

考虑负载均衡的系统保护通信专网路由规划方法

蔡鹏¹, 陆俊¹, 肖振锋², 徐志强², 李疆生³, 王赞¹

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 国网湖南省电力有限公司 经济技术研究院, 长沙 410004;

3. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209)

摘要: 针对系统保护通信专网局部节点与链路业务负载过重的问题, 提出一种考虑负载均衡的系统保护通信专网路由规划方法。首先, 阐述了系统保护通信专网的概念, 分析了局部节点和链路业务负载过重的问题; 然后, 构建了综合考虑业务特性和备份路径的负载均衡路由规划优化模型, 实现了模型的负载均衡路由规划求解; 最后, 以某省系统保护通信专网光传送网(OTN)拓扑为仿真网络, 采用 PSCPlanner 电力通信网规划平台与 K 条最短路径(KSP)算法进行了对比实验。仿真结果表明: 该方法均衡了链路容量, 降低了业务请求拒绝率, 有效地分配了网络资源。

关键词: 服务质量; 光传输网; 接入控制; 业务加载; 网络规划和优化

中图分类号: TN915 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2021)01-0036-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.01.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Routing planning method of system protection communication private network considering load balance

CAI Peng¹, LU Jun¹, XIAO Zhenfeng², XU Zhiqiang², LI Jiangsheng³, WANG Yun¹

(1. School of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Economic & Technology Research Institute of State Grid Hunan Electrical Power Co., Ltd, Changsha 410004, China;

3. State Grid Economic Technology Institute Limited Company, Beijing 102209, China)

Abstract: Aiming at the problem of overloading local node and link traffic of the system protection communication private network, a route planning method with load balance in system protection communication private network is proposed. First, the concept of the system protection communication private network is explained, and the problem of overloading the local node and link services is analyzed. Then, an optimization model of load balance route planning considering delay, service characteristics and backup path is constructed and the solution of load balance route planning is realized. Finally, the optical transport network (OTN) topology of a provincial system protection communication network is taken as the simulation network. A comparative analysis experiment is performed with the K-shortest paths (KSP) algorithm on the power communication network planning platform PSCPlanner. Simulation results show that the proposed method can balance link capacity, reduce the service rejection ratio and effectively allocates network resources.

Key words: quality of service; optical transport network; access control; service loading; network planning and optimization

0 引言

在实际工程应用领域中, 目前满足系统保护通信

收稿日期: 2020-05-15。

基金项目: 国家电网总部管理咨询项目(SGGL201906012)资助。

作者简介: 蔡鹏(1996—), 男, 江苏泰州人, 硕士生, 现就读于华北电力大学电气与电子工程学院信息与通信工程专业, 主要研究方向是系统保护通信专网路由规划。在校期间获“华北电力大学一等学业奖学金”和“高教社杯全国大学生数学建模竞赛北京赛区甲组北京市一等奖”。



专网的路由算法是在综合了时延和可靠性的要求下, 计算一条最优主路径和一条备份路径, 但都未涉及部分节点和链路负载过重导致的负载失衡问题。文献[1–2]在综合考虑网络时延和可靠性的基础上提出了一种考虑排队时延的路由选择算法, 有效提高了传输系统的实时性; 文献[3]考虑链路时延和可用率, 设计了基于蚁群算法的多路径路由方法, 兼顾了实时性和可靠性。上述 2 种方法虽然对系统保护通信专网路由的时延和可靠性进行了优化, 但未涉及路由优化中节点和链路负载过重的问题。文献[4]提出一种考虑链路负载

与业务风险联合均衡的电力通信网路由优化算法,能有效降低网络的阻塞率和业务传输风险,但该算法考虑备份路径时采用链路分离路径,存在部分节点阻塞的问题。文献[5]结合设备、负载和业务特征构建了基于负载均衡的路由优化方法,但未涉及备份路径的负载均衡。

目前的通信网络难以满足系统保护业务采集和控制信息高速、安全传输的要求,因此本文综合考虑系统保护通信专网时延、可靠性和负载均衡,提出一种考虑负载均衡的系统保护通信专网路由规划方法。

1 系统保护通信专网业务路由规划分析

典型的系统保护通信专网结构包括核心层、骨干层和接入层,其中核心层和骨干层网络可采用同步数字体系(SDH)技术或光传输网络(OTN)技术构建多业务传输平台(MSTP)^[6]。

系统保护通信专网的通信时延和可靠性是影响系统保护业务能否实现其预定功能的决定性因素之一^[7-8]。对于系统保护业务信息采集与控制,业务通信路由规划是实现信息实时可靠传输的关键。因此,系统保护通信专网业务路由规划必须满足特定要求:①时延要求。系统保护业务端到端时延通常为 50~60 ms,业务路由路径转发跳数应小于 6^[9]。②可靠性要求。单一路由可靠性为 99.99%, $N+1$ 备份路径为 100%^[8],区域协控主站及协控子站的通信设备均须满足“双路由、双设备、双电源”的要求^[10],当业务路由由所辖节点或链路发生故障时,要求不影响业务正常通信,必须至少有一条备份路由路径,且以全物理、全独立备份路由路径为优选^[11]。③负载均衡。系统保护通信专网节点与链路网络资源有限,为使得承载业务容量最大和充分运用资源,要求路由规划中考虑资源占用平衡,避免某些节点或链路过载降低专网整网性能,影响保护业务通信服务质量^[12]。

2 考虑负载均衡的系统保护通信专网路由规划方法

2.1 OTN 分层系统保护通信专网模型

结合系统保护通信专网建设工程实际,本文构建了系统保护通信专网分层 OTN 模型^[13],如图 1 所示。

图 1 中,系统保护通信专网分层 OTN 模型包含电层(IP)、光层(OTN/DWDM)以及光电映射接口。其中,电层由通信终端构成,通信终端之间构建业务通信路

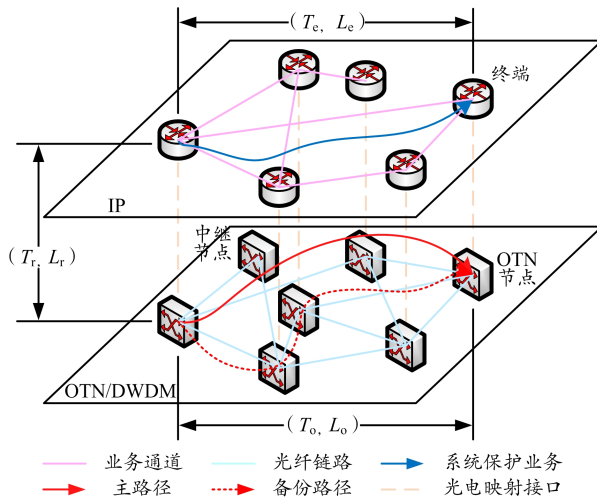


图 1 系统保护通信专网分层 OTN 模型

由通道,用于承载系统保护业务;光层由 OTN 节点、中继节点和光纤链路构成,光纤链路负责传输系统保护业务采集和控制信息,并采用 1+1 物理备份保障业务传输可靠性。光电映射接口实现系统保护业务的 2 个起止节点间的电层逻辑路径需求向光层进行条件约束映射,构成光层的物理路径约束。

2.2 系统保护业务负载均衡路由规划最优化模型

本文以上节所构建的系统保护通信专网分层 OTN 模型为网络架构,以系统保护业务的时延和可靠性为约束条件,节点均衡度最小为优化目标,构建系统保护业务负载均衡路由规划最优化模型。首先定义模型的约束条件,其次是模型的优化目标。具体如下:

①时延约束。系统保护业务 d 传输时延主要由电层逻辑路径时延、光电映射接口时延和光层时延组成,且满足系统保护业务传输时延要求,表达式为:

$$T_o = \sum_{i \in d} \frac{b_i}{v_o} + T_i N_{hop} \quad (1)$$

$$T_d = T_e + T_r + T_o < T_{max} \quad (2)$$

其中, T_o 为光层时延,由光纤链路传输时延和 OTN 节点设备转发时延组成, v_o 为光纤链路上的信息传输速度; b_i 为系统保护业务 d 传输所经光纤链路 i 的长度; T_i 为单一 OTN 节点设备的处理时延, N_{hop} 为系统保护业务 d 传输路由跳数; T_d 为系统保护业务 d 的传输总时延; T_e 为电层逻辑路径时延,即系统保护业务 d 在电层的排队时延; T_r 为光电映射接口时延; T_{max} 为系统保护业务传输时延上限, $T_{max}=50$ ms。

②可靠性约束。系统保护业务可靠性由电层逻辑路径可靠度、光电映射接口可靠度和光层物理路径可

靠度组成,表征系统保护通信专网各模块无故障传输业务的概率,系统保护业务 d 的可靠性约束表达式为:

$$L_0 = 1 - (1 - L_0^m)(1 - L_0^s) \quad (3)$$

$$L_d = L_e \cdot L_r \cdot L_0 > L_{\min} \quad (4)$$

其中, L_0 为光层物理路径可靠度, L_0^m 为光层主路径可靠度, L_0^s 为光层备份路径可靠度; L_d 为系统保护业务 d 的传输总可靠度, L_e 为电层逻辑路径可靠度, L_r 为光电映射接口可靠度, $L_{\min}$ 为系统保护业务传输可靠度下限, $L_{\min} = 1 - 10^{-6}$ 。

③均衡优化目标。考虑到系统保护通信专网资源的有限性,以及局部节点或链路过载问题,本文采用节点占用率来衡量系统保护通信专网的资源消耗情况。链路是两节点之间的通信通道,因此节点占用率不仅体现了节点资源的消耗,也在一定程度上体现了链路资源的消耗。OTN 节点的节点占用率表示为:

$$R_i = \frac{2 \sum_{d=1}^{N_d^i} \delta_{di}^o f_d}{\sum_{j \in V, j \neq i} W_{ij}} \quad (5)$$

其中, R_i 表示光层中的 OTN 节点 i 的节点占用率; N_d^i 表示光层中传输的系统保护业务数量; δ_{di}^o 表示给定系统保护业务 d 是否通过 OTN 节点 i 传输,取 0 时表示不通过 OTN 节点 i 进行传输,取 1 时表示通过 OTN 节点 i 进行传输; f_d 为系统保护业务 d 所占的链路容量,考虑到采用同种系统保护业务所占链路容量相同,取 $f_d = 1$, V 表示光层 OTN 节点集合; W_{ij} 表示光层链路 ij 的链路容量。如系统保护业务 d 的传输路径为 $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 2$, 光层链路 35 和 52 的链路容量均为 10, 则光层中的 OTN 节点 5 的节点占用率 $R_5 = \frac{2 \times (1 \times 1)}{10 + 10} = 0.1$ 。

由于标准差具有衡量数据波动程度的数学特征,本文根据标准差物理意义定义了节点均衡度。它反映了全网节点占用率的均衡程度,用于衡量本文方法和对比方法的均衡性能。采用式(6)作为系统保护业务负载均衡路由规划优化目标。

$$\text{Min} \sigma_{\text{node}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^P (R_i - \bar{R})^2}{P}} \quad (6)$$

其中, $\bar{R} = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P R_i$, R_i 表示系统保护通信专网的节点占用率均值, P 表示光层 OTN 节点(包含中继节点)的数

量, σ_{node} 表示系统保护通信专网节点均衡度,为系统保护业务负载均衡路由规划优化目标。

2.3 模型方法求解

为了实现系统保护业务负载均衡路由规划模型,本文提出了考虑负载均衡的系统保护通信专网路由规划方法,流程图如图 2 所示。

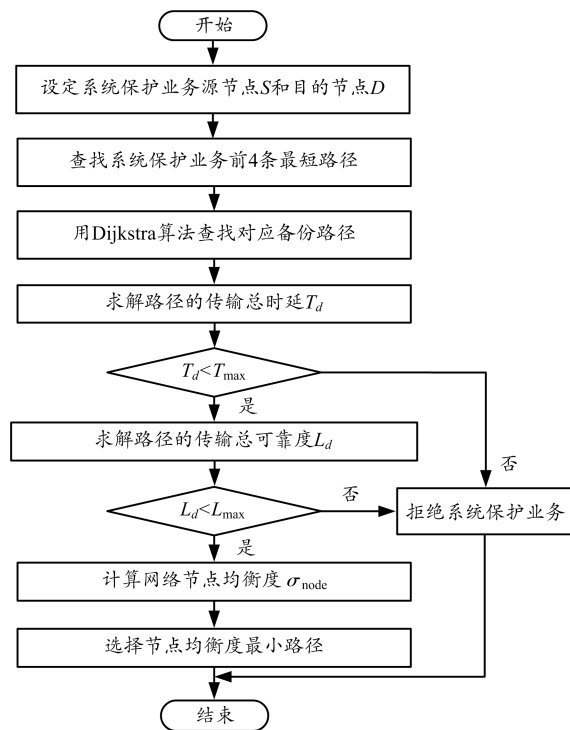


图2 考虑负载均衡的系统保护通信专网路由规划方法流程图

路由规划具体过程如下:

- ①设定系统保护业务的源节点 S 和目的节点 D 。
- ②查找系统保护业务 d 的前 4 条最短路径, 作为主路径的候选路径。
- ③对于每一条候选主路径, 暂时移除主路径所过节点及相应链路, 利用 Dijkstra 算法查找每条候选路径的备份路径^[10]。
- ④根据式(1)和式(2)分别求解每个方案的传输总时延, 保留满足时延约束的方案, 否则舍弃。
- ⑤根据式(3)和式(4)分别求解每个方案的传输总丢包率, 保留满足可靠性约束的方案, 否则舍弃。
- ⑥根据式(5)和式(6)计算保留方案的节点均衡度, 选择节点均衡度最小的方案作为系统保护业务 d 的传输方案。

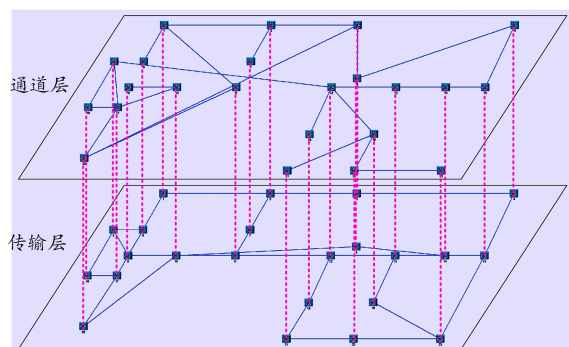


图3 某省系统保护通信专网 OTN 拓扑图

3 实验仿真和对比分析

3.1 实验设置

本文用于算例分析的网络拓扑图为某省系统保护通信专网 OTN 拓扑图,如图3所示。该拓扑图包含23个 OTN 节点和30条链路,最多能承载 $C_{23}^2=253$ 路系统保护业务,随机均匀产生1组业务请求矩阵,业务数为126,在节点均衡度和节点占用率对比实验中,均采用相同的126路系统保护业务。为了简化仿真实验,节点均衡度和节点占用率对比实验是在保证126路业务均加载的情况下进行分析的。在业务请求拒绝率对比实验中,随机均匀产生1组业务数为180的业务请求矩阵。仿真实验中考虑同种系统保护业务,假设系统保护业务所占的链路容量为1,对应设置链路最大容量为60。本文按照上节所提方法设计仿真实验,并与K条最短路径(KSP)算法进行对比,KSP算法对于每条业务仅在系统保护通信专网中查找前2条最短路径作为主传输路径和物理1+1备份路径。

3.2 实验内容和指标

实验分析包含三部分:节点均衡度、节点占用率和业务请求拒绝率对比。

为对比本文方法与KSP算法的性能,首先定义节

点占用率均值增加度 $I_i = \frac{\bar{R}_i - \bar{R}_i^{\text{KSP}}}{\bar{R}_i^{\text{KSP}}}$ 为添加相同 i 条系统

保护业务时本文方法的节点占用率均值相对于KSP算法增加的量,其中 $\bar{R}_i$ 和 $\bar{R}_i^{\text{KSP}}$ 分别为添加 i 条系统保护业务时本文方法和KSP算法的节点占用率均值;然

后定义节点均衡度减少度 $D_i = \frac{\sigma_i^{\text{KSP}} - \sigma_i}{\sigma_i^{\text{KSP}}}$ 为添加相同 i

条系统保护业务时,本文方法节点均衡度相对于KSP算法减少的量,其中 σ_i 和 σ_i^{KSP} 分别为添加 i 条系统保护业务时本文方法和KSP算法的节点均衡度。定义业务请求拒绝率 $FRR = \frac{N_{\text{rej}}}{N_{\text{load}}}$ 为加载 N_{load} 条系统保护业务时被拒绝业务数占总加载业务数的比例,其中 N_{load} 为加载的系统保护业务总数, N_{rej} 为加载 N_{load} 条系统保护业务时被拒绝的系统保护业务数。

3.3 PSCPlanner 实验环境构建

PSCPlanner 仿真平台本身采用目前较为成熟的业务通道最短路径承载分配算法和业务通道 RWA 承载分配算法这2种算法进行业务路径的分配。为了搭建本文方法中的实验环境,本文对网络的通道层进行了二次开发,具体搭建步骤如下:

①在传输层建立通信网络拓扑,设置节点名称、设备类型、厂商、波长粒度、波长数、是否支持波长转换和通信环境;设置链路名称、链路类型、长度和带宽。

②由于PSCPlanner在分配业务时,集成了成熟的算法,无法直接实现本文所提方法和用于对比的KSP算法。当2个OTN节点相连时,考虑到选择两节点直接相连的链路能使传输时延及波道资源占用达到最优,先计算好本文方法和KSP算法的业务路径,并在仿真平台的通道层按逐条链路方式添加相应的系统保护业务,通道层各条链路承载了多路业务。设置好通道层后,点击“业务通道RWA承载分配”按钮或“业务通道最短路径承载分配”按钮进行业务分配,完成本文方法和KSP算法的PSCPlanner平台实现。

③PSCPlanner支持对网络多项数据进行分析,包括节点总数、链路总数、通道总数、阻塞通道数、通道阻塞率、网络利用率、风险均衡度、网络冗余度和网络生存性。本文方法加载时是逐条添加的,因部分参数不具有研究意义,主要考虑网络的节点总数、链路总数、网络利用率、风险均衡度和网络冗余度等参数。

3.4 节点均衡度对比实验

分别采用本文方法和KSP算法为该网络配置相同的126路系统保护业务,且126路系统保护业务均成功加载。同时,每添加10路系统保护业务计算一次节点均衡度,仿真结果如图4所示。可以看出,随着网络中添加的系统保护业务数量不断增加,本文方法和KSP算法的节点均衡度均增加。这是由于网络中系统保护业务数量增加,各节点承载了不同数量的系统保护业务,节点占用率差异性增大,破坏了节点间的承载业务数量平衡;随着系统保护业务数量的增加,本文方

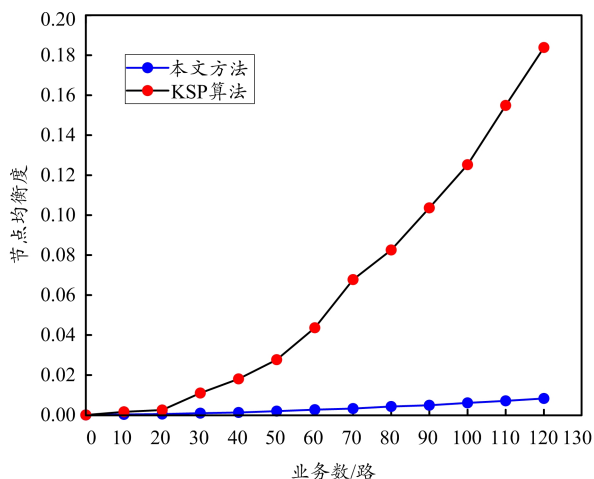


图4 节点均衡度对比图

法的节点均衡度增长速度比 KSP 算法慢,表明本文方法在添加新系统保护业务时比 KSP 算法更具优势,可以减少添加系统保护业务时网络性能的波动;当添加相同数量的系统保护业务时,本文方法的节点均衡度明显低于 KSP 算法,并且添加的系统保护业务越多,这种优势越明显,可预见本文方法运用于中大型系统保护通信专网时,会有较好的性能。

3.5 节点占用率对比实验

分别采用本文方法和 KSP 算法添加 126 路系统保护业务,记录各节点的节点占用率,算例仿真结果如图 5 和表 1 所示。表 1 中, $\bar{R}_{node}$ 表示节点占用率均值, σ_{node} 表示节点均衡度。

从图 5 和表 1 可以看出,当添加的系统保护业务数量为 126 时,本文方法的节点占用率最大值为 34%,最小值为 13%;KSP 算法的节点占用率最大值为 50%,最小值为 1%。由此可见,采用本文方法添加系统

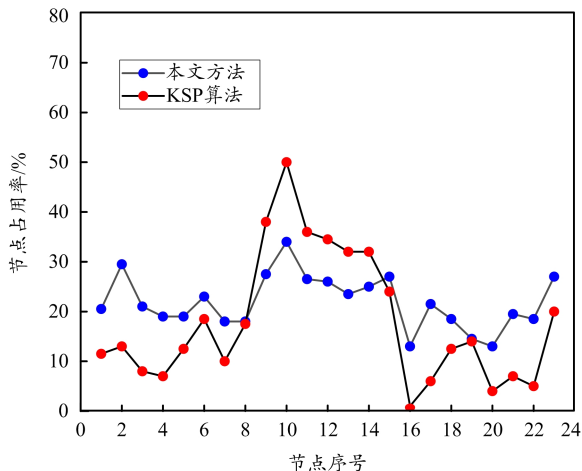


图5 节点占用率对比图

表 1 节点占用率对比表

方法	$\bar{R}_{node}/\%$	σ_{node}	节点占用率 最大值/%	节点占用率 最小值/%
本文方法	20	0.0053	34	13
KSP 算法	18	0.1884	50	1

保护业务的网络节点占用率波动范围较小,这是因为本文方法在添加每路系统保护业务时,不仅考虑了资源最小利用准则,同时考虑了当前网络的节点波道占用情况;本文方法的节点均衡度的节点占用率均值与 KSP 算法相比互有高低,这是因为本文方法在添加新系统保护业务时,为了兼顾新业务占用波道情况和当前网络波道占用情况,会选择次最短路径来为新系统保护业务分配传输路径,这在一定程度上提高了整个网络的节点占用率均值。

为了进一步探究本文方法和 KSP 算法的节点占用率特性,在添加新系统保护业务时,每添加 10 路系统保护业务,记录节点占用率均值,算例仿真结果如图 6 所示。同时,计算 2 种方法的节点占用率均值和节点均衡度的增减幅度并进行对比,如图 7 所示。

从图 6 可以看出,当系统保护业务数量增加时,本文方法的节点占用率均值均高于 KSP 算法。结合图 7 可知,与 KSP 算法相比,本文方法的节点占用率均值增加了 38%,但节点均衡度减少了 93%。在节点均衡度上的减少量约为节点占用率均值增加量的 2.4 倍,因此本文方法优于 KSP 算法。

3.6 业务请求拒绝率对比实验

分别采用本文方法和 KSP 算法为系统保护通信专网配置相同的 180 路系统保护业务,每添加 10 路系统保护业务记录业务请求拒绝率,仿真结果如图 8

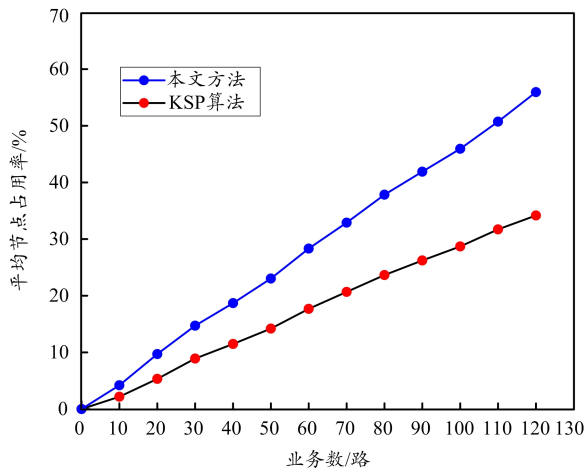


图6 节点占用率均值对比图

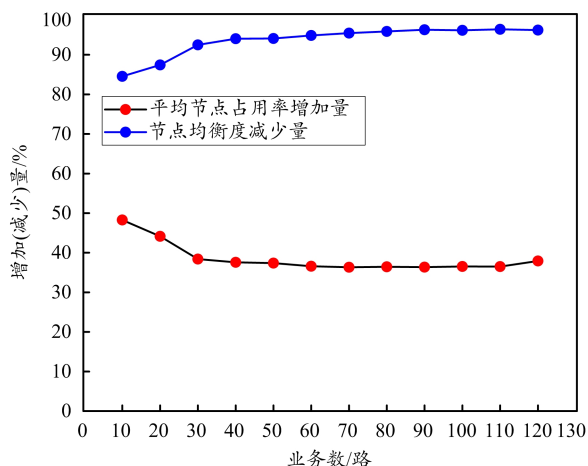


图7 节点占用率均值和节点均衡度增减幅度对比图

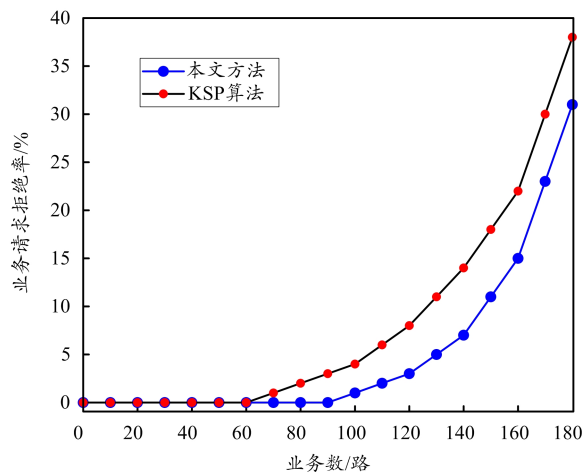


图8 系统保护业务请求拒绝率对比图

所示。可以看出,随着网络中添加的系统保护业务数量不断增加,本文方法和 KSP 算法的业务请求拒绝率均增加,这是由于网络中系统保护业务数量增加,网络资源逐渐消耗,当节点占用率达到使用上限,该节点将不能再承载新系统保护业务,业务请求拒绝率升高。随着系统保护业务数量的增加,本文方法在业务数大于 90 路时出现业务拒绝,而 KSP 算法在业务数大于 60 路时已出现业务拒绝;当添加相同数量的系统保护业务时,本文方法的业务请求拒绝率低于 KSP 算法,这是由于本文方法在添加业务时考虑了网络中各节点业务的占用情况,能够使各节点占用率保持在相近的水平,在不出现业务拒绝的情况下可以承载更多的系统保护业务,出现业务拒绝时也能保持较低的业务请求拒绝率。

4 结束语

本文提出了考虑负载均衡的系统保护通信专网

路由规划方法,适用于解决现有系统保护通信专网局部节点和链路过载问题。根据标准差物理意义定义了节点均衡度来衡量系统保护通信专网的均衡性能,通过 PSCPlanner 仿真软件进行分析,本文搭建的系统保护业务负载均衡路由规划优化模型能够满足系统保护通信专网规定的系统保护业务时延的要求,降低了业务请求拒绝率;与 KSP 算法相比,在增加了 38% 的节点占用率的条件下,本文方法的节点均衡度降低了 93%,具有更好的均衡性能。此外,本文方法不仅适用于系统保护业务,在对时延等特性进行微调情况下,可将本文方法推广到传统电力通信网领域。

下一步工作将考虑不同系统保护业务之间的带宽差异性,结合智能算法,继续深入研究系统保护业务相关的电力通信网优化规划。

参考文献:

- [1] 丁明吉,蒋攀,钟震林,等. 100G OTN 设备线路侧接口互通技术[J]. 光通信技术,2020,44(7):24-27.
- [2] 刘川,黄在朝,陶静,等. 考虑排队时延的系统保护通信网络路由选择算法[J]. 电信科学,2018,34(10):47-52.
- [3] 贾惠彬,薛凯夫,马静,等. 广域保护通信多路径路由选择的改进蚁群算法[J]. 电力系统自动化,2016,40(22):22-26.
- [4] 李彬,卢超,景栋盛,等. 负载与风险联合均衡的电力通信网路由优化算法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(9):2713-2723.
- [5] XING N, XU S, ZHANG S, et al. Load balancing-based routing optimization mechanism for power communication networks [J]. China Communications, 2016, 13(8): 169-176.
- [6] 刘丽榕,王玉东,马睿,等. 电网系统保护业务分析及通信承载方案研究[J]. 电力信息与通信技术,2017,15(12):12-18.
- [7] 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.
- [8] 王智慧,汪洋,秦璇,等. 系统保护业务需求分析及通信技术研究[J]. 电力建设,2017,38(5):116-123.
- [9] 刘林,祁兵,李彬,等. 面向电力物联网新业务的电力通信网及发展趋势[J]. 电网技术,2020,44(8):3114-3130.
- [10] 胡心亭. 基于风险均衡的系统保护专网业务备用路径规划方法[D]. 北京:北京邮电大学,2019.
- [11] 祁兵,刘林,李彬,等. 基于等势 P 圈的电力通信骨干网保护优化[J]. 中国电机工程学报,2019,39(13):3799-3807.
- [12] 祁兵,刘思放,李彬,等. 基于业务优先级和 SRLG 的电力需求响应业务调度优化算法[J]. 电网技术,2019,43(7):2393-2402.
- [13] KATIB I, MEDHI D. IP/MPLS over OTN over DWDM multilayer networks: an integrated three-layer capacity optimization model, a heuristic, and a study [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2012, 9(3): 240-253.