

海南联网工程牛皮纸绝缘和 PPL 纸绝缘 充油海底电缆技术经济比较

马凌, 赵远涛, 吴庆华

(中南电力设计院, 湖北 武汉 430071)

摘要: 目前 500 kV 交流自容式充油海底电缆绝缘材料主要有两种型式: 牛皮纸绝缘和 PPL 纸绝缘^[1]。由于两者造价、绝缘性能、介质损耗性能均有较大差异, 工程应用应综合初始投资、年运行费用、应用经验和安全稳定性等多方面因素进行选择。以海南联网工程为例, 介绍上述两种绝缘材料的性能和差异, 并结合不同电缆铠装型式、回流导体结构、无功补偿投入等, 进行综合技术经济比较, 最终得出对工程建设有指导意义的结论。

关键词: 海南联网; 自容式充油海底电缆; 牛皮纸绝缘; PPL 纸绝缘; 损耗; 技术经济性

中图分类号: TM21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2018)02-0056-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.02.013

Technical and Economical Comparison of Submarine Oil – filled Cables with Kraft Paper and PPL Paper Insulation in Hainan Interconnection Project

Ma Ling, Zhao Yuantao, Wu Qinghua

(Central Southern China Electric Power Design Institute, Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract: The insulating materials of 500 kV AC self – contained oil – filled (SCOF) submarine cables currently consist of two main types: kraft paper and PPL paper. Considering the huge differences between these two types including cost, insulation performance and dielectric loss performance, the first investment, annual operational cost, application experience and safety stability should be taken into consideration to make a final choice. Taking Hainan interconnection project for example, the performance and differences between these two insulating materials are introduced, and the technical and economical comparison is carried out based on different armour type, return conductor structure and reactive power compensation, etc., which may benefit other projects.

Key words: Hainan interconnection; self – contained oil – filled (SCOF) submarine cable; kraft paper; PPL paper; losses; technical economy

0 引言

海南联网工程在确定了 500 kV 交流联网方式和 600 MW 输送容量后, 适合于工程具体条件的电缆型式为自容式充油电缆, 供选择的绝缘材料和铠装主要有两种型式: 牛皮纸绝缘铜铠装和 PPL 纸绝缘钢丝铠装 + 回流导体(以下简称牛皮纸电缆和 PPL 电缆)^[1], 两种电缆在技术经济性上各有特点, 应以技术性能优和工程投资低作为出发点, 综合多方面因素选择合适的海底电缆型式。两种电缆的特

点简述如下:

1) 牛皮纸电缆。牛皮纸的全称是针叶树木浆牛皮纸(conifer pulp kraft paper)。牛皮纸密度低($0.7 \sim 0.8 \text{ g/cm}^3$), 可在降低介质损耗的同时, 对低粘度绝缘油保持较高的渗透率^[2]。对于超高压交流电缆, 通过去离子水漂洗可以进一步降低损耗。牛皮纸可以按不同的厚度($50 \sim 180 \mu\text{m}$) 制造生产以满足不同的绝缘要求。对于交流海底电缆, 靠近导体处电场强度高, 可以选用较薄的纸带, 增加纸带层数提高绝缘强度; 绝缘层外部电场强度较低, 可以选用偏厚的纸带, 减少层数, 提高生产速度和弯曲性

能^[3]。牛皮纸电缆的制造和使用经验已有半个多世纪的历史,各方面技术成熟、实践经验丰富、价格相对较低。目前来说,牛皮纸仍然是交流海底电缆首选的绝缘材料之一。相对PPL电缆,牛皮纸电缆的缺点是损耗较高,制造的电缆电容较大,需要系统提供更多无功补偿。

2) PPL电缆。20世纪80年代以来,一种新型的绝缘材料PPL纸(laminates composed of paper layers and polypropylene layers)出现并成功应用于海底电缆制造。PPL纸也称聚丙烯牛皮纸复合纸,是一种聚合物薄膜增强纸带^[1]。这种复合纸有不同的复合方式,如牛皮纸-聚丙烯薄膜-牛皮纸、聚丙烯薄膜-牛皮纸-聚丙烯薄膜等,从而形成绝缘物质不同的2层、3层或更多层结构。PPL纸在交流条件下比牛皮纸绝缘强度高,而介质损耗低,制造的电缆电容小。PPL纸绝缘海底电缆已具有多个工程应用实例,均应用在直流海底输电工程,且运行良好。目前的设计方案,PPL电缆采用的是应用在直流海底输电工程的钢丝铠装。当用于交流输电时,由于钢丝铠装涡流损耗比铜铠装大大增加,为降低损耗,需单独设计铜质回流导体,从而削弱了PPL纸绝缘低损耗的优势^[4]。而牛皮纸绝缘电缆若采用钢丝铠装,则可能导致电缆无法经济运行,从而不得不采用成本较高的铜线铠装。

目前,国际上超高压充油海底电缆厂家对于牛皮纸电缆和PPL电缆的生产现状不尽相同^[5]。有的两种均能生产,有的只能生产一种,有的虽均能生产,但只有一种具有生产经验。由于两种电缆的技术参数具有明显差别,性能各异,因此,必须通过多方面的技术经济比较才能最终确定电缆型式。

根据海南联网工程经验,主要考虑以下因素:电缆价格、系统无功补偿投入、初始投资、运行损耗、利用小时数和电网电价等^[2]。海南联网工程最终采用了牛皮纸电缆,下面根据工厂A、工厂B和工厂C提供的电缆参数进行详细论述,其中工厂A以生产牛皮纸电缆为主,工厂B和工厂C以生产PPL电缆为主。

1 基本模型和数据

以海南联网工程为例,建立图1模型并列相关数据,作为进一步技术经济分析比较的基础。电

缆长度31 km,徐闻和福山配置高抗补偿。两侧架空线长度各14 km,架空线为4×300导线,电气参数 $R=0.0256 \Omega/\text{km}$, $X=0.2823 \Omega/\text{km}$, $C=0.0128 \mu\text{F}/\text{km}$, $B=4.02 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$ ^[6]。

海底电缆运行时分3段处于不同的运行环境:空气中、陆地埋设段、海中埋设段。空气中电缆较短,约10余米;陆地埋设段是电缆温度控制段,电缆温度最高,单位损耗最大;海中埋设段长度最长,是损耗计算的主体。计算时忽略空气中电缆段,分陆地埋设段、海中埋设段两段计算,长度分别取4 km、27 km^[7]。

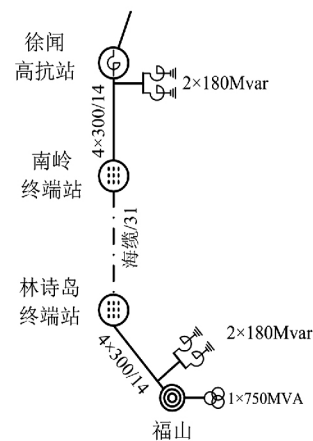


图1 海底电缆计算模型

2 介质损耗

一般介质损耗可用下式计算: $P=U_0^2 \times C \times \omega \times \text{tg}\delta$,当电缆绝缘部分的尺寸一致时,两种绝缘材料的介质损耗比可以表达为

$$P_1/P_2 = (\epsilon_{r1}/\epsilon_{r2}) \times (\text{tg}\delta_1/\text{tg}\delta_2)$$

两种材料的相对介电常数(ϵ)和介质损耗角正切值($\text{tg}\delta$)各厂家略有不同,典型值如表1所示。

表1 两种绝缘材料介质参数的典型值

材料	牛皮纸 (工厂A)	PPL (工厂B)	PPL (工厂C)
介质损耗角正切 $\text{tg}\delta_{90^\circ\text{C}}$	2.4×10^{-3}	1.2×10^{-3}	1×10^{-3}
相对介电常数 ϵ_r	3.5	2.85	2.7

根据上述参数进行计算,可见 P_1/P_2 或(P_1/P_3)的比值范围约为2.46~3.11。根据工厂A和工厂B提供的电缆详细参数(见表2),两种电缆的介质损耗设计值分别为16.6 W/m和7.0 W/m(比例为2.37)。

表2 海南联网工程采用的牛皮纸电缆和一种 PPL 电缆的主要参数表

项目	牛皮纸电缆 (牛皮纸+铜铠装)	PPL 电缆 (PPL+钢丝铠装+回流导体)	备注
电压/kV	525	525	
电流/A	815	774	
导体电阻 /(Ω·km ⁻¹)	0.022 1 0.027 3 0.028 6	0.022 1 0.028 8	直流电阻 20℃ 交流电阻 海中 交流电阻 90℃ 陆地 海中 600 MW 时
电缆阻抗/(Ω·km ⁻¹)	0.043 + j0.081		
电容/(μF·km ⁻¹)	0.24	0.204	
充电电流/(A·m ⁻¹)	22.8	19.4	每相 525 kV 时
1/2 补偿电流/A	353.2	301	两端补偿
介质损耗角正切值	0.002 8	0.001 2	tgδ
每相损耗 陆地/海中 /(W·m ⁻¹)	19.0/18.1	17.3/16.4 ^①	导体损耗
	16.6/16.6	7.0/7.0	介质损耗
	2.0/1.8	19.4/18.5 ^①	铅套和加强带损耗
	9.6/8.8	5.6/5.3 ^①	防蛀层和铠装损耗
	0	7.5/7.2 ^①	回流导体损耗
	0	4.9/4.7 ^①	铠装涡流损耗
每相总损耗	515	217 ^①	固定部分(介质损耗)
31 km/kW	897	1 626 ^①	动态部分(各金属层损耗)

注:①工厂 B 未提供海中电缆的温度和电阻,这里暂按与 N 缆边界一致条件来计算海中交流电阻(0.027 4 Ω/km)及相应电阻损耗,其他损耗(除介质损耗)均根据与导体损耗的比值计算得到^[8-9]。

3 其他损耗

为便于比较,表 2 列出了海南联网工程采用的牛皮纸电缆(由工厂 A 生产)和一种 PPL 电缆(由工厂 B 生产)的主要参数,后者采用钢丝铠装配合铜质回流导体。

电缆沿线各点的电流幅值和相位都在变化,当两端采用 1/2 等量补偿、保证福山变线路末端功率因数为 0.98 时,电缆末端电流分别达到最大值 815 A 和 774 A,两种电缆导体温度达到 90℃。电缆损耗计算按导体温度均为 90℃且环境条件相同进行计算。

4 补偿装置费用

电缆的电容不同,在系统中采用的补偿容量也不同,从而影响工程总投资。根据海南联网工程招标技术规范书的要求,传输 600 MW 时,福山站电压取 525 kV,功率因数取 0.98。

工厂 A 电缆的充电电流为 22.8 A/m,采取电缆两端同时补偿方式,补偿容量为各两组 180 Mvar 并

联高抗。两端设备总费用(未计安装和基础费用,下同)为 4 320 万元^[6]。

工厂 B 电缆的充电电流为 19.4 A/m,采取电缆两端同时补偿方式,补偿容量为两组 120 Mvar 并联高抗。两端设备总费用为 2 880 万元。

可见,采用牛皮纸电缆比 PPL 电缆的补偿费用高出 1 440 万元。

5 运行损耗比较

运行损耗费用采用如下年金现值系数公式计算:

$$m = \frac{(1+r)^n - 1}{(1+r)^n \times r}$$

式中: n 为运行年限,本工程取 30 年; r 为年利率,分别取 7%、8%、9% 则 m 分别为 12.41、11.26、10.27。

电价取 0.4 元/kWh、0.5 元/kWh、0.6 元/kWh,假设年运行小时数取 8 000 h,最大负荷运行小时分别取 3 000 h、4 000 h、5 000 h,两种电缆的年运行损耗费用差值如表 3。

可以看到,当最大负荷运行小时数大于 3 000 h,PPL 电缆的运行费用总体略高于牛皮纸电缆。

根据第4节、第5节的计算结果,综合考虑无功补偿高抗费用和年运行损耗费用,PPL电缆与牛皮纸电缆在综合成本上基本相当,当最大负荷运行小时数大于4 000 h,PPL电缆略高。

表3 两种电缆30年运行年限损耗费用差值表

		(PPL电缆-牛皮纸电缆) 单位:万元		
电费 /元	最大负荷小时 /h	年利率		
		7%	8%	9%
0.4	3 000	-293	-266	-243
0.4	4 000	792	719	656
0.4	5 000	1 878	1 704	1 554
0.5	3 000	-367	-333	-303
0.5	4 000	990	899	820
0.5	5 000	2 347	2 130	1 943
0.6	3 000	-440	-399	-364
0.6	4 000	1 188	1 078	983
0.6	5 000	2 817	2 556	2 331

6 电缆价格

影响电缆制造价格的因素较多,根据调研,PPL电缆一般比牛皮纸电缆高10%左右。按工程经验,可取1 000元/m进行计算,则PPL的总投资高于牛皮纸电缆,对于海南联网工程,该投资差约为7 500万元至1亿元。因此,采用PPL电缆的经济性并不好。

7 结语

根据前面论述,可以得出以下结论:

1) 在500 kV交流电压下,PPL比牛皮纸的介质损耗低、所需高抗补偿设备少,但这种差别不足以使PPL电缆在综合投资上具优势。对于直流电缆或其他电压等级,有必要进一步再讨论。

2) 从表2可以看出,所选取的PPL电缆铅套和加强带损失、回流导体及铠装的损耗明显高于牛皮纸电缆,对所得结果影响较大。

3) 海南联网工程路由最大海深100 m左右,从机械强度而言,没必要采用钢丝铠装^[10-11]。因此,若仅将牛皮纸更换为PPL纸,同时采用铜铠装,则

消除了回流导体损耗和钢铠装涡流损耗,有助于推广PPL电缆的应用;

4) 关于长期运行温度,早期牛皮纸一般取85℃,PPL纸取90℃,但是现在越来越多的牛皮纸也取90℃运行,从而抵消了PPL纸的运行温度优势;

5) 海南联网工程采用牛皮纸绝缘、铜铠装自容式单芯充油海底电缆在技术经济上是合适的。

参考文献

- [1] (德)L. Heinhold (德)R. Stubbe著,门汉文等译. 电力电缆及电线[M]. 北京:中国电力出版社,2001.
- [2] 陈凌云,朱熙樵,李泰军. 海南联网工程海底电缆的选择[J]. 高电压技术,2006,32(7):39-42.
- [3] 李健,郑伟. 交流500 kV海底电力电缆结构设计[J]. 电线电缆,2010(1):11-14.
- [4] Thomas Worzyk. Submarine Power Cables: Design, Installation, Repair, Environmental Aspects [M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [5] 赵健康,陈铮铮. 国内外海底电缆工程研究综述[J]. 华东电力,2011,39(9):1477-1481.
- [6] Zhao Jiankang, Chen Zhengzheng. Research Overview of Domestic and Oversea Submarine Cable Projects [J]. Eastern China Electrical Power, 2011, 39(9): 1477-1481.
- [7] 陈政,康义,马怡情. 广东-海南500 kV交流跨海联网工程无功补偿及电磁暂态研究[J]. 电网技术,2009,33(19):143-147.
- [8] 吴庆华,陈建康,郑伟,等. 中国首条500 kV海底电缆线路工程的设计[J]. 中国电机(技术版),2014,(10):46-54.
- [9] Nexans. Technical Note, 25694-HKA-MT-15086: ISSUE 1 [R]. Norway: Nexans, 2003.
- [10] J-Power Systems. Specification: JSP23-F0212A [R]. 2006.
- [11] 陈凯华. 海南联网海缆敷设施工与防护[J]. 南方电网技术,2009,3(5):25-26.

作者简介:

马凌(1978),高级工程师,从事架空输电线路及电力电缆工程技术研究和管理工作;

赵远涛(1985),硕士、高级工程师,从事架空输电线路及电力电缆工程设计及研究工作;

吴庆华(1962),教授级高级工程师,从事输电线路工程技术管理和研究工作。

(收稿日期:2017-11-24)