

缆系海底观测网电力系统结构与拓扑可靠性

吕 枫¹, 周怀阳¹, 岳继光², 何 斌²

(1. 同济大学 海洋与地球科学学院, 上海 200092; 2. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要: 缆系海底观测网可持续提供充裕电能和通信带宽给大量海底科学仪器。基于可靠性和经济性的原则, 分析得观测网电力系统适合采用负高压单极直流输电、以海水作为电流回路、海底负载并联供电和级联式高频直流变换的总体方案, 并以此为基础设计了观测网的物理架构。根据观测网的特点, 总结了海底电力系统适合采用的几类典型拓扑, 并以水下基站平均供电可靠度为可靠性指标, 计算并比较了这些典型拓扑的可靠性, 可为观测网的拓扑规划提供依据。进一步设计了海底电力系统的运行模式, 以提高观测网的容错能力。研究结果可为国家未来建设大规模观测网提供参考。

关键词: 海底电力系统; 缆系海底观测网; 负高压直流输电; 拓扑可靠性

中图分类号: TP 39

文献标志码: A

Power System Structure and Topology Reliability of Cabled Seafloor Observatory Networks

LÜ Feng¹, ZHOU Huaiyang¹, YUE Jiguang², HE Bin²

(1. College of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Cabled seafloor observatory networks (CSONs) can provide a large amount of undersea scientific instruments with sustained and abundant power. According to the principles of reliability and economy, the paper illustrates why the power system of CSONs is suitable to adopt the negative monopole DC transmission scheme with the seawater as the current returning path by parallel connecting undersea loads, and employing the cascaded high-frequency DC-DC conversion system, and then the CSONs' physical structure is established based on the analysis. According to the CSON's characteristics, several typical undersea power system topologies are summarized. With the average power feeding reliability of the undersea stations as the reliability index, the reliability indexes of these typical topologies are calculated and

compared. This method can provide a basis for the CSONs' topology planning. Furthermore, the operation mode of the undersea power system is designed to enhance the CSONs' fault-tolerance capability. The study can be a reference for the future construction of large-scale national CSONs.

Key words: undersea power systems; cabled seafloor observatory networks; negative high voltage direct current power transmission; topology reliability

海洋对全球环境和气候变化的影响巨大。为理解海洋的运行机理, 需要有目的地开展长期原位观测。但海洋的巨大体量长期以来严重阻碍了人类深入观测海洋内部的复杂动态过程, 造成了观测数据的严重缺乏。科学家迫切需要通过高分辨率的长期原位观测来记录和量化数十年的时空序列参数, 因此缆系海底观测网逐渐成为本世纪海洋科技领域的研究热点。它将电力系统和通信系统直接从陆地延伸到海底, 可解决大量科学仪器在海底长期运行面临的持续电能供给和海量数据传输两大难题, 从而实现从海底向上长期实时观测深大海洋的物理、化学、生物和地质等复杂过程^[1-8]。

国内外对缆系观测网的研究尚处于起步阶段。小规模试验性观测网海缆总长一般为数公里至数十公里, 通常只有单个海底节点^[9-12]。较大规模的观测网海缆总长可达数百公里以上, 通常具有多个海底节点^[13-16]。在国家“八六三”高技术研究发展计划的资助下, 近年来国内多家涉海单位合作研究了海底观测试验节点关键技术^[17]。在上海市科委的资助下, 采用低压供电和无线通信的东海小衢山观测站于 2009 年建成^[18]。在此基础上, 针对海气交换、板块移动、海洋沉积、大洋循环和自然灾害等科学主题, 国内多家涉海单位开始合作研究小规模试验性观测网。

海底电力系统是缆系观测网中最关键却也是技术风险最大的部分. 目前国内外主要侧重于其电力设备的研制^[19-21], 而针对其电力系统可靠性的研究很少. 文献[22]采用蒙特卡罗法比较了同一观测网拓扑下两种常见通信系统结构的可靠性, 而未涉及电力系统可靠性, 且该法计算量较大. 因此本文首先研究了适用于缆系观测网的海底电力系统总体结构, 以此为基础总结了适用于缆系观测网的典型海底电网结构, 然后以水下基站平均供电可靠度为可靠性指标, 分析并比较了典型拓扑的可靠性, 最后设计了观测网的运行模式. 本文的研究内容可为我国未来建设大规模海底观测网提供参考.

1 缆系海底观测网电力系统结构设计

由于缆系观测网主要位于海底, 特别是深海海底, 特殊地理位置加上天气、海况和船时的限制, 导致其布放和维修的周期很长, 成本也极为昂贵. 缆系观测网主干部分的运行寿命通常要求在 25 年以上, 且无需定期更换或维护其主要部件, 因此必须从可靠性和经济性两方面考虑来做折中设计. 缆系观测网的总体设计原则是, 在满足科学需求的前提下, 确保足够的可靠性、灵活性和扩展性, 并尽量降低其运行时间内建设和维护的总成本.

缆系观测网的核心电力元件为海底变换器、海缆和岸基远供设备 (power feeding equipment, PFE), 其中海缆还包括分支单元 (branching unit, BU). 缆系观测网适合采用在跨洋通信系统中应用的标准光电复合海缆, 以降低海缆研制和敷埋的成本. 该类海缆的功能单元为光纤和铜管, 分别用于数据传输和电能输送, 其适用于不同海底环境的几种典型结构如图 1 所示. 可见, 典型通信海缆只有一路铜导体, 因此缆系观测网适合采用单极输电, 且 PFE 和海底变换器之间需通过海水形成供电电流回路.

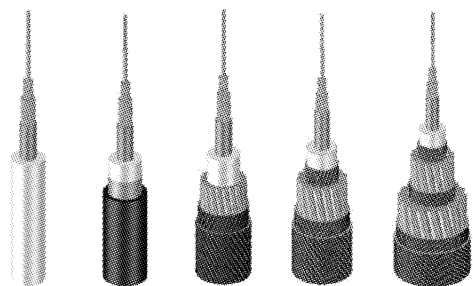


图 1 适用于不同海底环境的几种典型通信海缆结构

Fig.1 Several typical submarine cable structures under various seafloor conditions

AC(交流)输电较 DC(直流)输电更易于变换电压和切断故障电流, 但由于海缆的对地电容较大, 若采用 AC 输电将造成大量无功损耗, 从而降低电能传输效率, 因此缆系观测网不适合采用 AC 输电. 此外, AC 变压器的功率密度通常较小, 也不适用于要求体积紧凑的海底设备. 观测网覆盖范围较广, 提高输电电压可降低海底远距离电能传输损耗, 而输电电压受海缆长期绝缘性能的限制, 目前典型海缆长期运行的最高设计耐压为 10 kV. 随着现代电力电子技术的发展, 在观测网的电压等级和功率范围内, 采用多变换器串并联组合直流变换技术, 已可实现变换高压 DC 电压和切断故障 DC 电流^[20]. 因此, 缆系观测网适合采用 10 kV 以内的高压 DC 输电.

电力系统有并联和串联两大供电方式, 如图 2 所示. 图中: U, I, P 分别表示电压、电流、功率; 下标 s, p 分别表示串联、并联; n 表示水下基站编号. 并联方式中, PFE 为电压源, 各海底变换器与 PFE 并联, 所有电力元件具有公共接地端; 串联方式中, PFE 为电流源, 各海底变换器与 PFE 串联, 只在海缆终端具有接地端. 在电网拓扑和 PFE 输出电压相同的情况下, 并联方式相比串联方式, 能够提供更多功率给海底负荷, 且具有更高的输电效率. 此外, 并联方式更易于通过分支单元扩展连接水下基站, 而串联方式则需在分支单元处安装电流变换器^[19], 因此并联方式的可扩展性优于串联方式. 在缆系观测网中, 串联方式的优点是在海缆单点接地时, 因海水可提供电流回路, 海底电力系统通常仍能正常运行. 而并联方式可采用海缆分段继电保护方式降低该运行风

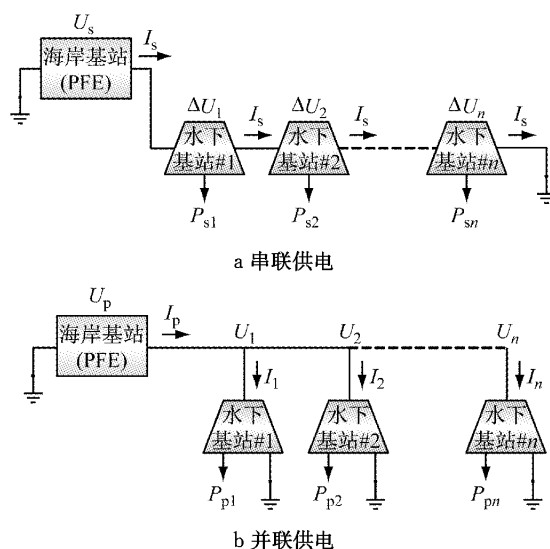


图 2 海底电力系统的两大供电方式

Fig.2 Two power transmission schemes in undersea power systems

险,即通过电切换分支单元隔离故障,使得观测网其余部分恢复运行.因此,缆系观测网更适合采用并联方式,而每个水下基站和海岸基站都需要设置接地(海)电极.

为降低观测网维护成本,避免水下基站的接海电极被腐蚀,该接海电极须为阴极,即相对海缆输电导体为高电位.而海岸基站的接地电极易于更换和维护,可设置具有冗余备份的阳极,使得维护操作不影响观测网运行.因此,PFE 的输出电压相对地电平应为负压,图 3 为海底负压直流输电原理图.

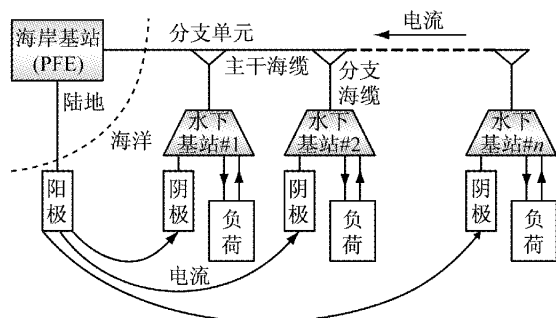


图 3 海底负压直流输电原理图

Fig.3 Schematic of the undersea negative DC transmission scheme

可见,缆系观测网适合采用的电力系统总体方案为:负高压单极 DC 输电,以海水作为电流回路;PFE 为电压源,与海底负荷并联供电.因此,缆系观测网的总体物理架构设计如图 4 所示.海底变换器位于水下基站内,通过分支海缆与主干海缆上相应

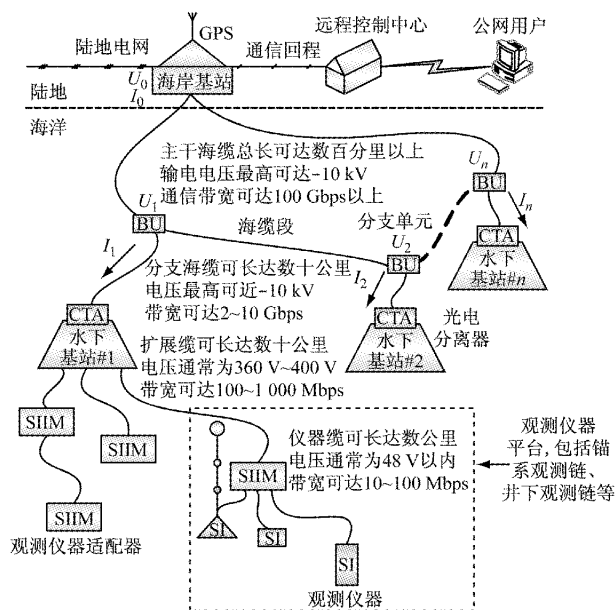


图 4 缆系海底观测网总体物理架构设计

Fig.4 Design of the overall physical structure of cabled seafloor observatory networks

的分支单元连接,将海缆提供的高压直流输电电能(通常为 $-1\text{ kV}\sim-10\text{ kV}$)降压变换为观测仪器适配器(science instrument interface module, SIIM)所需的中压配电电能(通常为 $360\text{ V}\sim400\text{ V}$),再由 SIIM 将中压配电电压降压变换为观测设备(science instrument, SI)所需的低压直流电能(通常为 48 V 、 24 V 和 12 V 等).PFE 位于海岸基站内,将陆地电网提供的工频 AC 电能变换为恒定电压的高压 DC 电能,通过主干海缆、分支单元和分支海缆连接至各水下基站内的海缆终端组件(cable termination assembly, CTA, 也称光电分离器),再给各水下基站内的高压直流变换器供电.

海底设备的维修维护成本很高,因此要求海底变换器具有高可靠性.为了耐高压和强腐蚀性,海底设备需要封装在钛合金腔体中使用,因此要求海底变换器体积紧凑,便于制造可靠的耐压密封结构.海底变换器采用高频开关直流变换技术,可提高电能变换效率和功率密度,降低发热损耗,从而减小体积、提高可靠性和延长工作寿命.因此,缆系观测网适合采用级联式直流变换系统,实现高压-中压-低压的多级变换,其中低压 DC 电能除了给海底仪器供电,还用于给海底设备内部的功能负载(主要为通信设备与监控电路)供电,其示意图见图 5.

2 缆系海底观测网电力系统典型拓扑及其可靠性

电力系统的可靠性主要由电网拓扑、元件参数和运行参数等因素决定^[23].在一定的元件参数和运行参数下,海底电网拓扑的设计显得尤为重要,而各水下基站的布放位置是影响电网拓扑结构和海缆路由规划的关键因素.每个水下基站通常可覆盖其方圆数十公里的观测区域,其布放范围由相应的观测区域决定,而其具体布放位置通常在沉积缓慢和平坦稳定的海底地质结构上.

2.1 基本结线方式

海底直流电网的基本结线方式主要有放射式、链式、环式和两端供电式四种,如图 6 所示.其中,放射式和链式为无备用结线方式,两端供电式和环式为有备用结线方式.海底电力系统潮流取决于各段海缆的长度和各水下基站的负荷.在满足电力系统稳定性限制的前提下,潮流调整的幅度主要取决于 PFE 的容量和输出电压范围.

假设缆系观测网为不可修系统,且发电系统和

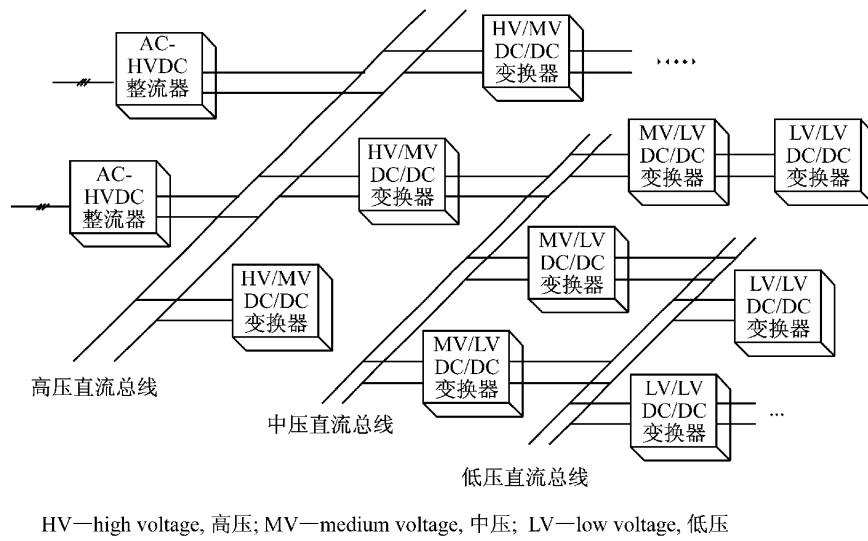


图 5 海底级联式高频开关直流变换系统

Fig.5 Undersea cascaded high-frequency switching DC-DC conversion system

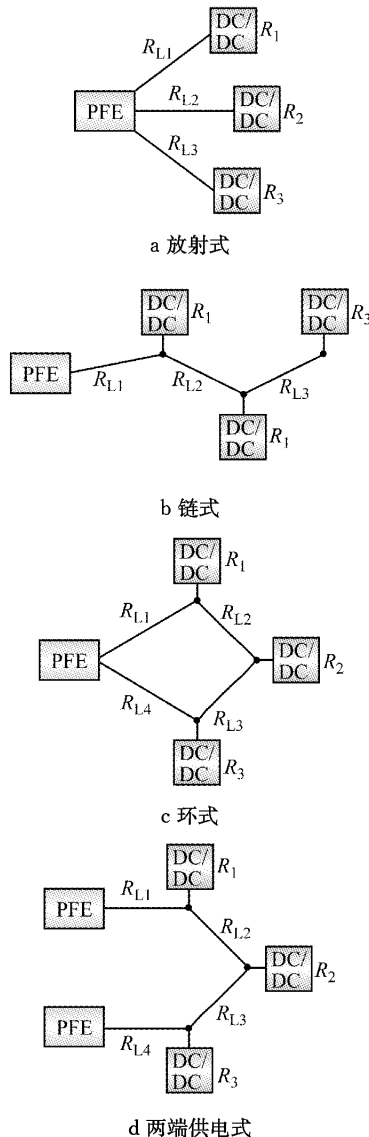


图 6 海底直流电网的基本接线方式

Fig.6 Basic topologies of undersea DC power system

PFE 的可靠度为 1, 海缆段 n 的可靠度为 R_{Ln} (下述分析中设所有海缆段的可靠度均为 R_L), 主干电网对水下基站 $i (i=1, 2, \dots, n)$ 的供电可靠度为 R_i , 其中 n 为水下基站的个数 (下文计算中均采用同样假设). 本文采用水下基站平均供电可靠度作为海底电网的拓扑可靠性指标, 可用 $R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i$ 表示. 通过

计算, 放射式的可靠性指标为 $R_{\text{star}} = R_L$, 链式的可靠性指标为 $R_{\text{chain}} = \frac{1}{3} (R_L + R_L^2 + R_L^3)$, 环式和两端供电

式的可靠性指标为 $R_{\text{ring}} = R_{\text{double}} = \frac{2}{3} (R_L + R_L^2 + R_L^3)$

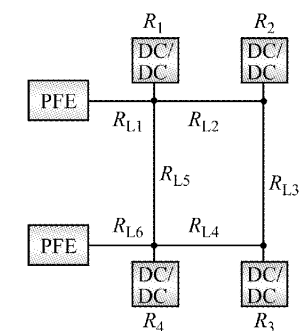
— R_L^4 . 若 R_L 为确定数, 则由于 $0 < R_L < 1$, 通过比较上述三个多项式, 可得 $R_{\text{chain}} < R_{\text{star}} < R_{\text{ring}} = R_{\text{double}}$, 可见总体上环式和两端供电式更为可靠. 由于假设发电系统和 PFE 的可靠度为 1, 因此环式和两端供电式方式的可靠度相同, 若考虑发电系统和 PFE 的实际可靠度, 两端供电式的可靠度将略高于环式.

2.2 双电源环式接线方式

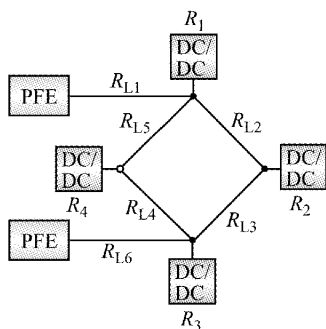
双电源环式拓扑也是缆系观测网适合采用的较为简单的有备用接线方式, 根据海底负荷分布情况, 总体上可分为负荷集中供电和负荷分散供电两种形式, 如图 7 所示.

负荷集中式双电源环式拓扑的各节点供电可靠度为

$$\begin{aligned}
 R_1 &= R_4 = 1 - (1 - R_L)(1 - R_L(1 - (1 - R_L)(1 - R_L^3))) \\
 R_2 &= R_3 = 1 - (1 - R_L(1 - (1 - R_L)(1 - R_L^3))) (1 - R_L(1 - (1 - R_L^2)^2)) \quad (1)
 \end{aligned}$$



a 负荷集中型双电源环式拓扑



b 负荷分散型双电源环式拓扑

图 7 海底电网的双电源供电环式拓扑

Fig.7 Ring topologies with double PFEs of undersea power systems

因此负荷集中式双电源环式拓扑的可靠性指标为

$$R_{2\text{ring,lc}} = \frac{1}{4}(R_1 + R_2 + R_3 + R_4) = \frac{1}{2}(-R_L^{10} + R_L^9 + 2R_L^8 - R_L^7 + R_L^6 - 6R_L^5 + 2R_L^4 + R_L^3 + 2R_L^2 + R_L) \quad (2)$$

负荷分散式双电源环式拓扑的各节点供电可靠度为

$$\begin{aligned} R_1 &= R_3 = 1 - (1 - R_L)(1 - R_L(1 - (1 - R_L^2)^2)) \\ R_2 &= R_4 = 1 - (1 - R_L(1 - (1 - R_L)(1 - R_L^3)))^2 \end{aligned} \quad (3)$$

因此负荷分散式双电源环式拓扑的可靠性指标为

$$R_{2\text{ring,ld}} = \frac{1}{4}(R_1 + R_2 + R_3 + R_4) = \frac{1}{2}(-R_L^{10} + 2R_L^9 - R_L^8 + 2R_L^7 - R_L^6 - 3R_L^5 - R_L^4 + 2R_L^3 + 2R_L^2 + R_L) \quad (4)$$

负荷分散式和负荷集中式的可靠性指标的差值为

$$R_{2\text{ring,ld}} - R_{2\text{ring,lc}} = \frac{1}{2}(R_L^9 - 3R_L^8 + 3R_L^7 - 2R_L^6 + 3R_L^5 - 3R_L^4 + R_L^3) =$$

$$\frac{1}{2}R_L^3(1 - R_L)^4 \left(\left(R + \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{3}{4} \right) > 0 \quad (5)$$

可见,在双电源环式拓扑中,负荷分散供电结构的可靠性高于负荷集中供电结构.实际上,这个结论也可推广到其他多电源供电的拓扑结构.

2.3 网型结线方式

若缆系观测网规模较大、节点较多,可采用网型拓扑.网型拓扑从各 PFE 到各水下基站均有多条冗余通道,因此可提高电网的可靠性和生存性,且能提供更大的功率和具有更高的电压稳定性^[24].图 8 为海底电力系统一种典型的六节点网型拓扑.

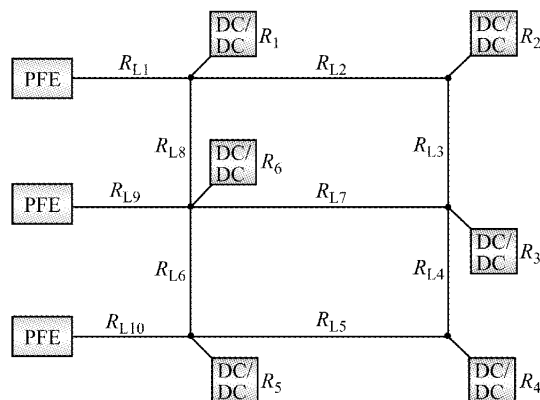


图 8 海底电网一种典型的六节点网型拓扑

Fig.8 A typical six-node meshed topology of undersea power systems

为比较上述结线方式的可靠性,假设海缆段可靠度均为确定值 $R_L = 0.8500$ 和区间数 $R_L = [0.8000, 0.9000]$,通过计算可得几种典型拓扑的可靠性指标,见表 1.可见,在这些典型的海底电网拓扑中,网型拓扑的可靠性通常远高于其他简单拓扑,有备用结线方式的双电源环式拓扑的可靠性仅次于网型拓扑,而无备用接线方式的链式和放射式拓扑的可靠性为最低.

表 1 几种典型拓扑的可靠性指标

Tab.1 Reliability indexes of several typical topologies

结线方式	可靠度	区间数
放射式	0.850 0	[0.800 0, 0.900 0]
链式	0.728 9	[0.650 7, 0.813 0]
环式	0.935 7	[0.891 7, 0.969 9]
两端供电式	0.935 7	[0.891 7, 0.969 9]
负荷集中式双电源环式	0.963 6	[0.930 0, 0.985 6]
负荷分散式双电源环式	0.964 0	[0.931 0, 0.985 7]
网型拓扑	0.992 8	[0.980 6, 0.998 3]

上述可靠性计算方法用于总体设计阶段快速比较不同拓扑结构的可靠性.进入详细设计阶段时,需要仔细分析各元件的可靠性数据,根据可靠性和经

济性的原则确定维修策略,以降低观测网的全寿命成本. 海缆段的可靠度主要与其所处海域的实际情况相关,如渔业集中程度和海底地质稳定性等,使得各海缆段在实际运行中的可靠度并不相同,且同一海缆段的可靠度也具有不确定性,因此在具体分析中,采用区间数描述海缆段的可靠度更符合实际情况.

对于特定海底区域的观测网,采用有备用结线方式比无备用结线方式,虽然建造成本通常更高,但是维护成本可能更低,其全寿命成本与海底观测区域的分布和特点相关. 有备用结线方式更适用于观测范围较大且观测区域离岸分布较为平均的情况. 当两种结线方式的全寿命成本预计相差不大时,建议选择有备用结线方式. 此外,海缆路由规划还需考虑海底地貌和海域内已敷埋的海缆和油气管道等设施的影响,并尽量减少与现存设施的交叉点,以降低因故障维修时设施间相互影响的风险.

3 缆系海底观测网电力系统运行模式

海底电力系统的基本要求是保证可靠持续地供电,但在环境相对恶劣的海底环境下,由内因或外因导致的意外供电中断不可避免. 内因主要是海底装备的质量问题,外因主要有渔业拖网、船舶抛锚、鱼类撕咬和地质灾害等,此外还有人为操作因素. 由于特殊的地理位置,海底电力系统相对陆地电力系统具有较低的可观测性,因此需要合理设计其运行模式,并基于该运行模式开发远程电能监控系统.

缆系观测网可分为三种运行模式:正常运行模式、故障处理模式和启动/复位模式. 正常运行模式下,电力系统所有状态变量在正常范围内. 若正常运行模式下发生严重故障,如海缆低阻接地故障,导致水下基站因欠压停止运行,岸基电能控制器将降低 PFE 输出电压,并限制主干电流至阈值(如 10 A)以下,然后进入故障处理模式. 故障处理模式下, PFE 通常降低电压至绝对值 500 V 以内,电能监控系统进行故障诊断、定位和隔离,然后重新提高 PFE 电压,以恢复到正常运行模式. 陆地电力系统采用高压断路器在线隔离故障,而观测网电力系统采用低压继电器离线隔离故障,这是由于目前电切换型分支单元内的继电器必须在低电压下(通常为 ± 500 V 以内)才允许切换状态. 因此,电能监控系统在隔离海缆故障前必须将海岸基站 PFE 降至足够低,此时所有水下基站都停止运行. 缆系观测网电力系统的

运行模式如图 9 所示.

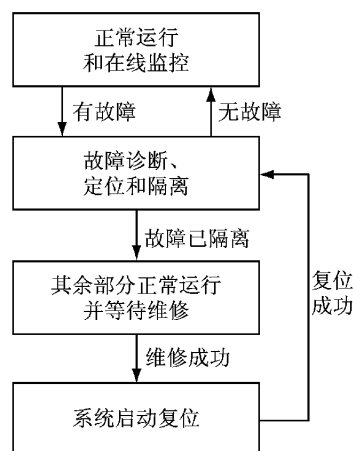


图 9 缆系海底观测网电力系统运行模式

Fig.9 Operational mode of the undersea power system of cabled seafloor observatory networks

4 结论

基于可靠性和经济性的原则,分析表明缆系海底观测网电力系统适合采用的总体方案为负高压单极直流输电、以海水作为电流回路、海底负载并联供电和级联式高频直流变换,并以此为基础设计了观测网的总体物理架构.

根据缆系观测网的特点,总结了海底电力系统适合采用的几类典型拓扑,并以水下基站平均供电可靠度为可靠性指标,比较了这些典型拓扑的可靠性. 总体上,有备用结线方式的可靠性高于无备用结线方式,负荷分散式的可靠性高于负荷集中式. 其中,以网型拓扑的可靠性为最高,其次为双电源环式拓扑,而链式拓扑的可靠性最低. 该法可为观测网总体设计时进行拓扑规划提供参考.

为进一步提高观测网的可靠性,设计了海底电力系统的运行模式,以提高观测网的容错能力. 本文可为国家未来建设大规模观测网提供参考.

参考文献:

- [1] Chave A D, Massion G, Mikada H. Science requirements and the design of cabled ocean observatories [J]. *Annals of Geophysics—Italy*, 2006, 49(2/3): 569.
- [2] Favali P, Beranzoli L. Seafloor observatory science: a review [J]. *Annals of Geophysics—Italy*, 2006, 49(2/3): 515.
- [3] Person R, Aoustin Y, Blandin J, *et al.* From bottom landers to observatory networks [J]. *Annals of Geophysics—Italy*, 2006, 49(2/3): 581.

- [4] Ducklow H W, Doney S C, Steinberg D K. Contributions of long-term research and time-Series observations to marine ecology and biogeochemistry [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2009, 1: 279.
- [5] Delaney J, Barga R. A 2020 vision for ocean science [C]// *The Fourth Paradigm: Data-intensive Scientific Discovery*. Washington: Microsoft Research, 2009: 27-38.
- [6] Smith K L, Ruhl H A, Bett B J, *et al.* Climate, carbon cycling, and deep-ocean ecosystems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 2009, 106 (46): 19211.
- [7] Ruhl H A, Andre M, Beranzoli L, *et al.* Societal need for improved understanding of climate change, anthropogenic impacts, and geo-hazard warning drive development of ocean observatories in European Seas [J]. *Progress of Oceanography*, 2011, 91 (1): 1.
- [8] 汪品先. 从海底观察地球——地球系统的第三个观测平台 [J]. *自然杂志*, 2007, 29 (3): 125.
WANG Pinxian. Seafloor observatories: the third platform for earth system observation [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2007, 29 (3): 125.
- [9] Massion G, Raybould K. MARS: the monterey accelerated research system [J]. *Sea Technology*, 2006, 47 (9): 39.
- [10] Dewey R, Round A, Macoun P, *et al.* The VENUS cabled observatory: engineering meets science on the seafloor [C]// *IEEE/MTS Oceans Conference*. Piscataway: IEEE, 2007: 398-404.
- [11] Duennebie F, Harris D, Jolly J. ALOHA cabled observatory will monitor ocean in real time-first use of a retired commercial electro-optical submarine cable for a scientific observatory [J]. *Sea Technology*, 2008, 49 (2): 51.
- [12] Hsu S K, Lee C S, Shin T C, *et al.* Marine cable hosted observatory (MACHO) project in Taiwan [C]// *Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies*. Piscataway: IEEE, 2007: 305-307.
- [13] Barnes C R, Best M M R, Pautet L, *et al.* Understanding Earth-ocean processes using real-time data from NEPTUNE, Canada's widely distributed sensor networks, Northeast Pacific [J]. *Geoscience Canada*, 2011, 38 (1): 21.
- [14] Kaneda Y. The advanced ocean floor real time monitoring system for mega thrust earthquakes and tsunamis- application of DONET and DONET2 data to seismological research and disaster mitigation [C]// *IEEE/MTS Oceans Conference*. Piscataway: IEEE, 2010: 1-6.
- [15] Cowles T, Delaney J, Orcutt J, *et al.* The ocean observatories initiative: sustained ocean observing across a range of spatial scales [J]. *Marine Technology Society Journal*, 2010, 44 (6): 54.
- [16] Puillat I, Person R, Leveque C, *et al.* Standardization prospective in ESONET NoE and a possible implementation on the ANTARES site [J]. *Nuclear Instrument and Method A*, 2009, 602 (1): 240.
- [17] 彭晓彤, 周怀阳, 吴邦春, 等. 美国 MARS 海底观测网络中国节点试验 [J]. *地球科学进展*, 2011, 26 (9): 991.
PENG Xiaotong, ZHOU Haiyang, WU Bangchun, *et al.* Test China node on monterey accelerated research system (MARS) [J]. *Advances in Earth Sciences*, 2011, 26 (9): 991.
- [18] 许惠平, 张艳伟, 徐昌伟, 等. 东海海底观测小衢山试验站 [J]. *科学通报*, 2011, 56 (22): 1839.
XU Huiping, ZHANG Yanwei, XU Changwei, *et al.* Coastal seafloor observatory at Xiaoqushan in the East China Sea [J]. *China Science Bulletin*, 2011, 56 (22): 1839.
- [19] Asakawa K, Kojima J, Muramatsu J, *et al.* Current-to-current converter for scientific underwater cable networks [J]. *IEEE Journal on Oceanic Engineering*, 2007, 32 (3): 584.
- [20] Vorperian V. Synthesis of medium voltage DC-to-DC converters from low-voltage, high-frequency PWM switching converters [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, 22 (5): 1619.
- [21] 陈燕虎, 杨灿军, 李德骏, 等. 基于模块堆叠的同步整流变换器 [J]. *电力自动化设备*, 2012, 32 (7): 62.
CHEN Yanhu, YANG Canjun, LI Dejun, *et al.* Synchronous rectifier converter based on module stack [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2012, 32 (7): 62.
- [22] Lentz S T. Reliability modeling of regional cabled observatories [C]// *IEEE/MTS Oceans Conference*. Piscataway: IEEE, 2007: 386-391.
- [23] 谢开贵, 纪静, 曹侃, 等. 大电网可靠性影响因素综述 [J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39 (23): 149.
XIE Kaigui, JI Jing, CAO Kan, *et al.* Review of influencing factors for bulk power systems reliability [J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39 (23): 149.
- [24] Delaney J R, Chave A D, Kirkham H. NEPTUNE: real-time ocean and earth sciences at the scale of a tectonic plate [J]. *Oceanography*, 2000, 13 (2): 71.