

基于 ETAP 的光伏系统直流弧闪计算

杨 鹏¹ 游永熙²

(1. 京鼎工程建设有限公司 2. 海南逸盛石化有限公司)

摘要：目前仅 NFPA 70E 有直流弧闪的计算公式，NFPA 70E—2024 中提供了 Maximum Power 法可对直流弧闪进行计算，但此法偏向保守，可能导致需要更高的个人保护装备和更长的工作距离。本文介绍目前国际上认可的直流弧闪计算方法，最后通过 ETAP 软件进行实际执行光伏项目的直流弧闪仿真计算。

关键词：直流弧闪；IEEE1584；NFPA 70E；光伏系统

0 引言

光伏系统包含大量直流元件，直流弧闪产生的高温不仅会导致设备损坏和火灾风险，还可能威胁到操作人员的安全，并影响系统的整体性能。因此，应对光伏系统直流弧闪进行计算并采取有效的预防和保护措施，以减少这些危害的发生。

1 直流弧闪的主流计算方法

1.1 直流弧闪计算公式

直流弧闪等效电路图如图 1 所示。

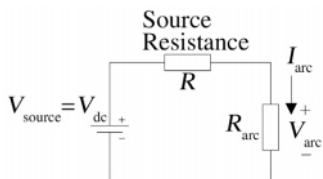


图 1 直流弧闪等效电路图

分析直流弧闪主要是求 R_{arc} 和 V_{arc} ，之后可用以下公式求弧闪功率和能量：

$$P = V_{dc} \times I_{dc} \quad (1)$$

$$P_{arc} = V_{arc} \times I_{arc} = I_{arc}^2 \times R_{arc} \quad (2)$$

$$E_{arc} \approx I_{arc}^2 \times R_{arc} \times t_{arc} \quad (3)$$

R_{arc} 和 V_{arc} 是弧闪计算的关键。

1.2 Maximum Power 法

该方法基于以下概念：当电弧电压为系统电压的一半时，电弧中可能出现最大功率。基于此假设得以下公式：

$$I_{arc} = 0.5 \times I_{bf} \quad (4)$$

$$R_{arc} = 0.5 \times \frac{V_{source}}{I_{bf}} \quad (5)$$

$$IE_m = 0.01 \times V_{sys} \times I_{arc} \times T_{arc} / D^2 \quad (6)$$

式中， I_{arc} 为直流电弧电流； I_{bf} 为直流短路电流； R_{arc} 为电弧电阻； V_{source} 为故障点直流电压。

1.3 Stokes & Oppenlander 法

Stokes & Oppenlander 基于对在敞开的空气电极之间自由燃烧的电弧在垂直和水平方向详尽研究，建立了过渡点处电弧电压和电流的模型^[1]。该方法为基于多次实验结果所推导出的经验公式，如下：

$$I_t = 10 + 0.2 \times Z_g \quad (7)$$

$$V_{arc} = (20 + 0.534 \times Z_g) \times I_{arc}^{0.12} \quad (8)$$

$$R_{\text{arc}} = \frac{(20 + 0.534 \times Z_g)}{I_{\text{arc}}^{0.88}} \quad (9)$$

式中, V_{arc} 为直流电弧电压; I_{arc} 为直流电弧电流; Z_g 为电极间距; R_{arc} 为电弧电阻, 与 Maximum Power 法最大的不同在于弧闪电压位未知, 无法直接求解, 因此必须通过迭代方式^[2]。

1.4 Paukert 法

Paukert 法用研究人员进行广泛的电弧试验电弧故障得来的数据建立电弧方程 (只有高电流电弧方程在 ETAP 的直流电弧闪光得到运用)。此方法计算流程与 Stokes&Oppenlander 法相似, 通过假设弧闪电流为初值, 进行迭代求解。电弧电流范围为 0.3A~100kA, 超出此范围不建议使用此法^[3], 这些方程式列于表 1。

表 1 100 A < I_{arc} < 100kA 的经验电弧公式

Electrode Gap (mm)	Arc Voltage (V)	Arc Resistance (Ω)
1	$13.04 \times I_{\text{arc}}^{0.098}$	$13.04 \times I_{\text{arc}}^{-0.902}$
5	$14.13 \times I_{\text{arc}}^{0.211}$	$14.13 \times I_{\text{arc}}^{-0.789}$
10	$16.68 \times I_{\text{arc}}^{0.163}$	$16.68 \times I_{\text{arc}}^{-0.873}$
20	$20.11 \times I_{\text{arc}}^{0.190}$	$20.11 \times I_{\text{arc}}^{-0.810}$
50	$28.35 \times I_{\text{arc}}^{0.194}$	$28.35 \times I_{\text{arc}}^{-0.806}$
100	$34.18 \times I_{\text{arc}}^{0.241}$	$34.18 \times I_{\text{arc}}^{-0.759}$
200	$52.63 \times I_{\text{arc}}^{0.264}$	$52.63 \times I_{\text{arc}}^{-0.736}$

1.5 DGUV-I 203-077 Iterative 法

该方法为德国标准, 其公式主要如下:

$$P_K = U_{\text{Nn}} \times I_{\text{kDC}} = U_{\text{Nn}}^2 / R_N \quad (10)$$

式中, U_{Nn} 为直流系统 (网络) 的标称电压; R_N 为直流系统的总欧姆电阻; P_K 为直流系统的短路功率 (故障位置); I_{kDC} 为持续短路电流 (故障位置金属性短路的短路电流的稳态值)。

$$U_{\text{arc}} = (34 + 0.352 \times d) \times I_{k,\text{arc}}^{0.12} \quad (11)$$

$$P_{\text{arc}} = U_{\text{arc}} \times I_{k,\text{arc}} \quad (12)$$

$$I_{k,\text{arc}(i+1)} = \frac{U_{\text{Nn}}}{R_{\text{arc}(i)} + R_N} = \frac{U_{\text{Nn}}}{\frac{(34 + 0.532 \times d)}{I_{k,\text{arc}(i)}^{0.88}} + \frac{U_{\text{Nn}}}{I_{\text{kDC}}}} \quad (13)$$

式中, d 为直流装置中的电极间隙。

其中 i 和 $i+1$ 为连续迭代步骤:

$$P_{\text{arc}(i+1)} = U_{\text{arc}(i+1)} \times I_{k,\text{arc}(i+1)} = \frac{U_{\text{Nn}} \times (34 + 0.532 \times d) \times I_{k,\text{arc}(i+1)}^{0.12}}{\frac{(34 + 0.532 \times d)}{I_{k,\text{arc}(i)}^{0.88}} + \frac{U_{\text{Nn}}}{I_{\text{kDC}}}} \quad (14)$$

为方便起见, 假设初始值为:

$$I_{k,\text{arc}(0)} = 0.5 \times I_{\text{kDC}} \quad (15)$$

但也要注意迭代偏差过小导致迭代中止。

$$k_p = \frac{P_{\text{arc}}}{P_k} \quad (16)$$

$$W_{\text{arc}} = P_{\text{arc}} \times t_{\text{arc}} = k_p \times P_k \times t_{\text{arc}} \quad (17)$$

式中, W_{arc} 为弧闪能量。

DGUV-I 203-077 的迭代计算方法计算出的用于确定安全等级的是电弧能, 和 Maximum Power 法、Stokes & Oppenlander 法的入射能量不同。需要对比 W_{arc} 和 $W_{\text{arc,prot}}$ 。 $W_{\text{arc,prot}}$ 计算公式如下:

$$W_{\text{arc,prot}} = k_T \times \left(\frac{a}{300\text{mm}} \right)^2 \times W_{\text{arc,test}} \quad (18)$$

式中, k_T 为传输系数, 小型系统, 带有侧墙、后墙和隔墙的取 1; $W_{\text{arc,prot}}$ 值见表 2。

表 2 $W_{\text{arc,prot}}$ 值

DIN EN 61482-1-2	统计平均值	
Arc protection class	Electric arc energy $W_{\text{arc,prot}}$	Direct incident energy
APC1	168kJ	146 kJ/m²
APC2	320kJ	427 kJ/m²

若 $W_{\text{arc}} \leq W_{\text{arc,prot_APC1}}$, 则计算结果为 APC1。可以参考 DGUV-I 203-077 规范。

2 ETAP 仿真

ETAP 22.0.1 版本支持 5 种计算方法：设方法 1 为 Maximum Power 法、方法 2 为 Stokes & Oppenlander 法、方法 3 为 Paukert 法、方法 4 为 DGUV-I 203-077 (Iterative) 法、方法5为方法4的简易法，误差较大，本文不再细述。以 ETAP 法进行海南某化工项目光伏系统直流弧闪仿真。

海南某化工厂光伏发电项目主要使用了 50kW 和 136kW 两种逆变器。其中 50kW 逆变器主要使用 270Wp 多晶硅光伏电池板，136kW 逆变器主要使用 550Wp 单晶硅电池板，具体规格如表 3 所示。

表 3 Case A 和 Case C 规格表

案例分组	Case A	Case C
逆变器	50kW	136kW
最大输入电压	1100V	1100V
直流开关数量	1	4
MPP 电压范围	200~1000V	200~1000V
MPPT 数量	3	12
每路 MPPT 输入组串数	3	2
PV 电池板最大输入电流	33A×3	26A×12
输入端子最大允许电流	12A	30A
最大直流短路电流	36A×3	40A×12
额定输出功率	48kW	136kW
最大输出视在功率	53kVA	150kVA
最大输出电流	56.7A	160.4A
额定电网电压	540VAC	540VAC
电池组件	多晶硅	单晶硅
电池组件最大发电功率	250kWp	550 kWp
开路电压	37.6V	49.49V
短路电流	8.92A	13.87A
一个光伏组串的 电池板数量	22	17
ETAP 选用电池组品牌	Yingli	Talesun
ETAP 选用电池组 发电功率	270kWp	550kWp
ETAP 选用电池组 工作电流	7.65A	13.11A
ETAP 选用电池组 开路电压	44.8V	49.92V
ETAP 选用电池组 短路电流	8.2A	14.01A

ETAP 使用直流弧闪模块之前先需要进行直流负荷计算和短路电流计算，之后进行直流弧闪计算。ETAP 建议使用 Stokes&Oppenlander 法并且使用计算模块中的 Method2 法。该法的优点是^[4]：

- 1) 它减少了最大功率方法的过度保守方法，因为它允许根据光伏阵列 P-V 短路曲线确定实际的电弧电流工作点。
- 2) 它与 Stokes&Oppenlander 和 Paukert 方法相结合，这本身被认为是直流电弧闪光电流的“严格”或“详细”计算方法。这种方法是 ETAP 软件进行光伏阵列直流弧闪光计算的首选。

模块计算选择如图 2 所示。

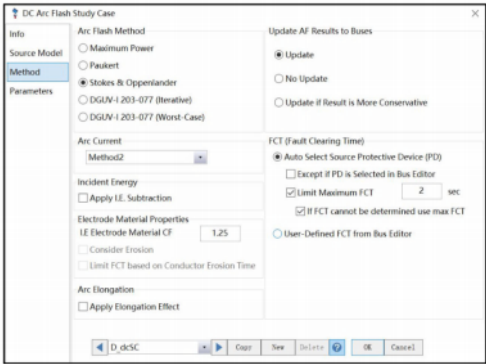


图 2 ETAP 直流弧闪计算方法选择

通过海南项目两种规格逆变器及配置电池组对比，可以看到不比额定电流高多少。组装此类阵列以提供 DC 1000V 和几百安的负载电流且组件通过逆变器连接到 AC 540V 电源系统时，逆变器引起的短路将被快速保护装置清除，但来自光伏太阳能电池阵列提供的短路电流无法被隔离，将继续馈入故障。在这种情况下，2s 的电弧时间是合适的^[1]。因此，FCT 取 2s，辐照度取 1000W/m²。

不同标准对应的分级等级是不同的，见图 3。

- 1) 若 ETAP 选用 NPFA70E 标准，则 ETAP 中的防护等级与 NPFA70E 的 Arc-Flash PPE Category 对应为：LEVEL A 对应 LEVEL 0 (1.2cal/cm²)；LEVEL

B 对应 LEVEL1 ($4\text{cal}/\text{cm}^2$)；LEVEL C 对应 LEVEL2 ($8\text{cal}/\text{cm}^2$)；LEVEL D 对应 LEVEL3 ($25\text{cal}/\text{cm}^2$)。NFPA70E—2015 版后取消了 LEVEL 0 ($1.2\text{cal}/\text{cm}^2$) 这个分级，现在 ETAP 中，LEVEL A 对应 $2\text{cal}/\text{cm}^2$ 。

2) 若 ETAP 选用与 DGVU-I 203-077 标准，则 ETAP 中的防护等级与 DGVU-I 203-077 的 Arc-Flash PPE Category 对应为：ETAP LEVELB (170kJ) 对应 DGVU-I 203-077 的 APC1 (168kJ)；ETAP LEVELC (345kJ) 对应 DGVU-I 203-077 的 APC2 (320kJ)；ETAP LEVELA 为 50kJ 。



图3 NFPA70E 和 DGVU-I 203-077 能量等级

电池组件选择了英利的电池板，能看到电池板的发电功率、工作电流、开路电压、短路电流以及选择电池组串联数量后的电池组串的电压及电流。太阳的辐照度一般取 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 。电池板规格的选择，选择了 270Wp 的电池板；电池组串联数量的选择，该组共有 22 个电池板串联，见图 4。

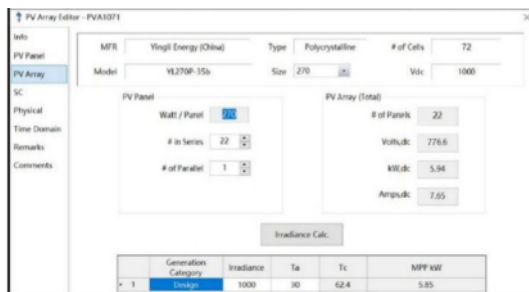
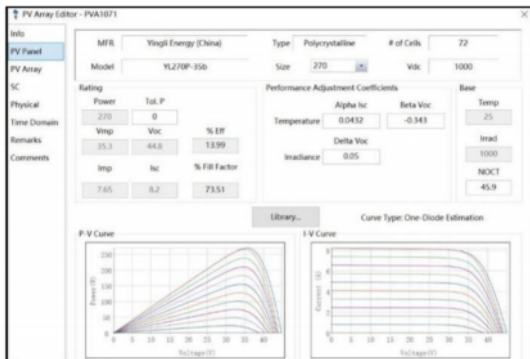


图4 电池板规格的选择

图 5 为案例 Case A，50kW 逆变器原理图，图 6 为 4 种方法直流弧闪计算仿真结果局部图。

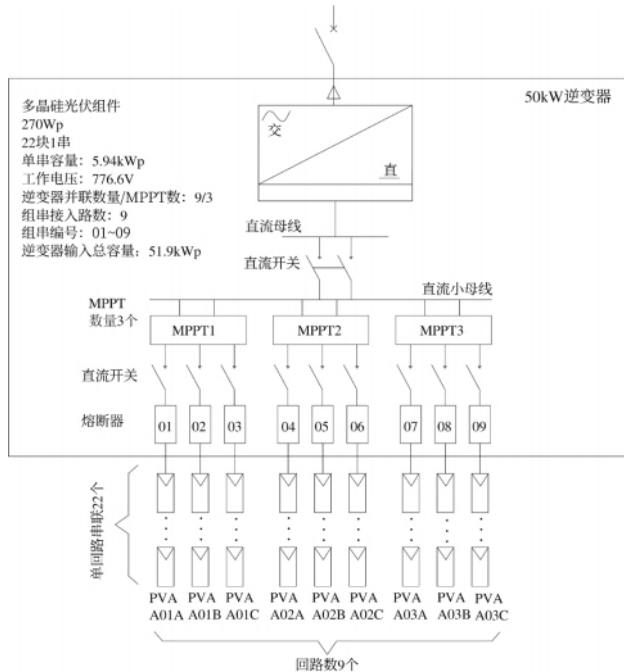


图5 50kW 逆变器原理图

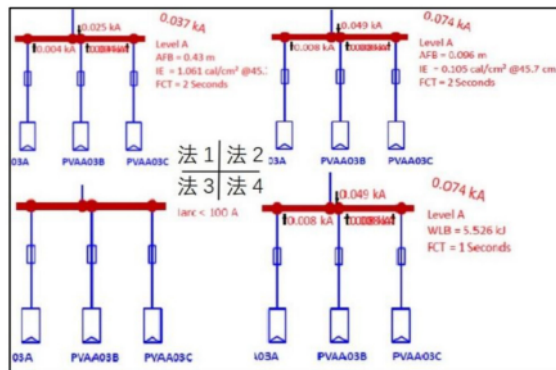


图6 Case A 短路电流计算

2025.01.DQGY 23



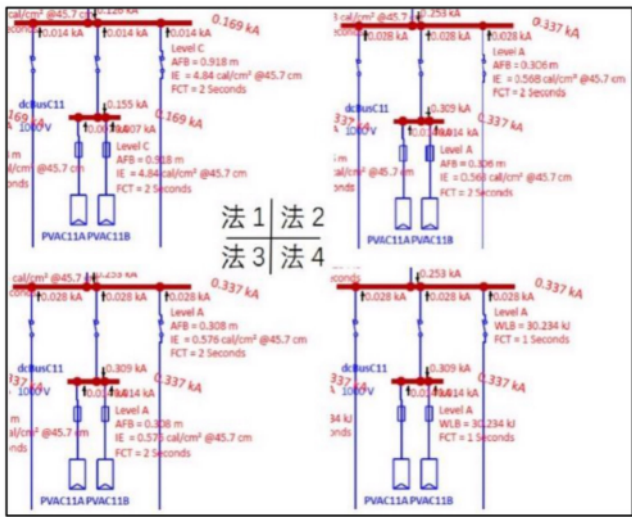


图 8 Case C 短路电流计算

Case A 和 Case C 仿真结果对比表格如表4 所示。

表 4 Case A 和 Case C 仿真计算结果

不同 仿真 方法	短 路 电 流 (kA)	弧 闪 边 界 (m)	入射能量 (cal/cm ²)	FCT (s)	能量 等级
CaseA 方法 1	0.074	0.43	1.061	2	A
CaseA 方法 2	0.074	0.1	0.105	2	A
CaseA 方法 4	0.074	0.06	5.526kJ	1	A
CaseC 方法 1	0.337	0.92	4.840	2	C
CaseC 方法 2	0.337	0.31	0.568	2	A
CaseC 方法 3	0.337	0.31	0.576	2	A
CaseC 方法 4	0.337	0.26	30.243kJ	1	A

表中CaseA 并没有方法3 Paukert法的计算结果，原因是在 $I_{arc}<100A$ 的情况下，Paukert 法在 ETAP 软件中无法进行仿真。

上述结果均按辐照度取 $1000W/m^2$ 计算，Klement 的文献 [4] 建议使用实际辐照度。因此以海南项目所在地洋浦为例，在 ETAP 中光伏组件参数的输入中，可以设置经纬度为，东经 109. 19° E，北纬 19.73° N。同时，在 ETAP 中可输入该地区冬至日时间，则计算出辐照度约为 $900W/m^2$ 。这样在 Source Model 选取中可选 Normal 状态。仿真计算的结果数

值均小于辐照度取 $1000W/m^2$ 时数值。

3 结束语

光伏系统直流弧闪计算的目的是通过科学的方法评估和管理电气系统中的弧闪风险，帮助识别和分析高风险区域，通过模拟和评估各种缓解方法，降低风险并提高安全性以保护设备免受潜在的物理损害，同时确保人员安全和减少经济损失。本文归纳的某些方法是可以手算进行的，但精确计算还需通过商业专业软件如 ETAP 进行，得出相对准确的结果。无论在工程任何阶段均可帮助设计人员、业主、生产人员采取相应的预防措施。

参考文献

[1] Das J C. 弧闪故障危害与治理 [M]. 王宾，译. 北京：机械工业出版社，2018.

[2] Rosero-Garcia J, Zuniga A F, Echeverri R A. A methodological proposal to calculate the arc flash considering AC-DC sources[J]. International Review of Electrical Engineering, 2022.

[3] R. F. Ammerman, T. Gammon, P. K. Sen,et al . Dc arc models and incident energy calculations[M]. 2009 Record of Conference Papers – Industry Applications Society 56th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, Anaheim, CA, 2009, 1–13.doi : 10.1109/PCICON.2009.5297174.

[4] Klement K. DC arc flash studies for solar photovoltaic systems : challenges and recommendations[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(5) : 4239–4244.

(收稿日期：2024-06-08)