

# 光伏系统直流线缆经济性选型

陈彬, 吴少璟, 江颖, 薛源

(合肥阳光新能源科技有限公司, 安徽 合肥 230001)

**摘要:** 光伏电缆的选型以往一致遵循满足载流量、线损和热稳定条件下选择最小截面的情况, 目前存在的线缆经济性选择, 也是需要导出 PVsyst 中的电流数据, 该方法较为麻烦所以应用得较少。本文通过 PVsyst 模拟数据, 使用多元线性回归的思路, 探求线损和峰值小时数、海拔的关系, 继而可以快速地电缆的经济性选择。

**关键词:** 线缆经济性选择; 低压直流线缆; 电流平方模型; 多元线性回归

中图分类号: TM247

文献标识码: A

文章编号: 1004-7344(2021)08-0055-03

## 0 引言

光伏系统设计中, 线缆往往只选择横截面最小的来减少投入<sup>[1]</sup>, 然而在考虑 25 年使用寿命的情况下, 这并不是最优的线缆选择结果。本文基于多元线性回归思想探求影响光伏系统电流的因素, 通过计算 25 年的线损造成的经济损失, 最后基于目前得到的电缆价格信息, 进行经济性方面的最优化选择。

## 1 直流侧经济性模型

取 1m 线缆作为基准单位, 直流线缆的线损公式为:

$$P_{\text{loss}}(I, \rho, S) = I^2 \rho / S \quad (1)$$

式中:  $I$ -电流,  $A$ ;  $\rho$ -电阻率,  $\Omega \cdot m/mm^2$ ;  $S$ -电缆横截面积,  $mm^2$ 。

忽略占比较小的低辐照度情况, 一般而言, 其中对太阳能电池而言电流和光照成线性关系<sup>[2]</sup>, 即:

$$k = \frac{P_{\text{光照}}}{I_{\text{组件电流}}} \quad (2)$$

式中:  $P_{\text{光照}}$ -光照的辐照量强度,  $W/m^2$ ;  $I_{\text{组件电流}}$ -组件的输出电流,  $A$ ;  $k$ -组件的特性, 即光照和电流的比值。

根据式(1)和式(2)可得, 对于一串串联的太阳能电池, 电缆的线损可用式(3)表示:

$$P_{\text{loss}}(I, \rho, S) \times \frac{S}{\rho} = I_{\text{组件电流}}^2 = P_{\text{光照}}^2 / k^2 \quad (3)$$

公式(3)说明线损  $P_{\text{loss}}$  和  $P_{\text{光照}}^2$  成正比。

光伏系统的寿命约为 25 年, 对汇流箱出线电缆而言, 考虑全寿命周期线损导致的经济损失可用式(4)表示:

$$P_{\text{loss total}} = \sum_{n=1}^{n=25} \frac{2 \times N^2 \times P_{\text{loss}} \times (1-\eta_0) \times (1-\eta_{\text{annual}})^{n-1} \times P_{\text{electricity}}}{(1+i)^{n-1}} \quad (4)$$

其中:  $i$ -折现率, %;  $P_{\text{electricity}}$ -电价, 元/kWh;  $\eta_{\text{annual}}$ -组件每年衰减, %;  $\eta_0$ -组件首年衰减, %;  $N$ -汇流箱进线路数, 串。

基于式(1)和(4)  $P_{\text{loss total}}$  与电流平方, 组件本身的特性, 即衰减率、组件电流等, 以及线缆电阻率和横截面积有关, 其中电流平方的模拟需要用到 PVsyst, PVsyst 软件是一套著名的光伏系统仿真模拟软件, 由瑞士 Geneva 大学环境科学学院 André Mermoud 博士开发。PVsyst 软件主要用来对光伏发电系统进行建模仿真, 分析影响发电量的各种因素, 并最终计算得出光伏发电系统的发电量, 可应用于并网系统、离网系统、水泵和直流系统等等, 软件含有丰富的 NASA 和 Meteornorm 气象资源库、国内外组件数据库和逆变器数据库及定量分析工具等等, 深受国内外工程设计、产品研发、设计院和高校等光伏人士的欢迎<sup>[3]</sup>。本文使用的是 Meteornorm7.1 数据库, 该数据库是目前世界范围内应用最为广泛, 同时在我国最为准确地数据库之一<sup>[4]</sup>。

## 2 基于不同气候条件模拟组件输出电流

在 PVsyst 中模拟组件的输出电流, 取隆基 LR6-60-PH310M 组件为例,  $I_{\text{mpp}}$  为 9.35A, 逆变器为 hoymiles 0.3kW 逆变器。取全国 36 个城市的光照资源, 这 36 个城市遍布全国各地, 水平辐照量从 900-1800kWh/m<sup>2</sup> 进行模拟, 海拔从 6-2889 m, 基于组件特性:

$$I \propto P_{\text{光照}}, \text{ 则 } I^2 \propto P_{\text{光照}}^2, \text{ 则 } \frac{I^2}{P_{\text{光照}}} \propto P_{\text{光照}} \quad (5)$$

式中:  $P_{\text{光照}}$  为某一时刻的光照强度, 即功率单位, 使用峰值小时数  $P$  来代表全年光照的能量, 单位为 kWh/m<sup>2</sup>, 峰值小时数  $P$  为全年每小时  $P_{\text{光照}}$  的和, 如式(6)所示:

$$P = \sum_{i=1}^{i=8760} P_{\text{光照}}(i) \quad (6)$$

基于模拟的 36 个城市的数据, 作出和的图形, 如图 1 所示。

图 1 表示 36 个城市  $P$  和  $\frac{I^2}{P}$  大体成线性关系, 不过存在个

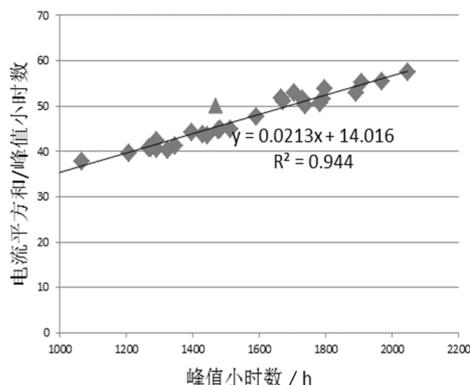


图1 峰值小时数与电流平方和/峰值小时数的关系(一)

个别点偏离直线较多,如图中的三角形点,通过复核发现,这些点均为相对高海拔点。因此,可以预估海拔影响了最终的结果,即海拔本身也是一个变量,为校验此结论,选用相对低海拔点,即选取海拔 1000m 以下所有城市重新建模如图 2 所示。

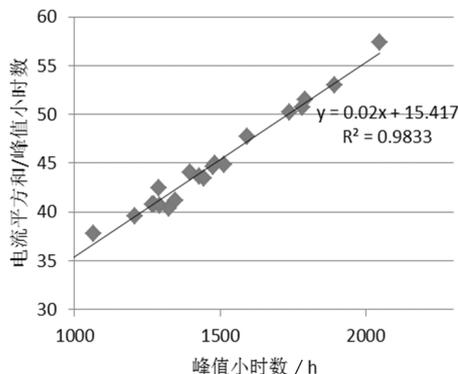


图2 峰值小时数与电流平方和/峰值小时数的关系(二)

图 2 显示该组数据的线性模型更加准确,因此可以判断海拔确实有影响,继而取最佳倾向峰值小时数在 1760-1800 的 8 个不同海拔的城市,峰值小时数差距不到 2%,默认影响较小,做出海拔 H 和  $\frac{I^2}{P}$  的关系如图 3 所示。

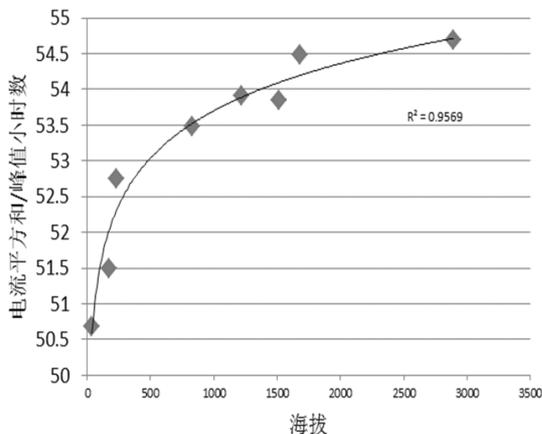


图3 海拔与电流平方和/峰值小时数

图 3 显示模型类似一个对数函数,因此对海拔 H 取对数,ln(H)与电流平方和/峰值小时数的关系如图 4 所示。

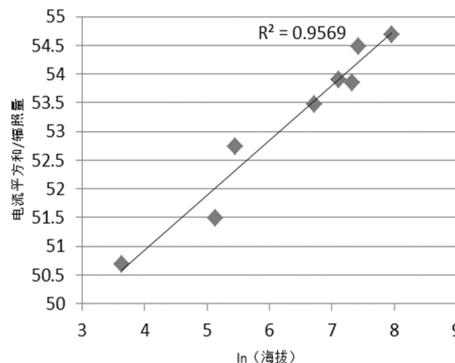


图4 ln(海拔)与电流平方和/辐照量的关系

图 2、图 4 显示 ln(H) 和峰值小时数与均电流平方和/辐照量均为线性关系,可以做如下假设,如式 (7) 所示:

$$\frac{I^2}{P} = A \times \ln(H) + B \times P + C \quad (7)$$

这是一个多元线性回归问题,使用梯度下降法进行求解,见表 1。

表 1 模型系数结果

A	B	C
0.01956	0.73296	13.24765

标准差为 0.6981,标准差系数为 1.44%。

则式 (7) 可表示为:

$$\frac{I^2}{P} = 0.01956 \times P + 0.73296 \times \ln(H) + 13.24765 \quad (8)$$

则:

$$I^2 = P \times (0.01956 \times P + 0.73296 \times \ln(H) + 13.24765) \quad (9)$$

该模型中使用组件的 mppt 电流为 9.35A,推广到所有适用组件,如式 (10) 所示:

$$I^2 = \frac{I_{mppt}^2 \times P \times (0.01956 \times P + 0.73296 \times \ln(H) + 13.24765)}{9.35^2} \quad (10)$$

### 3 实例模拟

假设基于我司格尔木领跑者项目,电价为 0.31 元/kWh;首年衰减 2%,之后每年 0.55%;选用铝合金线缆,电阻率为 0.0279Ω·m/mm<sup>2</sup>;折现率 5%;组件 I<sub>mppt</sub> 为 9.35A,代入式 (4)、(10) 进行计算。

计算常见的 8 路、12 路、16 路进线汇流箱的出线线缆总花费,8 路、12 路进线汇流箱电缆可以选择 2×50mm<sup>2</sup>、2×70mm<sup>2</sup>、2×95mm<sup>2</sup> 和 2×120mm<sup>2</sup> 四种铝合金线缆,16 路进线汇流箱可以选择 2×70mm<sup>2</sup>、2×95mm<sup>2</sup> 和 2×120mm<sup>2</sup> 三种线缆,电缆总花费函数为式 (11) 所示:

$$NPV_{totalcost} = NPV_{cableloss} + NPV_{cablecost} \quad (11)$$

求得最小电缆总花费 (NPV<sub>totalcost</sub>) 即为最佳情况。

则已知线缆费用的情况下,可以基于最小的总花费原则进行选择,基于某厂商铝合金线缆定价,最后结果如图 5 所示。

结论显示最小截面线缆均非最优线缆,对于 8 进 1 汇流箱,

(下转第 92 页)

船舶名称	船舶MMSI	航速	航向	航高	日期
桂桂平运8373	413972385	6.4(节/小时)	334.50°	桥无	2020-08-20 11:23:04
鸿源8683	413798943	6.8(节/小时)	167.20°	桥无	2020-08-20 11:14:20
粤顺兴运9036	413991945	5.6(节/小时)	329.60°	桥无	2020-08-20 11:14:06
粤运916	412479710	4.9(节/小时)	165.90°	桥无	2020-08-20 11:13:08
粤运916	412479710	4.8(节/小时)	158.20°	桥无	2020-08-20 11:13:05
盛源盛	412591620	6.4(节/小时)	324.80°	桥无	2020-08-20 11:03:07
盛源盛	413703910	7.2(节/小时)	327.10°	桥无	2020-08-20 10:54:42
粤顺源运2238	413995874	4.9(节/小时)	165.90°	桥无	2020-08-20 10:54:18
粤顺源27	413813000	9.2(节/小时)	164.70°	桥无	2020-08-20 10:44:37
粤顺源运9983	413843915	6.7(节/小时)	333.70°	桥无	2020-08-20 10:44:30
中顺大	413459270	9.3(节/小时)	171.20°	桥无	2020-08-20 10:43:54
粤顺源运9678	431997212	4.1(节/小时)	169.40°	桥无	2020-08-20 10:34:41

图 14 通航列表数据



图 15 CCTV 视频监控

## 5 结语

将桥梁主动预警防撞系统与流溪河特大桥桥梁结构安全监测系统相结合,搭建一个统一、完善、开源化的综合管理平台。所有数据通过 4G 网络传输,在云平台进行解析、处理、展示。

通过电子化手段,实时获取水域内船舶的动态信息,且让其

获知实时通航条件(如:航道位置、桥墩位置、通航净空)。如果船舶产生风险行为,系统自动对其进行警告纠偏。而一旦事故发生,可以通过桥梁结构安全监测系统快速判断并报警。达到提前预防,事时警告,事后快速响应的效果。最大限度避免因船舶碰撞桥梁带来的二次事故。

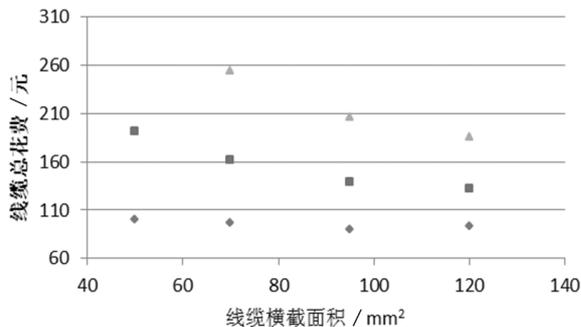
## 参考文献

- [1] 高志刚.大型跨河桥梁施工期通航安全维护主体责任落实的思考[J].中国水运(上半月),2018(7):22-23.
- [2] 马广文,王西秩总.交通大辞典[M].上海:上海交通大学出版社,2005.
- [3] 李众,王帅,魏百娟.origami 结构吸能能力研究综述[J].科学与财富,2019(6):136.
- [4] 冀楠,李通,李乔,等.船舶-桥梁单墩碰撞的数值模拟分析[J].中国水运(下半月),2019,19(5):53-54,57.
- [5] 冯忠居,李维洲,戴良军,等.中国跨海大桥防撞体系的应用现状[J].筑路机械与施工机械化,2017(34):45.
- [6] 盛勇,韩鹏,唐术熙,等.中小跨度桥梁安全运维现状与改进方法[J].交通与运输,2018,198(4):47-49.

收稿日期:2021-01-12

作者简介:董军(1966—),男,汉族,山东泰安人,经济师,高级政工师,研究生,研究方向为智慧交通管理。

(上接第 56 页)



• 汇流箱进线路数 8 ■ 汇流箱进线路数 12 ▲ 汇流箱进线路数 16

图 5 多进线路数条件下线缆截面与线缆总花费的关系

最优是 95mm<sup>2</sup> 线缆,比 50mm<sup>2</sup> 线缆少花费 9.76 元/m,对 12 路进线和 16 路进线的情况,最优解均为 120mm<sup>2</sup> 线缆,比 50mm<sup>2</sup> 和 70mm<sup>2</sup> 线缆分别节省 53.35 元/m 和 47.46 元/m。

## 4 结论和模型不足

基于目前的数据,可以发现电流平方和和峰值小时数以及海拔有关,基于多元线性回归思想可以建模,因此可以快速得到电流平方和的数据,进而计算线损,最关键的一步就是计算电流平方和的模型,目前的模型标准差系数为 1.44%,但是小于 1000m 的情况下,同样模型,标准差系数会降到 1% 以下,说明对海拔较

低的地区该模型更精确。

不足:①峰值小时数选用 MN7.1 数据库数据,虽然是目前最为使用的数据库,但是毕竟和真实情况可能有一定的出入;②模型本身存在一定的不准确情况,尤其是海拔较高的情况下;③模型数据来自 PVsyst 模型,因此 PVsyst 模型的不足也会影响到该模型的准确性。

## 参考文献

- [1] 夏炜.选择导线和电力电缆截面的可靠性计算[J].电子世界,2014(14):480-481.
- [2] 吴小进,魏学业,于蓉蓉,等.复杂光照环境下光伏阵列输出特性研究[J].中国电机工程学报,2011(增刊1):162-167.
- [3] 罗赞.基于 PVsyst 的独立光伏系统设计[J].信息通信,2015(5):53-55.
- [4] 王小杨,黄平祖,陈荣荣.基于 PVsyst 与 Meteonorm 的太阳能资源评估结果分析[J].建筑电气,2017(7):36-40.
- [5] 傅惠民,吴琼.多元线性过程回归分析[J].机械强度,2011(3):343-347.
- [6] 刘颖超,张纪元.梯度下降法[J].华东工学院学报,1993(2):12-16,22.

收稿日期:2021-01-15

作者简介:陈彬(1982—),男,汉族,四川资阳人,工程师,本科,研究方向为新能源发电。