

# 配电网低压电缆的高频等效模型研究

何 翔

(中国南方电网珠海供电局, 广东 珠海 519000)

**摘要:** 低压电缆是电网运行中的重要资产之一。目前对电缆的在线状态监测研究较多, 尤其与间歇性故障有关的监测。这类故障可能伴有放电电流信号, 或者在放电电流信号之前发生。为了评估在实际情况下是否可以检测到此类信号, 构建了一个由客户到主低压电缆的单支路连接的高频模型。在仿真建模中, 电缆用多导体传输线模型等效, 电缆接头用集总参数表示, 线路上的相关数据由实际线路参数等效。通过仿真分析, 将实际馈线段的实测数据与仿真结果进行比较, 两者较为吻合, 说明该模型可用于模拟低压馈线电缆状况相关信号的研究。

**关键词:** 低压电缆; 高频模型; 仿真分析

## Study on high frequency equivalent model of low voltage cable in distribution network

HE Xiang

(China Southern Power Grid Zhuhai Power Supply Company, Zhuhai 519000, China)

**Abstract:** Low voltage cable is one of the important assets in power network operation. At present, there are many researches on on-line status monitoring of cables, especially those related to intermittent faults. Such faults may be accompanied by a discharge current signal or may occur before the discharge current signal. In order to evaluate whether such signals can be detected in the actual situation, a high frequency model is constructed for the single-branch connection from the customer to the main low-voltage cable. In the simulation modeling, the cable is equivalent to the multi-conductor transmission line model, the cable joint is represented by lumped parameters, and the relevant data on the line is equivalent to the actual line parameters. Through the simulation analysis, the measured data of the actual feeder section is compared with the simulation results, and the two are in good agreement, which indicates that the model can be used to simulate the study of the signal related to the condition of low-voltage feeder cable.

**Key words:** low voltage cable; high frequency model; the simulation analysis

## 0 引言

数千米的地下电缆为用户连接提供电力, 这些电缆对电网企业及增量配电网来说是宝贵的资产, 在进行电网维护与规划时需要及时了解其运行状况。由于去中心化发电量的增加, 导致目前低压故障逐渐增加。此外, 低压绝缘故障处理是电网维护成本中主要的费用之一。因此, 目前对

低压电缆的状态监测是国内外的研究热点之一。电缆或附件中的薄弱点可能引起某种形式的放电, 特别是所谓的间歇性故障, 有时会导致熔丝烧断。短路前的放电等现象可能是电缆绝缘故障的一种指示, 在判断是否可以检测到这种放电信号时, 需要用到低压电网高频信号的传播信息。

目前已经有很多学者研究了低压配电网高频建模,其主要是为了研究数据通信。这些研究使用简化的电缆和互连模型,适用于研究数据通信性能。然而,与放电有关的信号可以沿着不同的信道传播,例如与通信相关的信号。此外,对传输线特性的详细研究也可以用于薄弱点的定位。因此,在文献[4]中,将带有铜屏蔽的低压地下电缆用高达50 MHz的四导体传输线模型来替代。

由于低压电缆的连接中可能存在几十个分支,这些电缆分支对信号传输有着重要的影响。为了量化分支电缆对信号传输的影响,对由主电缆和单分支电缆组成的电力网络进行了建模和测量。在仿真过程中,电缆模型用多导体传输线模型替代,通过确定节点方程,分别测量关节参数并进行求解,基于集总分量的方法考虑了分支节点对线路的影响。

本文首先对仿真模型中需要用到的参数提取方法进行了分析,获得了电缆中电压、电流的计算公式以及导纳矩阵的构建方法;其次,对仿真中的自感、互感计算方法进行了分析,完成参数提取后,对模型的构建方法进行了说明;最后,根据提取出来的参数,对模型进行了仿真验证,证明了仿真模型较为准确。

## 1 仿真参数提取

### 1.1 导纳参数的提取

典型的低压电缆由四个导体和一个接地屏组成。三根导线分别为A、B、C三相导线,一根用作中性连接。接地屏作为接地保护,一般连接到电网所有连接点的中性点,例如变电站、接头和用户连接。大截面的主电缆被用作数十个客户连接的馈线。对于每个连接,都有一个与主电缆相当但较小的横截面电缆分支。本研究中使用的典型电缆如图1所示。

为了对这种电缆进行高频传输建模,将其视为多导体传输线。在这种情况下,四个导体可以区分为四个电压和电流。可以使用单位长度参数

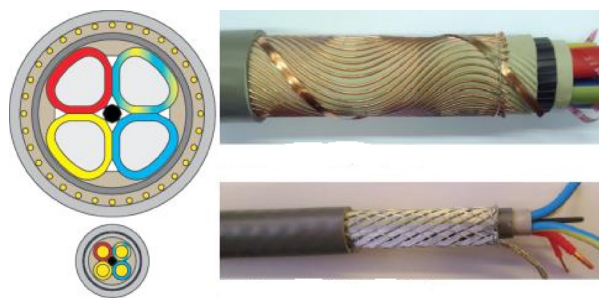


图1 电缆模型

Fig. 1 Cable model

(如电感、电容、电阻和电导)对其进行建模。由于导体是耦合的,因此存在多种传播模式。

电压、电流与式(1)中的电缆位置和单位长度参数有关。

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dz^2} V(z) &= ZYV(z) \\ \frac{d^2}{dz^2} I(z) &= ZYI(z) \end{aligned} \quad (1)$$

这些方程由四个耦合的微分方程组成。模式分解矩阵 $T$ 用于在四个独立的模式下解耦系统。这个关系可以用式(2)表示,式(3)是其中一个解, $\gamma$ 是传播常数。

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dz^2} V_m(z) &= T_v^{-1} ZY T_v V_m(z) = \gamma^2 V_m(z) \\ \frac{d^2}{dz^2} I_m(z) &= T_i^{-1} ZY T_i I_m(z) = \gamma^2 I_m(z) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} V(z) &= T_v (e^{-\gamma z} V_m^+ + e^{\gamma z} V_m^-) \\ I(z) &= T_i (e^{-\gamma z} I_m^+ + e^{\gamma z} I_m^-) \end{aligned} \quad (3)$$

由于主电缆和分支电缆的配置相似,因此可以使用相同的变换矩阵,但是单位长度参数不同。对于这两种电缆,提取参数并转换为可测量的电缆特性。将其值与实际测量值进行比较,以验证模型。

为了建立一个网络段的模型,建立了电缆段的起点和终点之间的关系。这里选择了导纳参数。电缆端部电流和电压之间的关系为

$$\begin{bmatrix} I(0) \\ -I(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_s & Y_m \\ Y_m & Y_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(0) \\ -V(l) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$Y_s$ 和 $Y_m$ 可以用转换矩阵根据电缆特性计算得

出

$$\begin{aligned} Y_s &= T_l(e^{\gamma l} - e^{-\gamma l})^{-1}(e^{\gamma l} - e^{-\gamma l})\gamma^{-1}T_l^{-1}Y \\ Y_M &= -2T_l(e^{\gamma l} - e^{-\gamma l})^{-1}\gamma^{-1}T_l^{-1}Y \end{aligned} \quad (5)$$

利用导纳矩阵，通过节点方程将输电线路截面连接到节点上。利用这种方法可以对低压馈线的传输线网络进行建模。

## 1.2 关键节点参数的测量

低压馈线中使用了几种类型的触头，如连接触头和分支触头。现在广泛应用的一种类型是连触分支电缆和主电缆的分支触头。本文采用了一种典型的应用触头，触头由金属夹制成，金属夹位于主电缆的剥离部分。为了安装这个线夹，接地网被拉到一边，并且在导体之间留出一些额外的空间。然后将维修电缆连接到卡箍上。关节的照片如图2所示。在此触头处，电缆的连续传输线结构有所中断。由于节点较短，其作用可以用集中单元来模拟。此外，导体之间增加了额外的空间，将改变了模型中的电感参数，而对其他参数的影响较小，可以忽略不计。



图2 电感测量

Fig. 2 Inductance measurement

为了确定增加的自感和互感，分别构造和研究了一个中间触头。考虑到模型的尺寸，触头应尽可能短。同轴连接器通过一个连接到接地网的金属夹具安装到每根电缆末端的所有导体上（见图2）。

使用矢量网络分析仪进行电感的测量，增益相位测试设置为10 MHz。选择此限制是为了避免由于长度引起的共振效应。每根导线的自感系数 $L$ 在所有其他导线悬浮的情况下进行测量。测量自感时，一侧感应已知电压 $U_1$ ，而另一侧测量超过50  $\Omega$ 电阻 $Z_0$ 的电压，输出电压 $U_2$ 计算公式为

$$U_2 = U_1 \frac{Z_0}{Z_0 + j\omega L} \quad (6)$$

互感系数 $M$ 是通过将模型一侧的所有导体短

接并进行测量的。在另一侧，在一个导体上感应电压 $U_3$ ，而在另一个导体上测量电压。因此，在第二导体的测量连接器上使用高阻抗以防止电流在二次电路中流动。在第二导体上测量的电压由流过第一导体的电流和互感给出。由自感系数和源阻抗可知注入电流。第二个导体中感应的电压 $U_4$ 计算公式为

$$U_4 = U_3 \frac{-j\omega M}{Z_0 + j\omega L} \quad (7)$$

由于有三个电缆段连接到触头，因此所有参数都有三个。为了获得这些参数，测量了三个方向上所有导体组合的电感，因此进行自感测量9次，互感测量24次。中性线由于在触头处对屏蔽层短路而被排除在外。然后将测量的参数分配到电缆截面的各个部分。完整形式的电缆本身的电感（在没有分支的情况下）被减去，因为这已经包含在电缆截面模型中，包括精确分支点的电缆。

## 2 模型的建立

模型包括两个主电缆段和一个分支电缆段，它们通过一个触头相互连接。所有电缆均以50  $\Omega$ 阻抗连接。本文将研究阻抗对实际住宅设施和变电站的影响。网络由四个节点组成，分别用A、B、C和D标记。该网络模型示意图如图3所示。节点 $n$ 处电缆 $c$ 的所有导体的电压或电流矢量可以表示为 $V_c^n$ 或 $I_c^n$ 。

节点可以用导纳矩阵和阻抗矩阵( $Z_c^n$ ,  $Y_c^n$ )来表示每个节点处的每个电缆截面。在本例中，这将导致12个矩阵。其中包括节点的连接关系和集中元素。此外，可以为节点( $P^n$ )上的所有源定义源向量，具体可用式(8)描述。

$$\sum_{c=1-3} Y_c^n V_c^n + Z_c^n I_c^n = P^n \forall \text{nodes} \quad (8)$$

由于电缆的电流和电压可以通过导纳参数进行关联，因此式(8)中描述的方程可以相互关联。将电缆导纳参数代入可得

$$\sum_{c=1-3} [Y_c^n + Z_c^n Y_{sc}] V_c^n + Z_c^n Y_{Mc} V_c^{n'} = P^n \quad (9)$$

式中,  $n'$  为各电缆段另一侧的节点, 这就产生了一组完整网络的方程, 可以求解所有节点的电压。

所有参数均在频域内确定, 并在 1 ~ 50 MHz 之间的多个频率下求解。

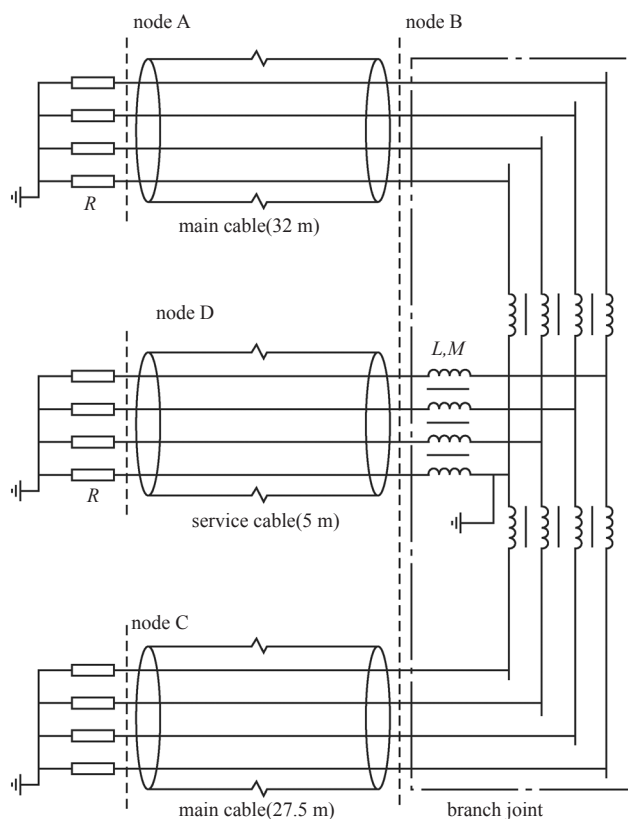


图 3 网络模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of network model

### 3 仿真分析

为了验证模型, 构建了上节所述的网络模型。为了避免测量电缆的任何影响, 这些电缆应尽可能短 (45 cm)。由于它们的阻抗与模型阻抗相同, 所以它们的影响很小。同轴连接器由于与低压电缆导体的连接而引入一个小电感。这是一个集总阻抗模型。

采用 80 MHz 任意波形发生器, 在主电缆端部蓝色相位处产生电压脉冲。用示波器同时测量那个点的电压。感应电压是一个带宽为 50 MHz 的高斯脉冲。在主电缆段的另一端和分支电缆的末端测量同一相位的电压。在模型中加入与电压

源相同的脉冲波形。将响应与图 4 中的测量值进行比较。仿真结果与实测信号吻合较好。

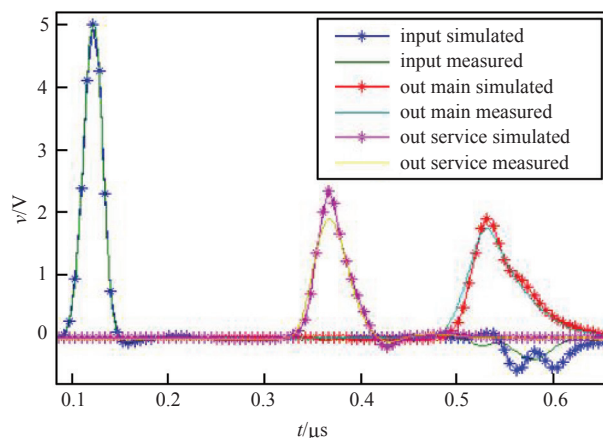


图 4 测量和仿真结果

Fig. 4 Measurement and simulation results

在导体和接地网形成的传输路径包括两个本征模式。因此, 该信道中的信号受到多模色散的影响, 不同模式之间的相速度存在差异, 导致在足够的传播距离内分离成两个脉冲。

经研究发现, 这种效应部分被触头的附加互感所掩盖。图 5 给出了到达节点 C 的模拟信号 (有和没有电感) 之间的差异。在没有电感的模拟中, 第二个脉冲开始出现, 时间差大致符合两种模式与电缆长度的比率, 具体为

$$t = \frac{l}{v_2} - \frac{l}{v_1} = 37 \text{ ns} \quad (10)$$

根据导体不同, 电缆的互感系数为每米 50 nH 或 75 nH, 由于接地网完全包裹电缆, 因此电缆内部没有磁场。图 5 结果解释了多模色散的掩盖。

### 4 结束语

本文模拟了由 3 个电缆段和 1 个触头组成的简化的低压馈线。实验结果与测量结果吻合良好。仿真模型综合了高达 50 MHz 的多导体传输线的全部特性。该关节被建模为一个集总单元节点, 其中包含从测量中获得的附加电感参数。

该模型可用于为在该带宽内传播的任何信号构建一个低压网络模型。模拟放电等状态相关现象产生的信号, 分析监测的可行性。

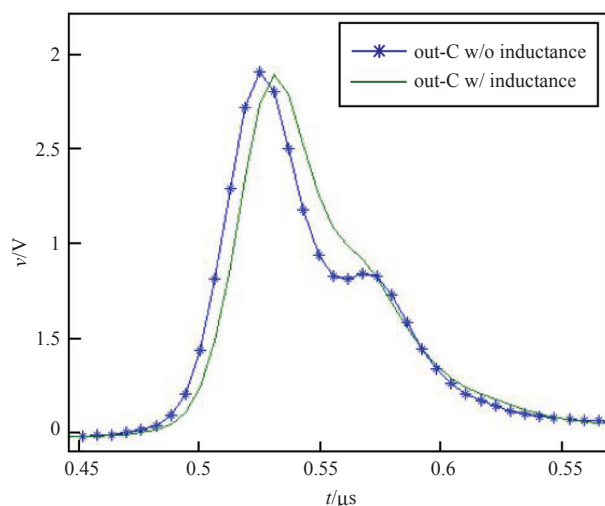


图5 节点C处的信号

Fig. 5 Signal at node C

多模色散可以用来定位放电, 此模型中的接头显示与相地信号一起发生的多模色散具有掩蔽效应。

通过本文研究, 该模型已得到验证, 并可扩展到一个完整的馈线, 可进一步分析信号, 为分支电缆对用户和变电站的影响开展研究。

#### 参考文献

- [1] 范军丽, 邓伟, 侯悦, 等. 一种光纤复合低压电缆故障检测与定位方法[J]. 电子设计工程, 2019, 27(6): 73-77.
- [2] 居乃谦, 赵晓峰, 王琼琿, 等. 低压电缆故障问题的解决措施[J]. 自动化应用, 2015(11): 134-135.
- [3] 孟杰. 光纤复合低压电缆温度特性与传输损耗分析研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [4] 逯怀东, 吕平, 谢荣昆, 等. 低压多分枝电网的区段故障定位方法[J]. 电气技术, 2017(7): 78-81.

- [5] LAZAROPOULOS A G. Factors influencing broadband transmission characteristics of underground low-voltage distribution networks[J]. IET Communications, 2012, 6(17): 2886-2893.
- [6] VERSOLATTO F, TONELLO A. An MTL theory approach for the simulation of MIMO power-line communication channels[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 1710-1717.
- [7] 魏慧娟. 煤矿井下电缆故障快速定位技术研究[J]. 机械工程师, 2018(2): 134-135, 138.
- [8] 王鹤, 李兴宝, 路俊海, 等. 基于叠加原理的光纤复合低压电缆热路模型建模[J]. 电工技术学报, 2019, 34(7): 1381-1391.
- [9] 张众发. 低压电力线通信信道测量与分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [10] 雷健新, 王斌, 刘海林, 等. 基于小波分析的配网电缆在线故障定位仿真[J]. 农村电气化, 2020(5): 36-39.
- [11] 王艳, 李永亮, 赵洪山, 等. 配电网地埋电缆载波信道模型及影响因素分析[J/OL]. 电网技术, 2020, 44(7): 2745-2753.

#### 作者简介



何翔

何翔(1972—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为电网设备状态检修、配电网运检技术研究, 配电网规划设计。

(收稿日期: 2020-05-27) **EA**