

海外项目中光伏直流电缆选型标准解读

张博静

上海电气集团股份有限公司 上海 201100

摘要: 随着光伏技术的发展,越来越多的国内企业出海执行海外项目,在执行海外项目的过程中,除了主设备外,光伏电缆的设计也遇到了一些有争议的标准解读和适用问题。本文根据执行的海外项目为依托,针对于最新的IEC标准,对于电缆选型的计算方法进行了标准解读,并以具体案例进行了详细说明。

关键词: 光伏; IEC标准解读; 电缆计算

在大型的光伏电站中,除了光伏组件和逆变器以及变压器等主设备,辅材中的交直流电缆对于电站的安全可靠运行,及电站收益起到至关重要的作用。

由于成本压力,电站中电缆未考虑安全裕量,敷设系数等等导致线缆选型不能满足电站生命周期内长期安全稳定运行要求,电缆烧毁事故时有发生。电缆的选型应在考虑载流量的基础上,再考虑对于压降和线损的控制。

光伏行业在电缆选型方面有成熟的标准体系,另外,在标准IEC61215:2021引入了双面辐照BNPI和背面辐照BSI,规范了双面组件场景下的组件电流,为双面组件的线缆选型提供了依据。

本文将通过对行业相关标准进行分析并结合项目执行情况,理清光伏项目中低压线缆选型的原则和计算逻辑,为保障光伏电站的全生命周期稳定运行提供指引。

1 IEC 标准分析

下表列出了光伏电站线缆选型所涉及的常用标准:

表1 光伏方阵线缆相关标准

标准号	标准名称	引用
IEC60364-4-43	低压电气装置安全防护过电流保护	[1]
IEC60364-5-52	电气设备的选择和安装-布线系统	[2]
IEC60364-7-712	低压电气安装-特殊安装和位置的要求-光伏系统	[3]
IEC62548	光伏子阵设计	[4]
IEC61215	地面用光伏组件-设计规范 and 型式	[5]
IEC62930	1500V直流光伏系统线缆	[6]
IEC60502-1	1kV-3kV挤包绝缘电力电缆及附件	[7]

1.1 线缆载流能力概述

从材料本身出发,决定线缆载流量大小的主要因素有以下几点:

- 线缆材料(铜,铝)
- 线缆横截面积(金属的线径)

以上两点决定了线缆的标准载流能力。受环境和安装方式的影响,线缆实际的载流能力还需考虑由于温度和散热情况产生的载流量降额。影响因素有:

- 导体温度
- 敷设方式(排列形态,敷设间距,并联数量等)
- 敷设类型(直埋,穿管等)
- 土壤热阻系数

由于安装方式类型繁多,在IEC60364-5-52附录中有详细描述,在此不赘述。

线缆本身的载流能力可以简单总结为:

$$I_0 = \frac{I_z}{f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_4} \quad (1)$$

其中:

I_z 为线缆考虑降额后实际的载流能力

I_0 为标准载流能力,由IEC60364-5-52上标称的容许电流给出,或参考电缆厂家提供的数值

f_1 为土壤温度降额系数

f_2 为线缆敷设系数

f_3 为土壤热阻系数降额系数

f_4 为电缆埋地深度降额系数

1.2 光伏子阵线缆选型分析

光伏子阵通常有PV string cable, PV subarray cable, 和PV array cable 三段线缆[4],要确定线缆应具备的最小载流能力,需从正,反两个方向考虑可能流过线缆的最大电流。

在有过流保护装置的情况下,过流保护装置的选型是按照正向的最大电流选择的;反向电流也会在超过保护电流时切断,所以流过电缆的正,反向电流始终不会高于过流保护装置的选型规格。这就要求线缆的载流能力等于过流保护装置的额定电流 I_a 。

在线路没有过流保护装置的情况下,需要分别考虑

正向和反向可能流过线缆的最大电流，取其大者。

正向电流考虑 $1.25 \times K_I \times I_{SC_MOD}$ （其中 I_{SC_MOD} 项根据所选线缆替换成 $I_{SC_subarray}$ 或 I_{SC_array} ）。

其中1.25为安全系数SF， K_I 为双面增益因子，在后面章节会展开说明。

I_{SC_MOD} 为组件（组串）的STC下短路电流

$I_{SC_subarray}$ 指的是一次汇流之后的线路短路电流，一般指汇流箱输出电流。计算方法为组件/组串短路电流 $I_{SC_MOD} \times$ 并联数N（汇流箱接入串数）。

I_{SC_array} 指的是二次汇流（如有）之后的短路电流，计算方法为subarray短路电流 $I_{SC_subarray} \times$ 3汇流箱并联数N'。

Array反向电流考虑非光伏阵列产生的反向馈电流 I_{BF_TOTAL} 。

在光伏系统中，各段线缆一般都需要过流保护装置，此时决定线缆的选型一般是过流保护装置的选型。而对于过流保护装置的选型，新版IEC62548修订稿给出了对于PV组串的过流保护装置

$$I_n > 1.5 \times K_I \times I_{SC_MOD} \quad (2)$$

$$\text{and } I_n \leq I_{MOD_MAX_OCPR} \quad (3)$$

$I_{MOD_MAX_OCPR}$ 为组件规格书上标称的最大熔丝电流

以及对于PV subarray cable 和PV array cable的过流保护装置规格分别为

$$I_n > 1.25 \times K_I \times I_{SC_Subarray} \quad (4)$$

$$I_n > 1.25 \times K_I \times I_{SC_array} \quad (5)$$

以上对于载流能力的计算和过流保护装置选型逻辑，在标准IEC62548: 2016 [4] 章节 7.3.7.1, IEC60364-7-712: 2019 [3] 章节712.524.1.101.1都有几乎完全相同描述。而新版IEC62548修订稿考虑了双面组件，新增定义了双面因子 K_I 。

1.3 安全系数SF

光伏组件受环境因素影响，在某些时候的短路电流可能比在标准测试条件STC (AM = 1.5, 1000W/m²辐照，组件温度25℃)下的组件短路电流更高，这些因素包括但不限于：

- 高的直接辐照度
- 反照率
- 云增强
- 与标称值的偏差
- 电池最高温度高或低
- 低大气质量

因此，标准引进了一个安全系数SF (safety factor) = 1.25来考虑这些因素带来的影响，用作线缆，和熔丝选型的安全系数考量（组串熔丝安全系数增加到1.5）。

IEC62548强调，低于1.25的安全系数在任何情况下都是不建议的。

1.4 双面增益因子 K_I

双面组件在2018年之后逐渐普及。辐照和光伏电池的光生电流成正比，因此在同场景下，双面组件比单面组件有更大的短路电流 I_{sc} 。背面所受辐照受地表反照率，组件离地高度，和组件前后拍间距等因素影响，难以统一描述。

IEC61215: 2021 [5] 中关于双面组件的描述中，引入了BNPI(bifacial nameplate irradiance)的定义，表示正面接受1000W/m²的同时，背面接受135W/m²光照。以及双面可靠性辐照 BSI (Bifacial stress irradiance)，表示为正面接受1000W/m²同时背面接受300W/m²辐照。

BNPI中规定的135W/m²等同于60904-3中定义的环境下双面组件离地高度1米时背面所接受到的辐照度。一般的，行业内认为BNPI条件下的测试结果不仅与传统STC条件下的结果具有良好的兼容性，同时使在相同条件下对双面和单面组件的光伏性能进行直接对比成为可能，这种考虑为组件选型和光伏电站的设计提供了较可信的参考信息。BNPI也被新版IEC62548修订稿定为无仿真时的双面增益因子建议值，即：

$$K_I = I_{SC_BNPI} / I_{SC_MOD} \quad (6)$$

最新的IEC62548标准中对 K_I 的定义为：考虑了组件类型和安装性质（组件朝向，遮挡，组件背面辐照）的额定直流电流校正系数。所以 K_I 可以理解双面增益因子。

1.5 案例分享

以中东某大型地面光伏项目为例，光伏子阵配置简述如下：

➤ 组件：540W, $V_{mp} = 41.3V$, $I_{mp} = 13.13A$, $I_{sc} = 13.89A$; 组件双面率Bifacial factor = 70%;

➤ 支架：1V跟踪支架，距离地面高度1.5m;

➤ 组串：28块组件一串；

➤ 直流汇流箱：16进1汇流箱；

➤ 方阵：30个汇流箱接入逆变器；

➤ 双面增益因子 $K_I = 1.1$ ，由PVSYST软件仿真得出。

使用公式1进行线缆选型计算，根据电缆厂家样本对其中的降额系数选取如下：

$$f_1 = 0.93 \quad \text{土壤温度取} 30^\circ\text{C}$$

$$f_2 = 0.75 \quad \text{线缆敷设为3根同沟，间距} 0.125\text{m}$$

$$f_3 = 0.8 \quad \text{土壤热阻系数为} 2.0\text{K} \cdot \text{m/W}$$

$$f_4 = 1.00 \quad \text{电缆埋地深度为} 0.5\text{m}$$

针对汇流箱到逆变器的直流线缆选型，过流保护装置 I_n 规格应使用4计算，即：

$$I_z = I_n > 1.25 \times K_f \times I_{SCarray} = 305.58A$$

根据公式1可以计算出所需线缆标称载流量 I_0 为:

$$I_0 = \frac{I_z}{f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_4} = 547.6$$

故所使用线缆标称载流量应大于547.6A, 线缆标准载流量按照按照厂家样本进行选择, 根据样本, 符合载流量要求的电缆为2*400mm²铝缆¹。

另外, 线损和压降应基于具体的电缆长度进行计算。直流压降是组串到汇流箱部分的压降, 以及汇流箱到逆变器部分的压降之和, 本案例考虑将直流侧总压降控制在1.5%以内。

综上, 本案例推荐的汇流箱到逆变器部分电缆选型为: 2 *400mm²铝缆。

结束语

本文通过对光伏行业相关标准的分析解读, 对标准中关于载流量计算、安全系数、双面增益因子等要求的计算方式进行分析推演, 提出了需要综合考虑线缆载流能力以及线损、压降控制的分析方法。从而提升电站整体安全性、安全可靠, 选择合适的线缆规格, 保障投资收益。

参考文献

[1]IEC 60364 Low-Voltage Electrical Installations - Part 4-43 : Protection For Safety - Protection Against Overcurrent,

International Electro technical Commission, 2008.

[2]IEC 60364 Low-voltage electrical installations – Part 5-52: Selection and erection of electrical equipment – Wiring systems, International Electro technical Commission (IEC), 2009.

[3]IEC 60364 Low voltage electrical installations - Part 7-712: Requirements for special installations or locations – Solar photovoltaic (PV) power supply systems, International Electro technical Commission (IEC), 2019.

[4]IEC 62548 Photovoltaic (Pv) Arrays – Design Requirements, International Electro technical Commission (IEC), 2016.

[5]IEC 61215 Terrestrial Photovoltaic (Pv) Modules – Design Qualification And Type Approval – Part 1: Test Requirements, International Electro technical Commission (IEC), 2021.

[6]IEC 62930 Electric Cables For Photovoltaic Systems With A Voltage Rating Of 1,5 Kv Dc, International Electro technical Commission (IEC), 2017.

[7]IEC 60502 Power Cables With Extruded Insulation And Their Accessories For Rated Voltages From 1 Kv to 30Kv International Electro technical Commission (IEC), 2009.

¹此处载流量工况为: 环境温度40℃, 土壤温度25℃, 土壤热阻率1.2K·m/W, 电缆埋深0.5m