

文章编号:0254-0096(2018)10-2788-09

光伏支架系统雷电暂态研究

王耀武, 张小青, 陶世祺, 陈士刚, 孟庆阳

(北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 针对直接雷击时光伏支架系统雷电暂态计算问题, 提出支架系统中分支导体与接地装置中接地体不同的电路参数计算方法, 建立包含光伏支架系统和接地装置在内的整体雷电暂态电路模型。并以该模型为基础, 仿真计算不同雷击位置及不同结构地网条件下光伏支架系统上雷电暂态响应, 得出支架系统中雷电流与暂态电位的分布特性。计算结果表明, 雷击点位置、地网结构和光伏支架结构均对光伏支架上雷电流和暂态电位分布具有较大影响。雷电流在光伏支架系统中的分布与雷击点位置呈现出近强远弱的分布特性, 同时暂态电位在雷击发生后由畸形分布逐渐趋于均衡。

关键词: 暂态响应; 仿真模型; 雷击; 光伏支架; 电路计算

中图分类号: TM863

文献标识码: A

0 引言

大型光伏发电组件具有安装密度高、占地面积大和金属材料占比多等特点, 易遭受雷电侵害。由于雷击损坏的高维护费用、高人工成本和设备损坏期间功率损失等问题, 光伏组件的防雷保护研究已成为光伏发电工程中颇受关注的课题^[1,2]。

光伏发电组件由太阳能电池板、光伏支架系统、电能转换装置和保护系统(防雷保护系统)组成。以铝合金为主要材质的光伏支架是良导体, 当雷电流流经光伏支架和接地装置时, 会对光伏发电组件产生损害^[3]。国内外学者在光伏防雷保护领域不同方向开展了研究工作, 一些学者利用实测或模拟试验, 探讨雷击对不同材质太阳能电池板和光伏组件的危害^[4-8]; 还有学者利用有限时域差分法, 计算雷击对光伏发电系统直流侧的影响^[9,10]; 或利用 CDEGS 仿真软件, 对光伏阵列的雷电电磁效应进行仿真分析^[11]。然而, 以上研究基本未涉及到光伏支架系统的雷电暂态电路模拟, 既未给出支架系统中各空间分支导体的电路参数计算方法和结果, 也未建立集支架系统与接地装置于一体的整体暂态电路模型, 缺乏对于支架系统雷电暂态响应的计算分析。很

显然, 这难以满足光伏发电防雷设计对雷电暂态响应特性的需求; 即基于暂态电位响应的光伏发电系统雷电反击与过电压防护设计和基于暂态电流响应的热损坏防护设计。为此, 本文将针对这些问题展开进一步的研究工作。本文首先提出支架分支和接地分支的电路参数算法, 建立支架和接地装置的整体雷电暂态等值电路。在此基础上, 通过计算考察支架系统和接地装置中的雷电暂态响应分布特性, 可为光伏支架结构的防雷保护优化设计和光伏组件的雷击效应防护提供定量化的依据。

1 雷电暂态模型

研究光伏支架系统的雷电暂态, 需搭建光伏支架系统和接地装置组成的整体雷电暂态电路模型。该模型的建立, 首先从光伏支架分支和接地装置分支的电路参数计算开始。

1.1 光伏支架系统

光伏支架系统是光伏组件的支撑系统, 分为梁与桩两部分。光伏面板固定在梁上, 大型光伏发电组件为分担光伏面板的重量, 还会架设次梁。支架桩是光伏组件的固定和支撑装置, 同时也是防雷保护系统的安装基础, 其结构如图 1a 所示。

收稿日期: 2018-01-02

基金项目: 国家自然科学基金(51777007)

通信作者: 张小青(1957—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事电力系统电磁暂态的数值计算及过电压防护方面的研究。
xqzhang2@bjtu.edu.cn

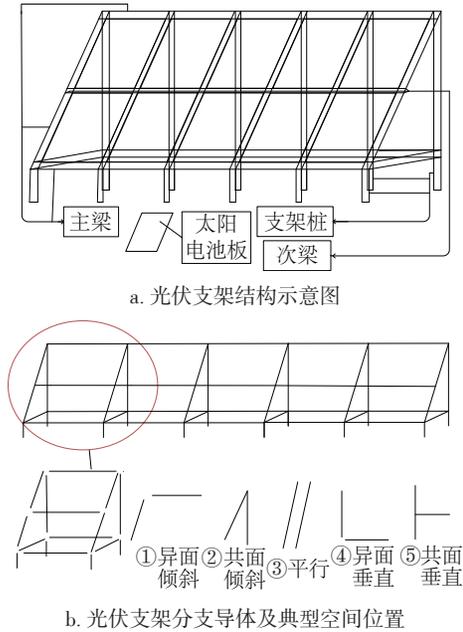


图1 光伏支架及分支导体示意图
Fig. 1 PV support and typical conductor positions

为模拟雷电流在光伏支架系统中的波过程,须根据雷电流波长将光伏支架结构进行分段。根据国际和国内标准^[12,13],一般采用双指数函数对雷电流源进行描述,如式(1)所示。

$$i = I_m A [\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)] \quad (1)$$

式中, I_m ——雷电流幅值, kA; A ——幅值修正因子; α 、 β ——波头和波尾因子。

将式(1)进行傅里叶变换,得到雷电流频域方程表达式(2)和频域判据式(3)^[14]。

$$I_s(\omega) = I_m \frac{A(\beta - \alpha)}{(\alpha + j\omega)(\beta + j\omega)} \quad (2)$$

$$20 \lg(|I_s(\omega)|/I_m) \approx -(160 \sim 200) \text{ dB} \quad (3)$$

根据式(2)和式(3)可求得雷电流上限截止频率。一般认为频率高于上限截止频率的谐波分量对雷电暂态的贡献可忽略,上限频率 ω_c 所对应的波长计算式为:

$$\lambda_c = \frac{2\pi c}{\omega_c} \quad (4)$$

导体分段长度一般应小于 λ_c 的十分之一^[15,16]。光伏支架系统分段如图 1b 所示,按空间位置关系,各分支导体相互间的空间位置可划分为异面倾斜、共面倾斜、平行、异面垂直和共面垂直 5 种情形。根据不同的导体空间位置关系可计算光伏支架分支导体的暂态电路参数。

1.1.1 分支导体的电阻

设光伏支架系统中某分支导体编号为 p ,在考虑雷电频谱的高频分量占比因素,其电阻值计算如式(5)所示。

$$R_p = \frac{l_p \sqrt{\mu f_c}}{2r \sqrt{\pi \sigma_c}} \quad (5)$$

式中, σ_c ——导体的电导率, $S \cdot m^{-1}$; μ ——导体的磁导率, H/m; f_c ——上限截止频率, hz; l_p ——第 p 段导体的长度, m; r ——采用等效面积法得到的框架分支导体等效半径^[13], m。

1.1.2 分支导体的电容和电感

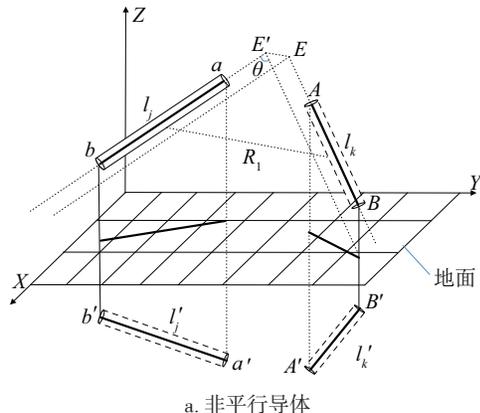
根据电容定义,分支导体的电容参数可通过分支导体的电位系数求取,而分支导体的电位系数计算可用平均电位法来实施,大地的存在是通过镜像法来考虑的^[17]。

对于光伏支架系统中任意 2 根分支导体 j 和 k ,如图 2 所示,导体 j 对 k 的互电位系数可表示为如式(6)所示。

$$\begin{aligned} P_{jk} &= \frac{u_{jave} + u_{kave}}{l_j \tau_j} \\ &= \frac{1}{4\pi \epsilon l_j l_k} \left(\int_{l_j} \int_{l_k} \frac{1}{R_1} dl_j dl_k - \int_{l_j} \int_{l_k} \frac{1}{R_1'} dl_k dl_j' \right) \quad (6) \\ &= \frac{1}{4\pi \epsilon l_j l_k} (\Lambda_{jk} - \Lambda_{jk}') \end{aligned}$$

式中, l_j 、 l_k ——导体 j 和 k 的长度; τ_j ——导体 j 的线电荷密度; ϵ ——空气介电常数。

对于导体 j 的自电位系数,可令 $l_j = l_k$,并将导体 k 的母线与导体 j 的轴线重合,再运用式(6)即可求取。计算式(6)的关键在于求解 2 个二重线积分 Λ_{jk} 和 Λ_{jk}' ,这两积分仅与各自对应导体的空间位置相关。导体空间位置的 5 种情形按光伏支架系统中



a. 非平行导体

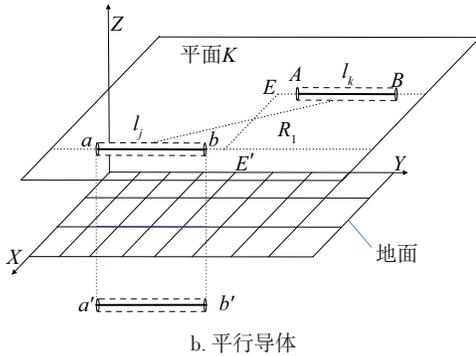


图2 空间导体位置关系示意图

Fig. 2 Positional relations of space conductors

各实导体间和导体镜像与实导体间的典型空间位置关系,又可分为非平行与平行2大类,如图2a、图2b所示。从数学上讲, Λ_{jk} 和 Λ_{jk}' 的计算类似,故本文仅就 Λ_{jk} 的计算加以讨论。

1) 非平行位置

导体异面倾斜关系可视为非平行空间位置关系中的一般情形,而其余空间位置关系可作为异面倾斜的特殊情况处理。如图2a所示两异面倾斜导体 j 和 k , 设 j 和 k 端点分别为 a 、 b 和 A 、 B , 它们的长度分别为 l 和 m , 两导体间距离为 R_1 , 则可计算得到导体 AB 与 ab 之间的 Λ_{jk} 如式(7)所示。

$$\begin{aligned} \Lambda_{jk} &= \int_{l_i} \int_{l_j} \frac{1}{R_1} dl_j dl_k \\ &= (d_2 + l) \ln \frac{d_4 + d_5 + m}{d_4 + d_5 - m} - \\ &\quad d_2 \ln \frac{d_6 + d_7 + m}{d_6 + d_7 - m} + (d_3 + m) \ln \frac{d_4 + d_7 + l}{d_4 + d_7 - l} - \\ &\quad d_3 \ln \frac{d_5 + d_6 + l}{d_5 + d_6 - l} - \frac{\delta d}{\sin \theta} \end{aligned} \quad (7)$$

其中,

$$\begin{aligned} \delta &= \tan^{-1} \left[\frac{d_1}{d_4 \tan \theta} + \frac{(d_2 + l)(d_3 + m) \sin \theta}{d_1 d_4} \right] - \\ &\quad \tan^{-1} \left[\frac{d_1}{d_5 \tan \theta} + \frac{(d_2 + l) d_3 \sin \theta}{d_1 d_5} \right] + \\ &\quad \tan^{-1} \left(\frac{d_1}{d_6 \tan \theta} + \frac{d_2 d_3 \sin \theta}{d_1 d_6} \right) - \\ &\quad \tan^{-1} \left[\frac{d_1}{d_7 \tan \theta} + \frac{d_2 (d_3 + m) \sin \theta}{d_1 d_7} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

式(7)、式(8)式中 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 、 d_5 、 d_6 、 d_7 分别为图7a中所示线段 $E'E$ 、 EA 、 $E'a$ 、 Bb 、 Ba 、 Aa 、 Ab 的长度。

当 $\theta \neq \pi/2$, $\delta d / \sin \theta = 0$ 时, Λ_{jk} 为导体间共面倾斜位置的积分; 当 $\theta = \pi/2$, $\delta d / \sin \theta \neq 0$ 时, Λ_{jk} 为导体间异面垂直位置的积分; 当 $\theta = \pi/2$, $\delta d / \sin \theta = 0$ 时, Λ_{jk} 为导体间共面垂直位置的积分。

2) 平行位置

如图2b所示, 设空间内两平行导体 j 和 k 端点分别为 a 、 b 和 A 、 B 长度分别为 l 和 m , 线段 Eb 长度 d_8 , AE 长度 d_9 , 则有:

$$\begin{aligned} \Lambda_{jk} &= \int_{l_k} \int_{l_j} \frac{1}{R_1} dl_j dl_k \\ &= (l + d_9 + m) \sinh^{-1} \frac{l + d_9 + m}{d_8} - \\ &\quad \sqrt{(l + d_9 + m)^2 + d_8^2} + d_9 \sinh^{-1} \frac{d_9}{d_8} - \sqrt{d_8^2 + d_9^2} - \\ &\quad (m + d_9) \sinh^{-1} \frac{m + d_9}{d_8} + \sqrt{(m + d_9)^2 + d_8^2} - \\ &\quad (l + d_9) \sinh^{-1} \frac{l + d_9}{d_8} + \sqrt{(l + d_9)^2 + d_8^2} \end{aligned} \quad (9)$$

根据以上导体空间位置作用可计算求得导体空间电位参数。考虑光伏支架系统中任意一个具有 n 根耦合分支导体单元, 其电位系数矩阵为 P 。

$$P = \{p_{jk}'\}_{n,n} \quad (10)$$

将 P 求逆得:

$$P^{-1} = \{p_{jk}'\}_{n,n} \quad (11)$$

据电容的定义, 光伏支架 n 根耦合导体的电容矩阵 $C = \{C_{ij}\}_{n,n}$ 。

$$\begin{cases} C_{ij} = \sum_{j=1}^k p_{jk}', & j=1, 2, \dots, k \\ C_{jk} = p_{jk}', & j, k=1, 2, \dots, k, k \neq j \end{cases} \quad (12)$$

根据电磁相似性原理, 电感矩阵 L 可由以上获得的电容矩阵 C 确定^[18], 计算如式(13)所示^[18]。

$$L = \mu_0 \epsilon_0 C^{-1} \quad (13)$$

在获取了 R 、 L 、 C 的参数矩阵后, 可将任意耦合分支导体单元表示为一个耦合 π 型电路。图3示出任意2根耦合分支导体 j 、 k 的耦合 π 型电路。

1.2 接地装置

如图4所示, 接地装置按照其安装形式以及连接方式可分为单桩式结构和钢筋混凝土支撑结构^[19]。从结构组成上讲, 接地装置一般是由垂直与水平2种基本接地体结构组成, 通过它们的组合, 构成垂直、环形和网状接地装置结构形式。

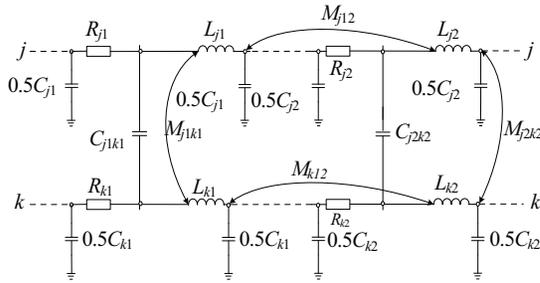


图3 分支导体π型耦合电路单元连接示意图
Fig. 3 PV support equal π style coupled circuits

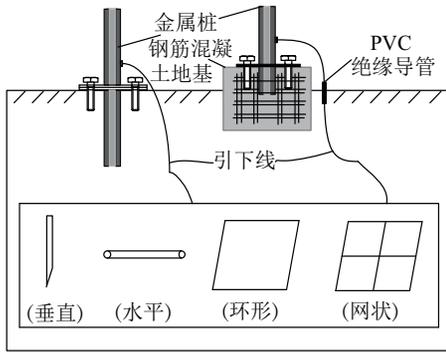


图4 接地体装置模型
Fig. 4 Model of grounding devices

雷电流具有很高的幅值,当其泄散到土壤中时,接地体附近土壤中的电流强度将大幅提升,则此处的电场将显著增强,当电场强度超过土壤临界击穿场强 E_0 ,将发生土壤放电击穿现象,其等效接地体半径增加。在考虑土壤放电击穿效应后,垂直和水平接地体的等效半径 r_h 和 r_v 的计算如式(14)、式(15)所示。

$$r_v = \frac{1}{2} \left(-l_v + \sqrt{l_v^2 + \frac{2\rho i_v}{\pi E_0}} \right) \quad (14)$$

$$r_h = \frac{\rho i_h}{2\pi l_h E_0} \quad (15)$$

式中, l_v 、 l_h ——垂直和水平接地体的长度,m; i_v 和 i_h ——垂直和水平接地体向土壤泄散的电流,A; ρ ——土壤电阻率, $\Omega \cdot m$,按照接地体的等效半径可进一步确定其电路参数。对于光伏接地装置实际尺寸而言,水平接地体尺寸较大,除土壤放电效应外,还应考虑泄露雷电流的波过程并计及分布参数效应,需进行分段并用 π 型电路表示;而垂直接地体较短,为简化计算,故用集总参数模拟。

水平接地体的暂态电路参数计算如式(16)~式(18)所示:

$$C_h = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{2\rho}{\sqrt{2d_h r_h}} - 1} l \quad (16)$$

$$L_h = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{2\rho}{\sqrt{2d_h r_h}} - 1 \right) l \quad (17)$$

$$G_h = \frac{2\pi}{\rho \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2r_h d_h}} - 1 \right)} \quad (18)$$

式中, r_h ——接地体半径,m; d_h ——接地体埋深,m; ϵ ——接地体介电常数,F/m。

长度为 l 的垂直接地体,其冲击接地电阻为:

$$\begin{cases} R_v = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{2l}{r_v} + 1 \right), & r_v < 0.4l \\ R_v = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{\sqrt{l^2 + r_v^2} + l}{r_v}, & 0.4l < r_v < l \end{cases} \quad (19)$$

由以上求得的电路参数,可建立计及分布参数效应的光伏接地装置等效 π 型电路,其基本的水平和垂直导体电路形式如图 5 所示。

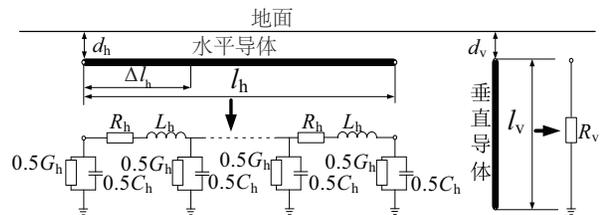


图5 水平和垂直接地导体π型电路示意图
Fig. 5 Horizontal & vertical grounding conductor equal π style circuits

1.3 光伏系统雷电暂态电路模型

光伏系统的雷电暂态仿真模型由图 6 所示的雷电流源、光伏支架系统雷电暂态模型和光伏接地装置雷电暂态模型 3 部分组成。

雷电流源由表征雷电流特性的电流源和雷电通道波阻抗的电阻构成,该电流源连接在代表光伏支架雷击点位置的雷电暂态电路的节点上,然后将光伏支架等效暂态电路与接地装置等效雷电暂态电路相连接,便建立了完整的光伏支架系统雷电暂态电路仿真模型。在雷电流源的激励下,整体光伏支架网络电路中产生雷电暂态响应,运用国际通用电磁暂态仿真软件 EMTP-RV,即可获得光伏支架系统中任意指定位置的雷电暂态电流和电位响应波形。

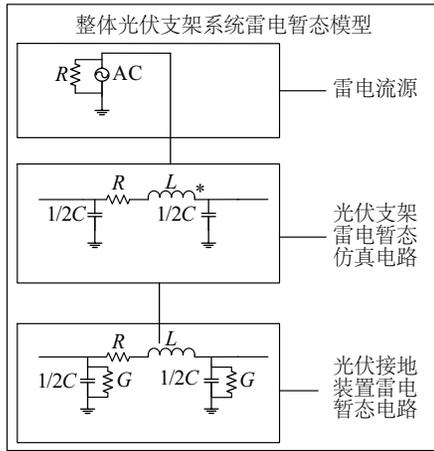
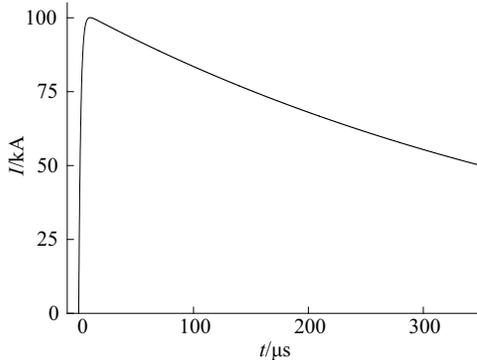


图6 光伏系统雷电暂态电路模型
Fig. 6 PV system lightning transient circuits

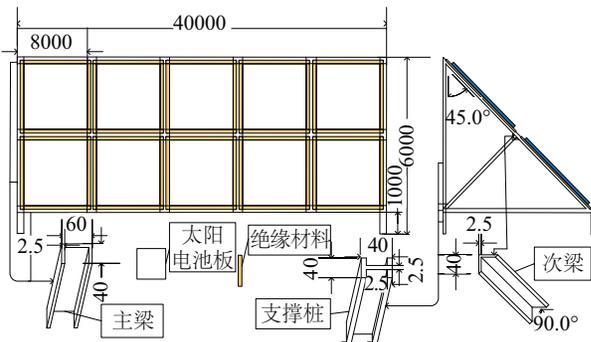
2 仿真算例

2.1 算例

根据雷电防护标准^[13],选取雷电流源波形参数为 10/350 μs 、100 kA,并以电流源的形式注入到光伏支架雷电暂态电路的节点位置上,其输出波形如图 7a 所示。选取作为算例的光伏支架的尺寸和参数如图 7b 所示。



a. 100 kA, 10/350 μs 首次雷击电流波形图



b. 光伏支架参数示意图(单位:mm)

图7 算例参数

Fig. 7 Example parameters

计算得到光伏支架分支导体自感参数在 $1.85 \times 10^{-6} \sim 9.63 \times 10^{-6}$ H 范围内,自电容参数在 $1.5 \times 10^{-11} \sim 9 \times 10^{-11}$ F 范围内;互感参数在 $0 \sim 8.25 \times 10^{-7}$ H 范围内,互电容参数在 $2.51 \times 10^{-15} \sim 7.78 \times 10^{-12}$ F 范围内。

为考察不同雷击点和地网条件下,光伏支架的雷电暂态响应,选取光伏支架上不同雷击点位置,非孤立避雷系统节点 w_1 、 w_2 、 w_3 ,以及孤立避雷系统节点 w_4 ,和垂直、环形和网状 3 种不同结构接地装置,其仿真示意图如图 8 所示。

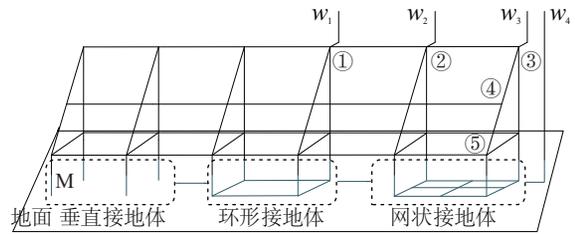


图8 光伏支架系统雷电暂态仿真试验示意图

Fig. 8 PV system lightning transient simulation experiment diagrammatic drawing

2.2 仿真结果及分析

2.2.1 光伏支架上不同位置电位波形

选择 w_3 型雷击点位置和环形接地装置,选择图 8 中所示光伏分支导体系统的③、④和⑤节点作为参考点,仿真计算得到各节点的暂态电位波形如图 9 所示,各节点的暂态电位幅值见表 1。由图 9 和表 1 可看出,在雷击点处的电位幅值最高,振荡也最为剧烈,越远离雷击点,电位的振荡幅度越小。各点电位波形上的振荡分量,在到达幅值之后均在不同程度上呈现衰减并趋于较缓下降特性,这主要是因为雷电流流过系统中各分支导体的电感、电容和电阻所致。由电感和电容的充放电过程引起波形振荡,再由系统中的电阻加以阻尼衰减,从而导致波形的振荡衰减。

2.2.2 不同接地装置结构

在注入雷电流幅值一定时,若是经由远离雷击点的桩,入地电流幅值越大,那么该情形下整体支架的散流效果越好,这是防雷设计所希望的泄露雷电流情况。选取 w_3 型雷击点位置和垂直、环形及网状 3 种接地装置结构,选取图 8 中 M 桩作为典型桩,得到不同接地装置结构条件下,经由该桩入地的电流波形如图 10 所示。

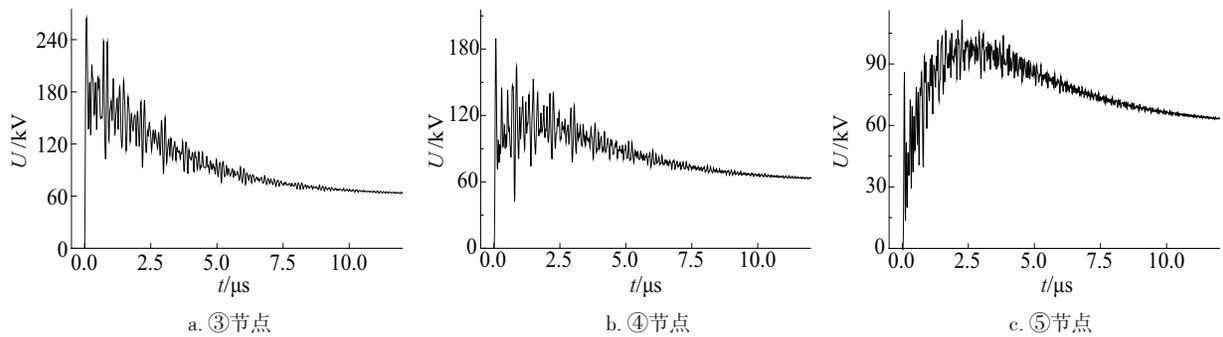


图9 光伏上结构不同节点雷击电位波形

Fig. 9 Voltage waveforms on PV support

表1 雷击光伏支架节点参数

Table 1 Lightning voltage responses on PV support

节点	电位幅值/kV
③	265
④	190
⑤	112

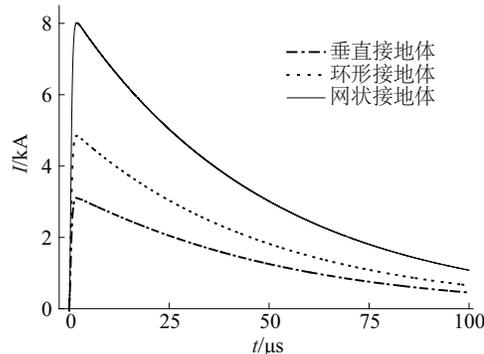


图10 M号桩不同接地体条件下电流波形图

Fig. 10 Current waveforms on M stake

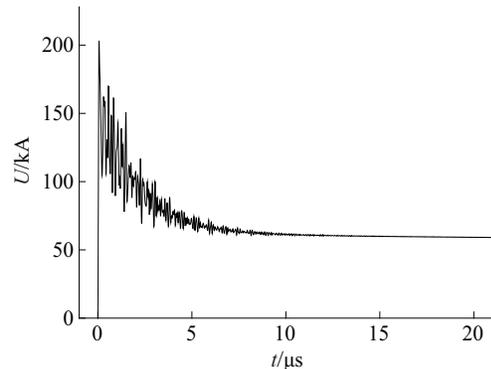
如图10所示,经M桩入地的电流在雷击发生后,在短时间内迅速攀升至幅值,而后缓慢下降。由不同的接地装置结构条件下,M桩的入地电流大小可看出,环形接地体散流能力次于网状接地而优于垂直接地体。

2.2.3 不同雷击点光伏支架梁上幅值电位

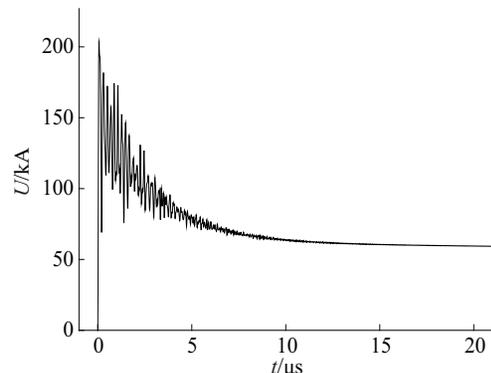
选取环形接地装置和 $w_1 \sim w_4$ 型雷击点,得到不同雷击点位置时太阳能电池板上最高幅值点的暂态电位波形如图11所示。

由图11和表2可看出,不同位置雷击点会影响光伏支架上电位的幅值,越靠近支架上梁的中心位置,其最高电位幅值越低,振荡幅度越小,光伏支架结构上雷电流的分布越均衡。由孤立防雷系统雷击特性曲线可以看出,其经地网反击的梁上最高

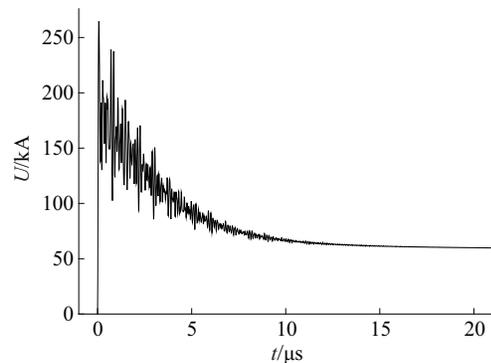
电位幅值相较非孤立防雷系统梁上电位值低,说明光伏组件在遭雷击时,孤立防雷保护系统的直击雷防护效果相较于非孤立系统要好。



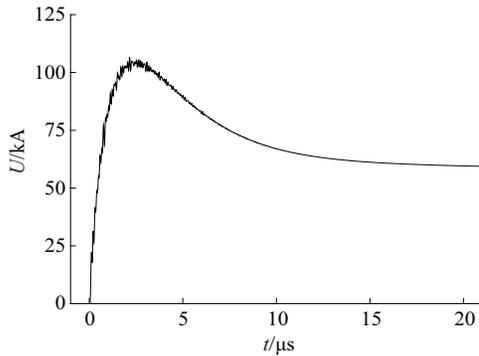
a. ①节点



b. ②节点



c. ③节点



d. ④节点

图 11 不同雷击点梁上最高幅值点电位波形图

Fig. 11 Lightning waveform with highest amplitude on PV support with strike nodes

表 2 不同雷击点光伏支架结构电位参数

Table 2 Voltage parameters of PV supporting structure with different lightning strike positions

雷击位置	主梁上节点	电位幅值/kV
w_1	①	205
w_2	②	210
w_3	③	265
w_4	③	105

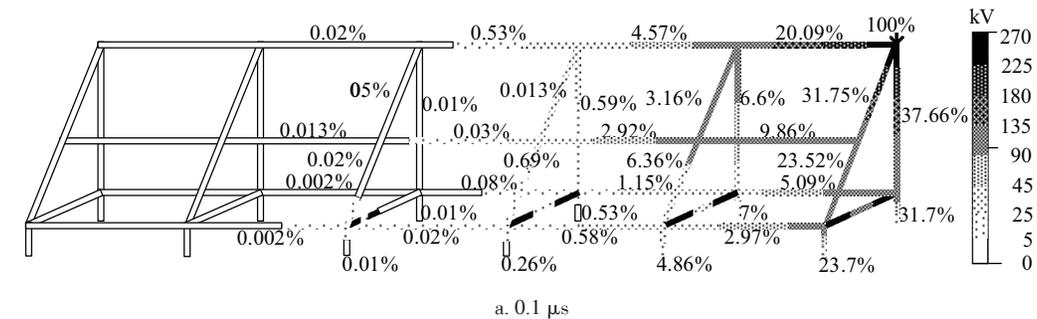
2.2.4 光伏支架雷电暂态时空分布

选择 w_3 型雷击点位置及环形结构接地装置, 仿真计算得到 0.1、10 和 350 μs 这 3 个典型时刻, 光

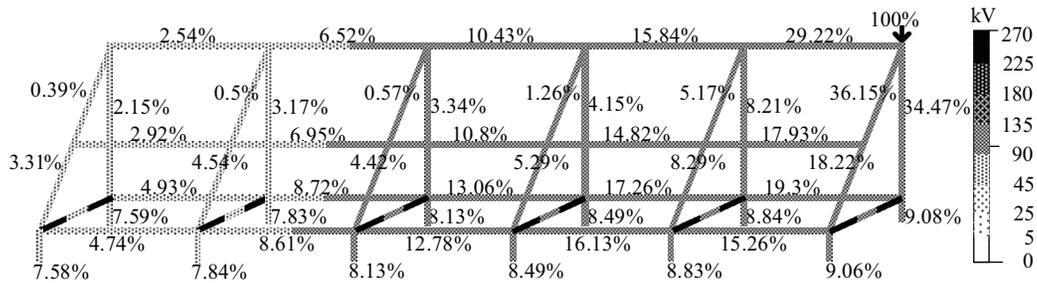
伏支架上雷电暂态分布如图 12 所示。

为便于分析, 引入暂态分流比 γ , 定义其为光伏支架上某一分支电流瞬时值与此时刻雷击点注入电流瞬时值之比, 该参数用以表征该时刻雷电流在光伏框架中的分布特性。同时, 在该图中以图案示出光伏支架分支瞬时电位值。由图 12 中所示的电流分布可看出, 在雷击发生后 0.1 μs 时刻, 支架系统中的电流分布极不均衡, 畸变程度高, 在雷击点附近的分支 γ 比值大, 远离雷击点的分支 γ 比值极小, 雷电的散流入地主要依靠雷击点附近的接地桩; 10 μs 时刻, γ 分布的畸变程度已明显减小, 雷击点较远处的分支也可起到雷电流通路作用, 且该通路向支架上雷击点远处扩展; 350 μs 时刻, 光伏支架上 γ 分布已基本趋于均衡, 即使是雷击点最远处分支也起到一定的分流作用。

再由图 12 中标出的暂态电位分布可见, 0.1 μs 时刻光伏支架雷击点位置出现全时刻电位幅值, 此时光伏支架上电位分布极不均衡, 越靠近雷击点位置电位幅值越高, 远离雷击点位置电位则迅速衰落, 至雷击点远端电位近乎为零; 在 10 μs 时刻, 光伏支架上各分支导体电位值已相差较小趋于均衡, 但此时光伏支架上的最大电位值远小于电位幅值; 350 μs 时, 光伏支架上各分支导体电位大小基本相同, 且平稳下降。



a. 0.1 μs



b. 10 μs

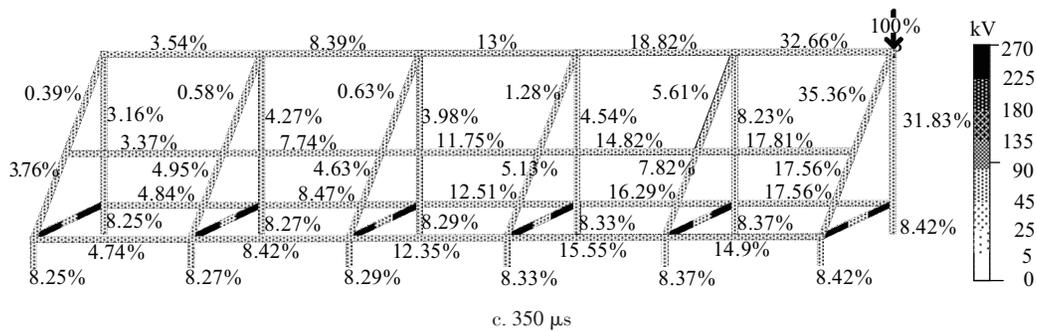


图12 光伏支架结构雷电暂态分布示意图

Fig. 12 Lightning transient distribution on PV supporting structure

3 结论

本文首先给出光伏支架结构中复杂空间位置分支导体的电路参数的计算方法,并搭建整体光伏支架系统雷电暂态电路模型,然后通过算例,计算不同雷击位置和接地装置条件下,光伏支架的雷电暂态响应分布特性,由这些计算可反映出下结论:

1)在雷电暂态起始阶段,光伏支架系统中雷击点位置的暂态电位幅值最高,可达百 kV 级别;而从雷击点到支架系统远端,暂态电位值迅速降低直至接近为零。随着暂态过程的持续,光伏支架上各点电位差逐渐减小,在注入雷电流半峰时刻已近似趋于等电位,支架系统中节点间最大电压不超过系统平均电位的 1.4%。

2)在光伏支架系统上,分支导体上雷电流大小与其距雷击点位置的远近密切相关,呈现近大远小的分布特性。在雷电暂态过程,地面上各竖直支架桩之间的雷电流分流比差值从起始阶段的 37.1% 逐渐减小,到注入雷电流半峰时刻基本趋于均衡,电流分流比差值减小到 0.2% 以下。

3)对于光伏支架系统接地装置来说,其泄散雷电流的性能按垂直、环形和网状接地体依次增强,使用环、网接地装置更易降低光伏支架系统中暂态电位的幅值,取得更为理想的防雷保护效果。

[参考文献]

- [1] Ahmad N I, Ab-Kadir M Z A, Izadi M, et al. Lightning protection on photovoltaic systems: A review on current and recommended practices[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 1611—1619.
- [2] Christodoulou C A, Ekonomou L, Gonos I F, et al. Lightning protection of PV systems[J]. *Energy Systems*, 2015, 7(3): 1—14.
- [3] Bower W I, Wiles J C. Analysis of grounded and ungrounded photovoltaic systems[A]. *IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1994, 1994 IEEE First World Conference on [C]*, Waikoloa, HI, USA, 1994, 1: 809—812.
- [4] Belik M. PV panels under lightning conditions[A]. *Proceedings of the 2014, International Scientific Conference on Electric Power Engineering [C]*, IEEE, Brno, Czech Republic, 2014: 367—370.
- [5] Dechthummarong C, Chenvidhya D, Jivacate C, et al. Experiment and simulation impulse partial discharge behavior in dielectric encapsulations of field-aged PV modules[A]. *Photovoltaic Specialists Conference [C]*, IEEE, Seattle, WA, USA, 2011: 003109—003112.
- [6] Jiang T, Grzybowski S. Impact of lightning impulse voltage on polycrystalline silicon photovoltaic modules[A]. *International Symposium on Lightning Protection [C]*, IEEE, Belo Horizonte, Brazil, 2014: 287—290.
- [7] Tamura K, Araki K, Kumagai I, et al. Lightning test for concentrator photovoltaic system[A]. *Photovoltaic Specialists Conference [C]*, IEEE, Seattle, WA, USA 2011: 000996—000998.
- [8] Hernández J C, Vidal P G, Jurado F. Lightning and surge protection in photovoltaic installations[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, 23(4): 1961—1971.
- [9] Yamamoto K, Takami J, Okabe N. Overvoltages on DC side of power conditioning system caused by lightning stroke to structure anchoring photovoltaic panels[J]. *Electrical Engineering in Japan*, 2014, 187(4): 29—41.
- [10] Stern H J, Kerner H C. Lightning induced EMC phenomena in photovoltaic modules[A]. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1993. Symposium Record [C]*, IEEE Xplore, Dallas, TX, USA, USA 1993: 442—446.

- [11] Sueta H E, Mocelin A, Zilles R, et al. Protection of photovoltaic systems against lightning experimental verifications and techno-economic analysis of protection [A]. International Symposium on Lightning Protection [C], IEEE, Belo Horizonte, Brazil, 2013: 354—359.
- [12] IEC 62305—2, Protection against lightning Part 2: Risk Management[S].
- [13] 中华人民共和国机械工业部. 建筑物防雷设计规范 GB 50057—94[M]. 北京: 中国计划出版社, 2001.
- [13] Ministry of Machine-Building of the People's Republic of China. Design code for protection of structures against lightning GB 50057—94 [M]. Beijing: China Planning Press, 2001.
- [14] 张小青. 建筑物内电子设备的防雷保护[M]. 电子工业出版社, 2000.
- [14] Zhang Xiaoqing. Lightning protection of electronic equipment in the building[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2000
- [15] Huang K, Zhang X. An experimental study on corona $q-u$ curves under non-standard lightning impulses [J]. Journal of Electrostatics, 2016, 81: 37—41.
- [16] 陶世祺, 张小青, 王耀武, 等. 直接雷击时风电机组的暂态响应分析[J]. 太阳能学报, 2017, 38(10): 2675—2682.
- [16] Tao Shiqi, Zhang Xiaoqing, Wang Yaowu, et al. Analysis of transient responses on wind turbines during direct lightning strike[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2017, 38(10): 2675—2682
- [17] 冯慈璋. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [17] Feng Cizhang. Introduction to engineering electromagnetic fields[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [18] Ametani A, Kasai Y, Sawada J, et al. Frequency-dependent impedance of vertical conductors and a multiconductor tower model[J]. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1994; 141: 339—345.
- [19] 何金良, 曾 嵘. 电力系统接地技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [19] He Jinliang, Zeng Rong. Power system grounding technology[M]. Beijing: Science Press, 2007.

LIGHTNING TRANSIENT RESEARCH OF PHOTOVOLTAIC SUPPORTING STRUCTURE

Wang Yaowu, Zhang Xiaoqing, Tao Shiqi, Chen Shigang, Meng Qingyang

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to perform the lightning transient analysis of PV framework, this paper proposes a efficient method for calculating the electrical parameters of framework branches and grounding materials. By integrating the supporting frameworks and grounding arrangements, an equivalent circuit model is built for lightning transient simulation. The lightning transient responses in the supporting framework systems are obtained for different striking points and structures of grounding arrangements that based on the circuit model. The simulated results reveal that the positions of striking points and structures of supporting frameworks and grounding arrangements have pronounced influences on the transient responses. The lightning currents on the branch conductors close to the striking point are significantly higher than the farther. Meanwhile, the transient potential distribution on supporting framework has an initial distortion and then tends to approximate equalization.

Keywords: transient response; simulation modeling; lightning; PV support; circuit calculation