

缆系海底观测网远程电能监控系统

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: 为提高缆系海底观测网的用能效率和运行可靠性, 根据其物理架构特点设计了远程电能监控系统的总体结构, 根据功能将该系统划分为数据采集、负载管理和网络分析三个子系统, 说明了子系统的主要功能和相互关系, 并研究了该系统的时间同步方案、负载供电优化策略和网络分析算法。通过理论分析, 获得了分支单元节点电压向量的加权最小二乘状态估计公式, 并基于电切换型分支单元的可控性, 提出了海缆接地故障定位的新方法。研究内容可为未来国家海底观测网的设计和运行提供参考。

关键词: 缆系海底观测网; 远程电能监控系统; 数据采集; 负载管理; 网络分析

中图分类号: TP39

文献标志码: A

Remote Power Monitoring and Control System for 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: In order to increase the power efficiency and operating reliability of cabled seafloor observatory networks (CSONs), the overall structure of the remote power monitoring and control system (PMACS) is designed according to the CSONs' physical characteristics. The PMACS is divided to three subsystems, which are the data collection subsystem, the load management subsystem, and the network analysis subsystem. The functions and relations of these subsystems are introduced and the time-synchronization scheme, load power optimization, and network analysis algorithms are studied. Through theoretical analysis, the weighted least square state estimation of the branching unit voltages is generated and a novel method for the ground fault location of the CSONs' submarine cable is presented based on the controllability of power switching branching units. The study can be a reference to the construction of national CSONs in

future.

Key words: cabled seafloor observatory networks (CSONs); remote power monitoring and control system (PMACS); data acquisition; load management; network analysis

缆系海底观测网是近年来国际上提出的海洋科学基础设施, 其主要由海岸基站、光电复合通信海缆、水下基站和观测平台等组成。缆系观测网的设计寿命通常在 25 年左右, 受该类海缆长期绝缘性能的限制, 其直流输电电压通常为 10 kV 以内, 而海缆总长可达数千公里, 因此可覆盖较大范围的海底区域。相对于传统的船基科考方式, 缆系观测网可将较为充裕的电能从陆地持续输送给分布在海底的大量科学仪器, 因此可大大扩展海洋科学观测的时空尺度^[1-2]。

由于体积受限和可靠性考虑, 缆系观测网采用的海缆及其分支单元(branching unit, BU)中无法安装遥测和遥信模块, 因此其相对陆地电网具有较低的可观测性, 而特殊的地理位置又使其具有较低的可达性, 导致维修周期很长。为提高观测网的用能效率和运行可靠性, 须从系统设计、运行模式和控制方式等方面综合考虑, 针对其物理架构特点设计远程电能监控系统(power monitoring and control system, PMACS), 实现类似陆地电网中能量管理系统(energy management system, EMS)以及监控与数据采集系统的相关功能^[3-4]。

当前国内外有关缆系观测网的研究尚处在起步阶段, 特别是针对其远程电能监控技术的研究较少且无系统。国外主要是美国华盛顿大学初步研究了观测网的相关电能监控方法^[5-7], 针对早期提出的采用自治式 BU 的观测网方案。国内主要是浙江大学和同济大学等单位初步研究和开发了 PMACS 控制

器相关软硬件^[8-9],但文中尚未涉及系统层面的研究.本文设计了观测网 PMACS 的总体结构,介绍了数据采集、负载管理和网络分析三个子系统的主要功能和相互关系,研究了时间同步方案、供电优化策略以及状态估计和故障定位等网络分析方法,可为未来国家海底观测网的设计和运行提供参考.

1 缆系观测网 PMACS 的总体结构

在缆系观测网中,海岸基站内的高压直流远供设备(power feeding equipment,PFE)将陆地电网提供的工频交流电能变换为恒定电压的高压直流电能后,通过主干海缆、BU 和分支海缆输送给各个水下基站.水下基站内的高压直流变换器将该高压输电能(通常为 $-2\sim-10\text{ kV}$)降压变换为观测设备适配器(science instrument interface module,SIIM)所需的中压配电电能(通常为 $300\sim400\text{ V}$),再由 SIIM 将中压电能降压变换为观测设备(science instrument,SI)直接可用的低压电能(通常为 48 V 以内).因此,缆系观测网的物理架构如图 1 所示.在实际工程中,须按照可靠性和经济性的原则,根据海底观测区域的具体范围和环境特点,合理选择链式、环式、两端供电式或网型等拓扑结构.

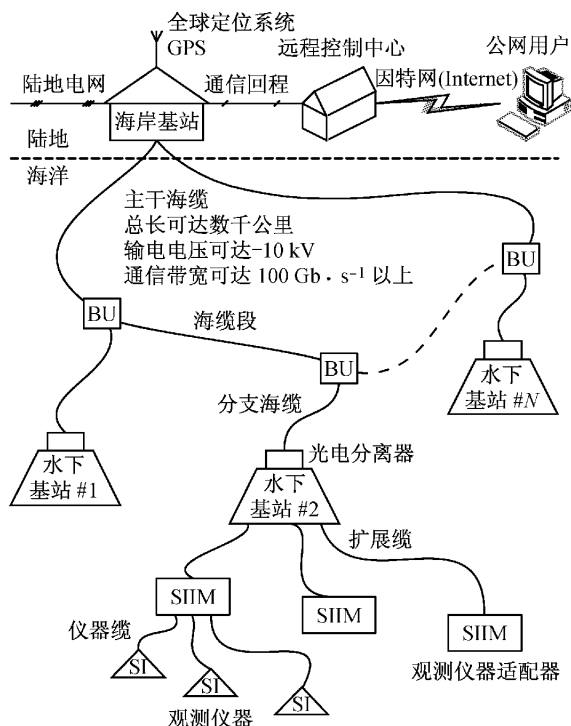


图 1 缆系海底观测网的物理架构

Fig.1 Physical structure of cabled seafloor observatory networks

PMACS 的核心功能是海底电力系统的远程监测、分析与控制. PMACS 采集的数据有海岸基站、水下基站和 SIIM 的供电状态(包括电压值、电流值和开关状态),以及各海底设备内部的多点温度值、湿度值和压力值等环境参数. PMACS 根据采集的电力系统状态数据,结合海底电网实际数学模型,通过状态估计和故障定位等网络分析功能,估计运行状态、预测运行趋势和提供运行对策,并控制所有内部负载和外部负载的供电,从而提高观测网的用能效率和运行可靠性.

从结构上看,PMACS 可采用三层客户端/服务器模型:底层为水下基站和岸基 PMACS 控制器,负责采集相应的观测网电力系统运行状态数据,并执行 PMACS 服务器发布的控制指令;中间层为 PMACS 服务器,负责管理和存储观测网电力系统的运行状态参数,并发布 PMACS 控制台的控制命令;顶层为 PMACS 控制台和客户端,负责从 PMACS 服务器获得观测网电力系统的运行状态数据,此外通过 PMACS 控制台可发送控制指令. 观测网 PMACS 的总体结构设计如图 2 所示. 图中,HVDC 表示高压直流(high voltage direct current),UTC 表示协调世界时(universal time coordination).

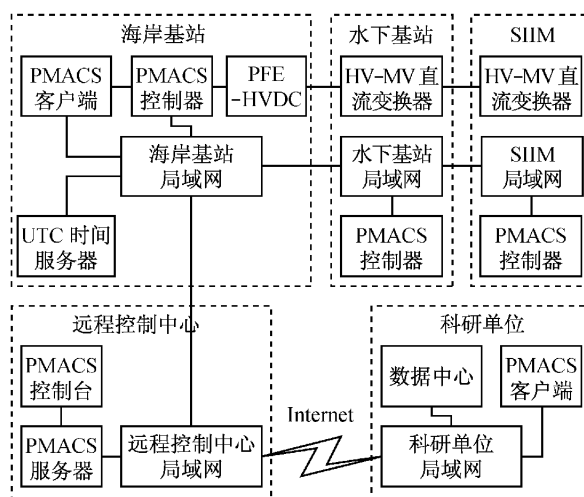


图 2 PMACS 的总体结构

Fig.2 Overall structure of the PMACS

从功能上看,PMACS 可分为数据采集子系统(data acquisition subsystem,DAS)、负载管理子系统(load management subsystem,LMS)和网络分析子系统(network analysis subsystem,NAS),相互关系如图 3 所示. DAS 是 PMACS 和观测网物理系统的接口,为 LMS 和 NAS 实时采集电力系统状态数据,并向电力系统发送控制信号;LMS 利用 DAS 提供的观测网电力系统实时数据执行 PMACS 调度决

策,向 DAS 发送电力系统控制指令,并向 NAS 发送负载供电状态数据,同时获得满足电力系统安全约束的供电限制值;NAS 利用 DAS 和 LMS 提供的观测网电力系统信息进行电网分析与辅助决策,向 DAS 发送量测质量信息,并向 LMS 提供负载供电限制值。

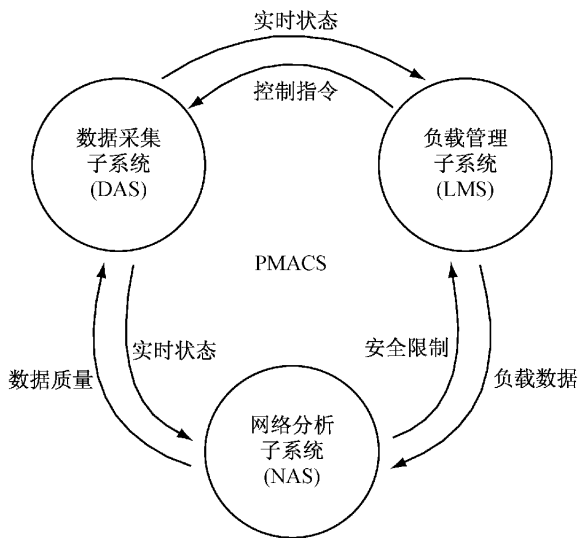


图 3 PMACS 三个子系统关系图

Fig.3 Diagram of the PMACS' three subsystems

2 数据采集

PMACS 数据库中存储的数据类型主要有电网参数、实时数据和历史数据。电网参数主要为各海缆段的长度及其单位长度海缆参数、海底电网的拓扑结构以及所有保护和报警阈值等。实时数据主要为各开关状态量以及电压值和电流值等模拟量,由 PMACS 控制器测量后通过海底光纤通信系统发送到 DAS。

采样时刻是电力系统状态数据的重要属性,PMACS 需要同一时间断面的测量数据,才能有效地分析海底电网的实际状态。陆地电力系统的各量测单元通常可采用全球定位系统(global positioning system, GPS)的卫星信号实现时间同步,而观测网中只有岸基可接受 GPS 信号,因此将时间服务器设置在岸基内,而控制器、服务器和控制台/客户端之间采用网络对时方式实现时间同步,可采用的时间同步协议主要有网络时间协议(network time protocol, NTP)和 IEEE 1588 等精确时间协议(precision time protocol, PTP)。其中, NTP 的授时精度可达数十毫秒, PTP 的授时精度可达微秒级,而

实际精度与同步源和网络路由有关。PMACS 的授时方案如图 4 所示,其中所有设备统一采用世界协调时(universal time coordinated, UTC)。授时周期一般以小时为单位,而在两次授时之间, PMACS 控制器可采用高稳定时钟芯片结合恒温晶振实现高精度守时。

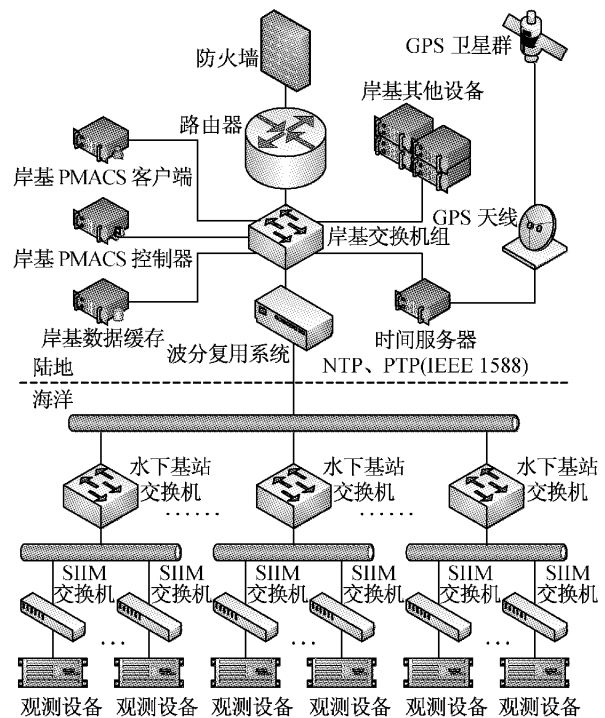


图 4 PMACS 的授时方案

Fig.4 Time-synchronization scheme of the PMACS

3 负载管理

PMACS 通过 LMS 控制各级负载的供电通断,调节岸基 PFE 的输出电压,并将各状态量与其阈值相比较,超过其阈值则代表观测网电力系统出现过压、过流和过温等异常状态,需要发出警告或发布相应的控制指令。

由于海缆总长较长,必须考虑海缆上的电压损耗与功率损耗。为确保观测网电力系统稳定,并尽可能多地输送电能到海底,若岸基 PFE 的最高输出电压为 U_{ss} ,则海底变换器正常工作的输入电压 U_{us} 的范围约为 $0.5U_{ss} \sim U_{ss}$ ^[10]。因此, LMS 的执行结果需要确保所有水下基站的输入电压满足该限制条件。假设 PFE 的输出功率和海缆的载流能力不是限制因素,则观测网的带载能力主要由 PFE 的输出电压、电网拓扑和海缆电阻决定。

随着观测网的扩展和负载量的增加,或当部分

海缆段因故障被隔离后造成电力系统带载能力降低时,可能会导致其带载运行时无法满足稳定性约束.为高效利用观测网的有限电能,并尽可能地覆盖较广的海底观测区域,需要为 LMS 合理设计负载管理策略,其基本运行流程图如图 5 所示.

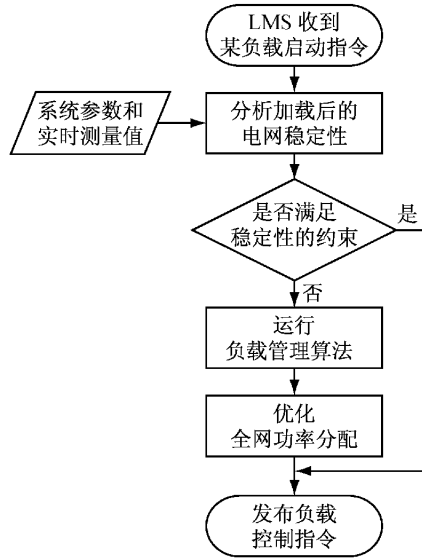


图 5 LMS 的运行流程图

Fig.5 Operational flow chart of the LMS

PMACS 的负载管理本质上是非线性优化问题.陆地 EMS 的负载管理通常采用基于成本和效益优化的方法^[11],而观测网的总体目标是利用有限的电能满足尽可能多的科学需求,因此 LMS 的目标是在满足电力系统稳定性约束的前提下优化海底负载的功率供给,可将所有海底负载设置为若干优先级,优先满足高优先级的负载供电.基于这种思路,文献^[12]提出了基于序列二次规划的负载管理算法,将负载优先级处理为优化目标函数的权重值,优化目标为确保观测网提供的功率尽可能满足负载功率需求和电力系统稳定性约束,较为有效地解决了负载管理问题.

当某个海底观测区域出现地震、风暴潮或火山喷发等重要科学现象时,可增加该处高优先级负载占总功率的比例,实现电能的灵活分配.

4 网络分析

PMACS 的 NAS 主要包含状态估计、模型修正和故障定位等功能模块. NAS 采用的电力网络静态模型由海底电网拓扑和各段海缆阻值决定.假设观测网有 N 个分支节点,且以流入水下基站的电流方向为正,则其电网数学模型可用节点电压方程表示

为 $I=Y \cdot U$,展开为

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{1,1} & Y_{1,2} & \cdots & Y_{1,N} \\ Y_{2,1} & Y_{2,2} & \cdots & Y_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{N,1} & Y_{N,2} & \cdots & Y_{N,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: I 为节点电流向量; U 为节点电压向量; Y 为节点导纳矩阵; N 为节点数.

4.1 状态估计

由于系统存在测量误差和数据丢包,观测网实时数据库内的运行状态数据可能不精确或不齐全.为建立可靠而完整的数据库,除了从硬件上提高测量单元的精度,从软件上可采用状态估计技术.

加权最小二乘法(weighted least square, WLS)算法是电力系统状态估计的经典算法,其程序简单、收敛性好、估计质量高,但计算量大、使用内存多、计算时间长.虽然观测网的覆盖范围较广,但与陆地电力系统相比,其节点数相对较少(通常为数十个以内),因此可采用 WLS 算法进行状态估计^[13].

在缆系观测网中,可观测量为水下基站测量所得的电压向量 U_{US} 和电流向量 I_{US} 以及岸基测量所得的电压向量 U_{SS} 和电流向量 I_{SS} ,假设待估计量为 BU 节点处的电压向量 U_{BU} ,可建立可观测量与待估计量的联系为 $x_m = H \cdot x$,展开得:

$$\begin{bmatrix} -I_{US} \\ I_{SS} \\ U_{US} \\ U_{SS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y \\ A \end{bmatrix} \cdot U_{BU} \quad (2)$$

式中: $z = [-I_{US} \ I_{SS} \ U_{US} \ U_{SS}]^T$ 为由可观测量组成的向量; $x = U_{BU}$ 为由待估计量组成的向量; $H = [Y \ A]^T$ 为联系 x_m 和 x 的系数矩阵, A 为系数矩阵.

构造可观测量的测量方差对角阵 $R =$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{I_{US}}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{I_{SS}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{U_{US}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{U_{SS}}^2 \end{bmatrix}, \text{其中 } \sigma_{I_{US}}^2, \sigma_{I_{SS}}^2, \sigma_{U_{US}}^2 \text{ 和 } \sigma_{U_{SS}}^2 \text{ 分}$$

别为 I_{US} 、 I_{SS} 、 U_{US} 和 U_{SS} 的测量误差方差对角阵,而 R^{-1} 起权重作用.建立目标函数为

$$J(x) = (x_m - H \cdot x)^T R^{-1} (x_m - H \cdot x) \quad (3)$$

令 $\Delta J(x) = 0$,可得待估计向量的估计值:

$$\hat{x} = (H^T R^{-1} H)^{-1} (H^T R^{-1} \cdot x_m) \quad (4)$$

式(4)扩展后即 BU 节点电压向量的状态估计公式:

$$\hat{U}_{BU} = \left([Y \quad A] R^{-1} \begin{bmatrix} Y \\ A \end{bmatrix} \right)^{-1} \left([Y \quad A] R^{-1} \begin{bmatrix} -I_{US} \\ I_{SS} \\ U_{US} \\ U_{SS} \end{bmatrix} \right) \quad (5)$$

其残差方程为

$$r = x_m - H \cdot \hat{x} = W \cdot x_m \quad (6)$$

式中: r 为残差向量; W 为残差灵敏度矩阵; $W = I - H(H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1}$. 在观测网中, W 为常数阵, 因此残差 r 和测量值 x_m 呈线性关系.

若 DAS 采集的数据中存在粗差, 可采用加权残差法或标准化残差法进行检测和辨识, 排除粗差后重新进行状态估计, 或采用抗差 WLS 算法实现对测量粗差的直接抑制^[14].

4.2 模型修正

PMACS 采用的电网模型由各海缆段等效串联电阻组成的向量 R 和各 BU 内部的开关状态组成的矩阵 S 决定. 在设计阶段, 电网模型采用设计拓扑和海缆制造商提供的标称参数值 R_0 . 在运行阶段, 海缆的实际参数值 R_1 会随着周围环境的变化而变化, 因此可能导致 R_0 与 R_1 之间存在较大的误差. 若不更新电网参数, 可能造成状态估计和故障定位等模块的分析结果精度下降, 从而降低观测网的运行可靠性和提高海缆维修巡检的成本.

各段海缆等效串联电阻变化的主要原因是周围海水温度的变化. 设 R_1 为单位长度海缆的实际阻值, R_0 为制造商提供的给定 t_0 温度下单位长度海缆的阻值, t_1 为海缆周围实际海水温度, α 为温度系数, 则在 t_1 温度下海缆阻值为 $R_1 = R_0 [1 + (t_1 - t_0) \alpha]$.

假设原电力网络模型为

$$Z_0 \cdot I_{BU} = U_{BU} \quad (7)$$

而实际电力网络模型为

$$Z_1 \cdot I_{BU} = (Z_0 + \Delta Z) \cdot I_{BU} = U_{BU} \quad (8)$$

式(7)–(8)中: Z_0 为标称节点阻抗矩阵; Z_1 为实际节点阻抗矩阵, 而 ΔZ 为两者的差值; I_{BU} 和 U_{BU} 分别为节点电流列向量和节点电压列向量.

总体上看, 深海水温较为稳定, 而浅海水温波动较大, 如位于杭州湾口外东海内陆架的小衢山试验站测得该处海水年温度变化可高达 25°C 左右^[15]. 由于铜导体的典型温度系数约为 $0.4\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, 若环境温度变化 25°C , 则海缆阻值变化约 10% .

陆地 EMS 系统中的参数估计算法主要有残差灵敏度分析方法和增广状态向量方法^[16]. 而在观测网中的某段海缆参数发生较大变化后, 会在测量值

中反映, 造成稳定的误差. 由电网模型可得, 节点 p 和节点 q 的注入电流分别为

$$\begin{cases} I_p = \sum_{k=1, k \neq p, q}^N Y_{pk} U_k + Y_{pp} U_p + (Y_{pq} + \Delta Y_{pq}) U_q \\ I_q = \sum_{k=1, k \neq p, q}^N Y_{qk} U_k + Y_{qq} U_q + (Y_{pq} + \Delta Y_{pq}) U_p \end{cases} \quad (9)$$

式中: Y_{pq} 为节点 p 和 q 之间的电导; U_p 为节点 p 的电压, 其他类推.

可得该段海缆的等效电导变化量 ΔY_{pq} 为

$$\Delta Y_{pq} = \frac{1}{2(U_q - U_p)} \left(I_p - I_q + \sum_{k=1, k \neq p}^N Y_{pk} U_k - \sum_{k=1, k \neq q}^N Y_{qk} U_k \right) \quad (10)$$

观测网电力系统运行拓扑由所有 BU 的开关状态决定. 通常每个电切换型 BU 的原理结构可等效为 S1、S2 和 S3 三个继电器, 如图 6 所示. 每个继电器均有闭合、断开和接地三种状态, 用于隔离存在故障的海缆段或水下基站, 观测网可通过这种海缆分段继电保护方式来提高容错能力.

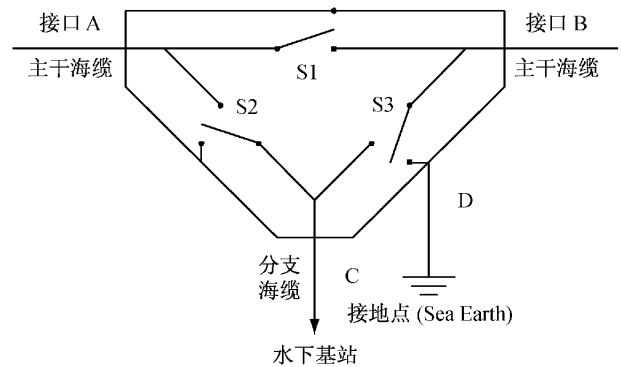


图 6 电切换型分支单元的简化等效结构

Fig.6 Simplified equivalent structure of the branching units with power switching

由于体积受限和可靠性考虑, BU 无继电器状态反馈功能, 因此 PMACS 无法分析实时结线. 当某个 BU 存在故障时, 其继电器的实际状态可能与其预期状态不一致, 从而可能导致海底电网的实际拓扑与预期拓扑不一致, 从而危害观测网的运行可靠性.

假设 BU 内所有继电器闭合为预期状态 (正常状态), 则当三个继电器中有一个继电器发生误开故

障且不接地时,为良性故障。良性故障不影响观测网的正常运行,也未改变电网拓扑结构。当 BU 内三个继电器中至少有两个继电器发生误开故障且不接地时,为功能故障,如图 7 所示。功能故障通常会影响到观测网的正常运行:功能故障 1 和 2 会导致相应的水下基站停止运行,故障 1 还可能降低海底电力系统的带载能力;功能故障 3 和 4 通常会降低海底电力系统的带载能力,不过该 BU 对应的水下基站仍可能正常运行。为减小对系统的扰动,PMACS 一般需在观测网运行时辨识拓扑。

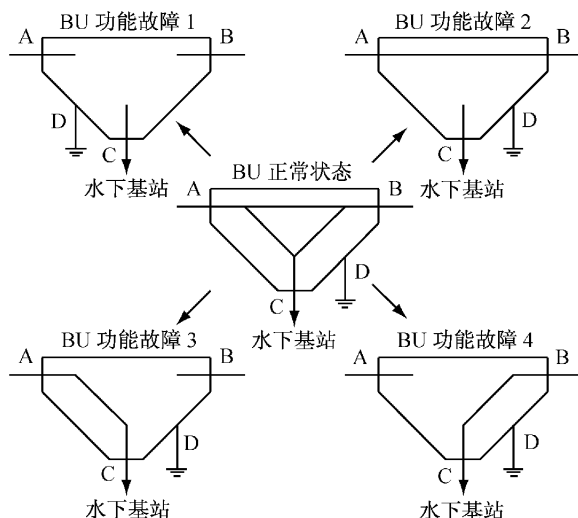


图 7 分支单元的功能故障类型

Fig.7 Functional fault types of the branching units

拓扑辨识通常可采用平均绝对残差法,但状态测量误差、海缆参数误差和 BU 继电器故障均会使测量值与估计值之间产生平均绝对残差(mean absolute residual, MAR),为消除测量误差和参数误差的影响,文献[7]利用 MAR 对岸基 PFE 输出电压的灵敏度来判断继电器故障。该方法的缺点是,若假设拓扑与运行拓扑不一致,需要遍历所有可能的拓扑故障来验证,计算较为繁琐,且需要变化 PFE 输出电压,对系统有一定的扰动。实际上,拓扑错误相当于大的参数错误,因此拓扑辨识方法也可采用类似参数估计的方法。若计算所得 $\Delta Y_{pq} \rightarrow Y_{pq}$,则说明该段海缆的两端对应的 BU 可能存在误开故障。

4.3 故障定位

海缆故障可分为电学故障和光学故障。光学故障主要是光纤断路或光中继器故障,可通过海缆通信监控系统(communications monitoring and control system, CMACS)检测和定位。由于海缆的结构和使用环境,工程经验表明电学故障发生的概率高于光学故障。电学故障可分为接地故障和开路

故障,其中接地故障又可分为低阻故障和高阻故障。接地故障是海缆故障的主要形式,其主要原因为渔业拖网、船舶抛锚、自然灾害和鱼类撕咬等造成海缆绝缘损坏。

根据观测网的特点,将三种海缆电学故障定义如下。低阻故障指海缆绝缘破损严重,即故障处铜导体与海水之间的接触电阻较低,导致至少一个水下基站因输入欠压而停止运行。其中,短路故障是低阻故障的极端情况,可导致整个观测网电压崩溃,必须立即进入故障处理状态,待故障隔离后岸基 PFE 方可正常供电。高阻故障指海缆绝缘破损不太严重,即破损处铜导体与海水之间的接触电阻较高,此时所有水下基站仍能正常运行,但观测网的带载能力降低,且其安全运行裕量减小,可暂时不进入故障处理状态。开路故障指铜导体因外力作用在海缆内部断开,此时无法通过该海缆段传输电能,而导体对海绝缘电阻仍处于正常范围。在海底环境中,海缆发生开路故障的同时必定伴随着严重的低阻接地故障,因此若观测网存在单纯的海缆开路故障,实际上意味着海缆两端的海缆继电器存在误开故障。海缆运行状态示意图见图 8。图中, U_f 、 I_f 和 R_f 分别为故障点处的对地电压、接地电流和接地电阻, R_{pf} 和 R_{qf} 分别为 BU # p 、# q 与故障点间的等效电阻, R_p 、 R_q 分别为分支海缆 p 、 q 的等效电阻。

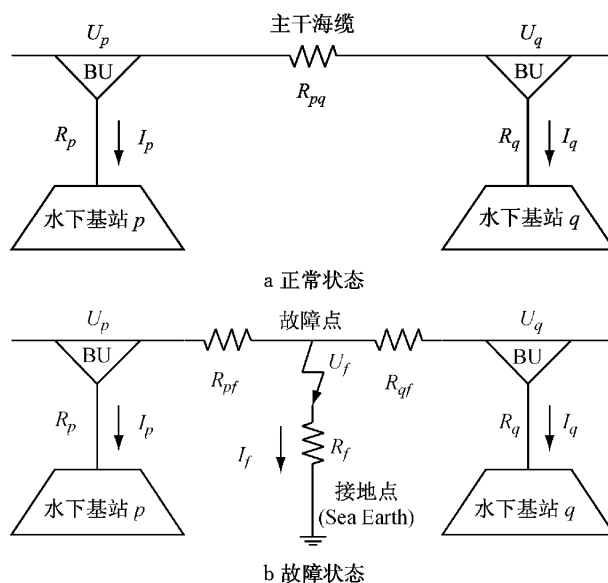


图 8 海缆运行状态

Fig.8 Operation status of submarine cables

陆地电网中电力电缆的故障定位按照检测原理主要分为阻抗法和行波法:阻抗法通过测量故障时测量端到故障点的阻抗,然后根据线路参数计算故障点的位置;行波法通过测量行波往返测量端和故

障点的反射时间或者故障点行波到达线路两端的传播时间差,根据行波速率计算故障点的位置.实际工程中,阻抗法和行波法在交流系统中均有应用,而直流系统普遍采用行波法定位故障^[17].由于 BU 内的继电器及其串联稳压管会对行波信号产生大量反射噪声,且行波法测量距离有限,因此行波法无法有效应用于大规模观测网的海缆故障定位.

当接地故障发生时,会在故障点处形成一定的故障电流.特别是发生低阻故障时,在 PMACS 的监控下,岸基 PFE 会因输出限流而降低输出电压,实现自动保护.发生接地故障时,为了观测网的运行安全,PMACS 通常调节 PFE 至低电压,此时所有的水下基站均停止运行,且所有 PFE 的输出电流总和约等于故障电流值.此时,通过 CMACS 不断切换 BU 继电器的状态,PMACS 同时监测 PFE 输出电流的变化,可确定故障点所在的海缆段.以图 1 所示的观测网为例,假设其采用常用的两端供电式,若 BU # p 和 # q 之间存在一处海缆低阻故障,在确定故障海缆段后,通过 CMACS 重建电网拓扑如图 9 所示,即等效于两台 PFE 直接连接到故障海缆.图中, I_{ss1} 和 I_{ss2} 分别表示水下基站 PFE 1 和 2 的输出电流, U_{ss1} 和 U_{ss2} 分别表示水下基站 PFE 1 和 2 的输出电压.

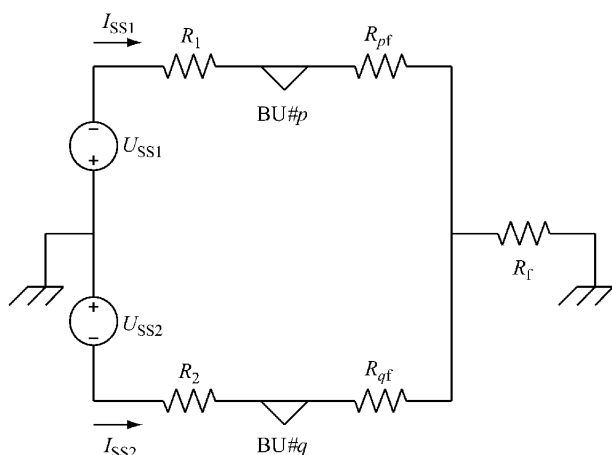


图 9 通过 CMACS 重建的电网拓扑

Fig.9 Power grid topology reconfiguration by CMACS

重建带故障海缆段的电网拓扑后,PMACS 控制两台 PFE 分别运行,可得:

$$\begin{cases} \frac{U_{ss1}}{I_{ss1}} = R_1 + R_{pf} + R_f \\ \frac{U_{ss2}}{I_{ss2}} = R_2 + R_{qf} + R_f \\ R_{pf} + R_{qf} = R_{fq} \end{cases} \quad (11)$$

解上述方程得:

$$\begin{cases} R_{pf} = \frac{1}{2} \left(\frac{U_{ss1}}{I_{ss1}} - \frac{U_{ss2}}{I_{ss2}} - R_1 + R_2 + R_{fq} \right) \\ R_{qf} = \frac{1}{2} \left(\frac{U_{ss1}}{I_{ss1}} + \frac{U_{ss2}}{I_{ss2}} - R_1 - R_2 - R_{fq} \right) \end{cases} \quad (12)$$

因此,故障点离 BU # p 的距离 $L_f = \frac{R_{pf}}{R_{fq}} \cdot L_{fq}$.

其中, L_{fq} 为故障海缆段长度.

若定位结果接近某个 BU,则应考虑 BU 内部发生接地故障的可能性.若观测网采用单个 PFE,则可通过 CMACS 重建两种故障电网拓扑,联立两个故障电网方程,实现故障定位.该法利用了电切换型 BU 的可控性,具有简单有效的优点.需要注意的是,在故障定位的过程中,PMACS 需要确保 PFE 的输出电流在安全阈值内.

5 结语与展望

为提高缆系海底观测网的用能效率和运行可靠性,根据观测网的物理架构特点,本文设计了 PMACS 的总体结构,说明了数据采集、负载管理和网络分析这三个子系统的主要功能和相互关系,研究了时间同步方案、负载供电优化策略和网络分析算法.

通过理论分析,获得了 BU 节点电压向量的加权最小二乘状态估计公式,提出了修正电网模型的新思路,并基于电切换型 BU 的可控性,提出了海缆接地故障定位的新方法.

缆系观测网的技术风险大、建设成本高,下一步将建立多节点观测网的中低压简化物理模型,用于初步检验 PMACS 在实际应用中的有效性.

参考文献:

- [1] Barnes C R, Best M M R, Johnson F R, *et al.* Challenges, benefits, and opportunities in installing and operating cabled ocean observatories: perspectives from NEPTUNE canada[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2013, 38(1): 144.
- [2] Killeen T L. Ocean observatories initiative (OOI): advanced research tools for the ocean sciences[J]. Marine Technology Society Journal, 2010, 44(6): 15.
- [3] 张伯明,孙宏斌,吴文传. 3 维协调的新一代电网能量管理系统[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(13): 1. ZHANG Boming, SUN Hongbin, WU Wenchuan. New generation of EMS with 3-dimensional coordination [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(13): 1.
- [4] Maghsoodlou F, Masiello R, Ray T. Energy management systems[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2004, 2(5): 49.

- [5] El-Sharkawi M A, Upadhye A, Lu S, *et al.* North east pacific time-integrated undersea networked experiments (NEPTUNE): cable switching and protection [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2005, 30(1): 232.
- [6] Chan T, Liu C C, Howe B M, *et al.* Fault location for the NEPTUNE power system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(2): 522.
- [7] Schneider K, Liu C C, Howe B. Topology error identification for the NEPTUNE power system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1224.
- [8] 卢汉良, 李德骏, 杨灿军, 等. 深海海底观测网络远程电力监控系统研究[J]. 传感技术学报, 2011, 24(4): 564.
LU Hanliang, LI Dejun, YANG Canjun, *et al.* Study on remote electric power monitoring and control system of deep seafloor observatory network [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(4): 564.
- [9] 吕枫, 岳继光, 彭晓彤, 等. 用于海底观测网络水下接驳盒的电能监控系统[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(5): 1076.
LÜ Feng, YUE Jiguang, PENG Xiaotong, *et al.* Power monitoring and control system for underwater junction boxes of sub-sea cabled observatory networks [J]. Computer Measurement and Control, 2011, 19(5): 1076.
- [10] Harris D W, Duennebie F K. Powering cabled ocean-bottom observatories [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2002, 27(2): 202.
- [11] Ng K H, Sheble G B. Direct load control—a profit-based load management using linear programming [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(2): 688.
- [12] Ting C, Chen C L, Howe B M. Optimization based load management for the NEPTUNE power system [C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting. [S. l.]: IEEE, 2007: 1-6.
- [13] Liu C, Schneider K, Kirkham H, *et al.* State estimation for the NEPTUNE power system [C]//IEEE PES Transmission and Distribution Conference & Exposition. [S. l.]: IEEE, 2003: 748-754.
- [14] 李碧君, 薛禹胜, 顾锦汶, 等. 抗差估计理论及其在电力系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 1999, 32(1): 57.
LI Bijun, XUE Yusheng, GU Jinwen, *et al.* Robust estimation theory and its application in power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 32(1): 57.
- [15] 张艳伟, 范代读, 许惠平. 东海海底观测网小衢山试验站记录的2010年智利海啸信号分析[J]. 科学通报, 2011, 56(32): 2732.
ZHANG Yanwei, FAN Daidu, XU Huiping. Records of the tsunami induced by the 2010 Chilean earthquake from Xiaoqushan seafloor observatory in the East China Sea [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(32): 2732.
- [16] Zarco P, Exposito A G. Power system parameter estimation: a survey [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(1): 216.
- [17] 宋国兵, 蔡新雷, 高淑萍, 等. 高压直流输电线路故障定位研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 133.
SONG Guobin, CAI Xinlei, GAO Shuping, *et al.* Survey of fault location research for HVDC transmission lines [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 133.

~~~~~  
(上接第1686页)

- wheel spokes [J]. Journal of Tongji University; Natural Science, 2006, 34(12): 1684.
- [6] 傅立敏, 胡兴军, 张世村. 车轮辐板开孔对汽车外流场影响的数值模拟[J]. 农业机械学报, 2006, 37(1): 8.  
FU Limin, HU Xingjun, ZHANG Shicun. Numerical simulation of influence of holes in wheel spokes on automotive external flow-field [J]. Journal of agricultural mechanics, 2006, 37(1): 8.
- [7] 傅立敏, 胡兴军, 张世村. 不同几何参数车轮的汽车流场数值模拟研究[J]. 汽车工程, 2006, 28(5): 451.  
FU Limin, HU Xingjun, ZHANG Shicun. Research on numerical simulation for the flow field around automotive wheels with different geometric parameters [J]. Automotive Engineering, 2006, 28(5): 451.
- [8] 谷正气, 林肖辉, 李伟平, 等. 车轮辐板形状对汽车气动阻力影响分析[J]. 科技导报, 2011, 29(6): 57.  
GU Zhengqi, LIN Xiaohui, LI Weipin, *et al.* Effect of the shape of wheel spokes on vehicle aerodynamic performance [J]. Science & Technology Review, 2011, 29(6): 57.
- [9] Dimitriou I, Klusmann S. Aerodynamic forces of exposed and enclosed rotating wheels as an example of the synergy in the development of racing and passenger cars [C]//SAE. [S. l.]: SAE, 2006; doi:10.4271/2006-01-0805.
- [10] 杨志刚, 李挺, 贾青. 静止和旋转孤立车轮局部流场的评价[J]. 计算机辅助工程, 2012, 21(5): 15.  
YANG Zhigang, LI Ting, JIA Qing. Evaluation on local flow field around stationary and rotating isolated wheel [J]. Computer Aided Engineering, 2012, 21(5): 15.
- [11] 谷正气. 汽车空气动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.  
GU Zhengqi. Aerodynamics of road vehicles [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [12] Krajnovic S, Sarmast S, Basara B. Numerical investigation of the flow around a simplified wheel in a wheelhouse [J]. Fluids Engineering, 2011, 133(11): 126.
- [13] Cogotti A. Aerodynamic characteristics of car wheels [J]. Technological Advances in Vehicle Design, 1983, 13(3): 173.