

碳纤维导线在全球能源互联网跨洲输电走廊中的经济性分析

为了应对全球能源危机，国家电网公司提出了全球能源互联网的构想，采用特高压输电技术实现电力跨洲输送。碳纤维复合芯导线具有填充率高、拉重比大、抗腐蚀、抗敷冰、弧垂小和重量轻等优点，但其在特高压输电线路中还没有应用的先例。通过对碳纤维复合芯导线在特高压线路应用中的全寿命周期成本进行分析，为新型节能的碳纤维复合芯导线在特高压跨洲输电线路中的应用提供理论支持。

张 鹏 李忠全/江苏南瑞斯特斯复合材料有限公司
李 宁/华北电力大学数理学院

0 引言

随着经济社会的飞速发展，化石能源生产和消费的持续增长，导致能源供应日益紧张，环境污染和气候变化问题日益突出，新的能源变革迫在眉睫，其基本特征是以电力为中心、清洁能源为主导，全球配置资源，实现全球能源的可持续发展。国家电网公司提出了全球能源互联网的构想，开发利用北极风能和赤道太阳能资源，并采用特高压交直流输电技术将电力跨洲输送，将是全球电力工业发展的趋势。据估算，到2050年，亚洲、欧洲和北美洲的电力需求分别为 38×10^{12} kW·h、 9.5×10^{12} kW·h和 10.2×10^{12} kW·h，取自北极、赤道清洁能源的供电量分别为 3.7×10^{12} kW·h、 2.3×10^{12} kW·h和 1×10^{12} kW·h，巨大规模的输电需求对输电线路提出了更高的要求和挑战^[1-3]。

在直流输电线路的设计中，导线的选择对塔型设计、金具和基础的选择等都有着重大影响，在全寿命周期成本中也占了50%以上。因此合理选择导线，在特高压

跨洲输电线路中具有重要意义^[4-8]。

碳纤维复合芯导线具有填充率高、拉重比大、抗腐蚀、抗敷冰、弧垂小和重量轻等优点^[9]，但是目前受各种因素的制约，应用尚不广泛，特别是在特高压输电线路中还没有应用的先例。通过对碳纤维复合芯导线在特高压线路应用中的全寿命周期成本进行分析，为新型节能的碳纤维复合芯导线在特高压跨洲输电线路中的应用提供理论支持。

1 碳纤维复合芯导线的特性

碳纤维复合芯导线与传统钢芯铝绞线相比，有着不同的特性^[10-13]。

1) 载流量大，通过软铝替代硬铝，导线的运行温度可以从70℃提高至160℃，导电率从61%IACS达到63%IACS，导线采用型线截面，填充率提高，等外径铝截面增加30%。

2) 碳纤维复合芯导线强度高，增加了导线的安全系数，抗覆冰能力强。就加强芯比较而言，一般钢丝的抗拉强度为1 240 MPa，而碳纤维复合芯的强度为2 400 MPa。

3) 线膨胀系数小，弧垂变化小，并且拉重比大，可减小架设弧垂。从而可以降低杆塔高度，节约杆塔数量，减小塔基占地面积，节约土地资源及降低输电线路综合建造成本。

4) 耐老化性能好，寿命长。避免了普通导线在通电时铝线与镀锌钢线之间的电化学腐蚀问题以及酸雨腐蚀，外缘无间隙，相同截面外径小，抗风偏能力强。



张 鹏/工程师

关键词/Keywords

全球能源互联网·
ACCC导线·
全寿命周期成本·
经济性分析·

因此,在评估和导线选型时,应当根据碳纤维复合芯导线的特点,选择评估标准。

2 全寿命周期成本模型

输电线路的全寿命周期成本指的是全盘考虑整个项目的设计、建设、运行维修以及改造、更新,直到项目全部报废为止的全部过程环节的成本,包括一次性投资、运行成本、维护成本、故障成本和报废成本。

其中,对于输电线路导线,通过构建优化目标函数,外加技术条件约束的方法,对导线建立了全寿命成本模型。

导线全寿命周期成本模型为

$$C_L = I + O + M + F + D \quad (1)$$

式中, I 为一次性投资费用(包括项目可行性研究、设备研制、生产制造以及项目施工安装等成本); O 为运行成本,由线路损耗、环境影响等构成; M 为维护成本,主要由日常检修和计划检修等构成; F 为故障成本,包括因停电造成的输电企业自身损失和造成的经济社会损失; D 为报废成本,包括项目报废退役过程中的工程成本、报废设备的处理成本等。

导线的一次投资成本,包括导线本体的购买费用,与之配套的绝缘子金具成本以及杆塔和基础的施工费用与其他成本。导线一次投资成本可由下式计算,即

$$I = nn'F_L + \sum_{i=1} M_i \quad (2)$$

式中, n 为导线分裂数; n' 为线路回路数; F_L 为单位长度导线价格,万元/km; $\sum_{i=1} M_i$ 为施工费用和其他费用的总和。

直流输电线路运行成本是指运行线路损耗造成的成本,包括导线的电阻损耗和电晕损耗、地线的感应损耗、磁滞损耗和涡流损耗,除线路的电阻损耗和电晕损耗外,其他损耗在线路损耗中占比并不高,故忽略不计。导线运行损耗为

$$O = 3n'F_E \left(\frac{P^2}{3nU^2 \cos^2 \varphi} R + P_k \right) t \quad (3)$$

式中, n' 为线路回路数; F_E 为输电电价; P 为线路

传输功率; R 为单位长度线路直流电阻; n 为线路分裂数; U 为输电电压; $\cos \varphi$ 为功率因数; P_k 为导线电晕损耗; t 为年最大利用小时数。

维护成本分为日常维护成本和计划检修成本,日常维护成本包括设备折旧费和日常维护的人工费。计划检修是对设备进行的周期性修理,分为大修、中修和小修,修理周期性因具体设备而定。根据有关行业规范和运行经验,一般来说,年运行成本可用投资费用的百分比形式表示为

$$M = \mu I \quad (4)$$

输电线路故障损失包括输电线路自身的损失,以及故障造成的经济社会损失。故障损失由自身损失、故障修复费用和社会影响费用构成,自身损失和故障修复费用采用统计数据,社会影响费用通过产电比法来反映,计算公式为

$$F = W_E F_E + \lambda C_R + W_E r \quad (5)$$

式中, F_E 为输电电价; λ 为设备平均年故障数; C_R 为设备故障平均修复成本; W_E 为期望缺供电量; r 为产电比。

期望缺供电量根据供电功率和设备平均修复时间来计算,即

$$W_E = P t_R \quad (6)$$

式中, t_R 为设备平均修复时间; P 为输电功率。

报废成本是线路报废后,清理、处置线路设备要花费的费用。根据电力企业固定资产折旧率,将架空输电线路折旧年限设定为30年,以一次投资的30%来计算总报废成本,并将其折算成每年等效为

$$D = 30\% I \left(\frac{1+R_i}{1+R_A} \right)^i \quad (7)$$

式中, R_i 为利率; R_A 为通货膨胀率; i 为年份。

综合上述各项成本,导线全寿命周期成本数学模型为

$$C_L = I + \sum_{i=1}^T (O + M + F) \left(\frac{1+R_i}{1+R_A} \right)^i + D \quad (8)$$

式中, T 为寿命周期。

另外,输电线路导线的选择,除了要满足导线电气、力学特性及环境影响等方面的要求之外,无线电干扰、临界电场强度和线路噪声值等

作为导线选型的约束条件也必须满足。

基于以上模型，针对参考文献中设想的全球能源互联网亚欧洲际输电走廊方案进行导线选型评估。

3 全球能源互联网跨洲特高压通道的导线选型经济性分析

设想中的洲际输电路径由中国新疆的精河起，经过阿拉山口、哈萨克斯坦、俄罗斯、白俄罗斯和波兰等到达德国，全长约5 570 km。输电方案设想为两个，其中，“直送输电”方案采用±1 100 kV直流建设，输电功率为11 000 MW，线路全长约6 410 km；“接力输电”方案分为两段，新疆精河至莫斯科段，采用±1 100 kV直流建设，莫斯科至德国西部和南部两段，为两个±800 kV直流建设，容量均为8 000 MW，线路长度分别为2 488 km和2 452 km。

主要针对两个方案中±1 100 kV，输送功率11 000 MW直流线路进行计算，计算采用的全寿命

周期为30年，通货膨胀率为3%，年利率为7%，其他条件略。为体现碳纤维复合芯导线强度高、填充率高、重量轻和弧垂小等优点，在选择导线型号时，不局限于按照等截面的方法来选择，而是在塔杆高度等力学条件相似的情况下，选择截面更大的碳纤维复合芯导线进行评估。

由表1的数据可以看出，在同等单位长度重量和外径的情况下，碳纤维复合芯导线的截面积均大于钢芯导线。由于碳纤维复合芯导线采用软铝替代钢芯导线的硬铝，且采用型材结构，填充率更高。因此，在相同的塔杆高度、通道宽度等条件下，采用碳纤维复合芯导线，可以获得更大的容量。在对表面电场强度、无线电干扰值和可听噪声值等约束条件进行计算后，选定满足条件的导线为钢芯导线8×JL/G3A-1000/45、8×JL1/G2A-1250/100及碳纤维复合芯导线8×JLRX/F1B-1040/87、7×JLRX/F1B-1140/79和7×JLRX/F1B-1390/87。

在运行损耗计算时，选择同等运行条件，即

表1 导线性能表

规格型号	铝截面积 /mm ²	外径 /mm	20℃直流电阻 /(Ω/km)	计算拉断力 /kN	70℃以上线膨胀系数 /(1/℃)	20℃环境温度额定载流量 /A
钢芯铝绞线，JL/G3A-1000/45	1 000.38	42.1	0.028 9	226.15	21.7	1 739
钢芯铝绞线，JL1/G2A，1250/100	1 249.03	47.85	0.023	329.85	21.7	1 961
碳纤维导线JLRX/F1B-1040/87	1 036.3	39.24	0.026 7	249	1.6	2 589
碳纤维导线JLRX/F1B-1140/79	1 135.8	40.74	0.024 5	236.8	1.6	2 730
碳纤维导线JLRX/F1B-1390/87	1 388.7	44.75	0.020 2	268.7	1.6	3 065

钢芯导线和碳纤维复合芯导线在相同的运行温度条件下进行计算，其结果如表2所示。在以往文献的研究中，部分研究者利用碳纤维复合芯导线耐高温运行的特性，往往选择较钢芯导线更小的截面，通过高温运行满足容量需求，以节约一次投资。在本文中，为适应跨洲输电线路大容量和环境恶劣的要求，评估时对钢芯导线和碳纤维复合芯导线采用相同的运行温度，而将碳纤维复合芯导线的高温运行能力作为系统冗余，以提高线路的耐候性和稳定性。通过对运行损耗的计算发现，相同力学条件下，选择截面更大的碳纤维复合芯导线，输电损耗能够显著降低。但由于碳纤

维导线价格较钢芯导线高，还需进一步分析其全寿命周期成本来评估其经济性。

表2 运行损耗计算表

(单位：kW/km)			
规格型号	直流损耗	电晕损耗	总损耗
8×JL/G3A-1000/45	380.3	11.8	392.1
8×JL1/G2A-1250/100	302.6	9.4	312.0
8×JLRX/F1B-1040/87	351.3	10.9	362.2
7×JLRX/F1B-1140/79	322.4	10.0	332.4
7×JLRX/F1B-1390/87	265.8	8.2	274.0

表3中，根据全寿命周期的思想，利用全寿命周期成本目标函数对钢芯导线8×JL/G3A-1000/45、7×JL1/G2A-1250/100及碳纤维复合

表3 全寿命周期成本分析

(单位: 万元/km)

规格型号	一次投资	退役成本	运行成本	维护成本	故障成本	全寿命费用
8×JL/G3A-1000/45	62.7	59.0	14 113.8	26.3	7 512.8	21 748.3
8×JL1/G2A-1250/100	94.9	89.3	12 837.1	39.9	7 512.8	20 534.1
8×JLRX/F1B-1040/87	89.5	84.2	13 039.4	37.6	5 366.3	18 579.3
7×JLRX/F1B-1140/79	96.9	91.2	11 965.0	40.7	5 366.3	17 519.4
7×JLRX/F1B-1390/87	113.8	107.1	11 274.3	47.8	5 366.3	16 861.5

芯导线8×JLRX/F1B-1040/87、7×JLRX/F1B-1140/79和7×JLRX/F1B-1390/87的全寿命周期成本进行了计算。计算结果表明, 尽管碳纤维复合芯导线一次投资成本较高, 但其耐候性好, 线损低, 全寿命周期成本较钢芯导线方案有较大降低。从建设、运行、维护和退役的全过程来看, 碳纤维复合芯导线的全寿命周期经济性较好。

1) 按等截面原则来比较, 钢芯导线8×JL/G3A-1000/45与碳纤维复合芯导线8×JLRX/F1B-1040/87截面相当, 导线价格JLRX/F1B-1040/87约为JL/G3A-1000/45的180%, 而受益于碳纤维复合芯导线高填充率、低弧垂的特性, 在塔杆、基础等设施的投资上, 碳纤维导线更为节省, 因而一次性投资8×JLRX/F1B-1040/87方案为8×JL/G3A-1000/45方案的142.7%, 而全寿命周期成本仅为其85.43%。

2) 按一次投资原则进行比较, 钢芯导线8×JL1/G2A-1250/100方案与碳纤维导线7×JLRX/F1B-1140/79方案一次投资相当, 后者总截面较前者小2 020 mm², 约20.2%, 总寿命成本约为钢芯导线方案的85.31%。

3) 按等单位长度重量原则进行比较, 钢芯导线8×JL1/G2A-1250/100方案与碳纤维导线7×JLRX/F1B-1390/87方案相比, 后者一次投资为钢芯导线的119.9%, 总寿命成本约为其82.11%。

4) 以钢芯导线8×JL/G3A-1000/45为基准, 三种碳纤维复合芯导线方案的全寿命周期成本分别为其85.43%、80.56%和77.53%。

为更好地反映全寿命周期成本和一次投资的

关系, 用全寿命成本与一次投资的比值来进行比较。全寿命周期成本与一次投资的比值越高, 说明全寿命周期中一次投资的占比越大, 其全寿命周期成本的经济性越差。由表4和下图可以看出, 虽然碳纤维复合芯导线一次投资较钢芯导线更大, 但是从全寿命周期成本的角度来看, 碳纤维复合芯导线较钢芯导线经济性更好。

表4 全寿命周期成本与一次投资比

(单位: 万元)

规格型号	一次投资	全寿命费用	L/I
8×JL/G3A-1000/45	62.7	21 748.3	346.9
7×JL1/G2A-1250/100	94.9	20 534.1	216.3
8×JLRX/F1B-1040/87	89.5	18 579.3	207.7
8×JLRX/F1B-1140/79	96.9	17 519.4	180.7
7×JLRX/F1B-1390/87	113.8	16 861.5	148.1

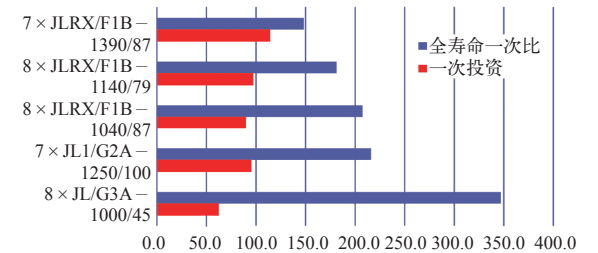


图 全寿命周期成本与一次投资比图

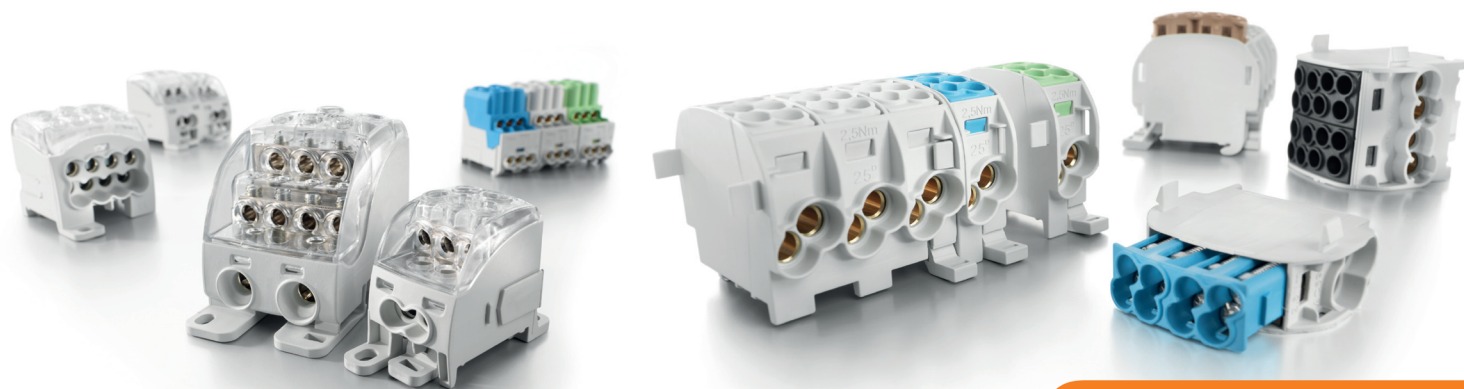
4 结束语

综上所述, 由于跨洲特高压输电通道容量巨大, 线路损耗和故障损失成本与一次投资成本相比, 对全寿命周期成本的影响更大。碳纤维复合芯导线以其容量大、线路损耗低、弧垂等力学性能好及耐候性好的优点, 在全球能源互联网跨洲特高压输电通道导线的选型中经济性更好, 更适合用于跨洲特高压输电通道工程的建设。

参考文献

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [2] 刘振亚. 特高压电网 [M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [4] 李兴源. 高电压直流输电系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [3] 张彦涛, 张志强, 张玉红, 等. 应用特高压直流输电技术实现亚欧洲际输电方案的设想 [J]. 电网技术, 2015, 39 (8): 2069-2075.
- [5] 李涛, 马薇, 黄晓蓓. 基于全寿命周期成本理论的变电设备管理 [J]. 电网技术, 2008, 32 (11): 50-53.
- [6] 李泓泽, 郎斌. 全寿命周期造价管理在电力工程造价管理中的应用研究 [J]. 华北电力大学学报: 社会科学版, 2008 (1): 7-11.
- [7] 黄道春, 魏远航, 钟连宏, 等. 我国发展特高压直流输电中一些问题的探讨 [J]. 电网技术, 2007, 31 (7): 6-12.
- [8] 杨长龙, 田超凯, 王志伟, 等. 碳纤维复合芯导线全寿命周期年费用法的选型研究 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2015 (11): 59-63.
- [9] 尤传永. 增容导线在架空输电线路上的应用研究 [J]. 电力设备, 2006, 7 (10): 17-19.
- [10] 邵天晓. 架空送电线路的电线力学计算 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [11] 张颖璐. 倍容量导线的张力弧垂特性分析计算 [J]. 电力建设, 2006, 27 (9): 7-9.
- [12] 何州文, 陈新, 王秋玲, 等. 国内碳纤维复合芯导线的研究和应用综述 [J]. 电力建设, 2010, 31 (4): 90-93.
- [13] 沈圣炜, 曹琦. 碳纤维复合芯导线在线路增容工程中的应用 [J]. 应用科学, 2009 (9): 68-69.

(收稿日期: 2016-01-12) **EA**



Weidmüller

魏德米勒WPD系列分线端子 为电力分配提供安全、高效的解决方案

魏德米勒新推出了WPD系列分线端子, 包括主回路分线端子、次回路分线端子和相位分线端子。魏德米勒WPD X01-X03主回路分线端子空间紧凑, 根据IEC61238“A级”标准测试, 可以安全地联接铝导线, 电压等级可以达到交直流1000V, 满足各种应用的电压需求; 次回路分线端子和相位分线端子WPD X00和WPD X04-X09, 提供了空间紧凑以及安全有效的电源分配, 台阶式的进线孔设计使得布线清晰简便, 满足客户实际应用中的高标准需求。

扫一扫, 关注魏德米勒官方微信



Let's connect.