

基于故障链路资源分离的电力光缆备用路由资源配置方法^①

陈永卫¹, 向志敏¹, 李 中², 郭利花²

¹(湖南省电力公司信息通信分公司, 长沙 410007)

²(华北电力大学 电气与电子工程学院, 保定 071003)

摘 要: 为了保障电网远程调度通道的可靠性, 同时提高光缆网络资源的利用效率, 基于共享备份通道保护方法耗费资源量大、阻塞率高等问题, 提出一种基于故障链路组分离的资源配置方法, 在构建保护通道时, 根据所形成的资源链路组进行保护资源的配置管理, 将主路由、备用路由的资源进行标记, 采用分组配置方式提升备用通道的利用效率, 从而实现主用工作路由资源的节省。最后, 针对不同的网络仿真场景对所提出的方法进行验证, 并对性能指标进行了理论分析。

关键词: 光缆路由; 备用资源配置; 故障分离; 生存性

Backup Resource Allocation Approach for the Electric Power Optical Network Based on Failure Group Separation

CHEN Yong-Wei¹, XIANG Zhi-Min¹, LI Zhong², GUO Li-Hua²

¹(State Grid Information&Communication Company of Hunan Electric Power Corporation, Changsha 410007, China)

²(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In order to ensure the reliability of the remote dispatching network and improve the utilization efficiency of optical cable network resource, this paper presents a resource allocation approach based on fault link group separation to solve the problem of high resource cost and block probability of shared Backup Path Protection approach. In the construction of protection channel, management of protected resources can be allocated according to the formation of the resource link group. It utilizes the main routing and alternate routing tag to improve the utilization efficiency of backup channel, realizing the saving of the main working route resource. Finally, the proposed method is verified under different network simulation scenario, and the performance is also analyzed in theory.

Key words: optical routing; backup resource configuration; failure separation; survivability

随着电力通信网络规模的快速扩张, 单通道容量正在从 10Gbps 向 100Gbps 发展, 若网络通道出现故障, 涉及电力业务通道数量巨大。在国网公司大容量骨干通信网络建设方案中, 普遍采用 2.5Gb/s 与 10GE 的数据网出口速率, 据统计在十二五期间, 各网省公司至三地数据中心的信息流量平均水平已经上升为 2.5-5 Gb/s, 全网平均需要约 100Gbps 以上的传输容量, 现有传输网络已经无法满足如此巨大的带宽需求。如果在现有的 SDH 传输网络基础上扩容, 约需新建约 10 条至上海、北京、西安容灾中心的 10 Gb/s 光纤电路,

网络建设与维护难度极大。因此, 提高网络的资源利用效率成为目前急需解决的问题。

电力通信网络的演进大体符合复杂网络的演化规律, 其发展过程中经历了从简单规则向复杂演化逻辑的变迁, 从 ER 随机图网络^[1]、WS 小世界网络^[2]到后来的 BA 无标度网络模型^[3], 所建网络模型也越来越符合真实的网络特征。根据所承载的电力业务不同, 从网络方式上可以分为动态业务和静态业务两类, 其中静态业务大多是网络管理人员根据经验或者网络的规划所指定, 而动态业务的路由方式往往是在业务的具

① 收稿时间:2016-10-11;收到修改稿时间:2016-12-05 [doi: 10.15888/j.cnki.csa.005855]

体执行过程中才能确定, 具有较大的不确定性. 预配置保护环(P 圈)是最近在电力通信网络中出现的一种新型的格状网络保护方式, 通过利用已经配置的保护资源同时为环上链路、跨接链路提供保护, 具有传统环网所不具有的效率. 目前, 关于P 圈的研究较多, 大多集中在 P 圈的候选集构建^[4]、P 圈的物理结构设计^[5]、P 圈的保护资源配置^[6,7] 等方面, 而考虑特定业务的共享风险性保护研究相对较少. 在文献[8]中初步针对电力业务的特点对 P 圈的资源配置进行了特殊化设计. 在电力调度通信网络中, 运行控制类业务(如: 继电保护、安全稳定装置、调度自动化)属于优先级较高的业务, 其数据传输可靠性将直接影响到电网的安全和稳定运行, 对此类业务具有极高的传输时延、生存性要求, 在电力光缆路由资源配置时需要重点考虑其保护性能, 此类业务在正常路由时也是不允许出现任何主用通道阻塞的. 以电网稳控业务为例, 通常稳控装置在主站、子站及执行站之间通过独立的通道进行传输, 信号延迟一般不超过 30ms, 并且要求每套稳控系统的数据通道均完全分离, 一旦网络出现不可避免的故障时, 网络能够快速切除故障链路, 并将调控信号转移到备用数据通道.

本文根据电力通信网络拓扑和业务流量、流向特征, 提出了一种能够满足动态电力业务调度需求的共享风险的资源配置方法, 该方法根据动态模拟的结果可以选定某条特定的业务的主用及备用路由方式. 为了说明所提方法的有效性, 针对目前广泛在用的 SBPP 共享备份通道保护方法^[9]进行了仿真比较.

1 问题描述

随着电网规模逐渐扩大, 电网的智能化与信息化发展离不开信息通信技术的支撑. 按照传输资源的分类方法, 对于端到端的电力光缆路由资源应当细分为占用波道、预占用波道、维护波道、冗余波道, 在动态路由过程中维护波道需要保持资源的常备状态, 因此不能参与在线路由计算^[10]. 维护波道是为保障电力通信网络的故障抢修和日常维护测试以及为业务落地提供专用的业务接口, 通常不会超过总资源的 10%. 预占用波道与冗余波道均可以为电力光缆备用路由提供保护和恢复路径, 并且在业务开放站点放置上下路 OTU. SBPP 保护方法在构建保护通道, 分配保护资源时, 可利用保护通道的共享机制来提升网络的资源利

用效率, 但却无法达到完全保护的水平. 图 1 中分别给出了 SBPP 保护失效的场景分析, 其中业务通道的工作路径(蓝色实线)以及业务的保护路径(绿色虚线).

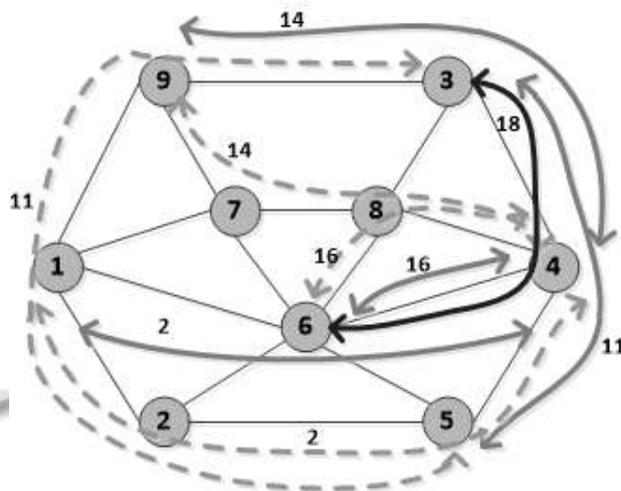


图 1 SBPP 业务通道保护失效说明

假定某条业务连接(编号 18)的主路由为 3-4-6, 它与业务连接 16(主路由为 4-6)、业务连接 2(主路由为 1-6-4)、业务连接 11(主路由为 5-4-3)和业务连接 14(主路由为 4-3-9)存在部分相关链路, 因此, 业务连接 18 的备用路由需要满足与全部业务连接的备用路由均互不相交的条件. 业务连接 11 的备用路由(5-2-1-9-3)和业务连接 18 的主路由占用了路由节点 3 的两个出口链路, 为了满足工作保护路径分离的原则, 业务连接 18 的备用路由唯一能够选用的链路仅有链路 3-8, 但是路由节点 8 的所有其它链路均已被占备用路由(14 的备用路由 4-8-7-9 和 16 的备用路由 4-8-6)占用. 由此可见已经没有任何的可用链路资源能够为业务连接 18 的中间路由节点 8 提供空闲的备用路由资源, 导致 SBPP 保护失效.

在电力通信承载网络中, 不同的网络生存性策略对的备用资源消耗影响较大, 如果保护策略与故障独立, 则无需提供实时故障定位以确定所用保护方法^[11]. 考虑到在故障定位过程中需要额外的故障检测环节, 采用基于通道的生存性策略相比基于链路的保护策略具有更高的保护效率. 因此在发生故障时, 可以直接将受到影响的故障业务路由切换到备用通道上, 而无需考虑具体的故障位置, 算法也具有较高效率.

在电力通信网络中, 高等级业务的业务传输主路由与备用路由需要完全分离, 尤其是在出现主用、备

用通道同沟同缆的情况下，一旦故障发生，将无法实现故障路径与主路由的分离。但是，考虑到网络的实际成本，备用路由往往可以共享空闲容量，当网络发生故障后，可以在倒换完成时立即启动新的保护通道配置。在配置业务子波道时 N*10Gb/s WDM 系统中的 GE、2.5G 业务通道经由 TMUX 子速率复用器汇聚，路由应当优先遵循 OTM 站点最少、光缆路由最短原则，以降低系统成本。

2 故障链路资源分离配置算法

在网络资源受限的条件下，如果主路由完全不相关，则可以通过网络保护资源复用来提高网络的整体资源利用效率。如图 2 所示，网络中具有两条业务主路由，分别为 1-6-4 和 5-6-7-9，其对应的保护通道分别为 1-2-5-4 和 9-1-2-5，其保护通道可以共享链路 1-2 和 2-5 上的保护容量。对于可靠性业务传输的基本要求是，任意一个主路由的保护容量均不可以被其它工作通道的资源所用。基于通道的保护，采用完全端到端的容量配置方式，既可以避免故障定位，又可以实现故障的快速切换。SBPP 方法目前主要应用在电信领域，由于普通的数据业务在保护失效时，还可进一步启动快速重路由方式进行恢复，但是对于电力调度业务则无法接受二次恢复过程所带来的额外延迟。

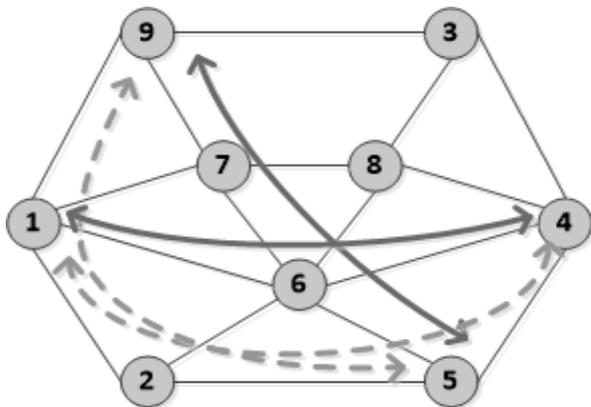


图 2 故障分离资源配置原理

根据电力通信网络传输通道的安全性保障原则，业务电路的备用资源配置需要能够满足 1+1/1:1 的配置关系，原则上应当具备双平面、双系统支撑，并能够实现电力负荷自动分担的配置方式^[12]。若考虑网络多故障的情况，资源的配置方式与传统单故障的保护方式略有不同，例如：对于双链路故障，若需要实现

业务的完全保护，则需要网络中任意两个节点之间至少存在三条可迂回的路径，核心交叉连接点的连通度至少为 3。若在网络局部区域无法满足上述要求时，则只能通过网络的动态重构来实现。已有研究成果表明，双链路故障完全保护所需配置的保护资源约为单链路故障保护所需资源的三倍，在目前电力综合数据网已经出现明显资源不足的情况下，这显然是不切实际的。在网络设计过程中，需要采用共享风险链路组的方式，将与某个故障关联的链路组形成资源绑定关系，从而提升备用资源的利用效率。通过节省网络的备用资源用量，进而可将备用容量作为主用工作通道，亦可降低网络的阻塞率。为提高资源利用效率，备用路由通道应当满足最短路径的限制条件，但是考虑到共享型资源保护方式的条件下，备用通道资源利用效率的高低不应将路径长度作为单一的优化目标，备用保护圈上的共享跨越链路数也应是一个关键因素。此外，可能还包括业务转接数、系统总体容量均衡等因素。由此，本文重点考虑故障链路组分离的需求，提出了一种故障链路组分离(FGSP, Failure Group Separated Algorithm)的 P 圈保护模型设计方法。

在网络资源配置过程中，首先将网络中存在的业务连接对进行排序，采用长跨距优先原则，防止后续长路径找不到可用的保护资源，针对业务序列对逐个预路由，确定网络业务路径，并进行着色标记，将不同的业务路径组及故障备份链路进行编号。后续的资源采用 ILP 模型进行配置。假定在网络中的备选圈集合 P，用 p 表示单个圈的序号，具体模型如下：

$A_r^p \in \{0,1,2\}$ ：业务路径保护指示符， $A_r^p = 2$ 表示业务路径 r 的跨越链路保护， $A_r^p = 1$ 表示圈上链路保护， $A_r^p = 0$ 表示圈 p 无法提供保护。 d_r 表示业务路径 r 的工作容量， n_p 表示圈 p 的配置容量； $B_i^p \in \{0,1\}$ ：链路归属指示符，如果链路 i 属于圈 p，则 $B_i^p = 1$ ，若链路 i 不在圈 p 上，则 $B_i^p = 0$ 。 $s_i \geq 0$ ，表示链路 i 的备用容量需求量， c_i 表示链路 i 的权值，

目标函数：

$$\text{Minimize } \sum_{i \in S} c_i s_i$$

约束条件：

$$\sum_{p \in P} A_r^p n_p > d_r, r \in D \tag{1}$$

$$\sum_{p \in P} B_i^p n_p = s_i, i \in S \tag{2}$$

该模型用于网络业务在实现完全保护时, 最小化资源利用. 其中, 式(1)用于保障网络中的保护资源配置能够覆盖网络中的链路资源需求, 式(2)用于单条链路的备用容量配置.

上述计算模型采用 ILP 优化工具箱求解, 表 1 给出了 FGSP 与 SBPP 的通道保护结果, 其中圈的编号和

容量配置参见表 2. 由结果可知, SBPP 共存在 3 条业务通道并未完全保护, 这主要是由于 SBPP 保护方法在分配保护资源时, 虽然利用保护通道的共享机制来提升网络的资源利用效率, 但却无法达到完全保护, 其详细原因分析可参见论文第 1 部分 SBPP 算法失效性分析.

表 1 各业务路径 FGSP 与 SBPP 的保护资源分配机制比较

连接请求	通道路径	FGSP-P 圈 (提供的保护容量)	SBPP 保护路径	连接请求	通道路径	FGSP-P 圈 (提供的保护容量)	SBPP 保护路径
1	1-2-5	2(1),3(1)	1-6-5	13	5-6	3(1),6(1)	5-4-6
2	1-6-4	3(2)	1-2-5-4	14	4-3-9	3(1),4(1)	4-8-7-9
3	1-9	2(1),3(1)	1-7-9	15	4-8-7	4(1),5(1)	4-6-7
4	1-7	2(2)	1-9-7	16	4-6	4(2),6(1)	4-8-6
5	1-7-8	3(2)	1-6-8	17	3-9-7	5(2)	3-8-6-7
6	1-6	2(2)	1-7-6	18	3-4-6	1(2),5(1)	-
7	2-6-8-3	3(1),4(1)	2-5-4-3	19	9-7	1(1),2(2),4(1)	9-1-7
8	2-1-9	4(2)	2-6-4-3-9	20	9-3-8	1(1),2(1)	-
9	2-6-8	2(2)	2-1-7-8	21	9-1-6	1(2)	-
10	5-4	3(2),4(1),6(1)	5-6-4	22	7-8	1(2),2(1)	7-9-3-8
11	5-4-3	2(2)	5-2-1-9-3	23	7-6	1(1),5(1)	7-8-6
12	5-6-7	2(1),4(2)	5-2-1-7	24	8-6	1(1),5(1)	8-4-6

表 2 9n17s 网络 FGSP-P 圈配置

圈编号	圈路径	圈容量数	所需圈个数
1	7-6-8-3-9-7	5	1
2	1-9-3-8-7-6-5-2-1	8	1
3	4-3-9-1-2-5-6-8-4	8	1
4	4-3-9-7-8-6-2-5-4	8	1
5	4-3-8-7-6-4	5	1
6	5-6-4-5	4	1

在对 9 节点网络进行压力测试时, 发现当网络存在 78 条业务连接通道时, 配置 FGSP 圈的方式总备用容量(保护容量)仅为 37, 网络冗余度为 0.4744, 相比传统的保护方式具有比较明显的优势. SBPP 虽然通过共享保护资源提供保护资源的利用效率, 但采用通道保护的方式极大程度上限定了其保护的灵活性, 共享资源的复用度相比 FGSP 方法较弱, 而且存在 3 个业务通道无法保护. 究其原因, 主要是非跨接链路的资源共享方式所造成的, 保护通道仅针对通道保护, 在配置保护资源时极易出现带宽配置过于密集的情况, 从而导致某条线路的备用资源耗尽. 此外, 保护资源的低

复用度会占用额外的业务通道, 还会影响网络正常业务在连接建立过程中的业务阻塞率.

3 仿真结果分析

网络仿真拓扑采用图 1 给出的 9 节点网络拓扑以及经典的泛欧 COST-239 网络, 网络连接采用随机流模拟的方式, 业务带宽需求满足[1,5]随机分布, 业务连接规律服从泊松模型规律. 本文资源配置模型采用 Matlab 优化工具箱的整数线性规划函数求解.

当网络中业务连接数目相同时, 为了模拟业务的动态性, 仿真实验随机选取不同业务的起止节点, 构建由随机节点产生的业务连接组合成特定的业务通道集, 显然针对不同的业务通道集的配置结果并不相同, 且与网络拓扑结构还存在一定关系.

本文选用示例中的 9 节点拓扑和泛欧 COST-239 拓扑进行仿真模拟. 为保障仿真结果的准确性, 在固定的业务连接上随机选取 12 组不同的业务通道集, 最终结果统计对 10 组业务通道集的平均结果作为参考和比较. 由于 SBPP 方法在配置保护资源时, 可能会发

生阻塞,此时对 SBPP 的冗余度统计已经不具有参考意义. 由于所采用的业务路由方法一致,当网络出现阻塞率(业务路由阻塞或者保护路由阻塞均计入)时,已经无法满足正常工作路由的带宽需求,其资源配置具有更高的冗余度. 具体结果如图 3、图 4 所示.

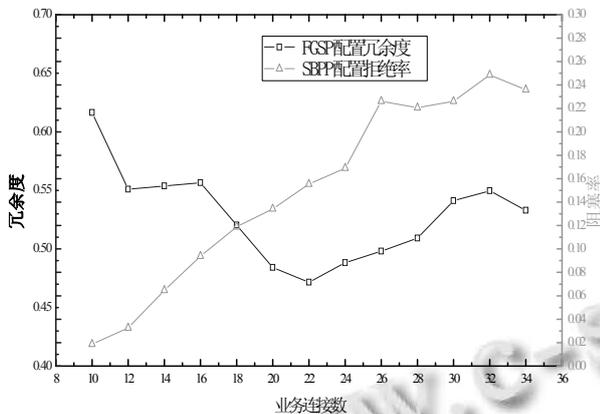


图 3 九节点网络模型保护配置

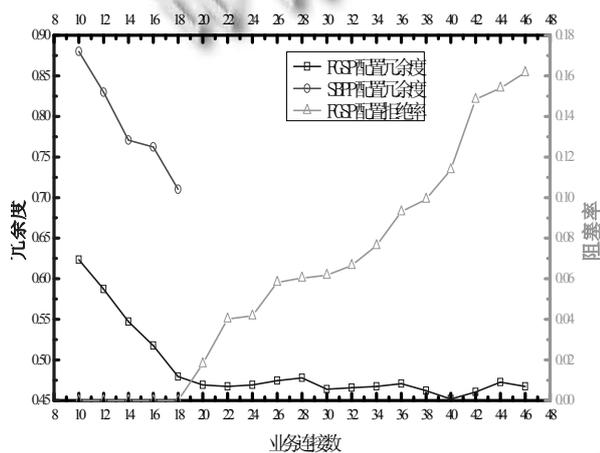


图 4 泛欧 COST239 网络模型保护配置

图 3 给出了 9 节点拓扑下的资源配置情况,此时 SBPP 已经发生了业务阻塞,再比较两种算法的冗余度已经不具有任何意义. 为了清晰地表明二者的规律,本文将 SBPP 的阻塞率与 FGSP 的资源冗余度进行比较,可以看出 FGSP 的冗余度在初始时随着业务连接数增加而减小,在具有 22 条业务连接数的时候达到冗余度的最低值 0.47. 在不同场景下,只有在业务连接数为 20~26,配置冗余度小于 0.5 时,保护效率较高,这是由于随着网络业务数量增大,可以复用共享的资源利用效率提升,而此后的资源冗余度的增大,是因为在达到最低冗余度后,网络的资源配置受到故障相关性因素影响导致最优化的保护路由无法有效寻找到

可配置的连通路,导致冗余度逐步上升. SBPP 的业务阻塞率基本随着业务连接数增加持续增大,在业务连接数 32 时已经接近 0.25,这是由于 SBPP 的资源复用度较低造成的,业务连接数越多,其阻塞的几率越大.

由于 9 节点的网络连通度相对较低(FGSP 的冗余度大多在 0.5~0.6 之间),本文还选择了经典的网络拓扑-泛欧 COST239 拓扑. 虽然两个网络的节点数量差不多,但是 COST239 具有更高的紧密度,能够更有效的体现出本文算法的性能. 在业务量较小时(10~16 业务连接),所配置资源的冗余度大多集中在 0.45~0.5 间,而 SBPP 方法在网络负载较小时,也出现了无阻塞的情况,此时其冗余度在 0.7~0.9 范围内变化,由此也可以看出网络在大负载情况下,SBPP 会出现高阻塞率,这主要是因为保护资源耗费了大量的带宽,从而导致正常的工作路径无法建立. 由于 COST239 的可选路由较多,SBPP 阻塞率出现点所对应的网络负载接近于 9 节点拓扑的 2 倍.

为了详细说明不同业务集测试下的网络性能,本文在图 5 和图 6 给出了对应于 3 组业务负载场景下所对应的不同业务通道集的配置结果. 可见业务连接数目相同时,不同业务通道集的配置结果不同,但两个保护机制配置结果的变化趋势是一致的. 当 FGSP 所配置的保护圈配置冗余度较大时,SBPP 对应的阻塞率也较大,这说明其资源利用关系基本一致,当业务通道集中存在大量具有相交节点的业务通道时,其配置保护容量也会相应增多,其业务阻塞率也将随之增大.

考虑到资源的利用效率问题,对于多故障场景,可以采用冗余波道动态更新方式实现,一旦冗余波道被业务路由占用,则重新计算网络的资源连通度及可用性,低于下限时自动重新启动预留机制. 为了保障业务故障链路组分离,业务电路进行路由分担时,优先选择具有独立的物理路径的路由,其次再选择同沟不同缆、同缆不同沟的业务通道. 后面两种情况往往是在物理资源不足的情况下才会发生,而且对于单一 WDM 系统而言,在不同的子波道间应当尽量采用负荷均摊的原则,避免单个 OTU/TMUX 失效造成系统的全阻. 若两个节点之间存在异路由光缆且具有足够的备用资源时,可以采用主备用 1: N 的配置方法,但至少应当满足主备用波道分属于不同的光缆区域.

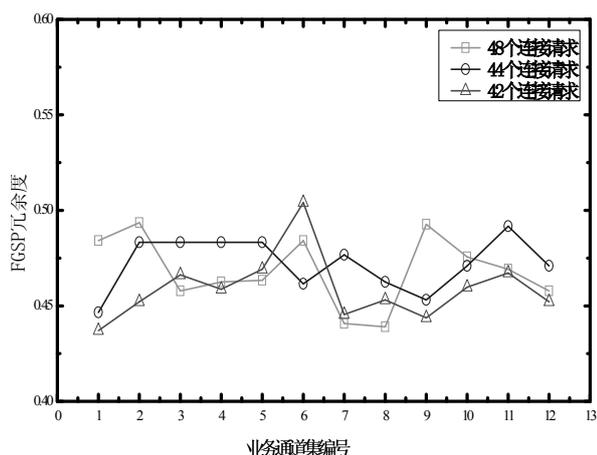


图 5 相同业务连接数目不同业务通道集的 FGSP 保护资源冗余度

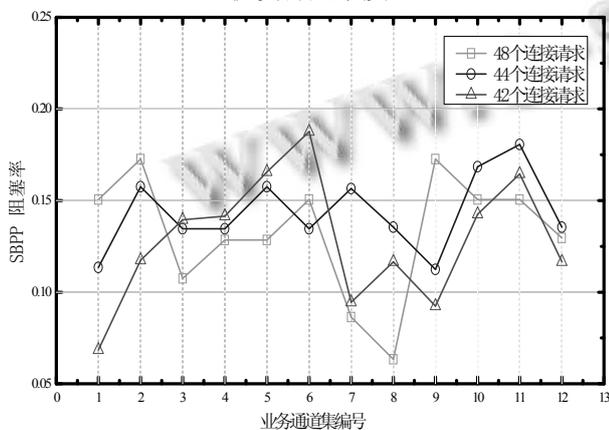


图 6 相同业务连接数目不同业务通道集的 SBPP 阻塞率

4 展望

实际系统中往往存在多种制式技术,比如当承载 SDH 的通道具有系统保护时, WDM 则无需配置波道保护,避免多次保护造成系统路由混乱问题,同时也可提高了系统资源利用率.而且,业务节点的双归电路所承担的 GE 或 2.5Gb/s 电路在接入 WDM 系统时,不应采用同板卡、同物理路由配置,避免业务的共享风险.在实际应用中,通信线路的部署往往受到杆塔资源的限制,而且大多连通度较低,还受到通信节点、线缆资源的归属权约束.在加入上述限制条件后,可能会导致 ILP 模型无解,因此在后续的研究中,可以采用与启发式算法配合的方式计算电力光缆的备用路由资源.此外,在跨接链路共享保护资源时,还应当遵守区域范围的保护通道配置原则,如某些区域

波 WDM 系统在 10 波以下时至少配置 1 个维护波道, 11~20 波具备 1~2 维护波道等要求,在设计保护 P 圈时,应当扣减相应的保护容量.因此,在后续的备用光缆路由由备用资源配置算法研究中还应当考虑到上述限制要求,在算法设计方面还有很多工作需要完善.

参考文献

- 1 Erdős P, Rényi A. On the evolution of random graphs. Publication of the Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Sciences, 1960, 38(1):17-61.
- 2 Watts DJ, Strogatz SH. Collective dynamics of 'small-world' networks. Nature, 1998, 393(6684): 440-442.
- 3 吴金闪,狄增如.从统计物理学看复杂网络研究.物理学进展,2004,24(1):18-46.
- 4 Wu B, Yeung KL, Ho PH. ILP formulations for p-cycle design without candidate cycle enumeration. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2010, 18(1): 284-295.
- 5 Panayiotou T, Ellinas G, Antoniadis N. P-Cycle-based protection of multicast connections in metropolitan area optical networks with physical layer impairments constraints. Optical Switching & Networking, 2016, 19(P2): 66-77.
- 6 Kamal AE. Network protection for mesh networks: Network coding-based protection using p-Cycles. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2010, 18(1):67-80.
- 7 丁玉龙,吴雯婷,徐荣青.基于链路容量有限的启发式 p 圈容量分配算法.光通信研究,2014,40(1):9-10.
- 8 李彬,杨娇,熊克卿,等.面向电力业务需求的 P 圈/快速重路由混合故障保护算法.电力系统自动化, 2016, 40(7): 113-120.
- 9 Shen G, Wei Y, Yang Q. Shared backup path protection (SBPP) in elastic optical transport networks. 2012 Asia Communications and Photonics Conference: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). 2012. PAF4C.6
- 10 Khan ZA, Faheem Y. Cognitive radio sensor networks: Smart communication for smart grids—A case study of Pakistan. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 40(40): 463-474.
- 11 曾瑛,仇英辉,樊冰,等.OTN 网状网中一种基于链路选择的 p 圈算法.光通信研究,2014,(1):25-27.
- 12 Lloret J, Canovas A, Sendra S, et al. A smart communication architecture for ambient assisted living. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(1):26-33.