

## 基于链路失效模型的多级电力业务路由规划

杨淑娜<sup>①</sup> 许嘉丽<sup>①</sup> 杨鸿珍<sup>②</sup> 赵玉虎<sup>①</sup> 池灏<sup>\*①</sup>

<sup>①</sup>(杭州电子科技大学通信工程学院 杭州 310018)

<sup>②</sup>(国网浙江省电力有限公司信息通信分公司 杭州 310018)

**摘要:** 该文从智能电网中电力业务多样性的角度出发, 分析不同类型业务对网络的可靠性需求。建立链路失效函数模型, 并基于该模型设计面向可靠性的路由规划方法。以网络阻塞率和资源利用率为指标, 通过与传统链路失效路由算法的比较分析来验证所提出方法的有效性。传统链路失效路由规划算法忽略了电力业务多样性, 对接入网络的业务请求无差别处理, 路由规划约束条件相对单一, 导致网络阻塞率较高。该文所提路由算法充分考虑了不同业务对网络需求的多样性, 依据业务等级调整目标函数并分别进行路由分配, 从而降低网络阻塞率, 提升网络可靠性和资源利用率。

**关键词:** 智能电网; 可靠性; 链路失效; 路由规划

中图分类号: TM715

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)11-3788-08

DOI: 10.11999/JEIT220565

## Availability-oriented Routing Algorithm for Planning Multi-level Power Service Based on Link-failure Model

YANG Shuna<sup>①</sup> XU Jiali<sup>①</sup> YANG Hongzhen<sup>②</sup> ZHAO Yuhu<sup>①</sup> CHI Hao<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

<sup>②</sup>(Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Considering the diversity of power services in smart grid, the reliability requirements of different levels of services are analyzed. A link-failure model is built, and an availability-oriented routing planning algorithm is designed based on the built model. The feasibility of the proposed algorithm, in terms of the network blocking rate and resource utilization, is validated by comparing with the classical link-failure routing algorithms. The classical link-failure routing algorithms ignore the diversity of power services, and process all service requests of the access network indiscriminately. The classical routing planning constraints are relatively simple, which leads to the high blocking rate. Regarding to the different requirements on the network availability from kinds of services, the routing algorithm proposed in this paper adjusts properly the target function and allocates the resource according to the incoming service. Thus, the network blocking rate is significantly reduced. Meanwhile, the network availability and resource utilization are greatly improved.

**Key words:** Smart grid; Availability; Link-failure model; Routing planning

### 1 引言

智能电网是一种自动化的综合应用型电力网络, 相比于传统网络, 智能电网在电力业务传输的

各个环节都表现得更加自动化、智能化<sup>[1]</sup>, 并且在各个环节都引入了大量新业务。随着现代社会的发展, 未来电网将会面临电力业务数量急剧增长, 业务种类不尽相同的情况, 这对网络传输的可靠性提出了更高的要求。目前主流的传输技术是光传送网(Optical Transmission Network, OTN)技术, 其融合了传统同步数字体系(Synchronous Digital Hierarchy, SDH)和波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)的优势<sup>[2]</sup>, 在能够提供巨大传输容量的情况下, 依然具有强大的保护和监控管理等能力。OTN技术可以在很大程度上提高电网运行的可靠性<sup>[3]</sup>, 但网络资源是有限的, 在面对未来

收稿日期: 2022-05-09; 改回日期: 2022-08-16; 网络出版: 2022-08-23

\*通信作者: 池灏 chihao@hdu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61901148, 61975048), 浙江省自然科学基金(LY22F050010, LZ20F010003), 国网浙江电力公司科技项目(5211XT20008R)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61901148, 61975048), Zhejiang Provincial Natural Science Foundation (LY22F050010, LZ20F010003), State Grid Zhejiang Electric Power Company Technology Project (5211XT20008R)

庞大的业务量和业务种类时，必须优化业务路由规划方法，提高网络性能。

在未来电网结构复杂化、业务多样化的发展趋势的驱动下<sup>[4]</sup>，网络可靠性成为网络性能评估的关键。影响网络可靠性的主要因素包括网络节点失效和光纤链路失效，其发生具有随机性。相比于网络节点失效，导致光纤链路失效的因素更多，如架设光缆的地理环境、气候、光缆的长度以及人为因素等，都有可能造成链路失效而发生业务中断，造成巨大的业务损失。因此，现有的提升网络性能的方法之一就是基于链路失效提出优化的电力业务路由规划方法，通过合理的路由选择，均衡网络负载，提高网络整体的可靠性。随着现代社会的发展以及各种应用的出现，网络业务多样性将成为网络性能优化时需考虑的一项重要问题<sup>[5-7]</sup>。然而，目前大部分的基于链路失效的路由算法均聚焦于失效链路的数量，忽视了网络业务的多样性在路由规划中的影响<sup>[8,9]</sup>。面对种类繁多的电力业务，网络规划者需针对不同的业务进行规划。因此，本文对电力业务的可靠性需求进行分析，并提出基于链路失效模型的多级电力业务路由规划方法。本文所提业务路由规划算法在传统业务路由规划算法的基础上进行了创新，其创新点包括：

(1)采用层次分析法对电力业务可靠性需求进行定量分析，为各电力业务设置不同重要度等级；

(2)建立链路失效模型，依据业务等级调整模型的目标函数并分别进行路由分配，实现不同电力业务在路由规划时的分级处理。

## 2 电力业务可靠性需求分析

### 2.1 电力业务可靠性需求定性分析

智能电网中的电力业务主要分为生产信息类业务和管理业务。生产业务主要包括继电保护业务<sup>[10]</sup>、安全稳定装置业务以及调度电话业务等，这些业务的作用是通过监测电网的实时状态以指导电网的运行，保障电网运作的可靠性，因此，生产类业务的实时性需求与可靠性需求都较高。管理业务主要包括会议电视业务、行政电话业务等，其作用是传输网络的管理控制信息，相比于生产业务，管理业务的实时性需求与可靠性需求相对较低。本文选取线路保护、保护管理系统、调度电话、调度自动化、视频会议、会议电视、行政电话、配电自动化、国家电网资源计划系统(State Grid-Enterprise Resource Planning, SG-ERP)业务等9种具有代表性的电力业务进行可靠性分析，表1给出了针对该9种业务可靠性需求的定性分析。

### 2.2 电力业务可靠性需求定量分析

电力业务可靠性需求的定性分析只能作为业务间可靠性相互比较的参考依据，某种程度上，定性分析是为了后续更为准确地进行定量分析。通过量化手段将定性分析的结果量化为直观的数据，更有利于电力业务可靠性需求与路径规划算法的结合。

本文采用层次分析法作为量化手段。层次分析法是一种常用的定性与定量结合的决策手段，该方法根据决策者的经验判断方案层中各个方案针对同一指标的相对重要程度，并合理地给出相应的重要度权重值，最后根据权重值求出各个方案的优劣次序。层次分析法具有系统性、简便性以及实用性的特点，其中，系统性是指层次分析法将对象视作一个系统，对该系统通过分解、比较、判断等操作完成决策；实用性是指层次分析法的应用范围十分广泛，可以比较有效地处理许多难以直接用定量方法解决的实际问题；简便性是指层次分析法计算简便，容易被决策者了解和掌握。

使用层次分析法量化电力业务可靠性的具体步骤是：

首先，建立层次结构模型。层次结构模型分为3层，最上层是目标层，中间层是指标层，最下层是方案层。此处将目标层设置为电力业务需求权重，将指标层设置为可靠性，将方案层设置为具体电力业务，并给电力业务进行编号。层次结构模型如图1所示。

其次，确定权重赋值标度并构造判断矩阵。权重赋值标度根据表1定性分析结果进行取值，常用标度为1/9~9，如表2所示，其中*i*和*j*分别代表两种不同的电力业务的编号。

构造判断矩阵时要满足 $C_{ij} > 0$ ； $C_{ij} = 1/C_{ji}$ ； $C_{ii} = 1$ ，判断矩阵构造如表3所示，其中 $C_i(i = 1, 2, \dots, n)$ 和 $C_j(j = 1, 2, \dots, n)$ 分别代表两种不同的电力业务， $B_k$ 代表可靠性重要度比较结果。

表1 各电力业务的实时性与可靠性要求

业务编号	业务名称	业务类型	可靠性要求
$C_1$	线路保护(继电保护)	数据业务	极高
$C_2$	保护管理系统	数据业务	极高
$C_3$	调度电话	语音、多媒体	极高
$C_4$	调度自动化	数据业务	高
$C_5$	视频会议	语音、多媒体	极高
$C_6$	会议电视	语音、多媒体	较高
$C_7$	行政电话	语音、多媒体	高
$C_8$	配电自动化	数据业务	一般
$C_9$	SG-ERP业务	数据业务	高

根据经典9种电力业务可靠性需求构造的判断矩阵, 结果如表4所示。

最后, 对判断矩阵进行计算得到业务可靠性权重赋值结果。具体的计算方法为: 对判断矩阵进行列向归一化, 对得到的新矩阵进行求和。最后再次进行列向归一化即可得到各电力业务的可靠性需求权重, 权重计算结果如表5所示。

### 3 光纤链路失效模型

#### 3.1 光纤链路失效概率

目前骨干网中的光缆大致分为3种, 分别是光纤复合架空地线(Optical fiber composite overhead Ground Wire, OPGW)、全介质自承式光缆(All Dielectric Self-Supporting optical fiber cable, ADSS)以及其他普通光缆。这3种光缆的可靠性性

能略有差异, OPGW的可靠性略高于ADSS光缆的可靠性, 普通光缆的可靠性相对最低, 因此目前光传输网中主要使用OPGW光缆。在大多数已有的研究中都将链路失效概率设置为固定值<sup>[11]</sup>, 实际上, 链路失效概率是动态的, 由链路长度、光纤失效概率及光纤修复概率共同决定。由于链路发生故障后可以修复以恢复至正常工作状态, 因此计算链路失效概率实际上等同于计算链路的可用性。可用性是指可维修产品在规定的条件下使用时具有或维持其功能的能力, 常用A来表示, 其计算表达式为

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \tag{1}$$

其中, 平均失效前时间(Mean Time To Failure, MTTF)表示系统无故障运行的平均值, 平均恢复前时间(Mean Time To Restoration, MTTR)表示系统从故障发生到维修结束时间段的平均值, 平均故障间隔时间(Mean Time Between Failures, MTBF)表示两次故障发生时间之间的时间段的平均值

$$MTBF = MTTF + MTTR \tag{2}$$

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \tag{3}$$

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \tag{4}$$

其中, 表达式(3)中的 $\lambda$ 表示每千米光缆的平均失效概率, 表达式(4)中的 $\mu$ 表示每千米光缆的平均修复概率。因此, 长度为L的第k条光纤的失效概率计算公式为

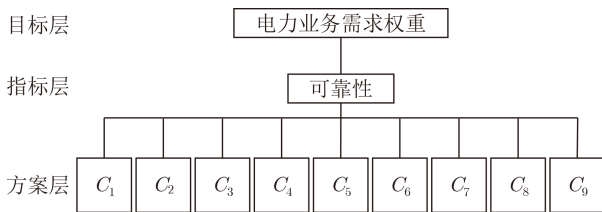


图1 电力业务可靠性需求层次结构模型

表2 电力业务重要度赋值方法

重要性等级	重要性标度
i与j同样重要	1
i比j稍微重要	3
i比j明显重要	5
i比j强烈重要	7
i比j极端重要	9
i比j稍微不重要	1/3
i比j明显不重要	1/5
i比j强烈不重要	1/7
i比j极端不重要	1/9

表3 判断矩阵构造方法

	$C_1$	$C_2$	...	$C_n$
$C_1$	$C_{11}$	$C_{12}$	...	$C_{1n}$
$C_2$	$C_{21}$	$C_{22}$	...	$C_{2n}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
$C_n$	$C_{n1}$	$C_{n2}$	...	$C_{nn}$

表4 具体电力业务可靠性需求的判断矩阵

	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$
$C_1$	1	1	1	3	1	5	3	7	3
$C_2$	1	1	1	3	1	5	3	7	3
$C_3$	1	1	1	3	1	5	3	7	3
$C_4$	1/3	1/3	1/3	1	1/3	3	1	5	1
$C_5$	1	1	1	3	1	5	3	7	3
$C_6$	1/5	1/5	1/5	1/3	1/5	1	1/3	3	1/3
$C_7$	1/3	1/3	1/3	1	1/3	3	1	5	1
$C_8$	1/7	1/7	1/7	1/5	1/7	1/3	1/5	1	1/5
$C_9$	1/3	1/3	1/3	1	1/3	3	1	5	1

表5 可靠性需求权重赋值结果

	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$
可靠性需求权重值	0.1824	0.1824	0.1824	0.0720	0.1824	0.0345	0.0720	0.0198	0.0720

$$\begin{aligned}
p_k &= 1 - A^{L_k} \\
&= 1 - \left( \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \right)^{L_k} \\
&= 1 - \left( \frac{\mu}{\mu + \lambda} \right)^{L_k} \quad (5)
\end{aligned}$$

### 3.2 基于链路失效的函数模型

研究光传送网路径规划问题时，国内外研究手段主要集中于最优化函数建模与规划优化算法等方面<sup>[12-14]</sup>。在实际运用中，这两者通常是结合使用，首先进行最优化函数建模，再将函数作为约束条件加入到规划优化算法中。最优化函数建模是利用网络不确定因子，对规划问题建立数学模型，确立函数关联与限制条件，并给出相应目标函数，通过优化算法求解使得目标函数最优。

在给电力业务分配波道资源时，电力业务的可靠性需求与链路失效情况都是网络不确定因子，二者需要结合考虑，将可靠性需求高的业务分配到失效风险较低的链路上，将可靠性需求较低的业务分配到失效风险相对较高的链路上。依据此思想，目标函数设计为

$$\text{Re} = \sum_{i=1}^p R(i)S(v_i)R(v_j) \quad (6)$$

其中， $i$ 是业务编号， $p$ 为业务数量， $R(i)$ 为业务 $i$ 的可靠性重要度，由层次分析法得到； $S(v_i)$ 为链路 $j$ 失效前业务 $i$ 所经过路径的可用性的乘积，其计算公式为

$$S(v_i) = \prod_{j=1}^n A(v_{ij}) \quad (7)$$

$R(v_j)$ 为失效链路 $j$ 在全网中的可靠性权重，其计算公式为

$$R(v_j) = \frac{\prod_{j=1}^n A(v_{ij})}{\left[ \sum_{j=1}^m A(v_{ij}) \right]^n} \quad (8)$$

基于以上的目标函数，结合K最短路径算法(K-Shortest Pathes algorithm, KSP)设计电力业务规划算法，以实现均衡网络负载，提高全网可靠性的目的。

## 4 算法设计

### 4.1 算法描述

电力通信OTN的业务路由规划是在网络基本配置、光纤链路失效概率、电力业务可靠性需求等

参数已知的情况下进行的。链路失效模型下面向可靠性的业务路由规划方法分为以下6个步骤：

步骤1 网络预处理。初始化网络拓扑图参数，根据OTN网络中的实际情况，分别对网络拓扑中每条链路所包含的波长按顺序标号，采用层次分析法计算接入网络的业务的可靠性需求。

步骤2 接收业务连接请求，并采用基于物理链路长度最短的K-SP算法为到达的电力业务预选出 $K$ 条( $K>1$ )候选路径。此处链路长度随着 $K$ 的增大而增加，因此 $K$ 的取值取决于实际成本预算。 $K=1$ 时为最短路径算法取得的最优路径。

步骤3 对第2步所找到的 $K$ 条最短路径，用波长分配路由算法取最优路径。用首次命中法判断链路中可用波长，保留能完全建立连接的路径，抛弃不能完全建立连接的路径。若 $K$ 条路径都不能完全连接，则阻塞该业务并跳转至第2步。

步骤4 在第3步保留下来的路径中，按照目标函数计算得到使目标函数值最大的路径。该路径即为链路失效模型下面向可靠性的业务路由规划方法选取得到的最优路径。

步骤5 检查所有接入请求是否都已进行路由规划。若没有全部规划好业务路径则跳转到第2步，若已经全部归好业务路径则转到第6步。

步骤6 所有电力业务都完成路由规划，规划算法结束。

算法流程图如图2所示。

### 4.2 算例分析

本算例采用的网络拓扑结构是由21条链路、14个节点组成的国家科学基金会网络(National Science Foundation NETwork, NSFNET)，如图3所示，其中标注了网络中每条链路的长度(单位为km)。

在该网络中对第2节选取的9种经典电力业务进行路由规划。本文中，K-SP算法的 $K$ 取值为5，所有光纤链路具备双向传输能力，假设每条光纤包含32个波长，每种业务的带宽需求均为1个波长。并且，每千米光缆的MTBF取值为 $8.761 \times 10^5$  h，每千米光缆的MTTR取值为13.8 h，即每千米光缆失效率 $\lambda$ 为 $1.1416 \times 10^{-6}$  (1/h)，光缆修复率 $\mu$ 为0.0725 (1/h)。网络中失效链路、连接请求中的业务种类、源节点和目的节点均由随机函数生成，业务种类的选取满足均匀分布。本文对Dijkstra算法、路由与波长分配(Routing and Wavelength Assignment, RWA)算法、文献[15]中的基于网络风险的路由分配(Risk-Routing and Wavelength Assignment, R-RWA)算法、文献[16]中的跨接链路算法

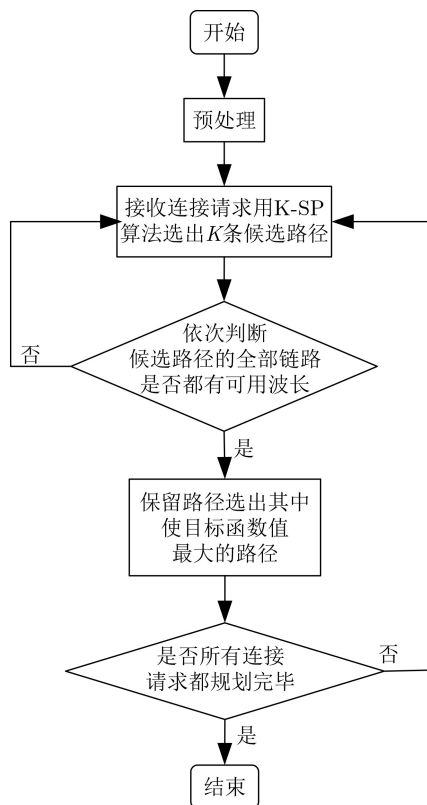


图2 算法流程图

(Straddling Link Algorithm, SLA)以及所提出算法分别进行仿真。其中, Dijkstra算法是一种经典的单源最短路径算法, 该算法以源点为中心向外层层扩展, 直到扩展到终点, 用于计算一个节点到其他所有节点的最短路径, 现有的许多路由规划算法都是在该算法的基础加以优化; RWA算法是一种经典的路由与波长分配算法, 通常分解为选路和波长分配两个子问题, 选路问题又可以分为寻找路由和选择路由问题, 波长分配问题也可以分为寻找波长和选择波长问题; R-RWA算法是一种基于网络风险的RWA算法, 该算法通过降低网络的最大风险, 抑制链路失效对全网业务的影响; SLA算法是一种经典启发式P圈构造算法, 可以快速构造基本圈, 该算法用于研究链路失效情况下网络的生存性问题。以上4种算法均可用于研究链路失效情况下的电力业务路由规划问题, 并且都具有一定的代表性, 本文将通过网络阻塞率、资源利用率<sup>[17]</sup>两个指标来衡量4种算法以及本算法的优劣性, 验证本算法的有效性。

图4给出了多链路失效情况下, 各路由算法在业务数量不同时阻塞率的对比。由图4可见, 5种算法的阻塞率均随着业务数量的增大而上升。在业务数量小于等于50个时, Dijkstra算法、RWA算法以及R-RWA算法阻塞率非常低, SLA算法与本算法

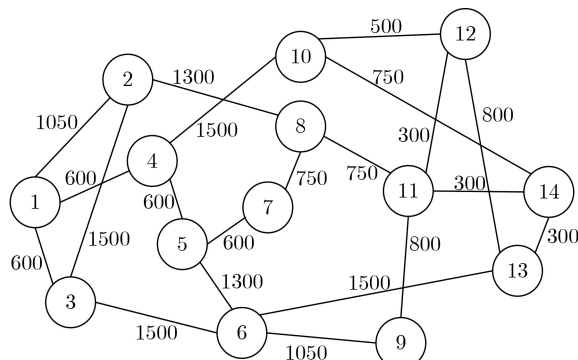


图3 NSFNET网络拓扑结构

的阻塞率为0。这是由于在业务数量较少时, 网络中的可用资源十分丰富, 各算法的约束条件对路由选择的限制表现得并不明显。当业务数量大于50个时, 由于个别链路出现波长资源用尽的情况, SLA算法与本算法也开始发生阻塞。当业务数量大于100个时, 5种算法的阻塞率呈现出明显的差别, 本算法阻塞率持续处于最低, 这是由于在前期网络可用资源比较丰富时, 本算法考虑了链路失效情况, 合理避免了因链路故障而发生的阻塞事件, 并且根据不同种类电力业务对网络的具体需求为其分配路径, 使电力业务在网络中较为均匀地分布, 因此本算法在对可用资源进行合理利用的同时, 也将阻塞率控制在较低水平。SLA算法的阻塞率略高于本算法的阻塞率, 这是由于SLA算法没有均衡负载策略, 对所有接入请求进行无差别处理, 虽然SLA算法有备份策略, 但备份路径仅与工作路径有关, 与业务类型无关, 因此网络负载较大时, 容易出现负载不均衡的情况, 导致阻塞率略高于本算法阻塞率。R-RWA算法在RWA算法的基础上, 考虑了网络业务与链路工作状态的依赖关系, 但没有备份策略和多级业务路由分配策略, 因此R-RWA算法的阻塞率介于RWA算法与SLA算法之间。对于阻塞率较高的Dijkstra算法和RWA算法, 两者仅考虑了在资源分配时最简单的影响因素, 分别是路径长度和可用波长资源, 因此在网络规划时容易出现负载集中于某条链路或某个节点的情况, 导致阻塞率较大。

图5给出了单链路失效情况下, 各路由算法在业务数量不同时阻塞率的对比。在单链路情况可以看作多链路失效情况的一种特例, 因此单链路失效情况下5种算法阻塞率变化的情况和引起变化的原因与多链路失效时相同。二者的区别在于单链路失效时不同算法在不同业务数量下的阻塞率略低于多链路失效时不同算法的阻塞率, 原因在于多链路失效情况下由链路失效引起阻塞的可能性略高于单链路失效情况。

图6给出了多链路失效情况下，各路由算法在业务数量不同时资源利用率的对比。这项指标代表当前网络中已占用的波长资源在网络中整体波长资源的占有率。图6中显示，5种算法的资源利用率随业务量的增大而上升，这是由于随着业务请求数量的增多，网络需要提供更多的可用通道资源。当业务数量大于等于175个时，5种算法的资源利用率上升趋势逐渐平缓，因为当业务数量较大时，网络中的可用资源减少，并且网络流量未能及时疏导，导致业务发生阻塞，能够成功建立连接的请求逐渐减少。本算法在不同的业务数量下，资源利用率高于其余4种算法，这是由于本算法根据不同种类业务的具体需求来分配路由，使网络中的业务较为均匀地分布，减少阻塞的发生，提高连接的成功率，并且由于本算法中业务种类的选取符合均匀分布，在业务数量较大时本算法的有效性更为突出。

图7给出了单链路失效情况下，各路由算法在业务数量不同时资源利用率的对比。单链路失效情况下的资源利用率变化趋势与多链路情况下基本一致。总体而言，在业务数量相同时，单链路失效情况下的资源利用率略高于多链路失效情况，这与链路失效对网络阻塞率的影响有关。

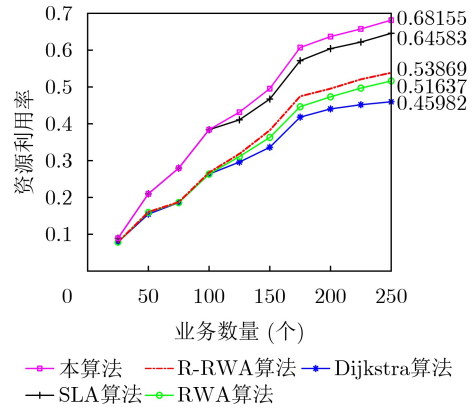


图 6 多链路失效时各算法资源利用率

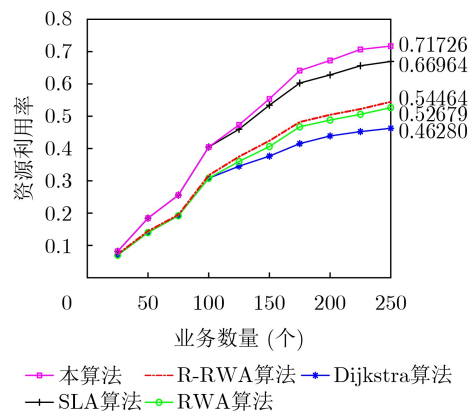


图 7 单链路失效时各算法资源利用率

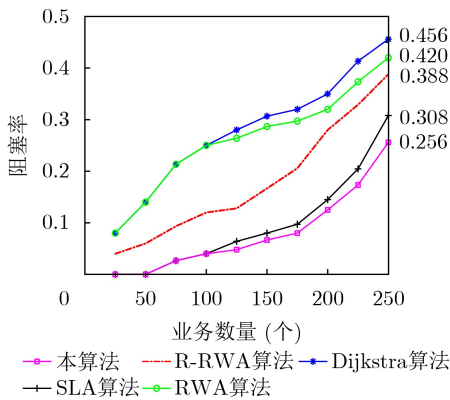


图 4 多链路失效时各算法阻塞率

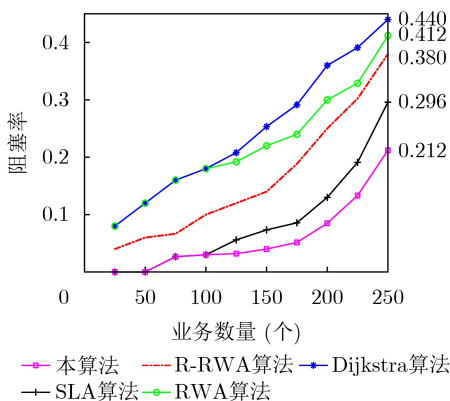


图 5 单链路失效时各算法阻塞率

## 5 结束语

本文基于链路失效情况提出一种面向可靠性的多级电力业务路由规划算法，给出了链路失效下的函数模型，利用该模型以及多级业务分配策略对规划路径进行约束，均衡网络负载，降低网络阻塞率，提高资源利用率，实现全网可靠性的提高。在电力业务数量急剧增多，业务种类不尽相同的发展趋势下，本文所提出的电力业务路径规划策略对网络性能的提升具有一定的参考价值，未来可以从业务不同需求的角度出发，基于链路失效构建多种需求的函数模型，使电力业务路由规划更具有区分性，网络能够可靠传输更多的业务。

## 参考文献

- [1] 孟凡超, 高志强, 王春璞. 智能电网关键技术及其与传统电网的比较[J]. 河北电力技术, 2009, 28(S1): 4-5,12. doi: 10.3969/j.issn.1001-9898.2009.z1.002. MENG Fanchao, GAO Zhiqiang, and WANG Chunpu. Smart grid key technologies and comparing with traditional grid[J]. Hebei Electric Power, 2009, 28(S1): 4-5,12. doi: 10.3969/j.issn.1001-9898.2009.z1.002.
- [2] 周光楠. 大容量OTN技术在骨干网上的应用研究[J]. 通讯世

- 界, 2019, 26(11): 62–63. doi: [10.3969/j.issn.1006-4222.2019.11.041](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4222.2019.11.041).
- ZHOU Guangnan. Research on the application of high-capacity OTN technology in backbone network[J]. *Telecom World*, 2019, 26(11): 62–63. doi: [10.3969/j.issn.1006-4222.2019.11.041](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4222.2019.11.041).
- [3] WANG Qiong and GAO Ying. OTN for the future transmission network[C]. 2012 Symposium on Photonics and Optoelectronics, Shanghai, China, 2012: 1–4. doi: [10.1109/SOPO.2012.6270500](https://doi.org/10.1109/SOPO.2012.6270500).
- [4] 刘林, 祁兵, 李彬, 等. 面向电力物联网新业务的电力通信网需求及发展趋势[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 3114–3128. doi: [10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0013](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0013).
- LIU Lin, QI Bing, LI Bin, *et al.* Requirements and developing trends of electric power communication network for new services in electric internet of things[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(8): 3114–3128. doi: [10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0013](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0013).
- [5] 赵子岩, 张大伟. 国家电网公司“十二五”电力通信业务需求分析[J]. 电力系统通信, 2011, 32(5): 56–60. doi: [10.3969/j.issn.1005-7641.2011.05.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-7641.2011.05.011).
- ZHAO Ziyang and ZHANG Dawei. Analysis on the requirement of SGCC on telecommunication services in the "12th five-year plan" Period[J]. *Telecommunications for Electric Power System*, 2011, 32(5): 56–60. doi: [10.3969/j.issn.1005-7641.2011.05.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-7641.2011.05.011).
- [6] 许超, 喻洪辉, 顾海林, 等. 智能电网通信业务的研究与分析[J]. 电气应用, 2013, 32(S1): 340–342.
- XU Chao, YU Honghui, GU Hailin, *et al.* Research and analysis of smart grid communication service[J]. *Electrotechnical Application*, 2013, 32(S1): 340–342.
- [7] 高超, 孙颖, 周静, 等. 电力通信业务预测分析方法研究[J]. 电力信息与通信技术, 2016, 14(7): 108–112. doi: [10.16543/j.2095-641x.electric.power.ict.2016.07.021](https://doi.org/10.16543/j.2095-641x.electric.power.ict.2016.07.021).
- GAO Chao, SUN Ying, ZHOU Jing, *et al.* Research on forecasting and analysis method of electric power communication service[J]. *Electric Power Information and Communication Technology*, 2016, 14(7): 108–112. doi: [10.16543/j.2095-641x.electric.power.ict.2016.07.021](https://doi.org/10.16543/j.2095-641x.electric.power.ict.2016.07.021).
- [8] 董武, 彭迪栋, 汤玮, 等. 基于OSNR的OTN路由优化算法[J]. 自动化技术与应用, 2019, 38(10): 85–88. doi: [10.3969/j.issn.1003-7241.2019.10.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-7241.2019.10.020).
- DONG Wu, PENG Dili, TANG Wei, *et al.* OTN network routing optimization algorithm based on OSNR[J]. *Techniques of Automation and Applications*, 2019, 38(10): 85–88. doi: [10.3969/j.issn.1003-7241.2019.10.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-7241.2019.10.020).
- [9] 丁慧霞, 高会生, 王法宁. 链路失效的电力OTN业务风险分析[J]. 光通信技术, 2015, 39(8): 40–43. doi: [10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2015.08.012](https://doi.org/10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2015.08.012).
- DING Huixia, GAO Huisheng, and WANG Faning. Service risk analysis for electric power OTN by considering link failure[J]. *Optical Communication Technology*, 2015, 39(8): 40–43. doi: [10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2015.08.012](https://doi.org/10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2015.08.012).
- [10] 茹予波. 智能电网背景下的继电保护新技术分析[J]. 科技创新与应用, 2020(31): 150–151.
- RU Yubo. Analysis of new relay protection technology under the background of smart grid[J]. *Technology Innovation and Application*, 2020(31): 150–151.
- [11] 蒋康明, 曾瑛, 邓博仁, 等. 基于业务的电力通信网风险评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 101–106. doi: [10.7667/j.issn.1674-3415.2013.24.016](https://doi.org/10.7667/j.issn.1674-3415.2013.24.016).
- JIANG Kangming, ZENG Ying, DENG Boren, *et al.* Risk evaluation method of electric power communication network based on services[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(24): 101–106. doi: [10.7667/j.issn.1674-3415.2013.24.016](https://doi.org/10.7667/j.issn.1674-3415.2013.24.016).
- [12] LI Wenzheng, LIU Junjun, and YAO Shunli. An improved dijkstra's algorithm for shortest path planning on 2D grid maps[C]. 2019 IEEE 9th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC), Beijing, China, 2019: 438–441. doi: [10.1109/ICEIEC.2019.8784487](https://doi.org/10.1109/ICEIEC.2019.8784487).
- [13] 高立坡, 康伟, 郝军魁, 等. 基于OTN技术的电力通信网络业务路由优化算法[J]. 自动化技术与应用, 2021, 40(11): 75–79. doi: [10.3969/j.issn.1003-7241.2021.11.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-7241.2021.11.017).
- GAO Lipo, KANG Wei, HAO Junkui, *et al.* Service routing optimization algorithm of power communication network based on OTN technology[J]. *Techniques of Automation and Applications*, 2021, 40(11): 75–79. doi: [10.3969/j.issn.1003-7241.2021.11.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-7241.2021.11.017).
- [14] 刘钰, 熊兰, 肖丹, 等. 基于业务重要度的电力通信路由系统可靠性分析[J]. 电测与仪表, 2017, 54(12): 34–41. doi: [10.3969/j.issn.1001-1390.2017.12.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1390.2017.12.006).
- LIU Yu, XIONG Lan, XIAO Dan, *et al.* Analysis on the reliability of communication routing system based on importance level of service[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2017, 54(12): 34–41. doi: [10.3969/j.issn.1001-1390.2017.12.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1390.2017.12.006).
- [15] 高会生, 王法宁. 一种基于网络风险的路由波长分配算法[J]. 光通信研究, 2015(5): 12–14, 18. doi: [10.13756/j.gtxyj.2015.05.004](https://doi.org/10.13756/j.gtxyj.2015.05.004).
- GAO Huisheng and WANG Faning. Considerations of a

- network risk-based RWA algorithm[J]. *Study on Optical Communications*, 2015(5): 12-14,18. doi: [10.13756/j.gtxyj.2015.05.004](https://doi.org/10.13756/j.gtxyj.2015.05.004).
- [16] 郭振宇. 基于网状光网络中P圈启发式算法的研究[D]. [硕士论文], 南京邮电大学, 2017.  
GUO Zhenyu. Research on P-cycle heuristic algorithm in mesh optical network[D]. [Master dissertation], Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2017.
- [17] 李彬, 贾滨诚, 马永红, 等. 考虑链路失效概率的电力业务保护策略[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 725-732. doi: [10.13335/j.1000-3673.pst.2018.1650](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2018.1650).  
LI Bin, JIA Bincheng, MA Yonghong, *et al.* Power business protection strategy considering link failure probability[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(2): 725-732. doi: [10.13335/j.1000-3673.pst.2018.1650](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2018.1650).
- 杨淑娜: 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为光通信与光网络.  
许嘉丽: 女, 硕士生, 研究方向为面向智能电网的下一代OTN技术研究.  
杨鸿珍: 女, 高级工程师, 研究方向为光通信与信息处理.  
赵玉虎: 男, 讲师, 研究方向为光通信与信息处理.  
池 灏: 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为光通信与光网络.
- 责任编辑: 余 蓉