



·高功率微波技术·

基于电磁拓扑的配电网雷电过电压分析*

张胤¹, 廖成¹, 尚玉平¹, 杜伟¹, 叶志红²

(1. 西南交通大学 物理科学与技术学院, 成都 610031; 2. 重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘 要: 将适用于复杂系统各个节点电磁响应同步求解的电磁拓扑方法引入到配电网雷电过电压问题的分析中。首先, 给出了传输线网络的 BLT 方程及其元素构建方法; 然后, 通过一个复杂的配电网对电磁拓扑的分析流程进行了详细说明, 并重点展示了理想节点散射矩阵的求解步骤。结果表明: 电磁拓扑方法可以应用在配电网节点雷电过电压的分析中, 其计算结果与 CST 的结果非常吻合, 且耗时远远低于 CST。

关键词: 电磁拓扑; 配电网; 雷电过电压; 节点; 散射矩阵

中图分类号: TM863

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210189

Analysis of lightning overvoltages at the junction of distribution network based on electromagnetic topology

Zhang Yin¹, Liao Cheng¹, Shang Yuping¹, Du Wei¹, Ye Zhihong²

(1. School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: The analysis of the lightning overvoltages of the distribution network is related to safe and reliable power supply of the power system, which needs to be paid attention to. However, the structure of the distribution network is complex, and an effective analysis is difficult to achieve through the use of classic transmission line equations. Therefore, in this paper, the electromagnetic topology method, which is suitable for the synchronous solution of the electromagnetic response at the junctions of the complex system, is introduced into the analysis of the lightning overvoltages in the distribution network. First, the BLT equation suitable for transmission line networks is provided and the construction methods of its elements are shown; then, the analysis process of electromagnetic topology is demonstrated in detail with an example of a complex distribution network, and the solution steps of the scattering matrix of the ideal junction are shown emphatically. The results show that the electromagnetic topology method is applicable to the analysis of the lightning overvoltages at the junction of the distribution network, as the calculation results are quite consistent with the results of CST, and the time consumed is much less than CST.

Key words: electromagnetic topology; distribution network; lightning overvoltages; junction; scattering matrix

配电网是电力系统中的重要组成部分, 承担着将来自发/变电站的电能输送分配到每一个用户、每一个用电设备上的责任。雷电是威胁架空配电网安全可靠供电的主要因素之一^[1-3]。

鉴于架空输配电网在雷电攻击下的过电压响应对用电安全的严重影响, 关于其雷电过电压的研究一直受到研究人员的关注^[4-5]。对于雷电感应过电压的分析, 常用的研究模型有三种: Taylor 模型、Agrawal 模型和 Rachidi 模型。这三种模型虽然在形式上有差别, 但其实际效果是完全等效的^[6]。当研究目标只是考虑理想导地面上架空线路雷电过电压峰值的时候, Rusck 模型有着非常明显的优势^[7-8]。对于雷电直击过电压的分析, 可以借助传输线方程来完成。通过将传输线方程以差分格式进行离散, 结合边界条件, 可以实现架空线沿线及负载位置电压电流

* 收稿日期: 2021-05-18; 修订日期: 2021-07-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(61771407)

作者简介: 张胤(1994—), 男, 博士生, 从事传输线电磁兼容问题研究。

通信作者: 廖成(1964—), 男, 博士, 教授, 从事计算电磁学、天线理论与技术、电波传播研究。

响应的时域迭代求解^[9]。而实际的架空输电线路的雷电效应分析中,除了需要考虑承担电能输送的导线,还需要对沿线的杆塔以及地面的参数进行分析,此时,单纯的解析方法难以实现准确分析的目的,因而,全波方法,特别是时域有限差分法(FDTD)被广泛运用到研究分析过程中。文献[10-11]借助FDTD方法分析了雷电击中杆塔时雷电流的流动和分布情况;文献[12]对多层地面上架空线路的雷电过电压进行了分析;文献[13]借助FDTD方法研究了混合海-陆环境对输电线路雷电过电压的影响。然而,当架空线路结构较为复杂、形成网络的时候,使用传输线方程及相应的模型对雷电过电压进行分析是非常复杂的,不仅需要对节点位置进行连接处理,也需要对网络中各条传输线进行分别计算,这在实际的处理过程中是非常容易出错且耗时的。

电磁拓扑(EMT)是一种复杂系统节点电磁响应问题的常用有效方法^[14],可实现复杂系统各个节点电磁响应的同步求解。并在分析外部电磁波作用下系统内部线缆、PCB、芯片等对象的电磁响应问题^[15-19]得到广泛应用。但是,在架空线缆雷电效应的分析问题上,电磁拓扑的运用还有待发展。本文将电磁拓扑引入配电网络节点电磁响应问题的研究中,借助电磁拓扑方法分析了常见的典型配电网络在雷电直击下各个节点的电压响应情况,并通过与CST计算的结果进行对比验证了采用EMT分析配电网络雷电效应的正确性和高效性。

1 电磁拓扑理论

1.1 电磁拓扑的概念

EMT是一种理论分析方法,主要用于求解复杂电子系统中节点位置处的电磁响应问题。电磁拓扑方法基于“良好屏蔽近似”原则将复杂电子系统划分成相对独立的子区域,不同子区域之间只能通过特定的通道实现能量的流动,其余部分屏蔽良好。之后,对子区域采用“节点”进行表示,不同的子区域之间通过“管”进行连接以实现区域之间电磁能量的流通与交互。图1是外部干扰源作用下的一个带有孔缝和贯通线缆的电子系统的电磁拓扑图和电磁能量交互作用关联图。该电子系统中电磁能量的流动只能根据图1中的管道路径进行。

在电磁拓扑理论建立的早期,该方法只能对复杂电子系统的电磁耦合进行粗略的定性分析,不能进行定量计算。为了解决这个问题,拓展BLT方程的应用范围,Baum, Liu和Tesché三个人共同推导了适用于电磁拓扑分析的广义BLT方程^[6],该方程对电磁拓扑网络中各节点的电磁响应可实现准确的分析计算。之后经过逐步的发展与完成,BLT方程成为了电磁拓扑理论的核心。

1.2 BLT方程

广义BLT方程是结合传播方程和散射方程推导得到的。传输线电磁拓扑的BLT方程以电压 V 表示为^[6]

$$V = (U + S)(\Gamma - S)^{-1}V_s \quad (1)$$

同理,对节点电流 I 的表达式可以得到

$$I = Z_c^{-1}(U - S)(\Gamma - S)^{-1}V_s \quad (2)$$

式中: Z_c 表示网络的特征阻抗矩阵; U 表示单位矩阵; S 表示散射矩阵; Γ 为传播矩阵; V_s 定义为激励源。

实现传输线电磁拓扑网络中各个节点电压电流求解的前提是实现网络中各个节点以及管道上相应参数的构建。从公式(1)和(2)中可以看出,完成BLT方程的计算需要构建的元素包括电压电流矢量、激励源矢量、传播矩阵和散射矩阵。其中,对于每根管道,电压、电流矢量为

$$V = \begin{bmatrix} V(0) \\ V(L) \end{bmatrix}, \quad I = \begin{bmatrix} I(0) \\ I(L) \end{bmatrix} \quad (3)$$

集总激励情况下的激励源矢量为

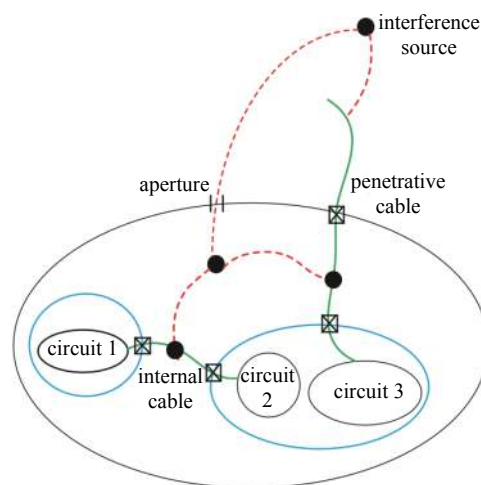


Fig. 1 Diagram of electromagnetic topology of an electronic system irradiated by the electromagnetic waves

图1 电磁波作用电子系统的电磁拓扑图

$$\mathbf{V}_s = \begin{bmatrix} e^{\gamma x_s}(\mathbf{V}_0 + \mathbf{Z}_c \mathbf{I}_0)/2 \\ -e^{\gamma(l-x_s)}(\mathbf{V}_0 - \mathbf{Z}_c \mathbf{I}_0)/2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： γ 表示传播常数； l 为管道长度； \mathbf{V}_0 和 \mathbf{I}_0 为集总激励电压电流； x_s 代表激励点位置； \mathbf{Z}_c 为管道特征阻抗矩阵。

传播矩阵为

$$\mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} 0 & e^{\gamma l} \\ e^{\gamma l} & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

在节点处，散射矩阵可根据节点类型的不同进行分别计算。对于接有实际负载的物理节点，散射矩阵即为节点处的反射系数矩阵，即

$$\mathbf{S} = (\mathbf{Z}_L - \mathbf{Z}_c)(\mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_c)^{-1} \quad (6)$$

其中， \mathbf{Z}_L 为负载矩阵。

在理想节点处，即该节点未接真实负载，只在网络中承担着转角、分叉等功能，该点的散射矩阵为^[14]

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} -\mathbf{C}_V \\ \mathbf{C}_I \mathbf{Y}_c \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{C}_V \\ \mathbf{C}_I \mathbf{Y}_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中： \mathbf{C}_V 和 \mathbf{C}_I 为节点处的电压电流关系矩阵； \mathbf{Y}_c 为特征导纳。

2 分析与验证

配电网被雷电直击时，网络中各个节点及终端的瞬态电压响应问题关系到电力设备寿命及用户的用电安全问题，一直被重点关注。本节通过对配电网进行电磁拓扑建模，详细展示了电磁拓扑在配电网节点电压瞬态响应问题中的分析流程，并计算了配电网终端接不同负载时负载上的瞬态电压值。

2.1 配电网电磁拓扑结构

配电网将发/变电站的电能经由配电线输送到各个用户，图 2 是一个典型的配电网的电磁拓扑示意图及杆塔的结构、尺寸参数。一般来说，与用户相连的配电网不设置避雷线，因此在杆塔处不考虑接地问题。

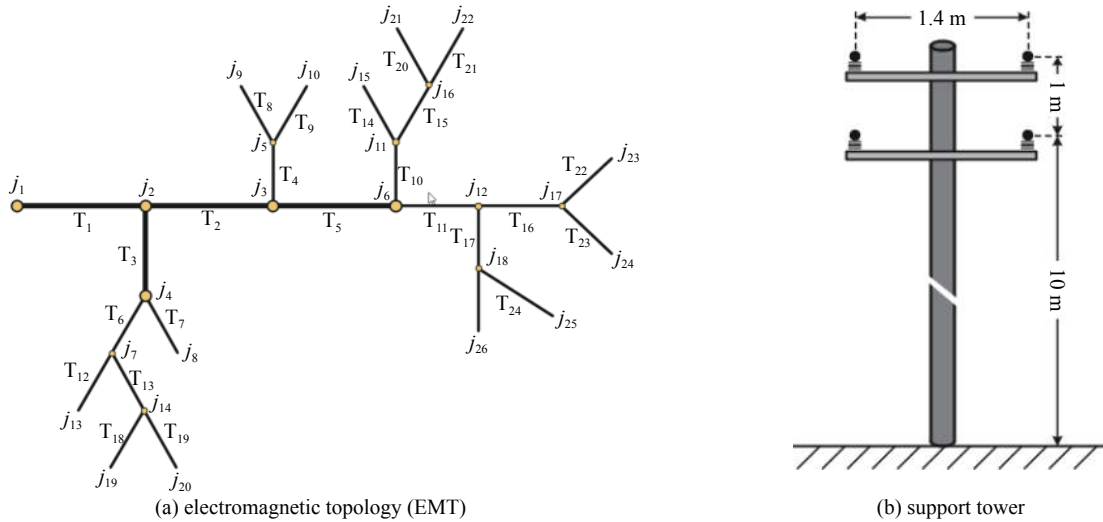


Fig. 2 Diagram of the EMT and support tower of the typical distribution lines

图 2 典型配电网电磁拓扑及杆塔示意图

在图 2 中，管道 T_1 - T_{25} 的长度依次分别为：100, 100, 80, 40, 100, 45, 30, 35, 40, 75, 80, 35, 45, 35, 40, 55, 50, 35, 20, 45, 45, 40, 35, 35, 20 m，管道中导线半径为 0.003 m。其中管道 T_1 , T_2 , T_3 和 T_5 中具有四根导线，其余管道皆为双导线。并且，在双导线管道中， T_4 , T_7 , T_{10} 及其相连管道中导线的高度为 10 m，其余管道中导线高度为 11 m。需要注意的是，在图 2 中，节点 j_2, j_3, j_4, j_5 等为理想节点， j_1, j_8, j_9 等为物理节点。本节对物理节点接不同负载的配电网在雷电直击的情况下的节点电压瞬态响应进行分析，雷电直击点设定为节点 j_1 的导线 1。

2.2 雷电脉冲

描述雷电电流的常用工程模型有三种：双指数函数模型、Heidler 函数模型和脉冲函数模型^[20]。本文选取两个

Heidler 函数模型的和来定义注入到配电网中的雷电脉冲^[21]。

$$i(t) = \frac{I_{01}}{\eta_1} \frac{(t/\tau_{11})^{n_1}}{1+(t/\tau_{11})^{n_1}} e^{-\frac{t}{\tau_{12}}} + \frac{I_{02}}{\eta_2} \frac{(t/\tau_{21})^{n_2}}{1+(t/\tau_{21})^{n_2}} e^{-\frac{t}{\tau_{22}}} \quad (8)$$

式中

$$\eta_1 = e^{-(\tau_{11}/\tau_{12})(n_1\tau_{12}/\tau_{11})^{(1/n_1)}} \quad (9)$$

$$\eta_2 = e^{-(\tau_{21}/\tau_{22})(n_2\tau_{22}/\tau_{21})^{(1/n_2)}} \quad (10)$$

式(8)~(10)中的各个参数的值在表1中给出。

表 1 雷电基电流参数

Table 1 Parameters of lightning-base-current

I_{L01}/kA	$\tau/\mu s$	$\tau/\mu s$	n_1	I_{L01}/kA	$\tau/\mu s$	$\tau/\mu s$	n_2
10.7	0.25	2.5	2	6.5	2.1	230	2

2.3 节点散射矩阵求解

由于节点 j_3 、 j_4 和 j_6 处传输线结构具有明显改变,我们对这3个节点特征阻抗矩阵和散射矩阵的计算进行详细分析。节点 j_3 、 j_4 和 j_6 处的节点结构如图3所示。

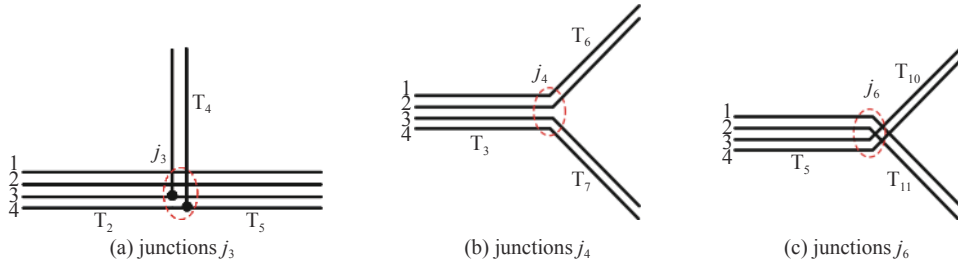


Fig. 3 Diagram of the junctions j_3 , j_4 and j_6

图3 j_3 、 j_4 和 j_6 的节点示意图

根据已给出的结构参数可以求得管道 T_1 的特征阻抗为

$$\mathbf{Z}_c^{T_1} = \begin{bmatrix} 533.6417 & 165.2810 & 182.5450 & 150.1448 \\ 165.2810 & 533.6417 & 150.1448 & 182.5450 \\ 182.5450 & 150.1448 & 527.9270 & 159.5918 \\ 150.1448 & 182.5450 & 159.5918 & 527.9270 \end{bmatrix} \quad (11)$$

对于节点 j_3 ,根据文献[15]可以得到,其各个端口之间的电压、电流关系矩阵 \mathbf{C}_V 和 \mathbf{C}_I 为

$$\mathbf{C}_V = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{C}_I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

特征阻抗矩阵为

$$\mathbf{Z}_c^j = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_c^{T_1} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{Z}_c^{T_1} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{Z}_c^{T_1} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中:

$$\mathbf{Z}_c^{T_1} = \mathbf{Z}_c^{T_2} = \mathbf{Z}_c^{T_3} \quad (15)$$

$$\mathbf{Z}_c^{\text{T}_1} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{c11}^{\text{T}_1} & \mathbf{Z}_{c12}^{\text{T}_1} \\ \mathbf{Z}_{c21}^{\text{T}_1} & \mathbf{Z}_{c22}^{\text{T}_1} \end{bmatrix} \quad (16)$$

根据公式(7)可求得散射矩阵为

$$\mathbf{S}^{j_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -0.0953 & -0.0660 & 0.1906 & 0.1320 & 1 & 0 & -0.0953 & -0.0660 \\ 0 & 0 & -0.0660 & -0.0953 & 0.1320 & 0.1906 & 0 & 1 & -0.0660 & -0.0953 \\ 0 & 0 & -0.3333 & 0 & 0.6667 & 0 & 0 & 0 & 0.6667 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.3333 & 0 & 0.6667 & 0 & 0 & 0 & 0.6667 \\ 0 & 0 & 0.6667 & 0 & -0.3333 & 0 & 0 & 0 & 0.6667 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.6667 & 0 & -0.3333 & 0 & 0 & 0 & 0.6667 \\ 1 & 0 & -0.0953 & -0.0660 & 0.1906 & 0.1320 & 0 & 0 & -0.0953 & -0.0660 \\ 0 & 1 & -0.0660 & -0.0953 & 0.1320 & 0.1906 & 0 & 0 & -0.0660 & -0.0953 \\ 0 & 0 & 0.6667 & 0 & 0.6667 & 0 & 0 & 0 & -0.3333 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.6667 & 0 & 0.6667 & 0 & 0 & 0 & -0.3333 \end{bmatrix} \quad (17)$$

同理,采用与节点 j_3 相同的分析可以求得节点 j_4 和 j_6 的散射矩阵为

$$\mathbf{S}^{j_4} = \begin{bmatrix} 0.0315 & 0.0296 & -0.1504 & -0.1063 & 0.9685 & -0.0296 & 0.1504 & 0.1063 \\ 0.0296 & 0.0315 & -0.1063 & -0.1504 & -0.0296 & 0.9685 & 0.1063 & 0.1504 \\ -0.1483 & -0.1042 & 0.0315 & 0.0296 & 0.1483 & 0.1042 & 0.9685 & -0.0296 \\ -0.1042 & -0.1483 & 0.0296 & 0.0315 & 0.1042 & 0.1483 & -0.0296 & 0.9685 \\ 1.0315 & 0.0296 & -0.1504 & -0.1063 & -0.0315 & -0.0296 & 0.1504 & 0.1063 \\ 0.0296 & 1.0315 & -0.1063 & -0.1504 & -0.0296 & -0.0315 & 0.1063 & 0.1504 \\ -0.1483 & -0.1042 & 1.0315 & 0.0296 & 0.1483 & 0.1042 & -0.0315 & -0.0296 \\ -0.1042 & -0.1483 & 0.0296 & 1.0315 & 0.1042 & 0.1483 & -0.0296 & -0.0315 \end{bmatrix} \quad (18)$$

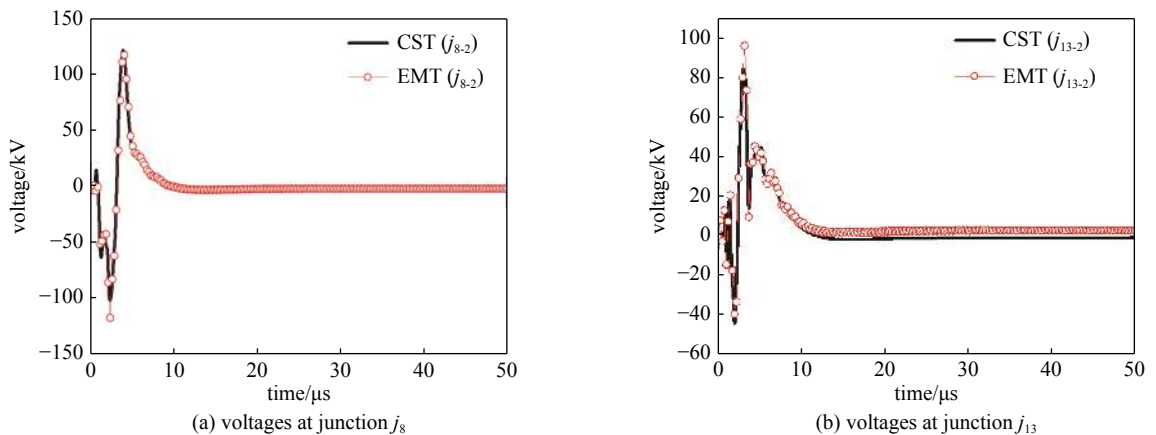
$$\mathbf{S}^{j_6} = \begin{bmatrix} 0.0315 & 0.0296 & -0.1504 & -0.1063 & 0.1504 & 0.1063 & 0.9685 & -0.0296 \\ 0.0296 & 0.0315 & -0.1063 & -0.1504 & 0.1063 & 0.1504 & -0.0296 & 0.9685 \\ -0.1483 & -0.1042 & 0.0315 & 0.0296 & 0.9685 & -0.0296 & 0.1483 & 0.1042 \\ -0.1042 & -0.1483 & 0.0296 & 0.0315 & -0.0296 & 0.9685 & 0.1042 & 0.1483 \\ -0.1483 & -0.1042 & 1.0315 & 0.0296 & -0.0315 & -0.0296 & 0.1483 & 0.1042 \\ -0.1042 & -0.1483 & 0.0296 & 1.0315 & -0.0296 & -0.0315 & 0.1042 & 0.1483 \\ 1.0315 & 0.0296 & -0.1504 & -0.1063 & 0.1504 & 0.1063 & -0.0315 & -0.0296 \\ 0.0296 & 1.0315 & -0.1063 & -0.1504 & 0.1063 & 0.1504 & -0.0296 & -0.0315 \end{bmatrix} \quad (19)$$

对于图2(a)中的其他节点,其相应的阻抗矩阵、散射矩阵都可以用相似的方法进行求解。

2.4 计算结果

完成了BLT方程各元素的构建后,根据公式(1)计算配电网各节点的电压响应。图4和图5分别是在各个物理节点都通过匹配负载和 $100\ \Omega$ 负载接地的情况下,采用电磁拓扑方法和电磁仿真软件CST得到的结果。

图4和图5中,“ j_{8-2} ”表示节点 j_8 处的第2条导线。需要注意的是,不同节点处所指的第二条线并不一定是直接连接的,例如 j_{8-2} 与节点 j_1 处的第4条导线连接,而 j_{13-2} 与节点 j_1 处的第2条导线连接。从图4和5中的对比结果可以看出:EMT方法的计算结果和CST的仿真结果在各个节点都吻合良好。这个事实说明EMT方法是完全胜任雷电直击情况下配电网各个节点的电磁响应问题分析的。而且,相比于CST仿真软件,EMT方法更为高



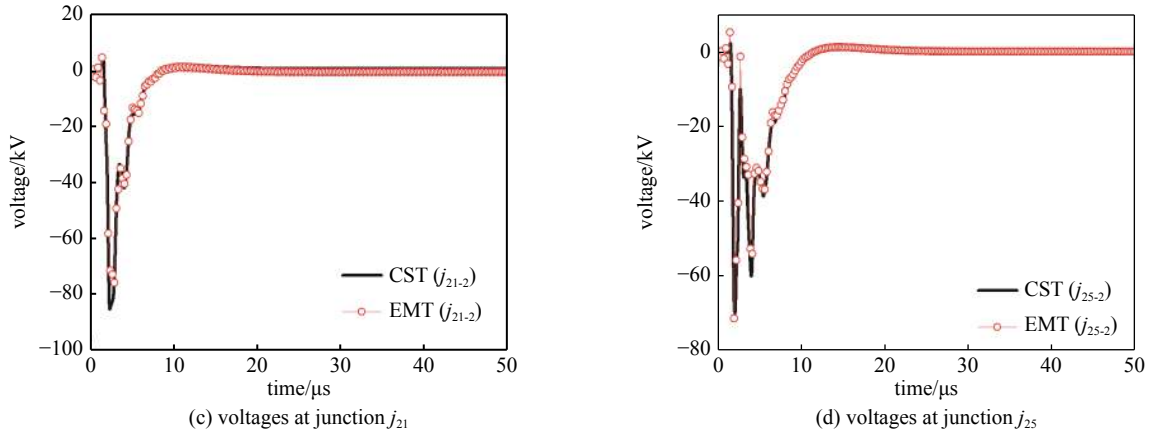


Fig. 4 Calculation results of the lightning overvoltages at the loads when the distribution network is terminated by a matching load

图 4 配电网络终端通过匹配负载接地时负载处的雷电过电压计算结果

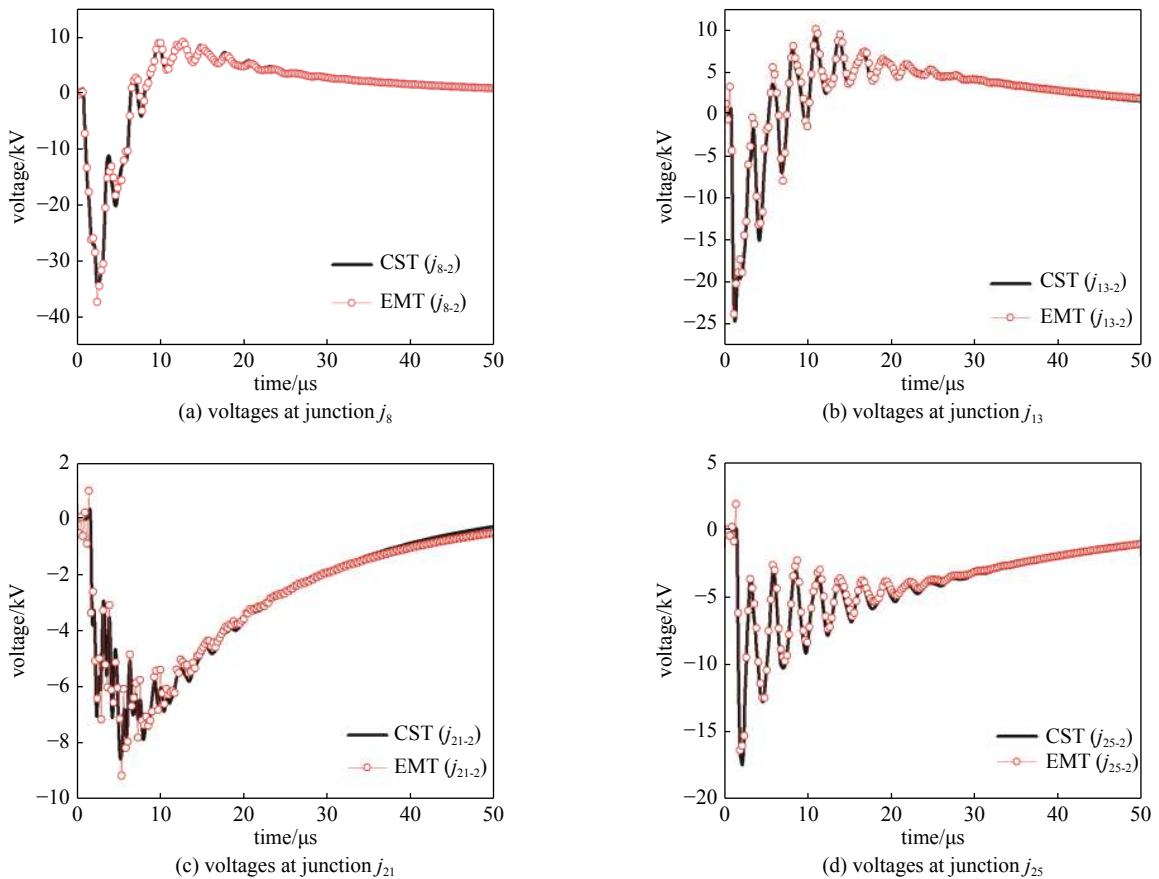


Fig. 5 Calculation results of the lightning overvoltages at the loads when the distribution network is terminated by a load of 100 Ω

图 5 配电网络终端通过 100 Ω 负载接地时负载处的雷电过电压计算结果

效。CST 完成仿真耗时达到十多 min, 而采用 EMT 方法只需几 s 便能完成计算。

同时, 对比图 4 和图 5 也可以看出, 物理节点处所接负载不匹配时, 节点处电压信号的振荡现象更为严重, 这是由于负载的反射导致。而图 4 的结果中也存在一定的震荡现象, 这是由于多条导线之间存在影响, 接地负载并不能完全实现一个理想的匹配所导致的。

3 结论

本文给出了适用于传输线网络电磁拓扑分析的 BLT 方程, 介绍了其各个元素的计算方法, 并将电磁拓扑引入到雷电直击情况下配电网络的节点瞬态响应雷电过电压的分析中。通过对一个具有多种节点形式的典型配电网络进行分析发现, EMT 方法的分析结果与电磁仿真软件 CST 的仿真结果非常吻合, 且极大地节省了计算时间, 这

验证了所提 EMT 方法在配电网雷电过电压分析中的正确性和高效性。与常用的传输线方程相比, 所提 EMT 方法更加适用于复杂网络的分析, 可以实现网络中所有节点瞬态特性的同时计算。而且, EMT 方法可以更加方便地实现复杂的传输线网络模型的构建, 相比于传输线方程, 可以有效降低建模过程中出错的概率, 特别是对于节点连接处的处理, EMT 方法更具有优势。

参考文献:

- [1] 陈家宏, 赵淳, 王剑, 等. 基于直接获取雷击参数的输电线路雷击风险优化评估方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 14-20. (Chen Jiahong, Zhao Chun, Wang Jian, et al. Optimal lightning risk assessment method of transmission line based on direct acquisition of lightning stroke parameter[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 14-20)
- [2] Zhang Liang, Wang Lei, Yang Jin, et al. Effect of overhead shielding wires on the lightning-induced voltages of multiconductor lines above the lossy ground[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2019, 61(2): 458-466.
- [3] Zhang Yin, Liao Cheng, Shang Yuping. Fast evaluation of lightning electromagnetic fields based on matrix pencil method in time domain[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2021, 63(4): 1029-1034.
- [4] 李青山, 皇甫羽飞, 张帅, 等. 110 kV 输电线路电容降压取电系统雷电过电压分析[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 2058-2063. (Li Qingshan, Huangfu Yufei, Zhang Shuai, et al. Lightning over-voltage analysis of 110 kV transmission line capacitor step-down power system[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 2058-2063)
- [5] 李琳, 齐秀军. 配电线路感应雷过电压计算[J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1093-1099. (Li Lin, Qi Xiujun. Calculation of the lightning induced voltages on power distribution line[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1093-1099)
- [6] Tesche F M, Ianoz M V, Karlsson T. EMC analysis methods and computational models[M]. New York: Wiley, 1997.
- [7] Barker P P, Short T A, Eybert-Berard A R, et al. Induced voltage measurements on an experimental distribution line during nearby rocket triggered lightning flashes[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, 11(2): 982-995.
- [8] Paulino J O S, Barbosa C F, Lopes I J S, et al. The peak value of lightning-induced voltages in overhead lines considering the ground resistivity and typical return stroke parameters[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, 26(2): 920-926.
- [9] Liu Xin, Zhang Mengmeng, Wang Tao, et al. Fast evaluation of lightning-induced voltages of overhead line and buried cable considering the lossy ground[J]. *IET Science, Measurement & Technology*, 2019, 13(1): 67-73.
- [10] 张波, 薛惠中, 金祖山, 等. 遭受雷击时输电杆塔及其接地装置的暂态电位分布[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 393-398. (Zhang Bo, Xue Huizhong, Jin Zushan, et al. Transient potential distribution of transmission tower and its grounding device under lightning[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 393-398)
- [11] 曹晓斌, 高竹青, 马御堂, 等. 雷击下 500 kV 杆塔接地装置的散流有效性[J]. 高电压技术, 2017, 43(5): 1596-1601. (Cao Xiaobin, Gao Zhuqing, Ma Yutang, et al. Current divergence validity of 500 kV tower grounding device under lightning stroke[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(5): 1596-1601)
- [12] Sheshyekani K, Paknahad J. Lightning electromagnetic fields and their induced voltages on overhead lines: the effect of a horizontally stratified ground[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, 30(1): 290-298.
- [13] Sheshyekani K, Paknahad J. The effect of an ocean-land mixed propagation path on the lightning electromagnetic fields and their induced voltages on overhead lines[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, 30(1): 229-236.
- [14] 谢海燕. 瞬态电磁拓扑理论及其在电子系统电磁脉冲效应中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2010. (Xie Haiyan. Transient electromagnetic topology theory and its application in electromagnetic pulse effects of electronic systems[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010)
- [15] Parmantier J P. An efficient technique to calculate ideal junction scattering parameters in multiconductor transmission line networks[J]. *Interaction Notes*, 1998, 536: 1-13.
- [16] Xiao Pei, Du Pingan, Ren Dan, et al. A hybrid method for calculating the coupling to PCB inside a nested shielding enclosure based on electromagnetic topology[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, 58(6): 1701-1709.
- [17] Gong Yanfei, Hao Jianhong, Jiang Luhang. Efficient analytical method for the coupling to penetrated transmission line in multiple enclosures based on electromagnetic topology[J]. *IET Science, Measurement & Technology*, 2018, 12(3): 335-342.
- [18] Han J H, Ju S H, Kang N W, et al. Wideband coupling modeling analysis by arbitrarily incoming source fields based on the electro-magnetic topology technique[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67(1): 28-37.
- [19] Han J H. Propagation and scattering supermatrices generation algorithm for implementation of electromagnetic topology technique[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(4): 3037-3046.
- [20] 何金良, 曾嵘. 配电线路雷电防护[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013. (He Jingliang, Zeng Rong. Lightning protection of distribution line[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013)
- [21] Guo Juo, Xie Yanzhao, Rachidi F. A semi-analytical method to evaluate lightning-induced overvoltages on overhead lines using the matrix pencil method[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, 33(6): 2837-2848.