

# 基于电力光缆线路资源共享度的网络优化方法

周静, 刘贵荣, 赵子岩, 陈希

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

## A Network Optimization Method Based on Resource Sharing of Power Optical Cable Lines

ZHOU Jing, LIU Guirong, ZHAO Ziyang, CHEN Xi

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** There are two kinds of optical cables, i.e., the ordinary optical cable and the special power optical cable such as optical fiber composite overhead ground wire (OPGW) and all-dielectric self-supporting optical cable (ADSS) optical cable, used in the underlying structure of power optical cable networks. The index of configuration ratio of special power optical cable line to transmission line is an important factor impacting the construction cost of power optical cable network. Thoroughly considering the particularity of power optical cable network construction and the differences of cost structure, an evaluation index of resource sharing is designed, and an optimization method of optical cable route in loop communication system, in which the demand relation of communication capacity requirement and sharing of optical cables are taken into account, is proposed. Taking the backbone loop communication network for 500 kV substations in a certain provincial power company as the case, the optimization schemes of optical cable network for 500kV substations under different conditions are analyzed and compared..

**KEY WORDS:** optical cable route; TSP model; evaluation index of resource sharing; network optimization

**摘要:** 电力光传输网所依托的底层光缆有普通光缆和电力线特种光缆 2 种类型。输电线路与电力特种光缆线路配比指标是影响电力光传输网络建设成本的一个重要因素。在充分考虑电力光缆网建设的特殊性和成本结构的差异性基础上, 设计了资源共享度评价指标, 提出考虑容量需求关系与光缆共享的环网光缆路由优化方法, 并以 S 省电力公司骨干环网为算例, 比较了不同情况下 500 kV 站点的光缆网优化方案。

**关键词:** 光缆路由; 旅行商模型; 资源共享度; 网络优化

## 0 引言

目前电力通信网基本还是以环为主。环形网结构简单, 与点对点的拓扑相比, 其业务恢复能力强, 可以使网络在极短的时间内恢复业务, 因而环形组

网方式在很大程度上将得到广泛应用<sup>[1-5]</sup>。环网应用同步数字体系(synchronous digital hierarchy, SDH)技术, 可采取路径保护或者子网连接保护, 组成专用保护环或者共享保护环。工程中常见的有单向通道保护环、双纤双向复用段保护环和四纤双向复用段保护环<sup>[6]</sup>。环网应用于光传送网(optical transport network, OTN)体系结构, 同样可以采用路径保护或者子网连接保护方式组织环保护。应用分插复用器(add and drop multiplexer, ADM)的 SDH 自愈环和应用光分插复用器(optical add/drop multiplexer, OADM)的波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)自愈环, 设计中需要考虑的问题各不相同, 但是某些近似的问题可以用统一的方法来解决。

对于环网, 在确定网络节点和节点对之间的可能光缆连接之后, 如何组织网络的物理路由, 使网络的建设更经济合理, 称为光缆路由问题。找出合理经济的环网物理拓扑, 关键在于准确地确定光缆的链路成本。链路成本与对应节点间的距离成正比, 单位长度光缆的敷设成本、光缆建设的其他费用、节点间已有光缆连接边权值也是影响链路成本的重要因素<sup>[7-8]</sup>。

电力传输网所依托的底层光缆有普通光缆和电力线特种光缆 2 种类型。普通光缆包括架空光缆、埋地管道光缆等, 电力线特种光缆包括光纤复合架空地线(optical fiber composite overhead ground wire, OPGW)和全介质自承式光缆(all-dielectric self-supporting optical cable, ADSS)2 种, 这有别于运营商网络所特有的底层光缆。特别是 OPGW 光缆, 随着新建线路的增多, 其日益成为电力底层光缆资源的主流。OPGW 光缆的路由主要依托输电线路的走向而定。输电线路的走向是根据电网的生产需要, 从电源点到负荷点的原则来进行规划和建

设, 新电源点的增加和负荷点的变化都会影响电网接线的改变, 进而引起输电线路的不断变化, 例如建设新的输变电线路、老线路开断环入新的变电站、线路改接到其他变电站等。这些输电线路的变化会引起电力光传输网的 OPGW 光缆路由相应地变化, 从而对光传输网结构造成一定的影响<sup>[9-15]</sup>。因此, 输电线路与电力特种光缆线路配比指标是影响环网建设成本的一个重要因素。

本文针对电力传输网底层光缆架构的特殊性, 探讨了如何有效地利用已建光缆的线路资源, 提高光缆资源共享度的组网优化方案。

### 1 问题描述

在实际电力光纤传输网络规划中, 节点间的物理路由组织与很多因素相关。在组织双向自愈环时, 对节点间业务量大的节点, 应该尽量使它们之间连接有光缆, 这样可以使网络的资源利用率得到提高。本文中实现的光缆路由算法考虑了以下几点问题:

1)  $D_{ij}$  表示节点  $i$ 、 $j$  之间的光缆线路长度, 当两站点之间的光缆长度超过一定阈值  $D$  以后, 权值中需要加入再生器的费用, 设环中加入一套再生器的费用为  $C_r$ 。

2) 由于不同的路段差异和敷设光缆的方式不同, 要有一个参数来修正不同路段上的建设成本,  $R_d$  表示因光缆敷设方式和施工难度不同而引起的修正因子。

3) 如果节点间存在光缆, 利用它可以使建设成本更小, 则设定敷设成本为 0, 对于不适合敷设光缆的路径, 权值设定为  $\infty$ 。

4)  $C_f$  表示单位长度光缆的成本,  $C_s$  表示敷设单位长度光缆的成本, 不同类型电力光缆的敷设成本参考表 1。

如果考虑节点对之间的业务关系, 则定义  $R_c$  作为容量分配的不同对网络规划所造成的影响因子。

表 1 电力光缆线路工程价格参考

**Tab. 1 Reference price for power optical cable construction**

光缆类型	型号	单位长度	参考单价/元
OPGW	24 芯	km	5 万
ADSS	24 芯	km	3 万
沟道光缆	24 芯	km	5.5 万
	3×2.5+1×1.5+4B1	m	16
光纤复合	3×6+1×4+4B1	m	30
低压电缆	4×70+1×35+4B1	m	330
	4×185+1×95+4B1	m	820
普通光缆	24 芯	km	2 万

$P_{ij}$  表示两节点对间的业务与总业务量的比值, 即

$$P_{ij} = \frac{T(i, j)}{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n T(i, j)} \quad (1)$$

式中:  $T(i, j)$  为节点对之间的业务数量;  $n$  为最大节点编号, 则考虑了容量分配的链路成本权值为

$$C_{ij} = D_{ij}(C_f + C_s R_d) + \text{int}(D_{ij} / D) C_r - R_c P_{ij} \quad (2)$$

结合成本估算的图权值, 可更有效地结合实际情况, 运用算法输出可行的环光缆路由结构。链路权值计算参数如表 2 所示。

表 2 链路成本权值的建议参数

Tab. 2 Proposed parameters for link cost weight calculation

参数	参数说明	建议取值
$C_f$	表示单位长度光缆的费用	1
$C_s$	表示敷设单位长度光缆的费用	1
$C_r$	表示一套再生设备的费用	30
$R_m$	表示因光缆敷设方式不同而引起的差异	1
$R_d$	表示因施工难度不同而引起的差异	1
$R_s$	表示因节点间容量分配不同而对网络规划所造成的影响因子	0.5

### 2 优化模型

路由问题已从图论角度被深入研究。以网络节点为节点, 以节点之间可能的光缆连接为带权值边, 且边的权值为建设此光缆连接的链路成本, 由此构成无向图  $G=(V, E)$ 。光缆路由问题就是在此无向图中寻找一个权值和最小的哈密顿回路。这也是图论中著名的旅行商(traveling salesman problem, TSP)问题。TSP 问题是一个 NP 完全问题, 其数学描述为:

设  $G=(V, E)$  是具有边成本  $C_{ij}$  的无向图,  $C_{ij}$  定义为对于所有的  $(i, j) \in E, C_{ij} \geq 0$ , 且  $C_{ij} = C_{ji}$ 。令  $|V|=n$ , 假定  $n > 1$ 。求  $G$  的一条周游路线且周游成本最小。利用分支界限法, 可以将状态空间树上不可能产生最佳的子树减去, 使搜索集中在较小的范围之内, 以便更快地找到近似最佳解。

根据上面的讨论, 得出利用求解 TSP 制定环的光缆路由策略的基本思想是: 首先根据自愈环规划过程中的具体情况得出环节点间的费用矩阵, 然后利用 TSP 方法求解, 所得到的结果即为环网经济合理的组网方案。本文引入整数变量  $x_{ij}=0, 1$ , 将 TSP 模型转化成混合整数规划模型<sup>[16]</sup>, 然后用 C++ 语言编写成实用化的程序调用模块, 实现算例仿真。TSP 问题的线性整数规划模型表示如下:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} x_{ij} \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, & i = 1, 2, \dots, n, j \neq i \\ \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, & j = 1, 2, \dots, n, i \neq j \\ x_{ij} = 0, 1, & i, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (4)$$

### 3 某省电力公司 500 kV 光缆路由优化方案

“十二五”期间，S 省公司将通过调整现有的网络，并结合新建电路，形成覆盖全省的 10G 骨干光纤环网，实现 500kV 变电站骨干网的双重覆盖。S 省骨干光传输网的站点基本都是由 500kV 变电站组成的，新建的 500kV 变电站按照 2 套省网设备设计，已建的 500 kV 站点有部分站点已经配置了 2 套传输设备，其中一套设备是为了满足保护业务传输的需要，其容量较低，也未考虑组网需求，网络结构较为单一。2015 年 S 省某区的骨干光缆建设规划方案如图 1 所示。

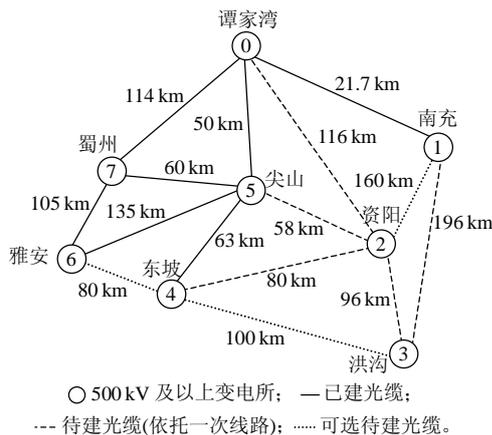


图 1 S 省 2015 年光缆建设规划方案  
Fig. 1 Optical cable planning scheme of S province for 2015

本算例优化目标是充分利用该区域的已建光缆，设计能够有效覆盖 8 个 500kV 站点的骨干光纤自愈环的光缆路由，并使得光缆路由成本最低，优化目标的实现分为 2 种：考虑节点对之间的业务需求和考虑节点对之间的需求 2 种方式。本算例在实施优化算法之前首先建立如下关键信息表：

1) 建立 SC 地区的工程节点属性表，包括节点名称、节点业务总量、节点的属性(行政属性)、该节点在环网中的地位(中心节点或端节点)。SC 中南部地区的光缆工程节点属性中，谭家湾和蜀州为中心节点，其余 6 个站点为端节点。

2) 建立节点对之间的业务需求信息表，以折算成 2M 的方式进行统计，如表 3 所示。

表 3 500 kV 光缆工程节点对业务需求关系  
Tab. 3 Nodes and traffic demands relationship of 500 kV optical cable projects

节点对名称	业务数量(2M)	节点对名称	业务数量(2M)
谭家湾-南充	20	资阳-东坡	10
谭家湾-资阳	20	资阳-尖山	2
谭家湾-洪沟	20	资阳-雅安	2
谭家湾-东坡	20	资阳-蜀州	2
谭家湾-尖山	14	洪沟-东坡	4
谭家湾-雅安	2	洪沟-尖山	10
谭家湾-蜀州	2	洪沟-雅安	4
南充-资阳	10	洪沟-蜀州	4
南充-洪沟	10	东坡-尖山	2
南充-东坡	10	东坡-雅安	10
南充-尖山	2	东坡-蜀州	2
南充-雅安	30	尖山-雅安	30
南充-蜀州	2	尖山-蜀州	2
资阳-洪沟	10	雅安-蜀州	30

3) 建立 SC 地区光缆工程 500 kV 站点间可存在光缆的关联表，参考表 4。“是否存在光缆”项中“0”表示待新建光缆，“1”表示光缆已经建设，此时光缆距离为 0；“光缆类型”项中“OPGW-24”表示 24 芯的 OPGW 类型；“随一次线路”表示需随 500 kV 线路建设光缆长度；“其它方式”项主要指不依托一次线路建设的光缆长度，包括租用公网线路、与其他等级的网络共享的光缆。

表 4 500 kV 站点间可存在光缆的关联表  
Tab. 4 Available optical cable information for 500 kV node-pairs

节点对名称	是否存在光缆	需建光缆长度/km		
		光缆类型	随一次线路	其他方式
谭家湾-南充	1	OPGW-24	217	—
谭家湾-尖山	1	OPGW-24	50	—
谭家湾-蜀州	1	OPGW-24	144	—
南充-资阳	0	OPGW-24	—	160
南充-洪沟	0	OPGW-24	196	—
资阳-洪沟	0	OPGW-24	96	—
资阳-东坡	0	OPGW-24	80	—
资阳-尖山	0	OPGW-24	58	—
洪沟-东坡	0	OPGW-24	—	100
东坡-尖山	1	OPGW-24	63	—
东坡-雅安	0	OPGW-24	—	80
尖山-雅安	1	OPGW-24	135	—
尖山-蜀州	1	OPGW-24	60	—
雅安-蜀州	1	OPGW-24	105	—

通过上述步骤基本完成了初始参数的输入。本算例基于中国电力科学院网络优化项目组自主开发的光缆网优化算法模块<sup>[17]</sup>。其中，为评价不同方案的光缆资源的共享程度，本文提出如下评价指标，分别是新建光缆比例  $P_1$ 、新建光缆与一次线路的配比  $P_2$  和光缆资源共享度  $S$ ，计算方法如下：

$$P_1 = \frac{\text{新建光缆长度}}{\text{环网光缆总长}} \times 100\% \quad (5)$$

$$P_2 = \frac{\text{依托一次线路的新建光缆长度}}{\text{环网光缆总长}} \times 100\% \quad (6)$$

$$S = (1 - \frac{\text{新建光缆长度}}{\text{环网光缆总长}}) \times 100\% \quad (7)$$

由此，当  $P_1=100\%$  时，表示该方案中环网的光缆完全是新建光缆，光缆资源共享度  $S$  为 0。当  $P_1=0$  时，表示该方案中环网的光缆路由完全利用已建光缆资源，资源共享度为 100%，但在实际工程实践中，共享度为 100% 的为理想情况，方案的优劣还需根据环上节点之间的业务需求综合考虑，在业务需求最大的节点之间尽可能建立直达光缆链路，以减低出现环上瓶颈链路的风险。

本算例一共考虑了 4 种组网方案：不考虑光缆共享，也不考虑节点对业务需求，对应方案  $S_{01}$ ；考虑光缆共享，但不考虑节点对业务需求，对应方案  $S_{02}$ ；不考虑光缆共享，但是考虑节点对业务需求，对应方案  $S_{03}$ ；既考虑光缆共享，也考虑节点对业务需求，对应方案  $S_{04}$ 。 $C_{\min}$  表示最低建网成本， $N_{\max}$  表示跨距段承载的最大业务数量(以 2M 方式折算)。

表 5 给出了 4 种方案的计算结果。其中  $S_{02}$  和  $S_{04}$  为建环成本较低的方案，约为其它 2 种方案的 50%，原因是  $S_{02}$  和  $S_{04}$  在优化过程中考虑共享已建光缆资源约束条件。此外， $S_{01}$  方案随一次线路建设的配比度最高， $P_2=61.9\%$ ，而  $S_{02}$  和  $S_{04}$  为 16.6%。最后值得注意的是，虽然  $S_{01}$  建环成本较高，且资源共享度最低，但在采用最小跳数优先的业务分配算法后，环网的容量最低，即环上跨距段最大业务量

为  $74 \times 2 \text{ M}$ ，而建环成本最低的 2 种方案  $S_{02}$  和  $S_{04}$  环上跨距段的最大业务量达到了  $144 \times 2 \text{ M}$ 。

通过上述分析，不难得出结论：如果需要建设成本最低和资源共享度最高的光缆路由，推荐采用方案  $S_{04}$  或者  $S_{02}$ 。考虑到环的业务容量和业务均衡度，可采用方案  $S_{01}$ 。但是方案  $S_{01}$  的建环成本毕竟是  $S_{02}$  和  $S_{04}$  的 2 倍，且为完全新建的光缆网，因此，必须通过实施更有效的业务分配策略，使得建环成本最低的 2 种方案具有最佳的业务均衡度。此外，对于已有的光缆连接，应该根据节点的相对位置取一个合理的权值，以免破坏环网的总体结构。而只有当节点对间的业务量占到网络总业务量的相当比重时，业务关系对路由规划才会造成显著影响。

## 4 结论

光缆路由组织和业务承载分配是传输网设计中的 2 个重要问题。随着互连程度的提高，电力光传输网正向着网状网的结构发展，在基于数字交叉连接(digital cross connect, DXC)或者光交叉连接(optical cross connect, OXC)的网络中，光缆路由组织和业务承载分配对于提高容量利用率，增强网络保护和恢复能力，有着重要作用。本文以 S 省“十二五”骨干环网的规划方案为算例依据，设计了考虑不同约束条件下的骨干光纤环网的光缆路由优化方案。而如何结合保护类型、线路速率的选择，以及工程实际情况，通过定量计算，更精确地评估环网的技术经济性能，还需要进一步分析。

表 5 S 省光缆路由优化方案比较

Tab. 5 Comparison of optimal optical cable route schemes

方案	是否考虑 建光缆	是否考虑 业务需求	最佳光缆路由	$C_{\min}$ /万元	$P_1/\%$	$P_2/\%$	$S/\%$	$N_{\max}$
$S_{01}$	否	否	谭家湾-蜀州-雅安-东坡-洪沟-南充- 资阳-尖山-谭家湾	1 618	100	61.9	0	74
$S_{02}$	是	否	谭家湾-蜀州-雅安-东坡-尖山-资阳- 洪沟-南充-谭家湾	860	55.2	6.6	44.8	144
$S_{03}$	是	否	谭家湾-资阳-南充-洪沟-东坡-雅安- 蜀州-尖山-谭家湾	1 733	100	60.8	0	194
$S_{04}$	是	否	谭家湾-蜀州-雅安-东坡-尖山-资阳- 洪沟-南充-谭家湾	767	55.2	16.6	44.8	144

## 参考文献

- [1] 聂运亮, 倪作廷, 何青. SDH 环网保护类型以及工程应用[J]. 通信工程, 2009, 4(39): 22-24.
- [2] 赵大平, 孙业成. SDH 光纤通信传输继电保护信号的误码特性和时间延迟[J]. 电网技术, 2002, 26(10): 66-70.  
Zhao Daping, Sun Yecheng. A preliminary analysis of characteristics of code error and time delay of protective relaying signals transmitted by SDH optical fiber communication system[J]. Power System

Technology, 2002, 26(10): 66-70(in Chinese).

- [3] 高鹏, 陈新南, 陆明, 等. 南方电网 SDH 光纤通信环网继电保护通道分析[J]. 南方电网技术, 2007, 1(2): 43-48.
- [4] 熊素琴, 周静, 赵子岩, 等. 新一代电力系统自动化通信网络模型与典型网络技术分析[J]. 电网技术, 2010, 34(S2): 434-437.  
Xiong Suqin, Zhou Jing, Zhao Ziyang, et al. Analysis on the new model of the communication networks for electric system automation technology[J]. Power System Technology, 2010, 34(S2): 434-437 (in Chinese).

- [5] 姜廷刚, 高厚磊. 适合广域测量系统的通信网络探讨[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(3): 56-61.  
Jiang Tinggang, Gao Houlei. Study on communication scheme for wide area measurement systems[J]. Proceeding of the EPSA, 2004, 16(3): 56-61(in Chinese).
- [6] ITU-T Recommendation G. 841 Types and characteristics of SDH network protection architectures[R].
- [7] 孙亚洲, 王龙. 电力系统 SDH 通信模式方案设计与实现[J]. 中国新通信, 2010(7): 28-30.  
Sun Yazhou, Wang Long. SDH design and implementation of communication mode in power system[J]. China New Telecommunications, 2010(7): 28-30(in Chinese).
- [8] 施继红, 宗容, 刘宇明. 电力通信网的抗毁性和拓扑优化研究[J]. 电力系统通信, 2009, 30(203): 11-14.  
Shi Jihong, Zong Rong, Liu Yuming. Study on the invulnerability and topology optimization of power communication network[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2009, 30(203): 11-13(in Chinese).
- [9] 李黄强, 孙云莲. 混合业务下的电力线通信资源优化分配[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 92-97.  
Li Huangqiang, Sun Yunlian. Resource allocation of the power line communication system for mixed traffics [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 92-97(in Chinese).
- [10] 焦晓波, 周雅. OPGW 在电力光传输网中的应用和发展[J]. 光通信研究, 2010, 4(8): 49-53.  
Jiao Xiaobo, Zhou Ya. Application and development of OPGW cables in power optical transmission network[J]. Study on Optical Communications, 2010, 4(8): 49-53(in Chinese).
- [11] 陈希. 电力特种光缆的发展与展望[J]. 电力系统通信, 2009, 30(195): 16-25.  
Chen Xi. Development and prospect of electric power special optical cable[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2009, 30(195): 16-25(in Chinese).
- [12] 陈希, 威力彦. OPPC 在电网中的应用研究与实验技术[J]. 电力系统通信, 2009, 30(201): 5-9.  
Chen Xi, Qi Liyan. Application and experiment of OPPC in power grid[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2009, 30(201): 5-9(in Chinese).
- [13] 王炫, 李红, 丛琳. 基于无线通信和光通信的高压输电线路监测系统[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 198-203.  
Wang Xuan, Li Hong, Cong Lin. A novel monitoring system for high voltage transmission lines based on wireless and optical communication technologies[J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 198-203(in Chinese).
- [14] 彭静, 卢继平, 汪洋, 等. 广域测量系统通信主干网的风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 84-90.  
Peng Jing, Lu Jiping, Wang Yang, et al. Risk assessment of backbone communication network in WAMS[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 84-90(in Chinese).
- [15] 赵宏波, 高鹏, 汪洋, 等. 电力特种光缆传输特性对系统升级的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 216-220.  
Zhao Hongbo, Gao Peng, Wang Yang, et al. Analysis on transmission characteristics of special optical fiber cable for power communication on upgrading of optical communication system[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 216-220(in Chinese).
- [16] Luss H, Rosenwein M B, Wong R T. Topological network design for SONET ring architecture[J]. IEEE Transactions on System, 1998, 28(6): 780-790.
- [17] 刘贵荣, 周静. 电力通信网 SDH 环容量均衡优化算法研究[J]. 电信科学, 2010, 12(A): 140-145.



周静

收稿日期: 2010-12-16。

作者简介:

周静(1980), 女, 通信作者, 博士, 从事电力系统通信网络规划与优化技术、电力物联网通信新技术研究, E-mail: zhoujingjing@epri.sgcc.com.cn;

刘贵荣(1983), 男, 硕士, 从事电力系统通信网络优化工作, E-mail: liuguirong@epri.sgcc.com.cn;

赵子岩(1975), 男, 博士研究生, 从事电力网络规划优化工作, E-mail: zzy@epri.sgcc.com.cn;

陈希(1964), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事电力通信管理和规划工作, E-mail: chenxi@epri.sgcc.com.cn。

(责任编辑 李兰欣)