

光伏电站直流系统电缆载流量的计算方法研究

季光兴¹, 赵益超²

¹通威新能源有限公司 四川成都

²东方电气集团东方锅炉股份有限公司 四川成都

【摘要】本文分析了并网光伏电站直流汇集系统的结构、特性和具体参数。基于直流电传输的特点,依据 IEC 算法建立了电缆载流量的数学模型,并结合常见的光伏电站直流系统方案作了相关分析。文章最后给出了建议载流量,对光伏电站工程设计中的电缆直流载流量计算和电缆选型能提供一定的参考。

【关键词】光伏电站; 直流载流量; 载流量计算

Research on a Calculation Method of Current Rating for DC Cable Used in Photovoltaic Power Station

Guangxing Ji¹, Yichao Zhao²

¹Tongwei New energy Co., Ltd, Chengdu, China

²Dongfang Boiler Group Co., Ltd, Chengdu, China

【Abstract】 This paper analyzes the structure, characteristics and the parameters of the DC collection system in a photovoltaic power station. A mathematical mode of cable calculation for the current rating is established, based on the characteristics of DC current, and relevant analysis is also made, combined with common photovoltaic power station DC system. Finally, a recommended current carrying capacity is shown, in order to provided a valid reference for the calculation and selection of DC current rating for cables in the engineering design of photovoltaic power station.

【Keywords】 Photovoltaic Power Station; DC Current Rating; Calculation on the Current Rating

引言

进入 21 世纪以来,随着全球经济高速发展,科技进步日新月异,人类越来越关心自己的生存环境,越来越重视可再生能源和清洁能源的使用。相比传统化石能源,太阳能不但清洁环保、符合可持续发展战略,而且据推测其寿命还有几十亿年,可以说是取之不尽、用之不竭。随着碳中和碳达峰目标的提出,太阳能发电受到了国际上的普遍认可和关注,得到了广泛的应用。目前,太阳能发电应用最广的形式是并网光伏电站,其中从直流汇流箱到逆变器的电缆作为电站电气系统的重要组成部分,其对光伏电站的影响不可轻视。电缆截面如果选择过大,会影响光伏系统成本,最终影响电站收益率;电缆截面如果选择过小,将会影响电缆的连续载流量,导致电缆过热,被迫限制光伏电站出力,甚至引发安全事故。合理地选择直流汇流电缆的型号截面,

对光伏电站的安全、平稳和经济运行起着举足轻重的作用。

1 光伏发电系统与电缆

目前大型并网光伏电站主要包括太阳能电池板阵列、直流汇流箱、集中式逆变器和箱变升压系统、35kV~330kV 升压站、送出工程等部分。

当今光伏电站主流技术方案是采用 DC 1500V 直流系统,在工程中,直流汇流箱到集中式逆变器的电缆一般选用市面上广泛应用的交联聚乙烯绝缘(XLPE) 1.8/3kV 电力电缆。从光伏电站工程设计实践来看,电缆载流量计算较多采用现行国家标准《电力工程电缆设计标准》(GB 50217-2018)介绍的算法。但是,直流电在电缆中传输具有下列特点:导体损耗低、没有交流磁场、没有集肤效应、没有绝缘介质损耗和金属护层的磁感应损耗等,因此对于电缆的直流载流量应该有自己的算法^[1]。

作者简介:季光兴(1983-)男,工程师,主要从事光伏电站系统优化研究。

在光伏发电系统中, 直流汇集电缆作为连接直流汇流箱和逆变器的重要部分, 承载着光伏电站的电能传输。合理地选择直流电缆截面型号, 对光伏电站的安全、平稳、经济运行将起到至关重要的作用。

由于直流电可看成角频率为 0 的交流电, 因此, 直流电缆载流量计算可参考国际电工委员会 (IEC) 相关标准《Electric cables- Calculation of the current rating》(IEC 60287), 或者其中文翻译版本《电缆载流量计算》(JB/T 10181-2000)^[2]里面提到的计算方法, 对应的频率应取值为 0, 相关公式可作简化。

2 国际电工委员会标准 IEC 60287 对载流量计算的相关论述

2.1 交流电缆连续载流量计算公式

电缆在稳态运行时形成温度场, 通过热物理学相关计算, 求解关于热阻回路的偏微分方程, 即可得到电缆连续载流量。IEC 60287^[3]给出的载流量公式正是基于此理论。

依据 IEC 60287 标准, 空气中不受日光照射的交流电缆连续载流量计算公式如下:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d[0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)}} \dots\dots\dots \text{式 1}$$

式中各符号的意义如下:

I——单根导体中流过的电流 (单位 A)

$\Delta\theta$ ——高于环境温度的导体允许温升 (单位 K), 环境温度指的是正常状态下, 电缆周围介质的温度

R——在最高工作温度下, 电缆导体每米的交流电阻 (单位 Ω/m)

W_d ——导体绝缘每米的介质损耗 (单位 W/m)

$T_1 \sim T_4$ ——单位长度热阻 (单位 $K \cdot m/W$), 包括电缆各部分材料的热阻和外部环境的热阻系数, 具体参照本文 2.3 章节论述

n——电缆中载有负荷的导体数 (导体截面、负载均相等)

λ_1, λ_2 ——金属套损耗、铠装损耗与电缆总损耗的比值

2.2 直流载流量计算公式

当直流流过电缆的时候, 没有集肤效应、没有

电容的影响、也没有交流磁场。电缆介质中极化损耗为零, 磁感应损耗也为零。所以式 1 中的 $W_d, \lambda_1, \lambda_2$ 等参数均为零, 则式 1 可简化为下列表达式:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta}{R'T_1 + nR'T_2 + nR'(T_3 + T_4)}} \dots\dots\dots \text{式 2}$$

式 2 中的 R' 为最高工作温度下, 导体单位长度的直流电阻 (单位 Ω/m), 其余参数含义同式 1。

R' 利用温度修正公式计算如下:

$$R' = R_{20}[1 + \alpha_{20}(\theta - 20)] \dots\dots\dots \text{式 3}$$

R_{20} ——20°C 时导体最大直流电阻 (单位 Ω/m), 可参见现行国家标准《电缆的导体》(GB/T 3956-2008)

α_{20} ——导体电阻的温度系数 (单位 1/K), 铜导体取 0.00393, 铝导体取 0.00403

θ ——电缆长期最高工作温度 (°C), 交联聚乙烯绝缘电缆为 90°C

2.3 热阻

上述载流量计算式定义了四个单位长度热阻值, 其中 $T_1 \sim T_3$ 分别对应电缆绝缘层、内衬层、外护层的热阻, T_4 为外部环境热阻。

$T_1 \sim T_3$ 按式 4~6 计算:

$$T_1 = \frac{\rho_r}{2\pi} G \dots\dots\dots \text{式 4}$$

$$T_2 = \frac{\rho_r}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2t_2}{D_s}\right) \dots\dots\dots \text{式 5}$$

$$T_3 = \frac{\rho_r}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2t_3}{D_a}\right) \dots\dots\dots \text{式 6}$$

ρ_r ——式 4~式 6 分别对应绝缘层、内衬层、外护层热阻系数 (单位 $K \cdot m/W$)

G——几何因素, 根据 t_1/d_c 的值 (电缆绝缘厚度/导体直径), 查 IEC 60287-2-1 附图 2 曲线

t_2 ——内衬层厚度 (单位 mm)

t_3 ——外护层厚度 (单位 mm)

D_s ——内衬层内径 (单位 mm)

D_a ——外护层内径 (单位 mm)

在不受阳光直射的情况下, 空气中敷设的电缆周围外部热阻 T_4 按式 7 计算:

$$T_4 = \frac{1}{\pi \times D_e \times h \times (\Delta\theta_s)^{1/4}} \dots\dots\dots \text{式 7}$$

式中:

D_e ——电缆外径 (单位 m)

h ——散热系数 (单位 $W/m^2k^{5/4}$)

$\Delta\theta_s$ ——电缆表面相对于环境温度的温升 (单位 K)

h 的计算可按式 7:

$$h = \frac{Z}{(D_e)^g} + E \dots\dots\dots \text{式 8}$$

Z 、 E 、 g ——常数值, 由电缆的敷设条件确定, 详见 3.2 节表 3

$(\Delta\theta_s)^{1/4}$ 一般采用数值计算法, 常用的迭代法计算如下:

$$\text{令 } K_A = \pi \times D_e \times h \times (T_1 + T_2 + T_3),$$

$$\text{则 } (\Delta\theta_s)_{n+i}^{1/4} = \left(\frac{\Delta\theta}{1 + K_A (\Delta\theta_s)_n^{1/4}} \right)^{1/4}$$

$\Delta\theta_s$ 为导体对周围环境温度的允许温升 (K), 可选取 $(\Delta\theta_s)^{1/4}$ 初值为 2, 并反复迭代, 直到差值

$(\Delta\theta_s)_{n+1}^{1/4} - (\Delta\theta_s)_n^{1/4} \leq 0.001$, 即确定 $(\Delta\theta_s)^{1/4}$ 的值。此种迭代算法的最大优点是收敛速度快, 能够在几步之内找到符合要求的值。

3 光伏电站电缆长期直流载流量计算实例

3.1 载流量计算输入条件

在光伏电站工程实践中, 直流汇集线缆较多选择交联聚乙烯 (XLPE) 绝缘电缆, 这种电缆导体长期最高工作温度可达 90°C。考虑到环保、无公害、无氯的可持续发展要求, 外护套也多选用聚乙烯材料 (PE)。根据电缆制造标准 GB/T 3956-2008^[6] 及 GB/T 12706.1-2008^[7], 表 1 列出了 YJLY₂₃-1.8/3kV 2×50mm² 电力电缆的相关规格参数。

3.2 电缆敷设方式及敷设环境

直流汇集电缆敷设条件设定如下: 敷设在桥架内自由空气中, 不受日光照射, 环境温度 35°C, 3 根电缆相互接触排列。电缆绝缘材料的热阻系数如表 2 所示:

表 1 电缆参数

电缆名称	交联聚乙烯绝缘、聚乙烯护套、钢带铠装、1.8/3kV 铝芯电缆		
电缆型号	YJLY ₂₃ -1.8/3kV		
导体标称截面积/mm ²	50		
电缆芯数	2		
环境温度 20°C 下直流电阻/(Ω/km)	0.641		
正常运行时导体最高温度/°C	90		
名称	材料	标称厚度 (mm)	计算外径 (mm)
导体	第 2 种绞合铜体	-	8
绝缘层	XLPE	2.0	12
绕包内衬层	聚烯烃	0.4	24.8
铠装层	钢带或镀锌钢带	0.2	25.2
外护层	聚乙烯	2.0	28.8

表 2 电缆绝缘材料的热阻系数

代号	ρT (单位 K·m/W)		
含义	导体和金属套之间	衬垫层	外护套
实际材料	XLPE 绝缘材料	阻燃包带材料	聚乙烯外护套
实际取值	3.5	2.0	3.5

电缆的散热系数 h 值可根据式 8 计算得出, 其中的 Z 、 E 和 g 值可按表 3 选取:

3.3 光伏电站电缆直流载流量实例计算结果

按照上述公式及相关校正参数的选取, 可计算出直流载流量计算结果; 与现行国家标准 GB 50217-2018^[8]的计算结果对比如表 4:

表 3 参数 Z 、 E 、 g 的选取

序号	敷设方式	Z	E	g
1	单芯电缆	0.21	3.94	0.60
2	相互接触两根电缆水平敷设	0.29	2.35	0.50
3	相互接触三根电缆水平敷设	0.62	1.95	0.25

注: 本表仅仅列举了三种常见条件, 其它敷设条件下的取值详见 IEC 60287

表 4 XLPE 电缆直流载流量与交流载流量的对比

电缆规格型号	敷设方式	直流载流量	交流载流量	直流/交流载流量之比
YJY ₂₃ -1.8/3kV 2×50mm ²	3 根圆形导体电缆空气中相互接触排列	138.5	107.4	128.9%
YJY ₂₃ -1.8/3kV 2×70mm ²	3 根圆形导体电缆空气中相互接触排列	178.3	131.0	136.1%
YJY ₂₃ -1.8/3kV 2×95mm ²	3 根圆形导体电缆空气中相互接触排列	218.1	157.5	138.5%

4 分析及结论

根据上述理论分析和计算可知: 在相同的敷设环境, 相同截面积的情况下, 常规交联聚乙烯绝缘电缆的直流载流量高于交流载流量 30%左右。这是因为电缆在直流电传输工况下, 由于导体损耗低, 不存在交流磁场, 绝缘介质损耗和金属护层的磁感应损耗均为零, 并且直流电传输不受临近效应和集肤效应影响, 上述多重因素共同叠加的结果。换言之: 对于直流系统而言, 如果按照 GB 50217-2018 的载流量算法选择电缆截面, 选择结果会偏大一级。表 4 中最后一列数据表明: 电缆截面积越大, 直流和交流载流量差距也越大, 也验证了集肤效应对电缆载流量的影响。

5 结束语

在工程设计中, 合理恰当的电缆规格计算选型, 对于光伏电站的安全、平稳、经济运行是有积极意义的。基于 IEC 标准计算直流载流量, 以得到电缆选型的可靠依据, 对于工程设计精细化的推广、工程质量的提高、工程成本管控和工程质量的提高也大有裨益。

参考文献

- [1] 王宏飞, 尚爱民, 王长发, 等. 基于直流和交流传输下城市轨道交通直流电缆连续载流量计算与分析[J]. 电线电缆, 2015, (3): 1-5.

- [2] JB/T 10181.1~10181.6-2000 电缆载流量计算[S].
- [3] IEC 60287-1-1 Electric cables-Calculation of the current rating-Part 1-1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses-General [S].
- [4] IEC 60287-2-1 Electric cables-Calculation of the current rating-Part 2: Thermal resistance-Section 2.1 Calculation of thermal resistance [S].
- [5] IEC 60038-2009 IEC standard voltages [S].
- [6] GB/T 3956-2008 电缆的导体[S].
- [7] GB/T 12706.1-2008 额定电压 1kV(U_m=1.2kV)到 35kV(U_m=40.5kV)挤包绝缘电力电缆及附件[S].
- [8] GB 50217-2018 电力工程电缆设计标准[S].

收稿日期: 2021 年 12 月 5 日

出版日期: 2022 年 1 月 6 日

引用本文: 季光兴, 赵益超, 光伏电站直流系统电缆载流量的计算方法研究[J]. 资源与环境科学进展, 2022, 1(1):1-4
DOI: 10.12208/j.aes. 20220001

检索信息: 中国知网 (CNKI Scholar)、万方数据 (WANFANG DATA)、Google Scholar 等数据库收录期刊

版权声明: ©2022 作者与开放获取期刊研究中心 (OAJRC) 所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS