

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200730

## 中压配电网电力线载波通信信道建模

王艳, 王阳, 赵洪山, 陈子璇, 李永亮

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

**摘要:** 电力线载波通信是智能配电网通信技术的重要选择之一。而中压配电网结构复杂, 分支众多, 存在电缆—架空线混合型线路, 使得载波信号在其上的传输特性难以预估。结合中压配电网结构特点, 提出一种载波信号在混合型配电网中的信道建模方法。首先, 在中压配电网的实际拓扑结构及线路类型基础上, 定义了载波信号的传输线管道。然后, 结合多导体传输线理论和行波理论, 推导各传输线管道的传播矩阵及各节点的散射矩阵, 并根据网络拓扑关系列写整个网络的电压方程。最后, 由电压方程可求得在信源节点激励下全网任意节点的电压响应。该建模方法不受网络拓扑结构及线路类型限制, 具有很强的适应性及可移植性。计算及电路仿真结果表明了方法的正确性及有效性。

**关键词:** 智能配电网; 电力线载波通信; 混合线路; 行波理论; 信道建模

### Channel modeling of power line communication in a medium voltage distribution network

WANG Yan, WANG Yang, ZHAO Hongshan, CHEN Zixuan, LI Yongliang

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** Power Line Communication (PLC) is one of the important choices for smart distribution network communication technology. The Medium Voltage (MV) distribution network has complex structure, numerous branches, and cable-overhead mixed lines, which make the transmission characteristics of the carrier signal difficult to predict. Based on the structural characteristics of an MV distribution network, this paper proposes a channel modeling method for carrier signals in mixed distribution networks. First, the transmission line pipeline of the carrier signal is defined based on the actual topology and line type of the MV distribution network. Then, the propagation matrix of each transmission line pipeline and the scattering matrix of each node can be derived based on multi-conductor transmission line theory and traveling wave theory, and the voltage equation of the whole network can be written according to the network topology relationship. Finally, the voltage response of all nodes in the whole network under the excitation of the source node can be obtained by the voltage equation. The modeling method is not restricted by the network topology nor line type, and has strong adaptability and portability. The results of calculation and circuit simulation show the correctness and effectiveness of the method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51807063) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2019MS081).

**Key words:** smart distribution network; power line communication; mixed lines; traveling wave theory; channel modeling

## 0 引言

我国的配电网通信方式包括光纤、电力线载波和无线通信等。在实际应用中, 由于光纤敷设价格昂贵、维护费用高且维护工作量大的问题使其应用受到限制; 无线通信灵活便利, 但在电缆沟、电缆

隧道等场合存在信息延迟时间不确定性、可靠性较差的问题; 电力线载波通信技术 (Power Line Communication, PLC) 以现有的输电线路作为载波信号的通信媒介, 大大节省了建设信道的投资, 具有天然的网络通道资源和应用的灵活便利性, 作为光通信的补充和延伸, 电力线载波通信成为了智能配电网通信技术的重要选择之一<sup>[1-3]</sup>。

典型的中压配电网结构复杂、分支众多, 载波信号在传播过程中会发生多次折反射, 噪声和衰减

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51807063); 中央高校基本科研业务费专项基金项目资助(2019MS081)

都具有明显的频率选择性。而正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)对于频率的选择性衰减具有良好的适应性,是电力线载波通信主要的调制技术。建立配电网载波信道模型,确定最佳的传输频率对基于OFDM的PLC技术的应用与发展具有重要的实用价值。

近年来,国内外学者针对配电网的网络特性,提出了多种PLC信道的建模方法,按照建模方式可分为自上至下与自下至上两种类型。自上至下方法的典型代表是多径模型<sup>[4-7]</sup>,该模型基于实测数据,通过曲线拟合的方式得到建模参数,不能对载波信道进行预测。自下至上的方法以理论计算为基础,考虑到网络的拓扑结构、线路类型、终端设备等对信道模型的影响,具有良好的灵活性和通用性,能够为PLC技术提供理论支持。自下至上的方法可分为基于双导体传输线和基于多导体传输线两种模型。前者将配电线路简化成两根导体,由于其简单易行的特点使得目前的大量研究都基于此种模型<sup>[8-11]</sup>。基于多导体传输线模型的研究较少,且其中大部分的研究对象为纯架空线网络。文献<sup>[12]</sup>提出了基于传输矩阵法的配电网PLC信道模型,建立了10 kV架空线路信道模型和变压器的端口简化模型,通过实际测量验证了模型的正确性,但该方法不适用混合型线路,不能满足实际配电网信道建模的要求;文献<sup>[13]</sup>提出了基于BLT方程的配电网PLC信道模型,该模型在计算中不受网络拓扑结构和节点连接关系的限制,具有良好的适应性,但文中仅考虑了架空线信道模型,未涉及电缆线路;文献<sup>[14]</sup>通过节点分析建立了PLC信道模型,分析了中压电缆传播特性,该方法将网络各部分用导纳矩阵表示,灵活性差。

实际的配电网大多为架空线和电缆混合连接线路,以及同为架空线或电缆但型号不同的混联线路,对混合线路和混联线路信道模型的研究,对PLC技术在配电网中的实际应用十分重要。本文采用自下至上的方法,以配电网的实际特性为前提,提出了一种适用于纯架空线网络、纯电缆网络以及电缆-架空混合型网络的中压配电网PLC信道的建模方法,理论推导与电路仿真验证了本文方法的正确性。

## 1 基于配电网特性的传输线管道

如图1所示,实际的中压配电网由若干条传输线相互连接而成,具有多分支多负荷的复杂结构,网络中的传输线可分为三相架空线或一缆三芯地埋电缆两种类型,这些传输线或在线路末端接入终端节点,或用于网络间的互联。对于中压配电网而言,

其终端节点通常由配电变压器等设备组成;其互联节点可以按照线路类型的不同分为架空-架空、电缆-电缆以及混合型连接点。当配电线路用作通信信道时,可将信源节点视为互联节点,该节点装有PLC设备,设备与线路的连接方式有相间耦合、相地耦合和卡接式耦合。

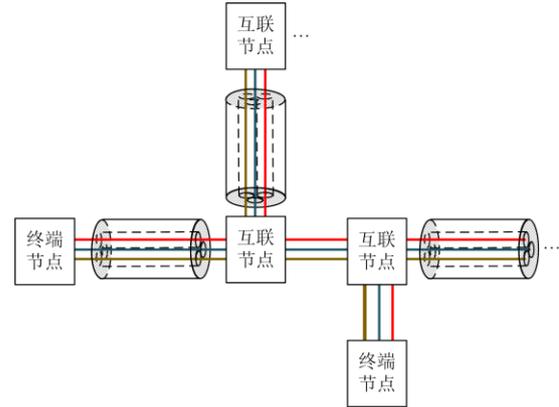


图1 传输线网络示意图

Fig. 1 Transmission line network schematic diagram

为了便于描述整个配电网,将网络中的一条传输线称为一个管道,可根据线路类型的不同将这些管道分为架空管道和电缆管道两类。架空管道由A、B、C三相导体组成,三相导体在节点处均采用直连的方式与该节点的设备或其余传输线相连;电缆管道由三相缆芯、各相屏蔽层和铠装层组成,三相缆芯在节点处同样采用直连的连接方式,屏蔽层和铠装层则通过电阻接地。

## 2 基于管道的中压配电网载波信道建模

### 2.1 管道单位长度参数

设架空管道和电缆管道单位长度阻抗矩阵为 $\mathbf{Z} = \mathbf{R} + j\omega\mathbf{L}$ ,单位长度导纳矩阵为 $\mathbf{Y} = \mathbf{G} + j\omega\mathbf{C}$ ,其中, $\mathbf{R}$ 和 $\mathbf{L}$ 分别为单位长度的电阻和电感矩阵, $\mathbf{G}$ 和 $\mathbf{C}$ 分别为单位长度的电导和电容矩阵。在载波通信频段内, $\mathbf{G}$ 的影响可以忽略不计。

中压架空管道常采用钢芯铝绞结构,主要由三相导体构成,导体排列方式有水平排列、三角排列等。架空管道单位长度参数可由文献<sup>[12]</sup>计算得到。

对于电缆管道而言,中压地埋电缆普遍采用铠装结构,一个典型的中压地埋电缆包含7根导体,分别为三相缆芯、各相屏蔽层和铠装层,如图2所示。

实际的中压铠装电缆在成缆时三相屏蔽层相互接触形成一个花瓣状的整体,因此可将铠装电缆视为5导体结构。为了便于表述,将电缆上各个导体的电压和电流向量表示为

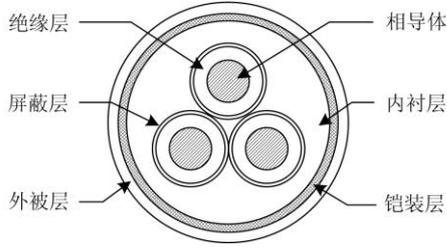


图2 中压三芯铠装电缆结构

Fig. 2 MV three-core armored underground cable structure

$$\begin{aligned} \mathbf{U} &= (U_A \ U_B \ U_C \ U_P \ U_K)^T \\ \mathbf{I} &= (I_A \ I_B \ I_C \ I_P \ I_K)^T \end{aligned}$$

其中，下标“P”和“K”分别表示屏蔽层和铠装层。

由于中压地理电缆三相屏蔽层相互接触，故认为三相屏蔽层具有相同的电位，在文献[15]电缆单位长度参数计算方法的基础上，可认为三相屏蔽层电位相同，采用文献[16]矩阵降阶的方法，将7导体电缆模型转化为5导体电缆模型。

## 2.2 多导体传输线管道相模变换

对于多导体传输线的构成而言，向量 $\mathbf{U}(x)$ 和 $\mathbf{I}(x)$ 分别表示距离该管道首端 $x$ 处的电压向量和电流向量， $\mathbf{Z}$ 和 $\mathbf{Y}$ 分别表示该管道单位长度的阻抗和导纳矩阵，则根据多导体传输线理论可知，这段管道在频域下的微分方程为

$$\begin{cases} \frac{d^2 \mathbf{U}(x)}{dx^2} = \mathbf{ZYU}(x) \\ \frac{d^2 \mathbf{I}(x)}{dx^2} = \mathbf{YZI}(x) \end{cases} \quad (1)$$

由于管道的单位长度参数矩阵均为非对角阵，方程组中每一组的电压、电流均会影响着其他各组的电压、电流，即上式方程中各管道的导体间是相互耦合的，方程不易求解，故需对其进行相模变换以解耦。

通过对式(1)进行相模变换并求解，可得在频域下的管道实际相量与模量的关系为

$$\begin{cases} \mathbf{U}(x) = \mathbf{T}_V (e^{-\gamma x} \mathbf{U}_m^+ + e^{\gamma x} \mathbf{U}_m^-) \\ \mathbf{I}(x) = \mathbf{Y}_c \mathbf{T}_V (e^{-\gamma x} \mathbf{U}_m^+ - e^{\gamma x} \mathbf{U}_m^-) \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\mathbf{T}_V$ 为相模变换矩阵， $\mathbf{T}_V^{-1} \mathbf{ZY} \mathbf{T}_V = \mathbf{A}$ ， $\mathbf{A}$ 为对角矩阵，对角元素为 $\gamma_\phi^2$  ( $\phi = 1, 2, \dots, n$ ， $n$ 为导体个数)，其中， $\gamma_\phi$ 为第 $\phi$ 根导体的传播常数； $\mathbf{U}_m$ 为解耦后的模电压，上标“+”表示前行模量，上标“-”表示反行模量； $\mathbf{Y}_c = \mathbf{YT}_V \gamma^{-1} \mathbf{T}_V^{-1}$ 为该段传输线的特征导纳矩阵； $e^{\pm \gamma x}$ 的表达式为

$$\mathbf{e}^{\pm \gamma x} = \begin{pmatrix} e^{\pm \gamma_1 x} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & e^{\pm \gamma_2 x} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & e^{\pm \gamma_n x} \end{pmatrix}$$

对于架空管道而言，当 $\mathbf{ZY}$ 的对角元素相等，非对角元素也相等时，线路变成了平衡线路，可以采用Clarke矩阵作为线路的相模变换矩阵，且能满足一定的精度要求<sup>[17]</sup>，架空管道 $\mathbf{T}_V$ 具体形式为

$$\mathbf{T}_V = \begin{pmatrix} 1/\sqrt{3} & -1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{6} \\ 1/\sqrt{3} & 0 & 2/\sqrt{6} \\ 1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{6} \end{pmatrix} \quad (3)$$

对于电缆管道而言，可以采用回路分析法，求得5导体电缆的相模变换矩阵。由文献[18]可知，5导体电缆的相模变换矩阵 $\mathbf{T}_V$ 为

$$\mathbf{T}_V = \begin{pmatrix} 1/\sqrt{3} & -1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{6} & 1 & 1 \\ 1/\sqrt{3} & 0 & 2/\sqrt{6} & 1 & 1 \\ 1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{6} & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

式(3)和式(4)实现了对架空管道和电缆管道单位长度参数的解耦，得到了不随频率变化的相模变换矩阵，便于对配电网信道进一步的分析与计算。

## 2.3 管道传播矩阵

由行波理论可知，同一管道上任意一点的电压向量和电流向量可分别看成是由入射波(Incident Wave)和反射波(Reflected Wave)合成的，即：

$$\mathbf{U}(x) = \mathbf{U}^r(x) + \mathbf{U}^i(x) \quad (5)$$

$$\mathbf{I}(x) = \mathbf{Y}_c [\mathbf{U}^r(x) - \mathbf{U}^i(x)] \quad (6)$$

式中，上标“i”表示“入射”，上标“r”表示“反射”。入射电压和反射电压的表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{U}^r(x) = \mathbf{T}_V e^{-\gamma x} \mathbf{U}_m^+ \\ \mathbf{U}^i(x) = \mathbf{T}_V e^{\gamma x} \mathbf{U}_m^- \end{cases} \quad (7)$$

为了便于描述整个网络，将配网中各管道和各节点进行编号，用下标“j”和“k”分别表示每个节点所在的管道号与节点号，故 $\mathbf{U}_{j,k}$ 和 $\mathbf{I}_{j,k}$ 分别表示管道j上的节点k的电压向量和电流向量。

对位于节点k和节点h之间的管道j而言，其始末两端的电压向量为 $\mathbf{U}_{j,k}$ 和 $\mathbf{U}_{j,h}$ ，则有：

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{j,k} = \mathbf{U}_{j,k}^r + \mathbf{U}_{j,k}^i \\ \mathbf{U}_{j,h} = \mathbf{U}_{j,h}^r + \mathbf{U}_{j,h}^i \end{cases} \quad (8)$$

对节点k而言，若管道j为架空管道， $\mathbf{U}_{j,k} = (\mathbf{U}_{j,k,A} \ \mathbf{U}_{j,k,B} \ \mathbf{U}_{j,k,C})^T$ ；若管道j为电缆管道 $\mathbf{U}_{j,k} =$

$(U_{j,k,A} U_{j,k,B} U_{j,k,C} U_{j,k,P} U_{j,k,K})^T$ ; 节点 $h$ 与之相同。

由式(7)和式(8)可得管道首末两端入射电压和反射电压的关系为

$$\begin{pmatrix} U_{j,k}^r \\ U_{j,h}^r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & T_V e^{\gamma l} T_V^{-1} \\ T_V e^{\gamma l} T_V^{-1} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{j,k}^i \\ U_{j,h}^i \end{pmatrix}$$

即

$$U_j^r = R_j U_j^i \quad (9)$$

式中:  $l$ 表示管道长度;  $U_j = (U_{j,k} U_{j,h})^T$ ;  $R_j$ 为管道 $j$ 的传播矩阵。无论管道类型如何, 均可用 $R_j$ 表征管道首末两端入射电压和反射电压的关系。

为了得到整个配电网总的管道传播矩阵, 需要列写总网络的电压列向量 $U$ , 以节点号优先, 管道号次之的排列规则, 可得整个网络的管道传播矩阵方程为

$$U^r = R_T U^i \quad (10)$$

式中,  $R_T$ 为整个网络的管道传播矩阵, 对于由 $m$ 个电缆管道和 $n$ 个架空管道构成的配电网而言,  $R_T$ 的阶数为 $(10m \times 6n)$ 。

## 2.4 节点散射矩阵

### 1) 管道连接点处的散射矩阵

中压配电线路分为架空线路和电缆线路, 故管道连接点可分为架空-架空、电缆-电缆、架空-电缆和电缆-架空四种类型。对于中压配电网的任一管道节点而言, 均满足基尔霍夫定律。以图3所示的电缆-架空连接点 $k$ 为例, 阐述节点处电压电流的关系。令节点电流的正方向与该节点的反射电流同向。

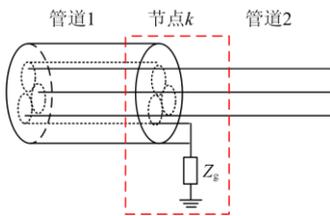


图3 电缆-架空连接点

Fig. 3 Cable-overhead connection node

考虑到在连接点处电压和电流向量是连续的, 则位于管道1、2之间的节点 $k$ 满足式(11)。

$$\begin{cases} U_{1,k}' = U_{2,k} \\ U_{1,k}'' + Z_g I_{1,k}'' = 0 \\ I_{1,k}' + I_{2,k} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $Z_g$ 表示接地电阻;  $U_{1,k}' = (U_{1,k,A} U_{1,k,B} U_{1,k,C})^T$ 表示三相缆芯的电压向量;  $U_{1,k}'' = (U_{1,k,P} U_{1,k,K})^T$ 表示屏蔽层和铠装层的电压向量。管道1的电压向量为

$U_{1,k} = (U_{1,k}' U_{1,k}'')^T$ ; 管道2的电压向量为  $U_{2,k} = (U_{2,k,A} U_{2,k,B} U_{2,k,C})^T$ ; 电流量表示方法类似。

式(11)可表达为

$$\begin{pmatrix} E_3 & 0 & -E_3 \\ 0 & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{1,k}' \\ U_{1,k}'' \\ U_{2,k} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_g & 0 \\ E_3 & 0 & E_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{1,k}' \\ I_{1,k}'' \\ I_{2,k} \end{pmatrix} = 0$$

即:

$$Y_k U_k + Z_k I_k = 0 \quad (12)$$

式中:  $E_2$ 和 $E_3$ 分别为2阶和3阶单位矩阵;  $U_k = (U_{1,k} U_{2,k})^T$ 为节点 $k$ 的电压向量;  $I_k = (I_{1,k} I_{2,k})^T$ 为节点 $k$ 的电流量;  $Y_k$ 为节点 $k$ 的电压系数矩阵;  $Z_k$ 为节点 $k$ 的电流系数矩阵。

结合式(5)、式(6), 可将式(12)整理为

$$U_k^r = (Z_k Y_C + Y_k)^{-1} (Z_k Y_C - Y_k) U_k^i \quad (13)$$

式中,  $Y_C = \text{diag}(Y_{C1}, Y_{C2})$ 为节点 $k$ 总的特征导纳矩阵,  $Y_{C1}$ 表示管道1的特征导纳矩阵,  $Y_{C2}$ 表示管道2的特征导纳矩阵。

由式(13)可知, 管道连接点 $k$ 的散射矩阵为

$$S_k = (Z_k Y_C + Y_k)^{-1} (Z_k Y_C - Y_k)$$

不论互连节点所连接的管道类型或个数如何, 其节点散射矩阵均可由上式求得, 散射矩阵 $S_k$ 具有通用性。

### 2) 信源节点的散射矩阵

如图4所示, PLC设备与线路的连接方式有卡接式耦合、相地耦合和相间耦合三种。

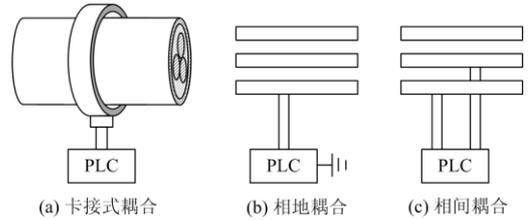


图4 PLC设备与线路耦合方式

Fig. 4 Coupling of PLC equipment and line

以相地耦合为例, 若节点 $k$ 为信源节点, 电压源等效电压为 $U_{ks}$ , 电源内阻为 $Z_{ks}$ , 则该点处电压和电流量可以表示为

$$\begin{pmatrix} 0 & Z_{ks}^{-1} \\ E_3 & -E_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{1,k} \\ U_{2,k} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} E_3 & E_3 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{1,k} \\ I_{2,k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{ks} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (14)$$

式中:  $U_{1,k}$ 和 $U_{2,k}$ 分别表示信源节点两侧管道的电压向量;  $I_{1,k}$ 和 $I_{2,k}$ 分别表示信源节点两侧管道的电流量;  $I_{ks} = Z_{ks}^{-1} U_{ks}$ 为信源电流量向量。

式(14)可表达为

$$Y_k U_k + Z_k I_k = I_s \quad (15)$$

式中,  $\mathbf{I}_s$  为节点  $k$  总的电流列向量。

无论 PLC 设备用何种方式与线路耦合, 信源节点均可表示为式(15)的形式。结合式(5)、式(6), 可将式(15)整理为

$$\mathbf{U}_k^r = \mathbf{S}_k \mathbf{U}_k^i + \mathbf{J}_s \quad (16)$$

式中,  $\mathbf{J}_s = (\mathbf{Z}_k \mathbf{Y}_C + \mathbf{Y}_k)^{-1} \mathbf{I}_s$  为变换后的电源列向量。

### 3) 终端节点的散射矩阵

如果节点  $k$  为终端节点, 其通常连接双绕组变压器。在电力线载波信道中, 可忽略配电变压器高低压侧的传递特性, 其电流电压关系仍满足式(12)的形式<sup>[10]</sup>, 终端节点的散射矩阵可由式(13)求取。

### 4) 配电网总的散射矩阵

中压配电网可以通过以上方法求得所有节点的散射矩阵。设配电网总的节点散射矩阵为  $\mathbf{S}_T$ , 在管道传播矩阵的节点编号规则下, 结合中压配电网网络拓扑结构, 可得整个网络由散射矩阵  $\mathbf{S}_T$  表示的入射电压和反射电压的关系式为

$$\mathbf{U}^r = \mathbf{S}_T \mathbf{U}^i + \mathbf{J}^s \quad (17)$$

式中:  $\mathbf{S}_T = \text{diag}(\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \dots, \mathbf{S}_N)$ ,  $N$  为网络节点数;  $\mathbf{J}^s$  为整个网络的信源列向量, 除信源节点外, 其余元素均为0。

## 2.5 基于传输线管道的配电网载波信道建模

将式(10)和式(17)联立, 可以整理得到整个配电网的电压  $\mathbf{U}$  为

$$\mathbf{U} = (\mathbf{R}_T + \mathbf{E}_T)(\mathbf{R}_T - \mathbf{S}_T)^{-1} \mathbf{J}^s \quad (18)$$

式中,  $\mathbf{E}_T$  为阶数为  $(10m \times 6n)$  的单位矩阵。

通过式(18)可以求得在信源节点激励下全网任意节点的电压响应。

## 3 仿真与验证

为验证本文建模方法在各类型线路及混合型线路配电网中的正确性, 结合配电网实际结构及 PLC 设备的安装方式, 在图 5 所示配电网拓扑结构下, 分别给出了纯架空线网络、纯电缆网络及混合型网络情况下, 本文方法、传输矩阵法及 Pspice 电路仿真三者的结果对比图。

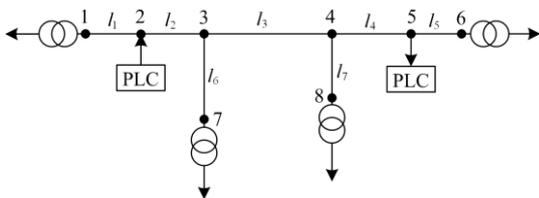


图 5 简单的配电网拓扑图

Fig. 5 Simple distribution network topology

若图 5 为纯架空线网络, 设管道 1、2、3、4、5 的线路型号为 LGJ-120/7, 管道 6、7 的线路型号为 LGJ-35/6, 其长度分别为  $l_1=l_5=10$  m、 $l_2=l_4=l_7=80$  m、 $l_3=120$  m 及  $l_6=100$  m; 载波频率取 10~1 000 kHz。节点 1、6、7、8 均与变压器相连, 变压器模型采用文献[19]中实测的 100 kVA 配电变压器。节点 2 与节点 5 分别为发、收信节点, 均装有 PLC 设备, 设备内阻为  $Z_s=50 \Omega$ , 耦合方式为 B 相与地耦合。

对于有损传输线, 当忽略导线的集肤效应时, 可用多段集总 Pi 型的电气短线来近似模拟分布参数线路<sup>[20-21]</sup>。故本文以 10 m 为一段电气短线在 Pspice 中搭建了图 5 所示的集总参数电路模型。

图 6 为纯架空线路网络的电压衰减曲线。由图 6 可知, 对于纯架空线路信道, 采用本文方法与传输矩阵法建模所得电压传输结果完全一致, 且两者与电路仿真结果也高度吻合, 进一步验证了本文方法的正确性。

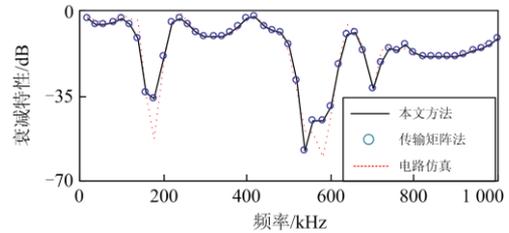


图 6 纯架空线路电压衰减

Fig. 6 Pure overhead line voltage attenuation

若图 5 为纯电缆线路网络, 设网络中电缆管道型号均为 YJV22-3×240, 电缆屏蔽层与铠装层在节点 1、3、5、6、7、8 处分别经 2 Ω 电阻接地, PLC 设备通过卡接式电感耦合器与线路连接, 耦合器原副边的电压比取 3:1<sup>[22]</sup>, 其余参数与模型不变。此时, 本文方法、传输矩阵法与电路仿真结果如图 7 所示。

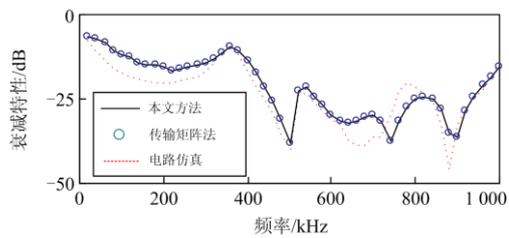


图 7 纯电缆线路电压衰减

Fig. 7 Pure cable line voltage attenuation

由图 7 可知, 对于纯电缆信道, 本文方法与传输矩阵法结果完全一致, 且功率衰减变化趋势与电

路仿真结果基本相同, 证明该方法对于纯电缆线路仍然适用。由图 6 和图 7 结果对比可知, 对于同一拓扑结构的配电网而言, 网络中采用不同类型的线路会给载波信号传输特性带来明显的差异, 其主要原因是由于架空线与地埋铠装电缆在结构与参数上的区别而造成的, 因此对实际配电网 PLC 信道进行规划与设计时, 应考虑线路类型对载波信号的影响。

由于架空管道由三根导体组成, 电缆管道由五根导体组成, 因此在互联节点处, 这两类管道的传输矩阵无法通过级联直接相乘, 故传输矩阵法不适用于混合型网络。而本文方法将网络中所有的电压向量用统一的列向量表示, 从原理上避开架空管道与电缆管道无法级联的问题, 可以实现对混合型配电网信道建模。

若图 5 为架空-电缆混合型网络, 设网络中的管道 1、2、3、4、5 为架空管道, 其型号为 LGJ-35/6, 管道 6、7 为电缆管道, 其型号为 YJV22-3×240, 电缆管道的屏蔽层与铠装层分别在节点 3、4、7、8 经 2 Ω 电阻接地; 其余的参数与模型不变。图 8 为使用本文方法与使用集总 Pi 模型电路仿真所得结果对比波形。

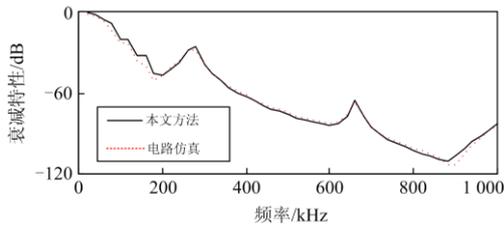


图 8 混合线路电压衰减

Fig. 8 Mixed lines voltage attenuation

由图 8 可知, 对于混合型信道, 使用本文方法与集总 Pi 型电路仿真的结果基本吻合, 证明了本文方法同样也适用于混合型网络。由图 8 与图 6、图 7 结果对比再次验证了不同的线路类型会造成载波信号传输有明显的差异。

中压配电网还存在格状网络和环网结构<sup>[23]</sup>, 为验证本文方法对此类网络信道建模的有效性, 对于附录 A 图 A1 和图 A2 所示两类网络, 其长度已在图中标明(单位: m); 线路型号均为 LGJ-35/6; PLC 设备采用相地耦合, 安装位置已在图中标明; 变压器等模型与图 5 相同。采用本文方法和电路仿真所得的结果如图 9 和图 10 所示。

由图 9 和图 10 可以看出, 采用本文方法和电路仿真所得结果基本一致, 验证了本文方法在建模时不受网络拓扑结构的限制, 对于格状网络和环网仍然适用。

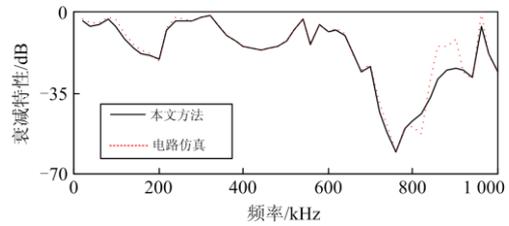


图 9 格状配电网衰减特性

Fig. 9 Grid distribution network attenuation characteristic

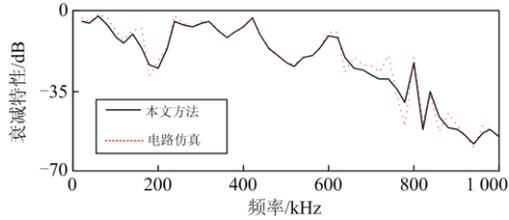


图 10 环网衰减特性

Fig. 10 Ring distribution network attenuation characteristic

为验证本文方法在复杂配电网中载波信道建模的有效性, 附录 A 图 A3 给出了某城区一条 10 kV 配出线的实际网络拓扑图。其中线路类型及线路长度(单位: m)图中均已标明; 电缆型号为 YJV22-3×240, 架空线路型号为 LGJ-35/6; 变压器等其他参数与图 5 相同; 取信源节点的 PLC 设备的耦合方式为卡接式耦合, 信源与收信节点的位置在图中均已表明。

采用本文方法和电路仿真所得的电压响应曲线如图 11 所示。由图 11 可知, 采用本文方法与集总 Pi 型电路仿真所得电压响应曲线的变化趋势基本一致, 验证了本文方法对复杂配电网信道建模的正确性。实际配电网中, 包含大量的混合型线路, 采用本文方法可以有效地建立配电网 PLC 信道模型, 实现对配电网的信道特性分析。

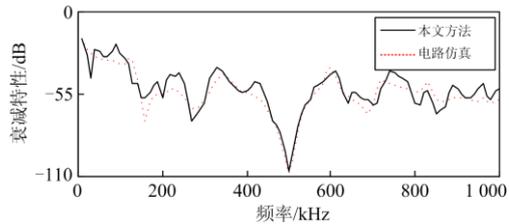


图 11 复杂配电网的衰减特性

Fig. 11 Complex distribution network attenuation characteristic

## 4 结论

智能配电网的建设需要高效、快捷、弹性、经济的配电通信网络作为支撑。而电力线载波通信以其得天独厚的优势在智能配电网通信技术中占有重要位置。在此背景下, 本文结合实际中压配电网结

构特性,提出了一种适用于任何网络结构的 PLC 信道建模方法。该建模方法不受网络拓扑结构、线路类型、信源个数的限制,具有很强的适应性及可移植性。理论推导及电路仿真结果表明了方法的正确性及有效性。

对于拓扑结构已知的配电网,在确定信源节点位置后,可用本文模型进一步分析 PLC 设备在不同耦合方式下载波信号的传输特性,以及线路接地电阻、终端设备等对信号传输的影响,为电力线载波通信技术在智能配电网中的规划设计及推广应用提供了重要的理论基础。

附录 A

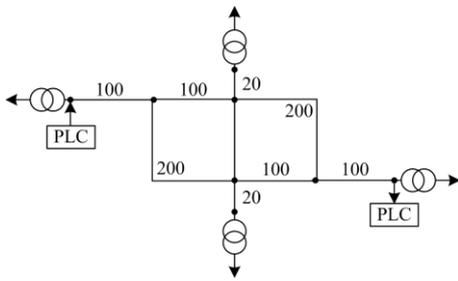


图 A1 格状配电网拓扑

Fig. A1 Grid distribution network topology

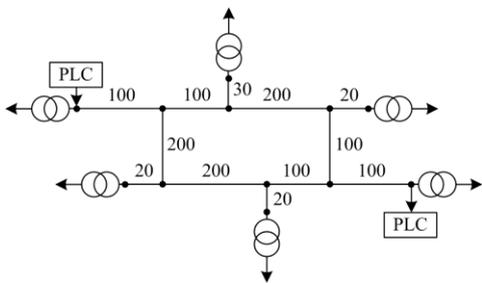


图 A2 环网拓扑

Fig. A2 Ring distribution network topology

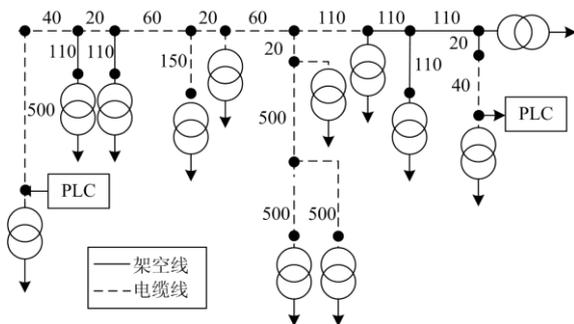


图 A3 某城区 10 kV 配电出线网络拓扑

Fig. A3 10 kV distribution outlet network topology in a certain urban area

参考文献

[1] 宋晓健, 喻洁, 张俊芳, 等. 面向能源互联网的电力-通信联合仿真平台设计[J]. 电力工程技术, 2017, 36(3): 44-49.  
SONG Xiaojian, YU Jie, ZHANG Junfang, et al. Design of power communication simulation platform for Energy Internet[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(3): 44-49.

[2] 陈皓勇, 陈永波, 王晓娟, 等. 基于 LPWAN 的泛在电力物联网[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 1-8.  
CHEN Haoyong, CHEN Yongbo, WANG Xiaojuan, et al. Ubiquitous Power Internet of Things based on LPWAN[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 1-8.

[3] 杨蓉, 曹旺斌, 尹成群. 基于自适应遗传算法的 PLC 信道动态子载波分配[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 111-116.  
YANG Rong, CAO Wangbin, YIN Chengqun. Dynamic subcarrier allocation of PLC channel based on adaptive genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 111-116.

[4] BALAL M, WASEEM N, RABIA M. Channel modeling of low voltage NB-PLC network using statistical and deterministic channel modeling approaches[C] // 2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), October 14-17, 2018, Paris, France: 693-696.

[5] PAGANI P, SCHWAGER A. A statistical model of the in-home MIMO PLC channel based on European field measurements[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(7): 2033-2044.

[6] 李松浓, 胡晓锐, 郑可, 等. 低压电力线载波通信信道衰减特性测量与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 99-106.  
LI Songnong, HU Xiaorui, ZHENG Ke, et al. Measurement and research on attenuation characteristics of low voltage power line communication channel[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 99-106.

[7] PITTOLO A, TONELLO A. A synthetic statistical MIMO PLC channel model applied to an in-home scenario[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(6): 2543-2553.

[8] 王艳, 王东, 赵洪山. 基于支路追加法的配电网混联线路电力线载波通信信道建模[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(23): 56-60, 85.  
WANG Yan, WANG Dong, ZHAO Hongshan. Power line communication channel modeling of hybrid lines in distribution network based on branch-adding method[J].

- Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 56-60, 85.
- [9] LE J, WANG C, ZHOU W, et al. A novel PLC channel modeling method and channel characteristic analysis of a smart distribution grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 146-158. DOI: 10.1186/s41601-017-0044-2.
- [10] LUIS G, PABLO F, MATEO C. Power line communication transfer function computation in real network configurations for performance analysis applications[J]. IET Communications, 2017, 11(6): 897-904.
- [11] RENNANE A, KONATE C, MACHMOUM M. A simplified deterministic approach for accurate modeling of the indoor power line channel[C] // 2008 Third International Conference on Systems and Networks Communications, October 26-31, 2008, Sliema, Malta: 121-126.
- [12] 郭以贺, 谢志远, 石新春. 基于多导体传输线的中压电力线通信信道建模[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1183-1190.  
GUO Yihe, XIE Zhiyuan, SHI Xinchun. Modeling of medium voltage power line communication channel based on multi-conductor lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1183-1190.
- [13] 赵洪山, 张伟韬. 基于 BLT 方程的中压电力线载波通信信道建模[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17): 155-162.  
ZHAO Hongshan, ZHANG Weitao. BLT equation based channel modeling for medium-voltage power line communication[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 155-162.
- [14] THEOFILOS A P, ANDREAS I C, GRIGORIS K P. Narrowband power line communication: medium voltage cable modeling and laboratory experimental results[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 102(9): 50-60.
- [15] 钱洁. 电力电缆电气参数及电气特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.  
QIAN Jie. Study on electrical parameter calculation method and electrical characteristics of power cables[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [16] ENRIQUE A. 柔性交流输电系统在电网中的建模与仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 43-45.
- [17] 郭以贺. 中压电力线通信关键技术研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2014.  
GUO Yihe. Research on key technologies of medium voltage power line communication[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2014.
- [18] 赵洪山, 张伟韬, 王艳. 基于改进模态分解的中压地埋电缆载波通信信道特性分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18): 177-186.  
ZHAO Hongshan, ZHANG Weitao, WANG Yan. Modified mode decomposition based channel characteristics analysis of power line carrier communication of medium-voltage buried cables[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 177-186.
- [19] ANTONIO C, VALENTINA C, DARIO D C, et al. Measurement issues for the characterization of medium voltage grids communications[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(8): 2185-2196.
- [20] PAUL C R. Analysis of multiconductor transmission lines[M]. Hoboken, USA: John Wiley and Sons, 2008: 312-314.
- [21] 杨清熙, 王庆国, 周星, 等. 快沿脉冲下传输线集总参数电路模型的验证与分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 327-332.  
YANG Qingxi, WANG Qingguo, ZHOU Xing, et al. Verification and analysis of lumped-circuit approximate models of multiconductor transmission lines excited by fast rising pulse[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 327-332.
- [22] 王艳, 陈家玉, 赵洪山, 等. 中压配电网载波通信卡式电感耦合器耦合模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 87-94.  
WANG Yan, CHEN Jiayu, ZHAO Hongshan, et al. Clamp inductive coupler model of medium voltage distribution network carrier communication[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 87-94.
- [23] 蔡伟, 乐健, 刘开培, 等. 基于信息节点的智能配电网中压电力线载波通信信道建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 150-156.  
CAI Wei, LE Jian, LIU Kaipei, et al. A channel modeling technology for the medium-voltage power-line carrier in smart power distribution grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 150-156.

收稿日期: 2020-06-27; 修回日期: 2020-09-29

作者简介:

王艳(1981—), 女, 博士, 讲师, 研究方向为电力线载波通信技术; E-mail: 18288061@qq.com

王阳(1996—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力线载波通信技术; E-mail: 814146957@qq.com

赵洪山(1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能配电网载波通信与自动化、风电机组的故障预测与优化检修等。E-mail: Zhaohshcn@126.com

(编辑 葛艳娜)