

海底通信光缆水下设备供电系统设计

刘兴华,叶胤

(广东省电信规划设计院有限公司,广州 510630)

摘要:海底通信光缆是国际通信流量的主要载体,国际互联网带宽加速增长推动了海底通信光缆的加速建设。介绍了海底通信光缆水下设备供电系统基本结构,分析了海底光中继器、海底分支单元和远供电源设备等器件的工作原理及内部电路设计,提出了海底通信光缆水下设备供电系统设计方法,并结合案例分析供电系统的切换保护机制。

关键词:海底通信光缆;光中继器;分支单元;远供电源设备;切换保护

中图分类号:TN914 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2022)05-0077-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.05.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design of power supply system for submarine communication optical cable underwater equipment

LIU Xinghua, YE Yin

(Guangdong Planning and Designing Institute of Telecommunication Co., Ltd., Guangzhou 510630, China)

Abstract: Submarine communication optical cable is the main carrier of international communication, and the accelerated growth of international internet bandwidth has promoted the accelerated construction of submarine communication optical cable. This paper introduces the basic structure of the power supply system for submarine communication optical cable underwater equipment, analyzes the working principles and internal circuit design of submarine repeaters, submarine branch unit, and power supply equipment. This paper proposes the design method of power supply system design for submarine communication optical cable underwater equipment, and analysis the switching protection mechanism of the power supply system combined with a case.

Key words: submarine communication optical cable, repeater, branch unit, power feeding equipment, switching protection

0 引言

海底通信光缆(下文简称海底光缆)是通信领域最重要的信息基础设施,承载了90%以上的国际通信流量。近年来,全球国际互联网带宽持续呈现加速增长态势,带宽需求的持续增长推动了海底光缆的加速建设。跨洋海底光缆长度可达到几千千米甚至上万千米,光信号在长距离传输后会严重衰减,因此在传输一定距离后需要增加光中继器对光信号进行放大。但光中继器要消耗电能,于是,陆地长途通信光缆系统每隔几十千米会在沿途的城市或者乡镇设置中继机

收稿日期:2022-02-14。

基金项目:广东省重点领域研发计划项目(编号:2020B0101080002)资助。

作者简介:刘兴华(1983—),男,硕士学历,广东省电信规划设计院有限公司工程师,长期从事光通信网络的规划和设计工作,参与了多条国际海底光缆的规划和设计,编写的新跨太平洋(NCP)海缆、新港美(HKA)海缆、亚太直达(ADC)海缆可行性研究报告获得多项省部级优秀工程咨询奖。



房放置光中继器,并接入公共电网给光中继器供电。由于海洋中不存在电网的概念,海底光缆必须靠自身解决光中继器的用电需求。本文分析海底光缆水下设备的供电原理,并提出系统设计方法,以及在不同故障情况下海底光缆供电系统的保护方案。

1 供电系统结构

海底光缆供电系统设备可分为陆上设备和水下设备,结构如图1所示。陆上设备包括海底光缆传输设备、网管设备、光谱接入设备和远供电源设备(PFE)等。陆上设备放置在海缆登陆站,从海缆站接入公共电网给设备供电。水下设备包括海底光中继器、海底分支单元(BU)等,由于远离陆地,需要通过远供电源技术解决用电问题。

海底光缆水下设备供电系统分为海底用电单元、供电单元和导电体三部分。海底用电单元包括海底光中继器、BU等,供电单元为陆上PFE,导电体包括海底光缆的铜管、陆地电缆和海洋接地装置等。

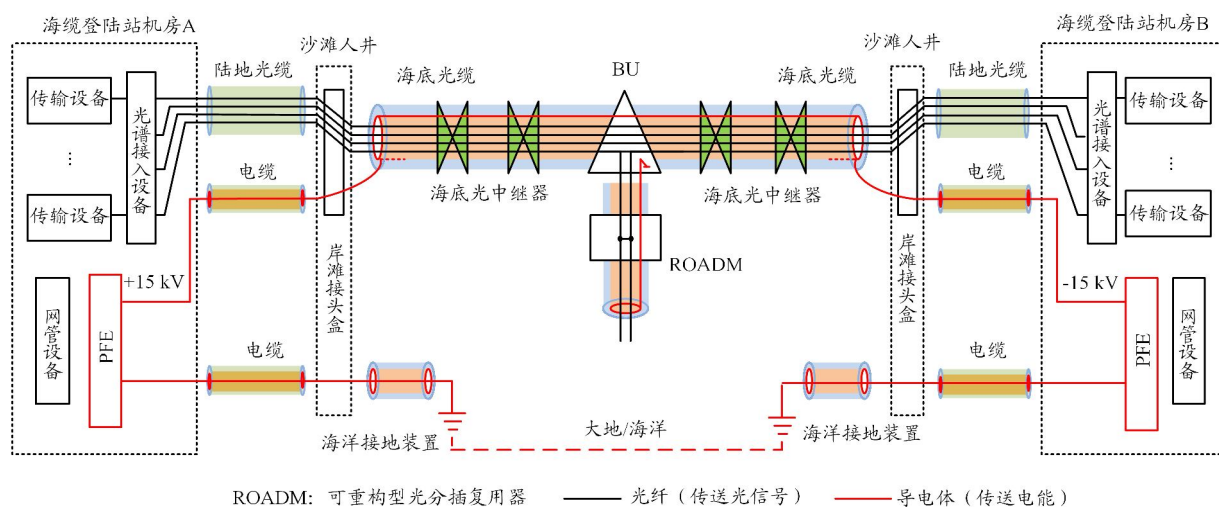


图1 海底光缆供电系统结构图

海底光缆水下设备供电系统采用直流高压电源供电,用电单元之间组成串联电路,通过调整系统电压、电流大小,使所有用电单元获得合适的电能。海底光缆在岸滩人井内登陆后,纤芯通过陆地光缆连接海底光缆终端传输设备,铜管通过陆地电缆连接供电单元中的一极,供电单元另外一极通过接地电缆连接海洋接地装置,则供电单元、导电体、用电单元与大地(海洋)形成闭合的电流回路。本文介绍海底光缆水下设备供电系统各部分的电气特性及系统设计。

2 供电系统原理

2.1 海底用电单元

2.1.1 海底光中继器

光中继器之间通过海底光缆连接,为方便存储、运输和施工,这些设备外形一般采用胶囊状结构,如图2所示。因为海底环境恶劣,且海底光缆施工敷设、维护打捞非常困难,所以光中继器主体外壳一般采用铜/钛合金等材料制造,具有密封性好、耐高压、耐腐蚀和耐磨损等特点,需支持海底光缆系统稳定工作25年以上。



图2 海底光中继器外形图

海底光中继器工作原理图如图3所示,采用掺铒光纤放大器对光信号进行放大。光中继器通电后,泵浦激光器(LD)向掺铒光纤提供泵浦光;掺铒光纤吸收泵浦光的能量后,其电子会从基态跃迁到能阶较高的亚稳态;当有信号光通过时,亚稳态电子会发生受激

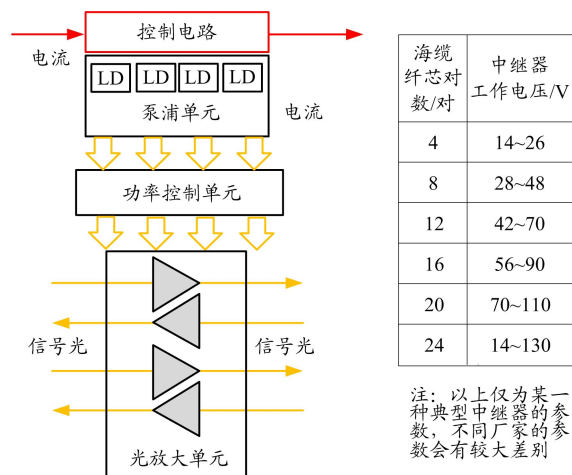


图3 海底光中继器工作原理图

辐射效应,放射出大量与信号光相同波长的光子,从而实现信号光的放大。

光中继器的泵浦LD采用共享设计,多个LD的泵浦光汇入功率控制单元后再分配给多个光路。当单个LD发生故障时,通过调节LD的输出功率,使每个光路放大的光信号仍能满足传输性能要求。由于光中继器的工作电压(从几十伏到一百多伏不等)取决于其集成泵浦LD的数量/纤芯数量,因此海底光缆系统纤芯数越多,则需要的泵浦LD越多。

光中继器的供电方式包括单极性和双极性2种,其内部电路图如图4所示。单极性光中继器只允许电流从一个方向输入,双极性光中继器允许输入电流的方向发生改变。在故障情况下,当海缆站的电源电极发生切换时,会导致光中继器输入电流方向发生改变。因此,设计双极性光中继器内部电路,可使通过内部器件的电流方向保持不变,从而维持光中继器正常工作。

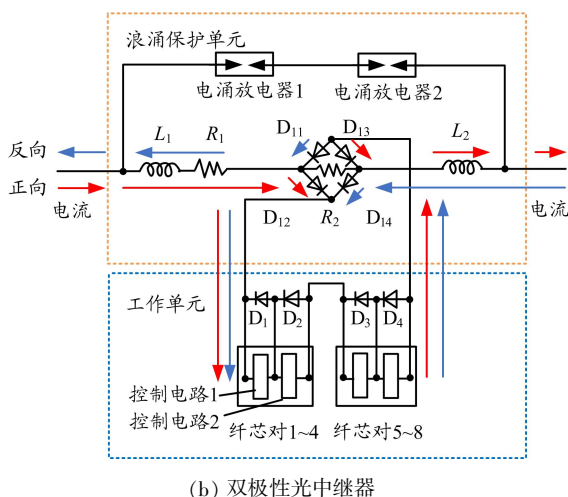
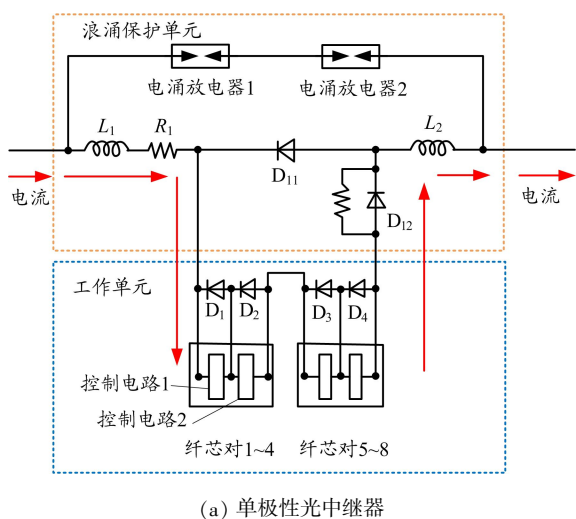


图4 海底光中继器内部电路图

在海底光缆发生故障时,系统由于短路、电源切换等原因可能产生足以损伤内部器件的浪涌电流(电压),因此还应根据内部器件的性能,在光中继器中设计合适的浪涌保护电路。图4(b)中的浪涌保护单元在海底光缆系统正常工作时处于开路状态,当海底光缆系统中产生浪涌电流时,保护单元形成通路,疏导绝大部分电流,保护用电单元不因电流过大而损坏。

主流的光中继器工作电流一般在0.5~1.5 A之间,可承受最大的电压为18 kV,浪涌电流一般为600 A。不同厂家的光中继器电气参数会有比较大的出入。

2.1.2 BU

海底光缆除了设置主干段外,往往还需要通过BU设置分支段连接不同的地区。BU的外形也采用与光中继器类似的胶囊状结构,如图5所示。BU一般设置有3个接线端,其中2个连接主干段海底光缆,1个连接分支段海底光缆。



图5 BU外形图

BU不仅具有将纤芯/信号分配到不同路由方向的功能,在海底光缆发生故障时,还可以实现供电电源相互倒换,其工作原理图如图6所示,电源切换状态如图7所示。目前,BU电源切换技术已经由早期的控制端站PFE上电顺序发展为通过端站发送命令来控制BU切换的智能控制方式。

图7中,BU的3个接线端(A、B、C端)分别通过海底光缆与3个方向的海缆站PFE设备连接,并且内部配置一个电极(GND端)与海水连接。BU可支持任何极性的电流方向,3个接线端中的任意2个均可以传导主干电流,而另外一个自动配置成为分支属性。电源的切换功能可通过改变BU的工作状态来调整供电系统的拓扑结构,特别是在海底光缆线路故障的情况下保持业务不中断。

BU可切换电源供电状态为A-B/C-GND、A-C/B-GND或者B-C/A-GND 3种。3个接线端同时接地为

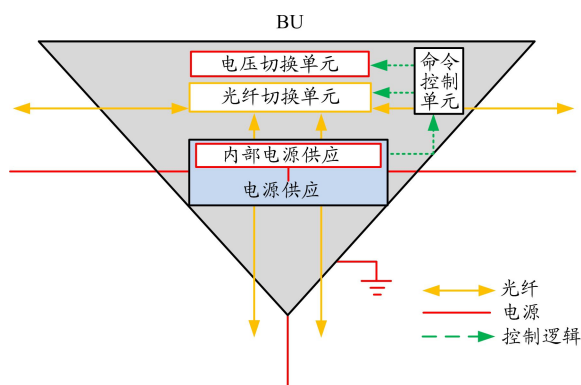


图6 BU工作原理图

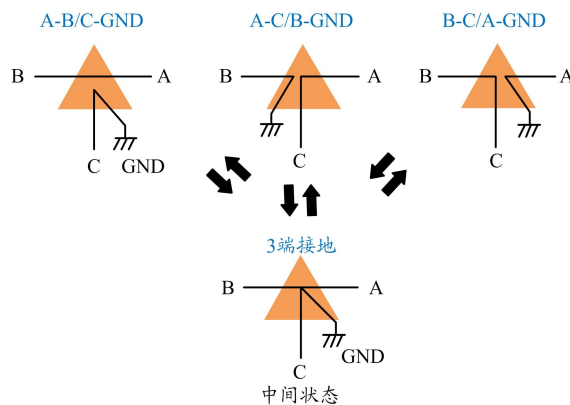


图7 BU电源切换状态

刘兴华,叶胤:海底通信光缆水下设备供电系统设计

切换的中间状态,任何状态之间的切换都要经过它,以降低由于切换错误导致系统断电风险。

BU 内部控制电路图如图 8 所示。海缆站发送的控制命令通过海底光缆纤芯传输到 BU 控制信号接收器,继电器切换控制器,根据命令调整电路的闭合/断开,从而搭建与控制命令一致的电路连接,实现电源供电状态的调整。

在切换电压限制上,通过加强 BU 内部单元的绝缘设计及高可靠性继电器的选取,由原来几百伏低压发展到 18 kV 高压热切换,减少了 BU 电源切换过程中 PFE 上下电操作及极性调整时间,提升业务恢复速度,也减少业务中断时间。

2.2 供电单元

海底光缆供电系统的 PFE 为所有水下设备提供高压直流的电力供应,目前业界 PFE 单端供电能力最高可达 18 kV。

PFE 的核心部件是电压转换模块,其负责将机房提供的低压电转换为高压电(转换电路如图 9 所示),一般通过串联多个转换模块实现,并配置为 $N+N$ 或者 $N+1$ 的备份方式。当任何一块转换模块发生故障时,PFE 通过旁路故障模块,使输出的电压、电流仍能满足海底光缆系统正常运行要求。

PFE 输出的电压、电流需具备高稳定性,并能实时监测及控制,同时还需具备海洋地和站地切换功能、输出电压极性变换功能,各海缆站的 PFE 应能相互协调工作。因 PFE 为高压设备,需配置保护设施避免操作人员受高压电伤害。

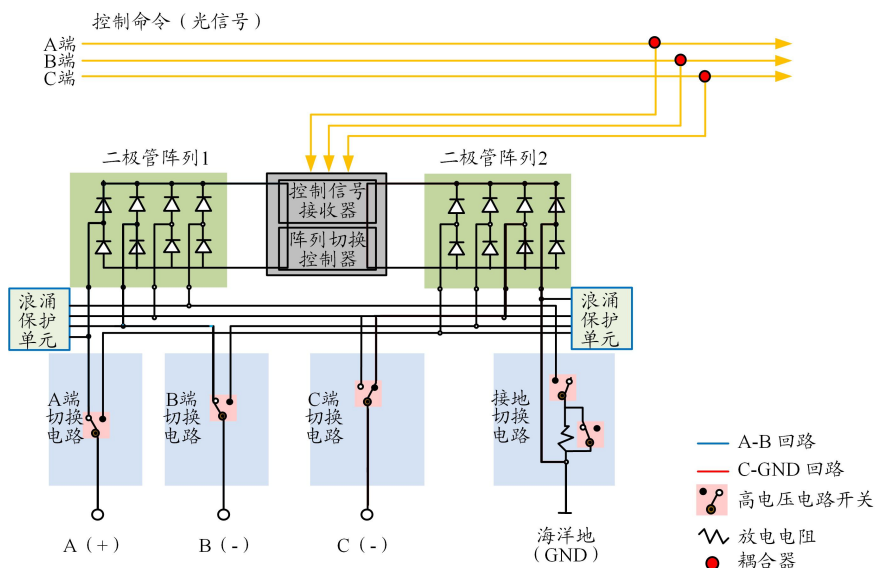


图 8 BU 内部控制电路图

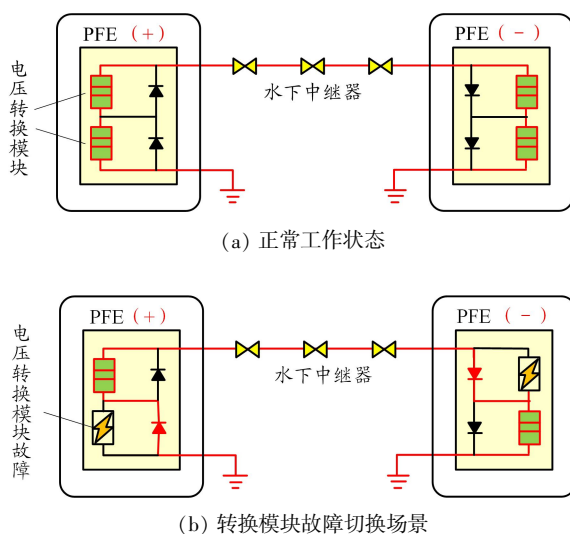


图 9 PFE 电压转换模块切换电路

2.3 导电体

海底光缆供电系统通过陆地电缆和集成在海底光缆内部的铜管给水下设备传输电能,电缆与海底光缆的内部结构如图 10 所示。主流海底光缆的铜管电阻值一般在 $0.8\sim 1.2\ \Omega/\text{km}$ 之间,跨洋海底光缆长达几千千米甚至上万千米,加载到海底光缆铜管的电压达到几千伏。海底光缆的电阻值与铜管的材质、厚度有关,厚度越大的铜管电阻值越低,导电性能更好,但成本也更高,因此要根据海底光缆供电系统传输距离,选择性能、价格合适的海底光缆铜管。

供电系统必须形成闭合的回路才能正常工作,一般用 PFE 工作接地的方式搭建闭合回路。例如:海缆站 A 的 PFE 设备的正极通过铜缆连接海底用电单元,并连接至海缆站 B 的 PFE 设备的负极,海缆站 A/B 的 PFE 设备的另一极连接海洋接地装置(零电势),利用大地(或海水)搭建闭合回路。海洋接地装置宜埋设在海底光缆登陆岸滩上,当海底光缆登陆岸滩不具备埋设海洋接地装置的条件时,海洋接地装置可埋设在登陆站内,或埋设在水海里。海洋接地装置的接地电阻不应大于 $5\ \Omega$ 。

3 供电系统设计与供电切换

3.1 供电系统设计

海底光缆供电系统的设计首先要根据传输性能的要求,合理配置水下

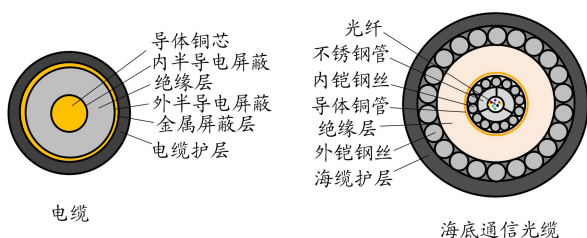


图 10 海底光缆供电系统导电体

设备的类型、数量,在此基础上,一般从海底光缆电压、水下设备电压以及地电位差 3 个方面考虑,设计合适的供电系统。

◆海底光缆电压是加载在海底光缆铜管的电压,它与温度有关,大部分海底的温度都非常低,为了反映海底光缆部署后的实际系统电压,海底光缆电压应根据海床温度而不是室温计算。海底光缆电压=海底光缆长度 $\times$ 海底光缆电阻 $\times$ 线路电流。

◆水下设备电压是水下设备(包括光中继器、BU 等)正常运行的压降。某些系统会使用单极性水下设备实现低电压,但需要特别考虑和权衡,因为单极性水下设备降低了系统供电的灵活性。水下设备电压=单个水下设备电压 $\times$ 水下设备数量。

◆地电位差产生的原因是太阳风暴 11 年周期引起的地球磁场变化。为覆盖地电位差变化,跨洋海底光缆供电系统通常按 0.1 V/km 考虑余量。地电位差=海底光缆长度 $\times$ 0.1 V/km。

本文以一个长为 8000 km、配置 12 对纤芯的海底光缆供电系统为例设计供电系统。加载在海底光缆的电压为 $0.8 \text{ A} \times 1 \text{ } \Omega/\text{km} \times 8000 \text{ km} = 6400 \text{ V}$ 。按每 80 km 配置 1 个光中继器,系统需配置约 100 个光中继器,加载在光中继器的电压为 $70 \text{ V} \times 100 = 7000 \text{ V}$;假设系统需配置约 5 个 BU,加载在 BU 的电压为 $50 \text{ V} \times 5 = 250 \text{ V}$;地电位差为 $0.1 \text{ V/km} \times 8000 \text{ km} = 800 \text{ V}$;以上各项相加,得到系统端到端的电压为 14450 V。详细参数如表 1 所示。

海底光缆供电系统一般采用双端供电,在正常情况下双端海缆站的 PFE 共同给水下设备供电,如图 11 (a)所示。当其中一端 PFE 发生故障,把该端 PFE 设备电压设为零,由另外一端 PFE 单端供电,单端 PFE 的最大电压必须能满足系统全程工作电压值,如图 11 (b)所示。如海底光缆绝缘层发生破损现状,导致海底光缆铜管与海水连接,相当于该点接地,电压降为零,通过调节两端 PFE 的电压值,使水下设备仍能获得正常工作电压,如图 11(c)所示。

表 1 海底光缆供电系统设计参数表

类别	明细	参数
海底光缆	线路电流/A	0.8
	海底光缆铜管电阻率/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	1
	海底光缆长度/km	8000
	海底光缆电压合计/V	6400
光中继器	每个光中继器电压/V	70
	光中继器数量/个	100
	光中继器电压合计/V	7000
BU	每个 BU 电压/V	50
	BU 数量/个	5
	BU 电压合计/V	250
地电位差	系数/($\text{V} \cdot \text{km}^{-1}$)	0.1
	地电位差合计/V	800
系统电压合计/V		14 450
PFE 双端供电电压(每端)/V		7225

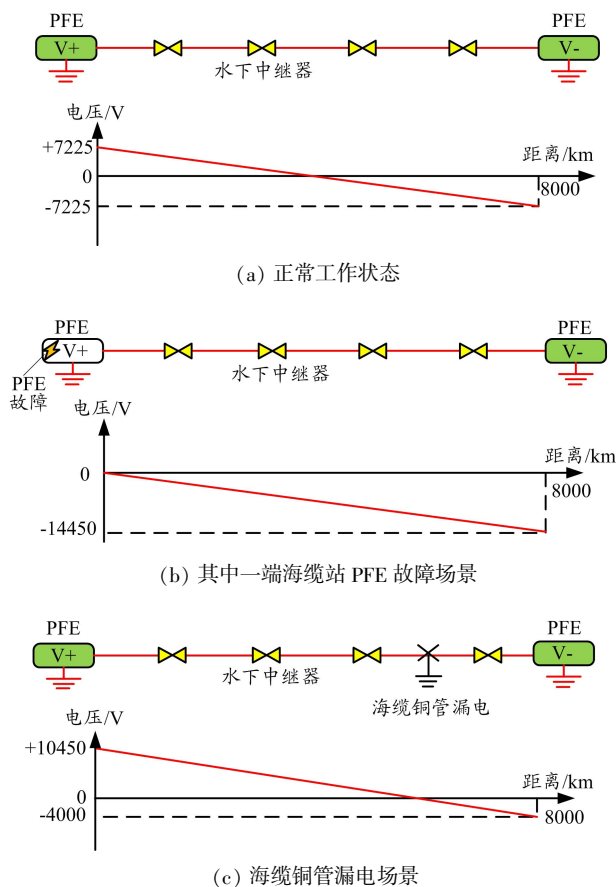


图 11 海底光缆供电系统图

刘兴华,叶胤:海底通信光缆水下设备供电系统设计

3.2 海底光缆中断与供电切换

海底光缆在受到抛锚、泥石流等外力的作用下可能会中断。海底光缆修复时间长,短则几天,长则达数月。随着海底光缆承载通信业务量的增加,对业务的稳定性要求也越来越高。对出现故障的海底光缆段,长时间业务中断只允许发生在故障侧,无故障侧应实现快速业务恢复。海底光缆供电系统可通过切换 BU 调整供电的方式来恢复业务。

系统正常工作状态下,主干段水下设备由两端 PFE 供电,分支段水下设备由单端 PFE 供电,如图 12(a)所示。当主干段某处发生海底光缆中断时,主干段水下设备全部处于掉电停工状态,分支段虽然供电正常,但通信业务无法在主干段传输,整个系统通信业务中断,如图 12(b)所示。切换 BU 的连接状态,有海底光缆中断的段落通过 BU 设置为接地,无中断的 2 节线

路设置为双端供电。调整 PFE 输出合适的功率,无中断 2 节线路的水下设备正常工作,这 2 节线路的通信业务得以恢复,如图 12(c)所示。系统级故障从故障发生到业务恢复总时间不应超过 60 s。

4 结束语

本文从海底光缆水下设备供电系统基本结构出发,详细分析了海底光中继器、BU 和远供电源设备等器件的工作原理及内部电路设计,并结合案例分析供电系统的切换保护机制,对国际海底光缆水下设备供电系统设计具有重要的借鉴意义。

为了实现更长的跨洋系统通信距离和满足未来系统光纤对数增加的需求,供电系统的能力还需在以下几方面进一步提升:①电能损耗需进一步降低,海底光缆需具有更低的直流电阻,目前有中继海底光缆的直流电阻一般在 $1.0\ \Omega/\text{km}$ 左右,今后超长距海底光缆直流电阻发展趋势降低到 $0.8\ \Omega/\text{km}$,甚至 $0.6\ \Omega/\text{km}$ 。②系统高压供电,需要所有配套产品都具备耐高压的能力,假设海底光缆已采用未来 $0.6\ \Omega/\text{km}$ 的低阻抗技术产品,对于 12 000 km 跨太平洋系统,压降将达到 20 kV (配置 16 对纤芯条件下)。③需提高光中继器电路效率,可通过从泵浦共享架构、泵浦驱动、防护和整流电路等方面进行设计优化。

参考文献:

- [1] 叶胤,王超,莫仁芸. 海底光缆通信系统技术发展分析[J]. 广东通信技术, 2021(1): 19-23.
- [2] 叶胤,刘杰. 海缆陆缆光传输系统联合设计的研究[J]. 光通信技术, 2021, 45(12): 50-54.
- [3] 晏庆,张晓,范路芳. 海底光缆通信系统安全威胁分析及应对策略[J]. 数字技术及应用, 2021(5): 25-27.
- [4] 赵鑫,汤晓华,汤瑞. 海洋光通信网络发展现状及趋势研究[J]. 信息技术与政策, 2020(4): 72-76.
- [5] ITU-T. Transverse compatible DWDM applications for repeatered optical fibre submarine cable systems: G.977.1[S]. Geneva: ITU, 2021.
- [6] CHESNOY J. Undersea fiber communication systems [M]. Amsterdam, Boston: Academic Press, 2002.

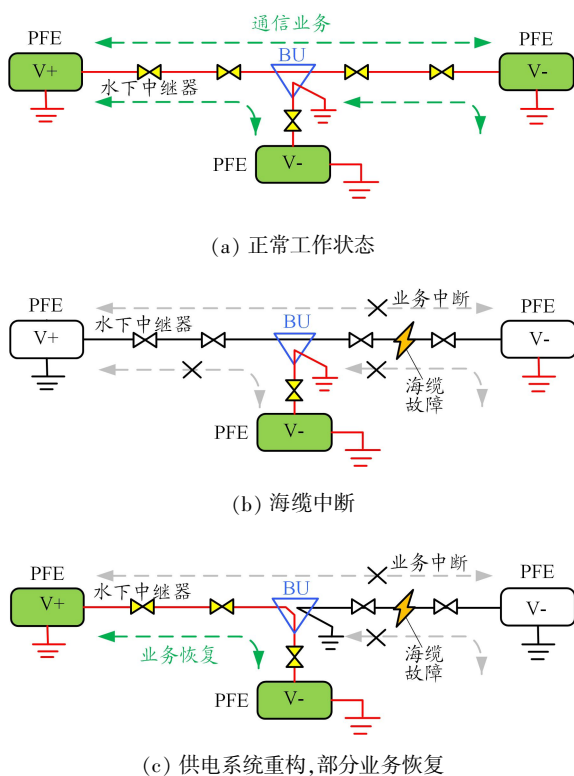


图 12 海底光缆供电切换图