故障率 $\lambda$ /年 <sup>-1</sup>	修复率 $\mu$ /天 <sup>-1</sup>	定检周期
保护装置	0.01	0.5	2 年
合并单元	0.01		
智能终端	0.01		
交换机	0.01		
光纤介质	0.003 3		

#### (1) 不可修复系统

首先假设保护系统为不可修复系统。根据图 9 的 RBD, 可得到系统可靠性函数并绘制可靠性曲线, 如图 10, 进而算得该保护系统的 MTTF 为 6.677 年。

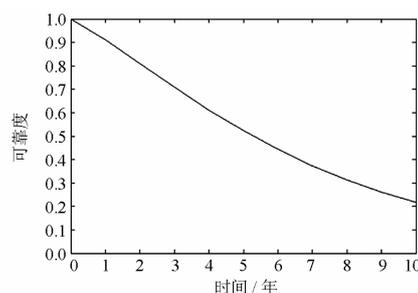


图 10 保护系统的可靠性曲线

Fig. 10  $R(t)$  curve of the protection system

#### (2) 可修复系统

现有保护系统均采用定期检修策略。将图 9 的 RBD 和蒙特卡罗方法结合起来, 进行 1 000 次仿真, 仿真时长为 10 年, 可得到可修复系统的可靠性指标, 如表 2 所示。

表 2 可修复系统的可靠性分析结果

Table 2 Results of reliability analysis for repairable system

平均可用性	0.998 31	10 年总停运次数	6.669
平均首次故障时间	12.621 年	10 年总停运时间	148.413 h

## 6 结论

SCD 文件具有严谨的语法结构和语义描述,能够完整描述智能变电站的一次、二次系统和通信系统。SCD 文件的作用不应局限于工程配置,还可广泛应用于高级应用以及智能变电站的性能评估。

以 SCD 文件作为主要输入源进行变电站可靠性的自动分析,既能对已有变电站设计方案进行高效评估,发现可靠性的薄弱环节,又能对不同设计方案的可靠性进行客观比较。

利用 SCD 文件进行可靠性自动分析的主要困难在于对物理连接的识别,利用本文提出的“逻辑连接图—物理连接图—可靠性框图”的变换方法,有效解决了上述问题,且能适应点对点和网络等多种通信方式。

### 参考文献

- [1] 邱剑, 王慧芳, 陈志光, 等. 智能变电站自动化系统有效度评估模型研究[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(9): 1-9.  
QIU Jian, WANG Hui-fang, CHEN Zhi-guang, et al. Research on effectiveness evaluation model of smart substation automation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9): 1-9.
- [2] 张其林, 王先培, 赵宇. 基于 IEC 61850 的变电站自动化系统连锁故障分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(2): 61-66.  
ZHANG Qi-lin, WANG Xian-pei, ZHAO Yu. Analysis on cascading failures of substation automation system based on IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 61-66.
- [3] 杜双育, 王先培, 谢光彬, 等. 基于 IEC61850 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, 40(5): 32-36, 41.  
DU Shuang-yu, WANG Xian-pei, XIE Guang-bin, et al. Reliability evaluation of substation automation system based on IEC61850[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 32-36, 41.
- [4] IEC 61850-6 communication networks and systems in substations part 6: configuration description language for communication in electrical substations related to IEDs[S]. 2004.
- [5] IEC 61850-5 communication networks and systems in substations part 5: communication requirements for functions and device models[S]. 2003.
- [6] 胡道徐, 沃建栋. 基于 IEC 61850 的智能变电站虚回路体系[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 78-82.  
HU Dao-xu, WO Jian-dong. Virtual circuit system of smart substations based on IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 78-82.
- [7] 朱林, 王鹏远, 石东源. 智能变电站通信网络状态监测信息模型及配置描述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 87-92.  
ZHU Lin, WANG Peng-yuan, SHI Dong-yuan. Status monitoring information model and configuration description of communication network in smart substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 87-92.
- [8] 李锋, 谢俊, 赵银凤, 等. 基于 IEC 61850 的智能变电站交换机 IED 信息模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 76-80.  
LI Feng, XIE Jun, ZHAO Yin-feng, et al. IEC 61850 based information model of switch intelligent electronic device for smart substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 76-80.
- [9] GIARRATANO J C, RILEY G D. Expert systems: principles and programming[M]. Fourth Edition. Course Technology, 2004.
- [10] 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 Wei-hong, ZHANG Pei-chao, HU Yan. Reliability and availability study of the digital substation system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 34-38.
- [11] 王勇, 韩学山, 丁颖. 计及站内接线的电网可靠性评估的蒙特卡罗方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 53-57.  
WANG Yong, HAN Xue-shan, DING Ying. Monte Carlo simulation method for reliability analysis of power network including substation configuration[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 53-57.

收稿日期: 2013-10-28; 修回日期: 2014-02-09

作者简介:

高吉普(1982-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为智能化变电站和智能电网相关研究;

张沛超(1970-), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统保护与控制、智能变电站、电力系统仿真; E-mail: pczhang@sjtu.edu.cn

何旭(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统可靠性、电力系统保护。