

基于安全性的继电保护光纤迂回通道路径选择

高会生, 王慧芳

(华北电力大学电子与通信工程系, 河北 保定 071000)

摘要: 针对电力光纤迂回通道传输的继电保护业务, 提出了基于安全性的最佳路径选择方法。介绍了光纤通道方式及性能指标, 强调了从安全性的角度为继电保护业务配置最佳路径的必要性。在此基础上, 改进了已有的 Dijkstra 算法用于选路, 所提算法充分考虑了电力光纤通信网节点和链路的安全性度量值。为避免某些链路过载带来安全风险, 通过动态权值更新函数调整链路权值。通过网络实例验证了新算法的可行性和有效性。

关键词: 继电保护业务; 安全性; 最佳路径; Dijkstra 算法; 均衡

Path selection based on security measure for relay protection services of fiber circuitous channel

GAO Hui-sheng, WANG Hui-fang

(Department of Electronics and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China)

Abstract: A optimal path selecting method based on security is proposed for relay protection services of optical-fiber circuitous channel. Firstly, the requirements and types of optical-fiber relay protection channels are described, and the necessity of configuring the optimal path is analyzed from the security perspective. Secondly, an improved Dijkstra algorithm is used to select paths, considering the security measure of nodes and links. For links security balancing, a function is used to adjust the weights of the links. Finally, examples verify the feasibility and effectiveness of the new algorithm.

Key words: relay protection services; security; optimal path; Dijkstra algorithm; balancing

中图分类号: TM769; TM73

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)14-0025-07

0 引言

随着电力光纤通信网规模不断扩大, 网络环境日益复杂, 为继电保护业务合理选择路径, 保障其信息安全传输成为研究难点。按照电力系统通信业务流向特点, 光纤通道继电保护业务属于典型的“站间业务”, 路径不经过中心站, 信息点对点传输, 对通道的可靠性、安全性要求严格^[1]。可靠性方面的研究成果比较成熟^[2-3], 但可靠性仅是保护装置不误动和不拒动, 随着电力通信设备智能化, 信息安全受到重视^[4-6], IEEE 电力系统继电保护委员会专门发布了一份研究报告, 全面系统阐述了继电保护信息安全问题^[6]。安全性概念涵盖了物理安全和信息安全, 较之可靠性更加全面地表征了通道属性。信息和物理综合安全性研究不断深入^[7], 为解决新的安全问题提供了新思路。

但是上述文献都缺乏继电保护业务路径配置方法研究。继电保护业务的路径算法不能以简单的跳数最小、带宽最大作为目标, 而是平衡路径安全性和全网链路安全风险的折中方案。且继电保护业务为恒定数据流负荷, 不存在突发性拥塞^[8], 因此, 流量均衡、最小路径代价和算法^[9-10]等公网的路径选择方法以及广域网保护算法^[11-13], 并不适用。文献[14]针对电力通信网业务进行路径选择, 以可靠性为目标枚举两点间所有路径, 再通过风险均衡指标择优选路, 只能用于小规模网络。实际工程中, 沿用人工方式选路, 缺乏科学性, 难以实现路径最佳, 同时增加了日常检修和数据维护难度。

由以上分析提出了基于安全性的继电保护业务路径选择方法。为网络中节点和链路进行安全性赋值, 改进了 Dijkstra 算法, 算法执行过程中通过动态权值更新函数在合理范围内均衡链路使用次数。

1 继电保护光纤通道安全性

继电保护业务需要配置双路径^[1], 通常主用为

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究指导项目“智能电网骨干通信系统安全风险评估”(Z2010291)

光纤直连, 备用为迂回通道。本路径选择方法旨在解决光纤迂回通道中的继电保护业务路径配置问题, 属于单路径优化选择策略的研究范畴。我国现有的光纤保护方式主要有两种, 专用保护方式和复用保护方式, 皆可通过多个节点组成迂回通道, 即专用纤芯迂回通道和复用迂回通道, 以提高传输通道利用率。

电力光纤通信网安全性指网络设施、信息资源不被破坏或非法访问的防御能力, 即抵御各种突发事件, 保护网络机密性、完整性和可用性的能力^[15]。具体而言, 继电保护光纤通道的安全性取决于所处网络结构和节点/链路的安全性。

设安全性 p 的 n 个属性集合为 $p^n = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$, 为方便评价, 将其映射为区间 $[0,1]$ 之间的实数, $p^n \in [0,1]$ 。

以网络中一条路径 X_i 为例, X_i 表示起点 s 到终点 t 所有节点和链路的集合: $X_i = \{s, i, \dots, j, t\}$ 。路径 X_i 的安全性取决于集合中元素安全性和元素连接关系。

第 i 个元素的安全性权值为: $p_i \in [0,1]$ 。若 $p_i = 0$, 则表明第 i 个元素最不安全; 若 $p_i = 1$, 则表明第 i 个元素绝对安全。文献[16-17]提供了节点\链路安全性的具体计算方法, 在此不再详述。

整条路径的安全性表示为

$$p_{st} = \prod_{i \in X_i} p_i \quad (1)$$

2 继电保护业务路径选择问题

可靠性一般用失效率表征, 文献[2]通过统计一定时间内相关指标的失效率得到待评估目标的可靠性; 安全性与可靠性相比具有更丰富的属性, 从网络传输、设备、运行、计数管理、人力资源等多方面综合考量^[16-17], 安全性不仅包括物理安全, 而且涉及了通道中所传信息的机密性、完整性和可用性, 很显然, 在信息篡改、信息注入、中间人攻击等信息安全防范方面, 安全性分析更能反映一条路径的安全状态^[4]。

2.1 基于安全性的路径

将“安全性”权值作为网络图中的“距离”或花费 (cost), 图中两节点间的最短路就是基于安全性的最佳路径。式 (1) 路径安全性采用“乘”的算子, 无法直接使用最短路径相关算法, 通过式 (2) 做对数运算实现乘积到求和的转换, 再取绝对值保证 cost

为正值, 转化为最短路径问题。对于 $p_i = 0$ 的元素, $|\ln p_i| = \infty$, 在最短路径程序中用 $\max Value$ 代表。

$$|\ln p_{st}| = \left| \ln \left(\prod_{i \in X_i} p_i \right) \right| = \left| \sum_{i \in X_i} \ln p_i \right| \quad (2)$$

以图 1 的简单网络为例, 简要分析 1-4 之间的路径, 研究角度不同, 得到的最佳路径亦不相同。假设链路 (1-5) 容易发生光缆缆断事件, 属于物理安全问题; 链路 (2-3) 容易发生信息篡改, 虽然物理设施未出现误动、拒动现象, 但篡改严重影响到继电保护信息的完整性、真实性和一致性^[4]。仅从跳数最小的角度出发, 1-4 之间的最佳路径为: 1-5-4; 考虑可靠性最佳路径为: 1-2-3-4; 从安全性角度出发, 则最佳路径为: 1-2-5-4。因此, 1-4 间虽有三种可达路径, 为确保信息安全传输, 应选择 1-2-5-4。

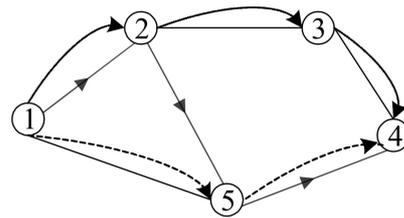


图 1 三种最短路径比较

Fig. 1 Comparison of three kinds of shortest paths

2.2 全网链路安全风险的均衡问题

以安全性为 cost 的最短路径相关算法, 必然导致所有业务都沿着最安全的链路传输, 造成某些链路过载, 某些链路零业务的不均衡现象。全网链路安全均衡状态通过链路使用次数的均方差进行评价, 均方差越小, 链路的安全状态越均衡。设每条链路的使用次数为 fs_i (Frequency Statistics), N_E 代表所有链路集合, 链路使用次数的均方差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N_E} \sum_{i \in N_E} (fs_i - \bar{fs}_i)^2} \quad (3)$$

2.3 路径选择目标函数

路径本身的安全性和全网链路安全均衡问题之间存在不可调和的矛盾, 根据需要折中权衡。理想情况是路径绝对安全, 且链路使用次数均衡, 如式 (4)。

$$\begin{cases} \max(p_{st}) \\ \min(\sigma) \end{cases} \quad (4)$$

3 最佳路径配置算法

3.1 经典 Dijkstra 算法 (D)

经典 Dijkstra 算法最早由 Edsger Wybe Dijkstra 提出, 按照路径长度递增的次序产生最短路径, 在工程领域中得到了广泛应用。针对继电保护光纤通道的最短路径问题, 该算法存在几点不足。首先, 经典算法仅考虑了链路权值, 没有考虑节点权值, 而在继电保护光纤通道中节点的安全性不容忽视; 其次, 经典算法只负责寻路, 无法避免某些链路重复使用, 部分链路承载过多业务导致安全风险过分集中; 最后, 经典算法只能计算单源点到其他所有节点的最短路径, 无法直接实现任意两节点间的最佳路径选择, 而实际工程中需要配置指定节点对之间的最短路径。因此, 需要作出相应的改进。

3.2 改进的 Dijkstra 算法 (IDA)

3.2.1 对经典 D 算法改进的内容

针对上述提出的需求, 对经典 D 算法进行了如下三个方面的改进:

- 1) 基于安全性对网络图节点\链路进行赋值, 为最佳路径选择提供条件;
- 2) 在每一次最短路径搜索完成后, 利用动态权值函数对该路径所经过的链路权值进行调整;
- 3) 能够输入指定节点对, 输出节点对的最短路径。

3.2.2 动态权值更新函数

为了避免某些链路承载过多的业务, 本文采用了链路状态更新算法, 保证路径安全性的条件下, 全网业务配置均衡。用以更改链路权值的动态权值更新函数为一个非线性变化的凹函数 $f(x)$, 表达式为

$$f(x) = e^{\frac{\alpha x}{k}} - 1 \quad (5)$$

设链路的安全性权值 $p \in [\beta, 1]$, 由 p_i 调整为 p'_i 的关系式为

$$-\ln p'_i = -\ln p_i + f(x) \quad (6)$$

式 (3) 中, α 、 k 为常数。 x 为某节点或链路的权值更改次数, $x=1, 2, \dots, m$, m 为有限值。 $f(x)$ 为权值改变量, 它随着该链路使用次数的增加而增大。当 $x=1, 2, \dots, k$ 时, $f(x)$ 的取值在 $[0, -\ln \beta]$ 区间内, 此后如果 x 继续增加, $f(x) \gg -\ln p_i$, 那么搜索到的路径重在考虑全网链路安全均衡问题, 忽视路径本身的长度及安全性。

根据以上分析可知, k 的取值决定了某一链路

在前 k 次权值更新的过程中重在考虑路径本身安全性, k 之后的更新则重在避免链路拥塞。由此容易得到

$$\alpha = \ln(1 - \ln \beta) \quad (7)$$

3.2.3 IDA 算法

设无向图 $G(V, E)$ 的 n 个节点为 v_0 到 v_{n-1} , 用邻接矩阵 cost 来表示, 则 $\text{cost}[v_i][v_j]$ 的值代表 (v_i, v_j) 链路上的权值; 若 (v_i, v_j) 不存在, 则值为无穷大。此外, 设数组 $\text{vertex}[v_i]$ 表示节点 v_i 的权值。 $\text{dist}[v_i]$ 表示源点 v_s 到 v_i 的最短路径长度, $\text{prev}[v_i]$ 表示此最短路上 v_i 的前一个节点。

1) 初始化: 源点 v_s 放入集合 S , $\text{dist}[v_s] = 0$, $\text{prev}[v_0] = 0$; 其余节点 v_i 放入集合 $T (T = V - S)$ 中, 前一个节点为 $\text{prev}[v_i] = v_s$, 与源点的距离为

$$\text{dist}[v_i] = \text{cost}[v_s][v_i] + \text{vertex}[v_s] + \text{vertex}[v_i]$$

2) 在集合 T 中寻找与 S 中元素直接相连且与源点 v_s 距离最短的节点 v_j , 即

$$\text{dist}[v_j] = \min \{ \text{dist}[v_i] \mid v_i \in T \}$$

同时将 v_j 放入集合 S 中。

3) 更改从 v_s 到 $v_k \in T$ 的最短路径长度, 若 $\text{dist}[v_j] + \text{cost}[v_j][v_k] + \text{vertex}[v_k] < \text{dist}[v_k]$, 则修改 $\text{dist}[v_k]$ 为

$$\text{dist}[v_k] = \text{dist}[v_j] + \text{cost}[v_j][v_k] + \text{vertex}[v_k]$$

同时记录该节点的前一个节点, $\text{prev}[v_k] = v_j$ 。

4) 重复操作 3)、4), 直到 S 中出现所要求的节点 v_t , 完成 v_s 和 v_t 之间的路径搜索。

5) 使用动态权值更新函数 $f(x)$, 见公式 (5), 更改 4) 中所得路径经过的链路权值。这一步骤并不影响实际节点和链路的安全性权值。最终输出路径安全性仍为原节点\链路权值之积。

6) 重复以上步骤, 直到所有需求配置的节点对完成路径搜索。

图 2 为上述改进算法的流程。

3.3 时间复杂度对比分析

经典 D 算法在计算单源、无负权的最短路时, 时效性较好, 时间复杂度为 $O(V^2 + E)$; 用于稀疏图时算法时间复杂度为 $O(V^2)$ 。IDA 算法的时间复杂度取决于实际业务需求, 如果用 S 表示所需配置

的业务数量,则算法复杂度为 $\alpha(SV^2)$,实际工程中电力光纤通信网属于稀疏图,继电保护业务分散且数量少。

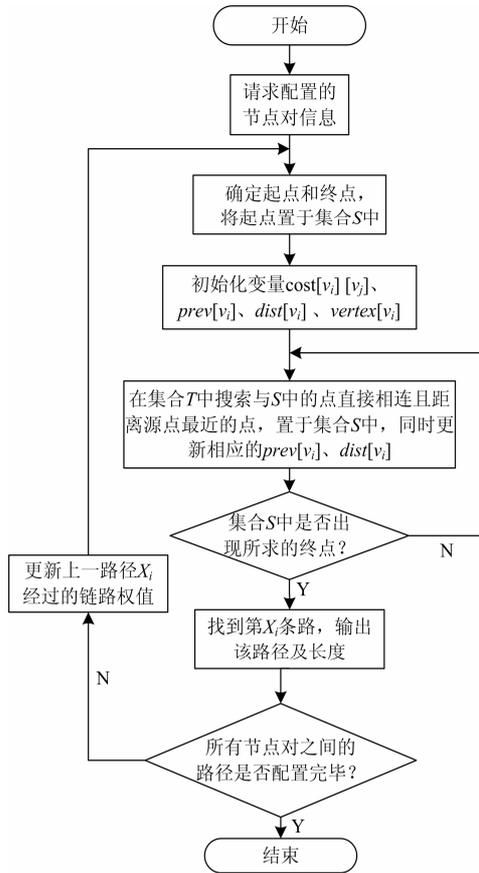


图2 算法流程图

Fig.2 Algorithm flow chart

4 实例分析

图3为经过简单整理后的某市局网络图,圆环中的数字表示节点编号,该图包含43个节点,62条链路。通过文献[14-15]中确定指标权重的方法计算出节点和链路的安全性权值,取值在[0.7,1]之间。为使图形简洁,图中仅标出了链路权值,未标出节点权值。权值越大,表示该节点或链路越安全。根据上一小节的分析,以及式(5)~式(7)得到动态权重更新函数 $f(x)$ 的参数为 $\alpha = 0.305$,并设 $k = 8$ 。使用VC++语言实现IDA算法,并进行可视化仿真。

其中70条业务量取自实际工程中的配置需求,903条业务量是指任意两点之间都配置一条保护业务,其他业务量随机产生。

4.1 具体路径分析

以70业务量时节点对(9,28)的路径配置情况为例作具体分析,使用D算法的配置结果为:9-4-15-13-21-22-28,路径安全性为0.613527;而IDA算法的配置结果为:9-10-23-22-28,路径安全性为0.537299。路径安全性有所降低,原因在于IDA算法为了规避已使用过的链路,退而求其次,选择一条安全性略低的链路,完成选路。图4中0时刻表示业务配置未开始,1时刻代表第一对节点进行选路,2时刻结束,同时第二对节点开始选路;纵坐标为某三条链路的权值更新过程。(9,28)位于业务配置请求列表的第26位,应从26时刻开始选路。

结合图3可知,节点9与4、16、10相连,从时刻之前,链路(9-4)已使用5次,每用过一次就

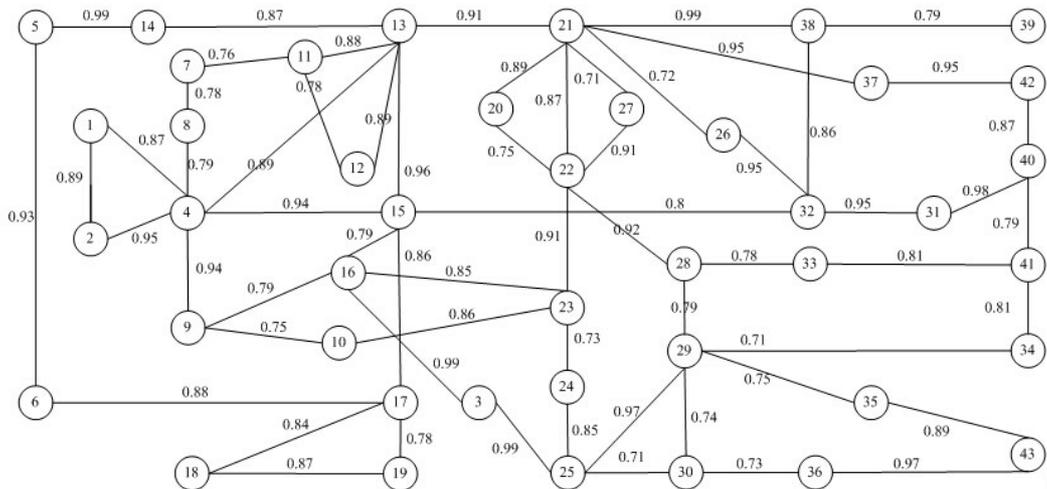


图3 某市局网络图

Fig.3 Network graph of a city

更新权值, 以避业务量过载; (9-16) 使用 3 次, 相应地权值更新 3 次; (9-10) 链路权值只更改 1 次。在 26 时刻, IDA 算法首先将节点 9 置于集合 S , 比较 (9-4)、(9-10)、(9-16) 三条链路的虚拟权值发现, 链路 (9-4) 的权值最小, 因此再把节点 4 加入到 S 集合, 之后遍历其余与 4、9 直接相连的节点, 在此过程中不断更新与起点 9 的距离, 最终得到路径 9-10-23-22-28。

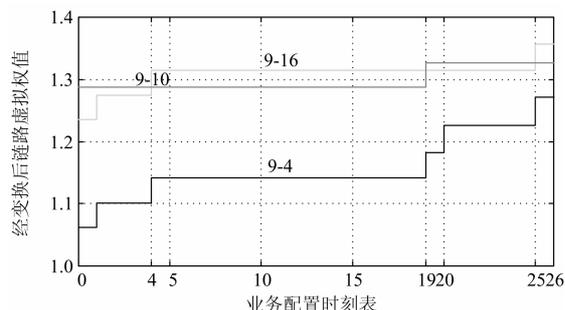


图 4 链路权值更新过程

Fig. 4 Process of updating the link weights

4.2 全网链路安全状态的均衡分析

针对多种业务量, 分别采用 IDA 算法和传统 D 算法 (设二者主要区别在于是否使用函数 $f(x)$) 统计每条链路的使用次数 f_{s_i} , 并通过式 (3) 评价链路安全状态的均衡程度 σ , 得到统计图 5。

图 5(a)~图 5(e)横坐标为 62 条链路按照其使用

次数由大到小排序后的集合, 通过插值得到链路使用次数的平滑曲线。黑色曲线代表 IDA 算法, 灰色为 D 算法。图 5(a)~图 5(e)中, D 算法结果均存在多条闲置链路, 即使用次数为零, IDA 算法有效减少了闲置链路数量, 改善了整体链路安全状态的均衡程度。当业务量不断增加趋于极限时 (从图 5(a)~图 5(e)), IDA 算法的均衡作用也越来越明显。图 5(f)表明对于不同业务量, IDA 算法的均衡作用十分明显。

4.3 路径配置结果分析

针对五种不同业务量, 分别使用 D 和 IDA 算法配置所需路径, 通过公式 (1)、(2) 计算所有路径的安全值, 绘制统计图 6。

图 6(a)~图 6(e)中横坐标等间隔分为 5 个安全性区间, 纵坐标表示落在每个区间内的路径数量。整体而言, 五种业务量时, 两种算法得到的路径数量呈现正态分布, 即 $p_{st} > 0.8$ 和 $p_{st} < 0.2$ 的数量相对较少, 大部分集中在区间 $[0.4, 0.8]$ 之间。路径安全性取决于该路径历经节点和链路的安全性权值, 由于初始权值区间为 $[0.7, 1]$, 路径一旦经过 4 个以上节点 \setminus 链路, 其安全性就大大降低, 安全性的累积效应表明应当不断加强安全措施, 确保每个细节的安全性, 从而提高整体网络的安全性。根据 D 算法的原理可知, 以安全性权值为 cost 值, 必然得到最安全路径, 图 6 表明在各个安全性区间内, IDA 算法配置结果与 D 算法差距较小, 即 IDA 算法能够保证大部分路径的安全性最佳。

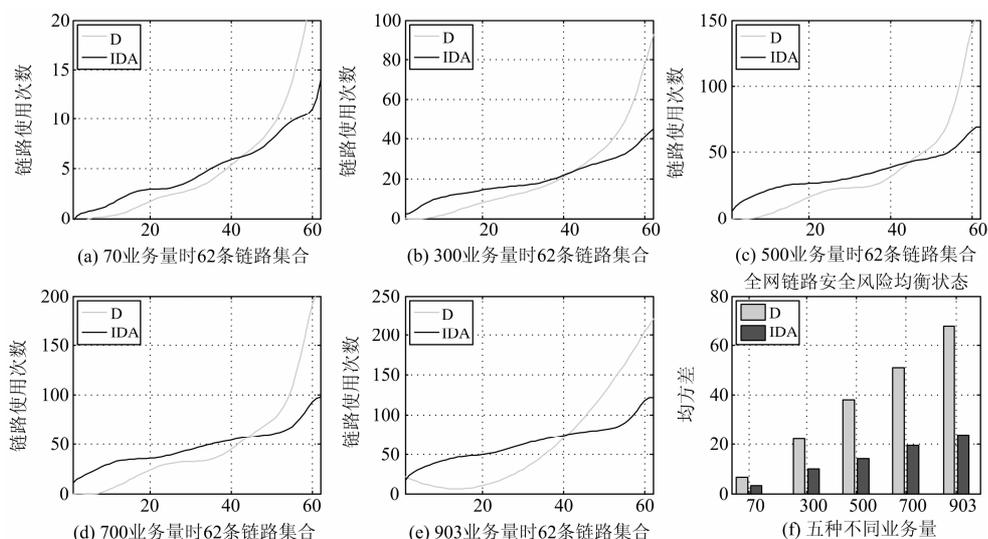


图 5 链路使用次数及安全均衡状态

Fig. 5 Using frequency and security balancing state of links

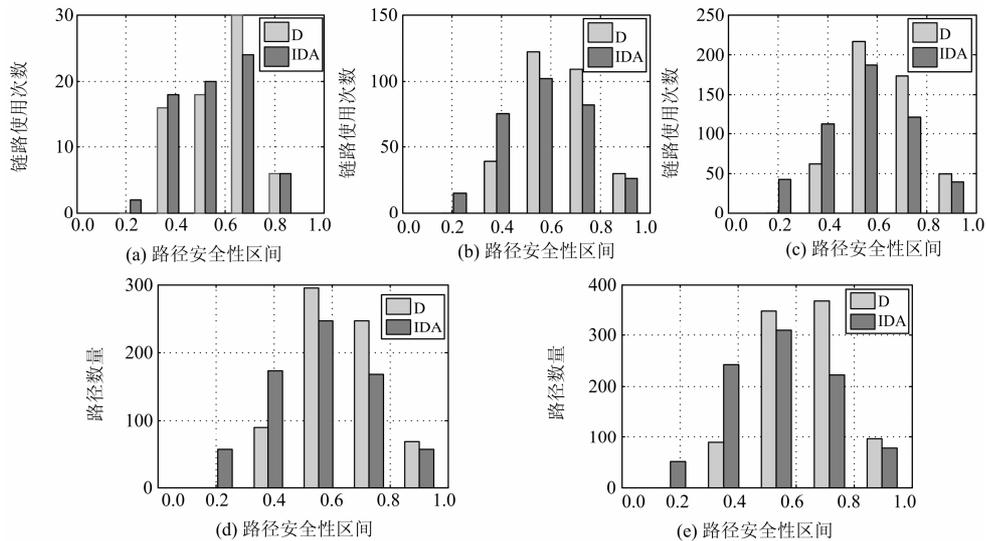


图 6 路径配置结果分析

Fig. 6 Analysis of path allocation results

结合 4.2 小节的仿真结果可知, IDA 算法兼顾了单个路径的安全性问题, 以及全网链路安全状态的均衡问题。均衡是以牺牲部分路径的安全性为代价的, 算法提出的动态权值更新函数简单有效, 在业务量较小时, 路径配置重在保障单个路径的安全性, 全网链路安全状态的均衡结果并不显著; 随着业务量不断增大, 该算法的均衡作用越来越明显, 但是部分路径的安全性降低。

综合具体路径选择和全部业务配置结果进一步分析, 网络由多个环相互嵌套组成, 使两节点间存在多种路径, IDA 算法利用这种可选空间实现安全性最高的路径和链路使用次数的均衡。

5 总结

光纤迂回通道继电保护业务的安全路径选择对于电力通信网的安全稳定运行具有重要意义。本文基于网络元素的安全性测度提出了改进的 Dijkstra 算法, 实现了最佳路径的配置, 在一定程度上保障了全网链路安全状态的均衡。研究发现, 单个继电保护业务路径的安全性与全网链路安全状态的均衡之间存在矛盾, 简单来说, 保护信息应当优先通过安全性越高的链路, 但是某一链路使用过于频繁必然导致全网链路安全状态不均衡。本文所提出的方法兼顾了最安全路径的配置以及全网安全状态的均衡, 但仍有改进的空间, 接下来的工作中将结合请求配置的业务顺序作进一步研究。

参考文献

[1] DLT_364-2010 光纤通道传输保护信息通用技术条件[S].

DLT_364-2010 general specification of transmitting protection information on optical channel[S].

[2] 石征, 侯思祖. 光纤保护通道的可靠性综合评价研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 91-94.
SHI Zheng, HOU Si-zu. Reliability comprehensive evaluation for optical fiber protection channel[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 91-94.

[3] 陈强林, 李瑞生, 马全霞, 等. 继电保护通道检测平台在光纤差动保护测试中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(8): 83-92.
CHEN Qiang-lin, LI Rui-sheng, MA Quan-xia, et al. The detection platform of relay protection channel in fiber differential protection test[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(8): 83-92.

[4] 李文武, 游文霞, 王先培. 电力系统信息安全研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11):140-147.
LI Wen-wu, YOU Wen-xia, WANG Xian-pei. Survey of cyber security research in power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 140-147.

[5] WANG Wen-ye, LU Zhou. Cyber security in the smart grid: survey and challenges[J]. Computer Networks, 2013.

[6] IEEE PSRC C1 Working Group. Cyber security issues for protective relays[C] // IEEE PES General Meeting, 2007: 1-8.

[7] SRIDHAR S, HAHN A, GOVINDARASU M. Cyber-physical system security for the electric power grid[J]. Proceeding of the IEEE, 2012, 100(1): 210-224.

- [8] 曾庆涛, 邱雪松, 郭少勇, 等. 电力通信业务路由分配算法[J]. 北京邮电大学学报, 2013, 36(3): 79-87.
ZENG Qing-tao, QIU Xue-song, GUO Shao-yong, et al. Routing algorithm for power communications service assignment[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013, 36(3): 79-87.
- [9] FORTZ B, REXFORD J, THORUP M. Traffic engineering with traditional ip routing protocols[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(10): 118-124.
- [10] 杨华卫, 王洪波, 程时端. 最小化路径代价和流量均衡模型及算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(10): 2415-2420.
YANG Hua-wei, WANG Hong-bo, CHENG Shi-duan. Minimizing sum of path-cost model and algorithm for traffic balancing[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(10): 2415-2420.
- [11] 汪旸, 尹项根, 张哲, 等. 基于遗传信息融合技术的广域继电保护[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 174-179.
WANG Yang, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Wide area protection based on genetic information fusion technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 174-179.
- [12] 熊小萍, 谭建成, 林湘宁. 基于 MPLS 的广域保护通信系统路由算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 257-263.
XIONG Xiao-ping, TAN Jian-cheng, LIN Xiang-ning. Routing algorithm for communication system in wide-area protection based on MPLS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 257-263.
- [13] 章小强, 管霖, 王同文. 针对特征选择问题的改进蚁群算法及其在电力系统安全评估中的应用[J]. 电工技术学报, 2010, 25(12): 154-160.
ZHANG Xiao-qiang, GUAN Lin, WANG Tong-wen. Kernel feature identification based on improved ant colony optimization algorithm for transient stability assessment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(12): 154-160.
- [14] ZHAO Zi-yan, LIU Jian-ming. A new communication services optimization method based on services risk balancing degree for power system[C] // Computer Science and Service System (CSSS), Nanjing, 2011: 994-997.
- [15] GB/T 20984 中华人民共和国国家标准—信息安全风险评估规范[S]. 2007.
GB/T 20984 information security technology-risk assessment specification for information security[S]. 2007.
- [16] 苑津莎, 高会生, 孙逸群. 电力光纤通信网的安全性评估指标体系[J]. 高电压技术, 2005, 31(5): 23-26.
YUAN Jin-sha, GAO Hui-sheng, SUN Yi-qun. Security evaluation indicator system for electric power optical-fiber communication network[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(5): 23-26.
- [17] 高会生, 孙逸群, 冉静学. 电力光纤保护通道安全风险评价指标的研究[J]. 继电器, 2007, 35(3): 61-65.
GAO Hui-sheng, SUN Yi-qun, RAN Jing-xue. Research of the security risk evaluation indices for electric power optical-fiber relay protection channel[J]. Relay, 2007, 35(3): 61-65.

收稿日期: 2013-10-13; 修回日期: 2013-12-24

作者简介:

高会生(1963-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究领域为电力通信网的管理和安全风险评估、电力系统通信;

王慧芳(1989-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究领域为电力通信网安全。E-mail: hjc0221@126.com