

考虑元件复用的继电保护通信可靠性定量评估

方必武, 王波, 刘涤尘, 贾骏, 卞成志

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 高压输电线上的继电保护功能的实现与通信通道可靠性紧密相关。以求解继电保护光纤通道可靠性为目标, 以 SDH 为节点, 光纤为边, 两者可靠性为权集, 构建光纤保护通道的加权无向图。从电网实际的数据资料出发, 基于图论思想按最贴近实际数据格式的方式进行编码, 并基于编码开发了基于逻辑“或”和“异或”的继电保护通信通道及业务可靠性评估算法。以华中某 18 节点、5 回线路、19 条通道的局部环网进行了实例计算。结果表明所提出的编码方式和算法模型具有很好的适应性和可操作性, 可以为电网进行保护通道检修工作和优化配置提供决策参考。

关键词: 保护通道; 可靠性评估; 图论编码; 逻辑运算

Reliability evaluation of protection communication considering components reusing

FANG Biwu, WANG Bo, LIU Dichen, JIA Jun, BIAN Chengzhi

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To solve the reliability assessment problem of protection channel caused by elements multiplexing. The paper builds a weighted-undirected graph of fiber protection channels, whose nodes measurement is SDH reliability and reliability of fiber optical as edge weights. It starts from the information provided by the actual grid, encodes the data according to the most close to the actual data format, and develops an algorithm for channel and service reliability assessment based on logical "or" and "exclusive or". The result is verified in a 18-node and 19-channel network in central China Grid, showing that the proposed encoding method and model have good practicability and operability, which can offer grid reference to network optimization, scientific channels arrangement and the maintenance of the protection channel.

Key words: protection channel; reliability evaluation; graph theory coding; logical calculation

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)11-0080-07

0 引言

随着电力行业向智能化发展, 电力信息化的进程不断加快, 电力网与电力信息网之间相互渗透的趋势越来越明显^[1]。电力通信网承载着电力系统多种业务, 可以看作电力系统的“神经网络”^[2], 其中继电保护作为电力系统三道防线中的第一道防线, 其安全可靠长久以来都被重点关注^[3]。高压输电线上的继电保护功能实现需要通信通道传输信息, 随着电网向远距离、特高压发展, 评估继电保护通信通道的可靠性至关重要^[4]。

继电保护的可靠性评估一直都是专家学者们研究的重点。比较成熟的方法有很多, 如故障树分析法、马尔科夫状态空间法、贝叶斯网络法等^[5-7], 归

结起来这些均是对继电保护装置本身可靠性的评估^[8-9]。而评估继电保护通信通道的研究还很少, 目前主要是从通信的 QOS(服务质量)比如时延、误码率和通道自身的保护机制等方面对通道进行评估^[10-11], 或者是在极端特殊情况下进行通道可靠性评估^[12-13]。而且现有的研究主要是对单条通道的定性分析, 或者对通道中某个或某几个元件进行定量评估, 考虑元件复用的多条通道可靠性定量评估方法尚不多见。而实际工作中, 多条通道并联承载线路业务, 其可靠性是运维人员关注的重点。

针对上述问题, 本文考虑保护通道的元件复用情况, 从图论的思想出发, 将光纤保护通道网络映射为无向图, 以 SDH 和光纤可靠性作为权值对实际业务路径进行编码, 开发了基于逻辑“或”和“异

或”加速的保护通道和线路业务可靠性评估模型。实例证明建立的模型具有很好的适应性和可操作性。

1 光纤保护通道结构及特点

1.1 线路保护的通道配置方式及结构

1.1.1 线路保护通道的配置双重化

由于输电线路直接承载着电力传输, 其故障容易传播扩散, 因此电力系统对线路的保护异常严格。除了保护装置功能上的主后备保护的双重化之外, 根据 GB14285-2006 《继电保护技术规程》上的规定, 220 kV 及以上的线路需要配置两套及以上保护装置, 即装置的双重化。

一套保护的通道配置一般是两种情况, 单通道或者双通道, 而且继电保护规定同一套保护装置的两个通道必须经由独立的站点路由; 对于一回线路而言, 通常配置两套保护装置。

1.1.2 光纤保护通道的基本结构

光纤保护通道是由光传输设备和光纤线路串接而成, 单条光纤保护通道可用图 1 的结构表示。

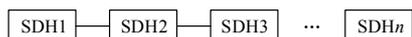


图 1 光纤保护通道的基本结构

Fig. 1 Basic structure of fiber protection channel

1.2 光纤保护通道的特点

1.2.1 光纤段的 1+1 保护

在 SDH 通信网络中有很多自愈保护机制如 SDH 自愈环, 自愈机制一方面能够保障通信的稳健可靠, 但另一方面由于倒换等动作, 相应延时也会增加。对于继电保护业务, 由于其重要性非常高并且有非常高的速动性要求, 在保护通道中一般配置光纤 1+1 保护, 即在两个 SDH 设备之间配置两回相同的光纤互为备用。

1.2.2 通道的复用情况

虽然, 继电保护规程要求单套保护的不同通道要相互独立, 但是在多套保护装置之间仍然会存在 SDH 设备和光纤线路的复用情况, 如图 2 所示。

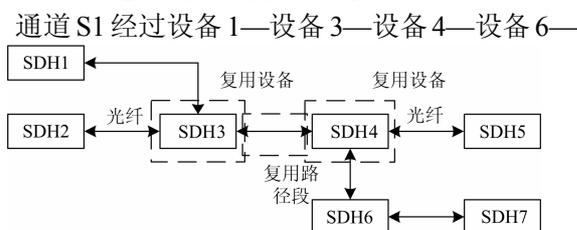


图 2 光纤通道的复用情况

Fig. 2 Multiplexing case of fiber channel

设备 7; 通道 S2 经过设备 2—设备 3—设备 4—设备 5。

两条通道都通过设备 3、设备 4, 即这两个设备为复用设备, 同时都经过设备 3 和设备 4 之间的路径段, 即此路径段也是复用。

1.3 考虑结构层次性的多维度可靠性界定

如 1.1 节所述, 在实际电力系统通信工作中, 为了有效地保证保护业务的实时可靠运行, 一般同一个保护装置配置多个相互独立的通信通道, 与此同时, 一回线路保护也配置多套保护装置, 形成线路保护业务——保护装置——通道三个不同的可靠性级别^[14]。本文为了有效表征保护业务的上述特点, 在此定义通道可靠性、保护装置业务可靠性和线路保护业务可靠性。通道可靠性指的是单条通道在其串接的 SDH 设备和光纤段共同作用下正常工作的概率; 保护装置业务可靠性指的是同一套保护装置在配置的多条通道共同作用下的正常工作概率; 线路业务可靠性指的是线路保护在配置的多套保护装置共同作用下的正常工作概率。

2 基于实际数据的图论编码

2.1 保护通道向无向图的映射

本文研究的是多条保护通道, 经过交接复用, 多条通道成为一个通信网络, 关于网络可靠性的研究, 经典的研究模型是图论。将光纤保护通道网络映射为一个无向图 $G=(N, E, W)$, 其中: N 为网络中节点集合, 表示 SDH 设备; E 为网络中无向边集合, 表示光纤; W 为网络中权值集合, 表示 SDH 可靠性和光纤可靠性。

SDH 的可靠性和光纤可靠性, 可以依据设备可靠性评估模型进行评估。本文采用基于历史故障数据的修正有效性作为元件可靠性, 本文分析的是节点和边权已知情况下的通道可靠性。

2.2 模型实用编码

2.2.1 原始拓扑编码

为了方便实际工作中的应用, 模型原始编码应该从实际电网能够提供的资料出发, 用最简单易得的形式进行。

(1) 网络节点 SDH 编号向量

为了能够在模型中区分各个不同的 SDH 设备, 第一步从电网通信拓扑图出发为每个节点编码, 假设网络中有 n 个设备, 得到

$$N_{SDH} = (N_1, N_2, \dots, N_n) \quad (1)$$

(2) 光纤线路邻接表

邻接表是图中表示节点间连接关系的比较直观自然的一种方式, 也是最容易从原始资料中整理得

到的, 其形式如表 1。

表 1 光纤邻接表

Table 1 Adjacency list of optical fiber

节点 1	节点 2	节点间光纤距离	保护方式
N_i	N_j	l_{ij}	1+1

表示节点 N_i 与 N_j 之间是联通的, 光纤距离为 l_{ij} , 保护方式为 1+1 或者 1+0。

(3) 通道路径编码矩阵

实际中能得到的关于通道具体路径的资料是通道组织表, 其描述的是每一个通道按顺序所经过的 SDH 设备, 结合对 SDH 设备的编号, 可以对 m 条通道进行编码得到路径编码 \mathbf{p} 。

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ p_{m1} & \cdots & p_{mn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{P}(i, j)$ 表示第 i 号通道按通道组织表经过的第 j 个 SDH 设备的编号为 p_{ij} , 对应 SDH 编号向量 \mathbf{N}_{SDH} 中的值。因为每条通道经过的 SDH 节点数远小于网络中总的节点数目, 所以对于 \mathbf{p} 每一行而言只有前面的一些列项非 0, \mathbf{p} 是一个稀疏矩阵。

2.2.2 编码实用处理

由实际资料进行原始编码之后, 并不适合于评估计算, 还需要进行实用化处理, 由拓扑编码得到可靠性评估编码。

(1) 节点设备可靠性向量

对每个节点 SDH 进行可靠性评估后, 可得到对应的 SDH 可靠性向量 $\mathbf{R} = (R_1, R_2, \dots, R_n)$ 。

(2) 光纤连线可靠性邻接矩阵

对于长度为 l 的光纤段, 若单位千米的可靠性为 r_0 , 则依据可靠性的串联原理, 得到该段光纤的正常工作的概率为

$$R_l = r_0^l \quad (3)$$

若为 1+1 保护光纤段, 则两 SDH 间的传输线正常工作的概率为

$$R_l = 1 - (1 - R_l)^2 \quad (4)$$

经过式(3)、式(4)的预处理, 可以将邻接表中的距离和保护转化为计算用可靠性。为了便于后续的编程计算, 将邻接表转化为邻接矩阵, 对于总共有 n 节点的网络拓扑其邻接矩阵如式(5)。

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} R_{11} & \cdots & R_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ R_{n1} & \cdots & R_{nn} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中, R_{ij} 表示节点 i, j 之间经过预处理后的实用光纤可靠性, 若 i, j 之间没有连通, 则用无穷大表示, 对角线元素 $R_{ii} = 0$ 。

(3) 通道逻辑顺序矩阵

设备路径矩阵 \mathbf{p} 虽然表示出了通道的结构, 但是由于通道之间存在共用的设备, 按该矩阵存储会有很多设备重复存储, 且不易观察设备被共用的情况。因此本文按照矩阵的形式来描述通道的逻辑结构顺序, 可以大大减少重复存储并且能方便地分析设备被共用的情况。

定义矩阵 $\mathbf{N}_{m \times n}$, m 表示通道数目, n 表示通信网络中的设备节点数目。矩阵中元素 $\mathbf{N}(i, j) = N_{ij}$ ($i \leq m, j \leq n$) 表示第 i 条通道是否经过设备 N_j 。 $N_{ij} = 0$ 表示通道 i 不经过设备 N_j , $N_{ij} = k$, ($k > 0$ 且为整数) 表示通道 i 经过设备 N_j , N_j 在通道 i 上的序号为 k 。其矩阵结构如式(6)所示。

$$\mathbf{N}_{m \times n} = \begin{pmatrix} N_{11} & \cdots & N_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ N_{m1} & \cdots & N_{mn} \end{pmatrix} \quad (6)$$

(4) 扩展的通道逻辑矩阵

单条通道是由节点设备和传输线路串联而成, 由串联模型可知通道可靠性是由节点和传输线路可靠性连乘得到^[15]。为了计算简便和提高计算精度, 由通道逻辑顺序矩阵 $\mathbf{N}_{m \times n}$ 和光纤连线可靠性矩阵 \mathbf{L} 生成扩展的通道设备逻辑矩阵 \mathbf{NA} , \mathbf{NA} 的形式与 $\mathbf{N}_{m \times n}$ 相同, 元素为 0 或者 1, 表示每条通道经过的各个设备的情况。

此时将传输节点和传输线定义为广义节点设备, 若 $\mathbf{NA}(i, j) = 1$, 表示第 i 号通道经过第 j 号广义设备, $\mathbf{NA}(i, j) = 0$ 表示第 i 号通道不经过第 j 号广义设备。 \mathbf{NA} 类似于通道逻辑顺序矩阵 $\mathbf{N}_{m \times n}$, 每一列对应的是一个广义节点设备, 将原来的 n 个节点对应 \mathbf{NA} 的前 n 列, 从 $n+1$ 列开始对应光纤连线。 \mathbf{RA} 为 \mathbf{NA} 每一列对应的广义节点设备的可靠性向量。

通过光纤连线邻接矩阵 \mathbf{L} 确定每一段光纤在 \mathbf{NA} 中对应的列位置。因为 \mathbf{L} 的对称性, 只需要对 \mathbf{L} 的上三角元素进行位置对应。例如 $\mathbf{L}(1, 2)$ 代表原节点 1 和 2 之间的连线, 在 \mathbf{NA} 中对应的列为 $n+1$ 。

不失一般性, $\mathbf{L}(t_1, t_2)$ 代表的节点 t_1 和 t_2 之间的连线 ($t_1 < t_2$), 按照矩阵 \mathbf{L} 的上三角按行计数的绝对位置为 $(t_1 - 1)n + t_2 - (1 + t_1)t_1 / 2$, 其中 $(t_1 - 1)n + t_2$ 为矩阵 \mathbf{L} 中第一个元素按行计数到 $\mathbf{L}(t_1, t_2)$ 的项数,

$(1+t_1)t_1/2$ 为下三角部分的项数。

遍历矩阵 $N_{m \times n}$ 每一行, 按下述规则得到 NA 、 RA 。

(1) 若 $N_{m \times n}(i, j) > 0$

则 $NA(i, j) = 1, RA(1, j) = R(1, j)$;

(2) 若 $N_{m \times n}(i, k) = t, N_{m \times n}(i, h) = t + 1$

令 $\begin{cases} t_1 = \min(g, h), t_2 = \max(k, h) \\ num = n + (t_1 - 1)n + t_2 - (1 + t_1)t_1/2 \end{cases}$

则 $NA(i, num) = 1, RA = (1, num) = L(t_1, t_2)$;

(3) 否则 $NA(i, j) = 0, RA(i, j) = 0$ 。

3 基于编码的通道及业务可靠性评估模型

3.1 单条通道可靠性评估

单条通道是经光纤段将 SDH 设备串联而成, 使用可靠性的串联模型^[16], 结合编码的情况, 可以得到通道 i 的可靠性。

$$R_i = \prod_j RA(1, j), NA(i, j) \neq 0 \quad (7)$$

3.2 相互独立多通道并联可靠性评估

在保护业务中对于每一套保护装置当存在多端口时, 规定必须配置至少两条路由相互独立的通道, 依据经典可靠性框图方法^[15], 此时保护装置承载的保护业务可靠性可以由式(8)计算。

$$R_{Bi} = 1 - \prod_{j \in \text{flag}(i)} (1 - R_j) \quad (8)$$

式中, $\text{flag}(i)$ 表示属于第 i 套保护装置的通道编号。

3.3 含复用元件的多通道并联可靠性评估

3.3.1 基于逻辑“或”的评估模型

通常一回线路会配置多套保护装置, 相互之间为并联形式。同一回线路不同装置的通道间会存在部分设备或光纤段复用, 含有复用情况的可靠性并联模型, 并不能根据传统的可靠性并联模型计算, 而是要将传统并联公式化简后的高次项转化为一次项^[17]。

对于 n 条存在复用的并联通道, 计算其系统可靠性的符号表达式为

$$R = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - S_i) = \sum_{i=1}^n S_i - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{(i-1)} S_i S_j + \dots + (-1)^{(m-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{(i-1)} \dots \sum_{k=1}^m S_i S_j \dots + \dots \quad (9)$$

式中, S_i 表示第 i 条通道的可靠性符号计算式, 对于含有 k 个广义节点的通道 i , $S_i = \prod_{j=1}^k RA_j$, RA_j 为第 j 个广义节点设备的可靠性值的符号表示。

则式(9)总共有 $C_n^1 + C_n^2 + \dots + C_n^n = 2^n$ 项, 对于其中 $2^n - n$ 项要将通道里面的部件拆开计算并将结果表达式高次项转化为一次项, 实现起来相当困难。结合本文对通道的编码, 在得到扩展的设备逻辑矩阵 NA 和扩展的设备可靠性矩阵 RA 之后, 我们可以利用逻辑“或”进行复用部分的高次项消除。以下的例子进行说明。假设两条存在复用的并联通道其扩展的设备矩阵和扩展的可靠性矩阵为

$$NA_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$RA_1 = (r_1, r_2, r_3, r_4, r_5) \quad (11)$$

则依据符号复用计算的规则, 其并联业务可靠性为

$$R = r_1 r_3 r_5 + r_1 r_2 r_4 r_5 - r_1 r_2 r_3 r_4 r_5 \quad (12)$$

因为被减去的部分是两通道的所有不重复部件的可靠性连乘, 实际上可理解为求两通道不重复的部件。可以对两通道以列为基准进行逻辑“或”计算, 得到计算通道逻辑矩阵(1 1 1 1 1), 表示两通道可靠性连乘时应该计入的部件, 与式(12)中被减去的部分相同。

因此得到一条运算规则, 复用通道进行并联的时候, 出现通道相乘时, 先在扩展设备逻辑矩阵对并联通道行求“或”, 然后计算“或门”输出的计算通道的逻辑矩阵行对应的可靠性。

式子 $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{(i-1)} \dots \sum_{k=1}^m S_i S_j \dots$ 运算项即等价于对 NA 矩阵中 m 行进行逻辑“或”运算, 运算后得到一个输出矩阵再乘以每一个元件对应的可靠性数值即可得到运算结果, 即对于所有 n 行中找出 m 行并联的项的可靠性为

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{(i-1)} \dots \sum_{l=1}^m S_i S_j \dots = \sum_{i=1}^m \Pi[NA_m(i) \times A] \quad (13)$$

式中: $A = RA$ 为 $n \times 1$ 的列向量, 记录每个元件的可靠性数值; $NA_m(i)$ 为 NA 矩阵找出 m 行的第 i 种组合进行“或”运算的结果向量值; Π 为求乘积函数, 求取向量 $NA_m(i) \times A$ 中所有非零元素的乘积。

3.3.2 模型的“异或”递归加速

对于一个区域而言, 通信网的节点数量往往远大于电力网的节点数量, 大规模网络下的 NA 往往为稀疏矩阵, 所以还可以采用稀疏矩阵技术对其计算进行优化。对某个 n 节点网络中有 m 条通道的保护业务, 需要进行“或门”公式的式子有 num 项。

$$num = C_m^2 + 2 \times C_m^3 + \dots + (m-1) \times C_m^m = (m-2) \times 2^{m-1} + 1 \quad (14)$$

复杂度为 $O(2^m)$ ，也就意味着需要计算 num 次 $\Pi NA_m(i) \times A$ ，假设每条路径 S_i 的平均节点数为 L ，则需要计算 $num \times L$ 次“或”运算和最多 $n \times num$ 次乘法运算，当 m 比较大时，这个计算量无疑是巨大的。

通过研究发现，公式中每一个 m 项组合的运算结果可以通过 $m-1$ 项的运算结果得到，即 m 项组合的第 i 个运算结果 $NA_m(i)$ 可以通过 $m-1$ 项中包含 $NA_m(i)$ 项的运算结果(假设为 $NA_{m-1}(j)$ ，是 $1 \times n$ 的行向量)与新加的 $NA_m(i)$ ($1 \times n$ 的行向量)按位求“或”得到，即

$$NA_m(i) = NA_{m-1}(j) \parallel NA(i) \quad (15)$$

但是此时不必要直接求 $NA_m(i)$ 矩阵对应的可靠性，

对于运算 $\prod_{i=1}^{C_m^m} NA_m(i) \times A$ 也可通过 $m-1$ 项的运算结果得到，具体方法是对 $NA_m(i)$ 和 $NA_{m-1}(j)$ 进行“异或”运算，即可得到相比于 $NA_{m-1}(j)$ ， $NA_m(i)$ 中增加的量(记为 $\Delta NA_m(i)$)，假设 $NA_{m-1}(j)$ 与可靠性列向量 A 的乘积结果为 $R_{m-1}(j)$ ，那么 $R_m(i)$ 即为 $R_{m-1}(j)$ 乘上 $\Delta NA_m(i) \cdot A$ 中非零值，即

$$R_m(i) = R_{m-1}(j) \times \Pi(\Delta NA_m(i) \cdot A) \quad (16)$$

基于此，在程序设计上可以先计算只有一行 S_i 的结果，在此基础上计算两行相乘 $S_i S_j$ 结果逐次累加直至求得整个表达式的值。整个公式需要计算的项由 2^m 降为 m 。以一个四并联道为例，计算流程如图 3 所示。

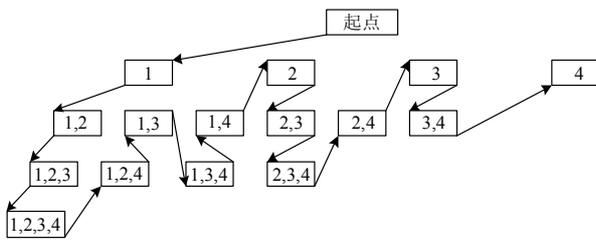


图 3 复用通道可靠性计算过程

Fig. 3 Reliability calculation process of multiplexing channel

(1) 计算第 1 条通道可靠性，由“异或”计算第 2 条通道与第 1 条通道的增量；

(2) 1、2 两通道的“或门”输出结果，由“异或”计算第 3 条通道与 1、2 “或门”输出增量；

(3) 由增量计算 1、2、3 的“或门”输出，由“异或”计算第 4 条通道与 1、2、3 “或门”输出的结

果的增量；

(4) 由增量计算 1、2、3、4 的“或门”输出结果，回溯到上一层，每当出现第 4 条通道即回溯到上一层，依次循环直到计算结束。

4 算例分析

针对华中地区某环网进行实例验算。共涉及 18 套 SDH 设备、18 条光纤段、19 条通道、10 套保护业务、5 回线路业务。在已知各节点可靠性测度及边权可靠性的基础上进行本文的模型应用。

该环网拓扑图、连接信息和通道及业务路径分别如图 4 和表 2。

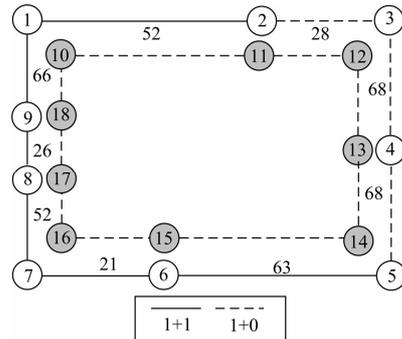


图 4 网络拓扑图

Fig. 4 Network topology

表 2 网络中各通道路径

Table 2 Channel path of the network

线路编号	装置编号	通道编号	通道路径
1	1	1	9—8
		2	18—10—11—12—13—14—15—16—17
		3	18—17
		4	2—3—4—5—6—7—8—9—1
		5	11—10
		6	2—3—4—5—6—7—8—9—1
		7	11—10
		8	2—1—9—8—7—6—5—4—3
		9	11—12
		10	2—3
2	11	11	11—10—18—17—16—15—14—13—12
		12	3—4
3	12	12	12—11—10—18—17—16—15—14—13
		13	12—13
4	13	14	12—13
		15	3—2—1—9—8—7—6—5—4
5	14	16	4—5
		17	13—12—11—10—18—17—16—15—14
6	15	18	13—14
		19	4—3—2—1—9—8—7—6—5

利用评估好的部件可靠性代入本文算法程序中, 可以迅速得到本算例的结果。通道可靠性、装置可靠性和线路可靠性评估结果分别如图 5(a)、图 5(b)、图 5(c)所示。由图 5(c)可以清楚地看到考虑元件复用和未考虑元件复用的差异, 不考虑复用抬高了实际的可靠性水平, 不利于实际工程中寻找隐患。

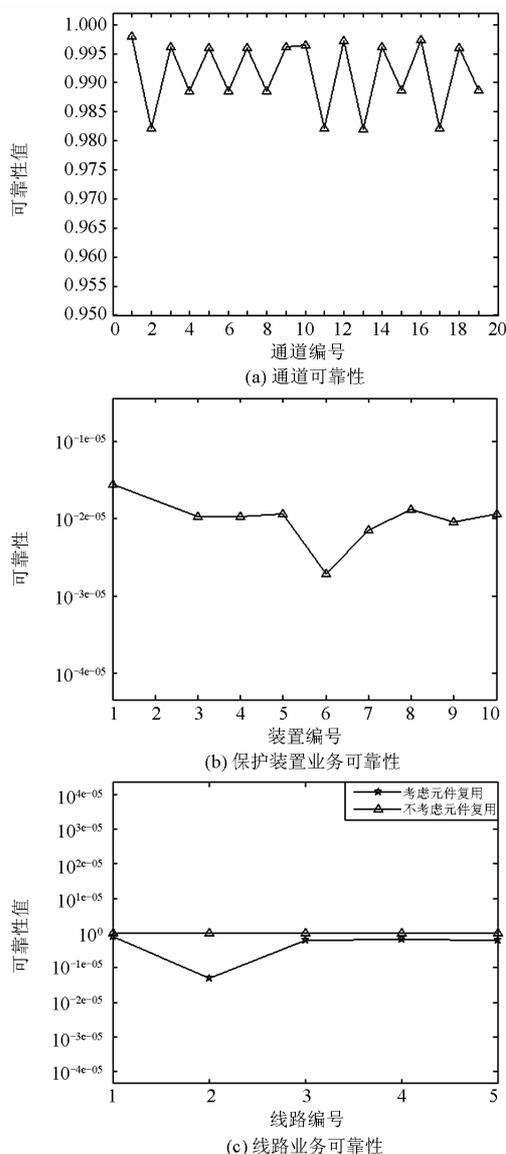


图 5 可靠性评估结果

Fig. 5 The result of reliability evaluation

5 结论

本文提出的基于图论编码的保护通道可靠性评估方法, 考虑了继电保护通信通道的元件复用情况, 从实际电网提供的数据出发, 编码逻辑与实际资料非常贴近, 简单易得。基于逻辑“或”复用算法和“异或”的加速处理, 能够应用到大规模复杂

网络中的继电保护通信通道可靠性评估。可靠性指标可以有效地指导继电保护通信通道的检修和优化配置, 具有非常现实的应用价值。

关于继电保护通信可靠性的阈值、通道的脆弱性及通道可靠性对电力系统保护业务影响等内容仍需要进行更深入的分析研究。

参考文献

- [1] 高会生. 电力通信网可靠性研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2009.
GAO Huisheng. Research on reliability of power communication systems[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2009.
- [2] 赵子岩, 刘建明. 基于业务风险均衡度的电力通信网可靠性评估算法[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 209-213.
ZHAO Ziyang, LIU Jianming. A new service risk balancing based method to evaluate reliability of electric power communication network[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 209-213.
- [3] 安灵旭, 陈中伟, 方华亮, 等. 考虑运行时间和温度的继电保护可靠性分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(5): 7-11.
AN Lingxu, CHEN Zhongwei, FANG Hualiang, et al. Reliability analysis of protection system with conditions of operating time and operating temperature[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2014, 26(5): 7-11.
- [4] 陈小雄, 黄新波, 朱永灿, 等. 输电线路雷击故障点远程定位装置的设计[J]. 高压电器, 2013, 49(7): 53-59.
CHEN Xiaoxiong, HUANG Xinbo, ZHU Yongcan, et al. Design of the remote location device for lightning strike fault point on transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(7): 53-59.
- [5] 戴志辉, 王增平. 继电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): 161-167.
- [6] 李芷筠, 戴志辉, 焦彦军, 等. 继电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.
- [7] 霍利民, 朱永利, 范高锋, 等. 一种基于贝叶斯网络的电力系统可靠性评估新方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 115-119.

2003, 27(5): 36-40.

HUO Limin, ZHU Yongli, FAN Gaofeng, et al. A new method of power system reliability based on Bayesian networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(5): 36-40.

[8] 李生虎, 朱莹, 朱婷涵. 继电保护系统长期和短期可靠性的参数灵敏度算法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 120-126.

LI Shenghu, ZHU Ying, ZHU Tinghan. Parametric sensitivity of long and short term reliability for relay protection systems[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 120-126.

[9] 陆俭国, 李奎, 杜太行, 等. 塑壳断路器可靠性理论与验证试验方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 180-185.

LU Jianguo, LI Kui, DU Taihang, et al. Reliability theory and test methods of moulded case circuit-breakers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 180-185.

[10] 黄淑琼, 高强. 光纤通信通道异常对继电保护的影响[J]. 电力系统通信, 2007(12): 42-45.

HUANG Shuqiong, GAO Qiang. Influence on relay protection caused by abnormal optical fiber communication channel[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2007(12): 42-45.

[11] 王勇, 利韶聪, 陈宝仁. 电力通信业务应用及发展分析[J]. 电力系统通信, 2010(11): 44-47, 52.

WANG Yong, LI Shaocong, CHEN Baoren. Analysis on the application and development of power communication services[J]. Telecommunication for Electric Power System, 2010(11): 44-47, 52.

[12] 丁晓兵, 赵曼勇, 周红阳. 提高极端气候条件下继电保护通道可靠性的方案[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 106-108.

DING Xiaobing, ZHAO Manyong, ZHOU Hongyang. Schemes of enhancing reliability of protection channel during extreme climate events[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 106-108.

[13] 胡勇, 粟小华, 李怀强, 等. 青藏±400 kV 直流联网工程继电保护配置与应用[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(2): 27-32.

HU Yong, SU Xiaohua, LI Huaiqiang, et al. Configuration and application of relay protections in ±400 kV HVDC Qing-Tibet interconnection system[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(2): 27-32.

[14] GB/T 14285-2006 继电保护和安全自动装置技术规程[S].

[15] 李志刚, 李玲玲. 串联系统的可靠性评估方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 146-153.

LI Zhigang, LI Lingling. A method of evaluating the reliability of services systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 146-153.

[16] 莫峻, 谭建成. 基于并行冗余协议的高可靠性过程总线通信研究[J]. 电工技术学报, 2012, 26(4): 263-268.

MO Jun, TAN Jiancheng. Highly reliable process bus communication parallel based on redundancy protocol[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 26(4): 263-268.

[17] 林洁. GO-FLOW 原理及其计算机辅助技术[D]. 长沙: 国防科技大学, 2003.

LIN Jie. Research on the principles and the computer aided technology of the GO-FLOW[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003.

收稿日期: 2014-08-14; 修回日期: 2014-12-11

作者简介:

方必武(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: bwfwhu@163.com

王波(1978-), 男, 副教授, 研究方向为源荷协调和高级应用;

刘涤尘(1959-), 男, 教授, 博导, 研究方向为电力系统运行与控制。

(编辑 葛艳娜)