

中压配电物联网架空线-电缆混合线路电力线载波信道建模

王 艳,王 阳,赵洪山,陈 浩,陈子璇
(华北电力大学 电气与电子工程学院,河北 保定 071003)

摘要:针对中压配电网架空线与电缆线路混合连接的实际情况,提出了一种基于输入阻抗矩阵的混合型配电物联网电力线载波信道建模方法。首先,分析中压配电网架空线路和电缆线路的结构参数,在多导体传输线理论基础上,推导2类线路的相模变换矩阵,列写传输线的链参数方程;其次,重点分析了各类型配电线路节点连接处的阻抗矩阵关系;然后,根据配电网实际拓扑结构,将配电网划分为不同类型网络分支,给出各类分支输入阻抗矩阵的计算方法,依次求得网络中各节点及信源节点的输入阻抗;最后,由信源节点的输入阻抗与边界条件,结合各传输线的链参数矩阵及各节点的输入阻抗矩阵,求得网络中任意节点的电压向量,实现混合型配电物联网电力线载波信道的建模。理论分析与仿真验证表明了所提建模方法的正确性与有效性。

关键词:配电物联网;电力线载波通信;混合线路;多导体传输线;输入阻抗;信道建模

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202012018

0 引言

目前电力物联网的建设是国家电网公司的重要发展战略。配电物联网实现了物联网与配电网的融合,是电力物联网建设与发展的重要环节。配电网通信技术是实现用户侧与电网侧信息交换的关键技术之一,其发展对于配电物联网的建设意义重大。

随着城市配电网的发展,其结构也日益复杂,“无线+有线”的互补通信方式是未来配电网通信技术的发展方向之一。基于5G技术的无线通信具有部署灵活、抗毁灭性强等优点,但在配电物联网中的实际应用仍不成熟,且在地下配电室、电缆沟中存在时延不定问题;传统的有线通信,如光纤通信等,应用在配电网中时存在敷设价格昂贵、接口多、故障率高、维护工作量大的问题。基于正交频分复用OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)调制的电力线载波通信PLC(Power Line Communication)以现有的电力线作为通信信道,具有天然的网络通道优势与应用的灵活便利性,能够适应配电网多分支、多负荷的复杂结构。PLC作为无线通信的补充与延伸,已经成为配电物联网建设的重要选择之一。因此,建立配电网信道模型,分析载波信号在配电物联网中的传输特性,对PLC在电力物联网中的规划设计以及推广应用具有重要的理论意义和实用价值^[1-3]。

近年来,基于配电网的实际特性,国内外学者提出了多种PLC信道建模方法,按其建模方式可分为自顶向下和自底向上2类。自顶向下模型以实测数

据为基础,通过数学拟合的方式建模,不能对信道特性进行预测^[4-5]。自底向上模型以理论计算为基础,考虑了实际配电网的结构与参数特征等对模型的影响,能够实现对信道特性的较精准预测。自底向上模型分为双导体模型和多导体模型2类。双导体模型将配电线路和配电设备简化为单相模型,此模型易于分析,但与实际配电网的ABC三相结构不符^[6-8]。多导体模型以实际线路类型和电力设备模型为基础,符合配电网的实际结构。文献[9]提出了传输矩阵法和变压器端口简化模型,通过实测数据验证了该方法对纯架空型配电网信道建模的正确性,但该方法仅适用于单一线路类型的配电网;文献[10]提出了基于BLT方程的PLC信道建模方法,该方法在计算中不受网络拓扑结构的限制,具有良好的适应性,但文中仍然只考虑了三相架空线路;文献[11]通过改进模量分解,对载波信号在配电网电缆线路中的传输特性进行了分析,给出了电缆屏蔽层与钢铠接地对载波信号的影响,但研究内容未涉及架空线路。

目前城市中压配电网大多为电缆线路与架空线路构成的混合型网络,载波信号在电缆线路和架空线路上的耦合方式及传输特性均存在较大的差异。因此,对混合型中压配电网的载波信道建模以及传输特性进行分析具有重要意义。本文通过计算配电网中各节点的输入阻抗,结合链参数矩阵,建立了配电网信道模型,实现了对混合型配电网的信道建模。本文方法原理简单、可移植性强,能够为PLC技术在配电物联网中的规划和推广应用提供理论指导。

1 中压配电网多导体传输线模型

1.1 中压配电网传输线单位长度参数

实际的中压配电线路分为架空线和电缆2种类

收稿日期:2020-03-29;修回日期:2020-10-29

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

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51807063) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2019MS081)

型,由于两者敷设方式及结构形式上的不同,两者的单位长度参数存在较大差异。设架空线和电缆的单位长度阻抗矩阵为 $Z = R + j\omega L$, 单位长度导纳矩阵为 $Y = G + j\omega C$, 其中, R 和 L 分别为单位长度的电阻和电感矩阵; G 和 C 分别为单位长度的电导和电容矩阵,在载波通信频段内, G 的影响可以忽略不计。架空线单位长度参数可由文献[9]计算得到。

配电网的电缆多采用地埋铠装电缆,其结构如图1所示。典型的中压铠装电缆包含7根导体,分别为三相缆芯、各相屏蔽层和铠装层。而实际中铠装电缆三相屏蔽层之间相互接触,故可将三相的屏蔽层看作1根导体。

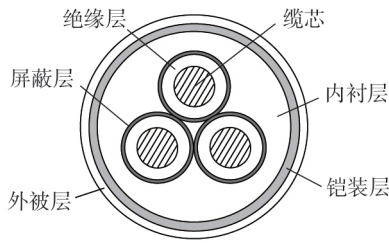


图1 中压地埋铠装电缆结构

Fig.1 Structure of medium voltage buried armored cable

为了便于表述,将电缆上各个导体的电压和电流构成的向量表示为:

$$\begin{cases} U = [U_A \ U_B \ U_C \ U_P \ U_K]^T \\ I = [I_A \ I_B \ I_C \ I_P \ I_K]^T \end{cases}$$

其中, U_A 、 U_B 、 U_C 分别为A、B、C三相缆芯的电压; U_P 、 U_K 分别为屏蔽层和铠装层的电压;电流定义可参考电压,此处不再赘述。

由于中压铠装电缆三相屏蔽层相互接触,故认为三相屏蔽层电位相同,在文献[12]中电缆单位长度计算方法的基础上,结合文献[13]的矩阵降维法,可得五导体电缆单位长度参数矩阵的表达形式为:

$$\begin{aligned} Z &= \begin{bmatrix} Z_{Cs} & Z_{Cm} & Z_{Cm} & Z_{CPm} & Z_{CKm} \\ Z_{Cm} & Z_{Cs} & Z_{Cm} & Z_{CPm} & Z_{CKm} \\ Z_{Cm} & Z_{Cm} & Z_{Cs} & Z_{CPm} & Z_{CKm} \\ Z_{CPm} & Z_{CPm} & Z_{CPm} & Z_{Ps} & Z_{PKm} \\ Z_{CKm} & Z_{CKm} & Z_{CKm} & Z_{PKm} & Z_{Ks} \end{bmatrix} \\ Y &= \begin{bmatrix} Y_{CP} & 0 & 0 & -Y_{CP} & 0 \\ 0 & Y_{CP} & 0 & -Y_{CP} & 0 \\ 0 & 0 & Y_{CP} & -Y_{CP} & 0 \\ -Y_{CP} & -Y_{CP} & -Y_{CP} & Y_{Ps} & -Y_{PK} \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{PK} & Y_{Ks} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

其中, Z_{Cs} 、 Z_{Ps} 和 Z_{Ks} 分别为各相缆芯、屏蔽层和铠装层的自阻抗; Z_{Cm} 、 Z_{CPm} 、 Z_{CKm} 和 Z_{PKm} 分别为各相缆芯之间、缆芯与屏蔽层、缆芯与铠装层、屏蔽层与铠装层之间的互阻抗; Y_{CP} 和 Y_{PK} 分别为缆芯与屏蔽层、屏蔽层与铠装层之间的互导纳; Y_{Ps} 和 Y_{Ks} 分别为

屏蔽层与铠装层的自导纳。通过对七导体电缆阻抗矩阵降维计算可知,五导体电缆参数矩阵中 $Z_{CKm} = Z_{PKm} = Z_{Ks}$ 。

1.2 多导体传输线的相模变换

对于由 $n+1$ 根导体构成的多导体传输线, $U(x)$ 和 $I(x)$ 分别为距离这段传输线首段 x 处的电压向量和电流向量, Z 和 Y 分别为这段传输线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,这段传输线在频域下的微分方程为:

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

由于传输线单位长度的参数矩阵均为非对角阵,即方程组中每个导体的电压、电流均会对其余导体的电压、电流产生影响,这使得方程不易求解,因此需对式(1)进行相模变换以解耦。

对式(1)进行相模变换并求解,可得传输线的实际向量与模量之间的关系为:

$$\begin{cases} U(x) = T_V (E^{-\gamma x} U_m^+ + E^{\gamma x} U_m^-) \\ I(x) = Y_c T_V (E^{-\gamma x} U_m^+ - E^{\gamma x} U_m^-) \end{cases} \quad (2)$$

$$E^{\pm \gamma x} = \begin{bmatrix} e^{\pm \gamma_1 x} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & e^{\pm \gamma_2 x} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & e^{\pm \gamma_n x} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, T_V 为相模变换矩阵,且有 $T_V^{-1} Z Y T_V = \gamma^2$, $\gamma^2 = \text{diag}(\gamma_1^2, \gamma_2^2, \cdots, \gamma_n^2)$, γ_φ ($\varphi = 1, 2, \cdots, n$) 为第 φ 根导体的传播常数; U_m^+ 、 U_m^- 分别为解耦后的前行、反行模电压; $Y_c = Y T_V \gamma^{-1} T_V^{-1}$ 为该段传输线的特征导纳矩阵。

对于架空线,当 ZY 的对角元素相等且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^[14],其具体形式为:

$$T_V = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{3} & -1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{6} \\ 1/\sqrt{3} & 0 & 2/\sqrt{6} \\ 1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{6} \end{bmatrix} \quad (4)$$

对于电缆而言,可以采用回路分析法^[11]求得五导体电缆的相模变换矩阵,其具体形式为:

$$T_V = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{3} & -1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{6} & 1 & 1 \\ 1/\sqrt{3} & 0 & 2/\sqrt{6} & 1 & 1 \\ 1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{6} & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

1.3 多导体传输线 $2n$ 端口表征

对于长度为 l 的多导体传输线,可将其视为 $2n$ 端口网络,如附录A图A1所示。由式(2)可知,这个

2n端口的传输线首末端电压和电流向量的关系可用链参数矩阵表征为:

$$\begin{bmatrix} U(l) \\ I(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U(0) \\ I(0) \end{bmatrix} \quad (6)$$

即:

$$\begin{bmatrix} U(l) \\ I(l) \end{bmatrix} = \Phi \begin{bmatrix} U(0) \\ I(0) \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, Φ 为这段传输线的链参数矩阵, 其各个子阵的表达式如式(8)所示。

$$\begin{cases} \Phi_{11} = \frac{1}{2} T_V (e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}) T_V^{-1} \\ \Phi_{12} = -\frac{1}{2} T_V (e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}) \gamma^{-1} T_V^{-1} Z \\ \Phi_{21} = -\frac{1}{2} Z^{-1} T_V \gamma (e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}) T_V^{-1} \\ \Phi_{22} = \frac{1}{2} Z^{-1} T_V (e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}) T_V^{-1} Z \end{cases} \quad (8)$$

实际配电网是由架空线和电缆相互连接而成的, 不论线路类型如何, 均可用链参数矩阵表征其首末端电压和电流向量的关系。

2 中压配电网节点连接处阻抗矩阵的关系

实际的中压配电网是由若干条传输线相互连接而成的, 具有大量的分支和负荷, 网络中的传输线可分为架空线和电缆2种类型, 这些传输线或连接终端节点, 或相互连接。本文将中压配电网的网络连接节点分为终端节点和互联节点两大类: 终端节点指配电线路与配电变压器连接节点; 互联节点指配电线路与配电线路连接节点, 可按线路类型分为纯架空型节点、纯电缆型节点以及架空线-电缆混合型节点。架空线由A、B、C三相导体组成, 三相导体以直连的方式接入节点; 电缆除三相缆芯外, 还包括屏蔽层和铠装层, 三相缆芯同样以直连的方式接入节点, 而屏蔽层和铠装层则在节点处经电阻接地。

由于各节点所接入的设备或线路类型会随着配电网的规划而发生变化, 使得节点前、后的电压和电流关系发生改变, 本文采用节点前、后的输入阻抗矩阵表征这一关系。

2.1 终端节点的输入阻抗矩阵

为便于表示, 将第 j 条传输线 L_j 上从节点 i 看入网络的输入阻抗矩阵记为 $Z_{in,i,j}$ 。终端节点及其输入阻抗矩阵如图2所示。图中, Z_{int} 为变压器阻抗矩阵; 节点2为终端节点, 箭头指示方向为输入阻抗的看入方向, 则 $Z_{in2,1}$ 为传输线 L_1 从节点2处看入的终端节点的输入阻抗矩阵。

配电变压器的数学模型^[9]为:

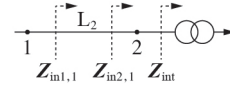


图2 终端节点及其输入阻抗矩阵

Fig.2 Terminal nodes and input impedance matrixes

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_0 & z_1 & z_1 \\ z_1 & z_0 & z_1 \\ z_1 & z_1 & z_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (9)$$

即:

$$U_i = Z_{int} I_i \quad (10)$$

其中, z_0 为相地阻抗; $z_1 = z_0 - 0.5z_2$, z_2 为相间阻抗。

当架空线接入终端节点时, 该节点前的输入阻抗矩阵为:

$$Z_{in2,1} = Z_{int} \quad (11)$$

当电缆接入终端节点时, 由于电缆屏蔽层和铠装层需在终端节点经过电阻接地, 此时该节点前的输入阻抗矩阵为:

$$Z_{in2,1} = \begin{bmatrix} Z_{int} & 0 \\ 0 & Z_g \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中, Z_g 为2阶接地阻抗矩阵。

2.2 互联节点前、后的输入阻抗

图3中传输线 L_1 与传输线 L_2 在节点2处相连, 节点2即为互联节点。中压配电网的互联节点可按传输线的连接方式不同分为架空线-架空线、电缆-电缆、架空线-电缆、电缆-架空线4种类型。

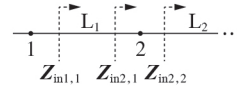


图3 互联节点

Fig.3 Interconnection node

(1)若节点2为架空线-架空线型互联节点, 则 $Z_{in2,1} = Z_{in2,2}$ 。

(2)若节点2为电缆-电缆型互联节点, 则实际运行中, 为保证配电网安全稳定运行, 防止出现感应过电压等现象, 电缆屏蔽层和铠装层需在此点的环网柜处接地, 如图4所示(图中 z_g 为接地阻抗)。则节点2可看作是传输线 L_1 、 L_2 和接地电阻三者的互联节点, 此时 $Z_{in2,1} = (Z_{in2,2}^{-1} + Y_g)^{-1}$, 其中 Y_g 为环网柜接地分支扩展后的5阶导纳矩阵, $Y_g = \text{diag}(0_{3 \times 3}, Z_g^{-1})$ 。

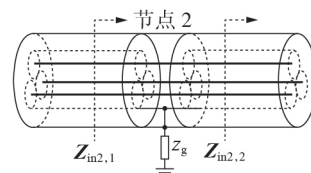


图4 电缆-电缆型互联节点

Fig.4 Cable-cable interconnection connection point

(3)若节点2为架空线-电缆型互连节点,如图5所示,由于架空线由3根导体组成,电缆线由5根导体组成,因此在求取 $Z_{in2,1}$ 前需先对 $Z_{in2,2}$ 进行降阶处理,得到处理后传输线 L_2 在节点2处看入网络的输入阻抗矩阵 $Z'_{in2,2}$,处理过程见附录B。此时 $Z_{in2,1} = Z'_{in2,2}$ 。

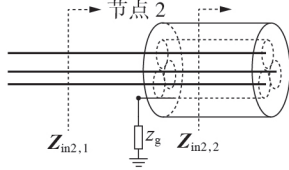


图5 架空线-电缆型互连节点

Fig.5 Overhead line-cable interconnection connection point

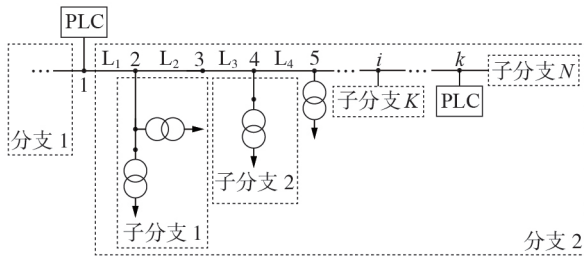
(4)若节点2为电缆-架空线型互连节点,则有:

$$Z_{in2,1} = \begin{bmatrix} Z_{in2,2} & 0 \\ 0 & Z_g \end{bmatrix} \quad (13)$$

实际应用中,可根据传输线类型的不同,分别求取 $Z_{in2,1}$ 与 $Z_{in2,2}$ 的关系。

3 基于输入阻抗的配电载波信道建模

对于任意拓扑结构的配电网而言,当已知载波信源节点的位置后,可将该载波通信配电网看作由许多不同类型的分支构成,如图6所示。信源节点的输入阻抗可由各分支网络的输入阻抗计算求得。下文将根据配电网实际的分支类型,分别给出各类分支的输入阻抗。



其中, z_s 为设备内阻抗。

当 PLC 设备安装于电缆线时, 其耦合方式为卡接式耦合, 由于电缆各个导体处于垂直的磁场环境中, 可认为耦合时对电缆各导体的内阻抗均相等, 故其输入阻抗可以表示为 $\text{diag}(z_s, z_s, z_s, z_s, z_s)$ 。

3.6 基于输入阻抗的载波通信信道建模

对于复杂的配电网, 可自线路末端起逐步求得各个节点的输入阻抗矩阵, 进而得到信源节点的输入阻抗矩阵。以图 6 所示的配电网为例, 设分支 1 网络输入阻抗矩阵为 Z_{in1L} , 分支 2 网络输入阻抗为 Z_{in1R} , 则信源节点的输入阻抗矩阵 Z_{in1} 为:

$$Z_{in1} = (Z_{in1L}^{-1} + Z_{in1R}^{-1})^{-1} \quad (18)$$

根据信源节点的边界条件 $Y_s U_1 + I_1 = I_s$, 结合该点的输入阻抗, 可得信源节点的电压向量为:

$$U_1 = (Y_s + Z_{in1}^{-1})^{-1} I_s \quad (19)$$

其中, U_1 为信源节点的电压向量; Y_s 为信源的内导纳矩阵; I_s 为电流源向量。

若信源节点 1 和收信节点 k 之间为同类型传输线时, 则收信节点 k 和信源节点 1 之间的电压关系为:

$$U_k = \prod_{i=j=1}^{k-1} (\Phi_{11}^i + \Phi_{12}^i Z_{in1,j}^{-1}) U_1 \quad (20)$$

其中, Φ^j 为传输线 L_j 的链参数矩阵。

若信源节点 1 和收信节点 k 之间存在电缆-架空线或架空线-电缆混合线型, 则在混合线路连接处按 2.2.2 节中的内容, 对该节点电压向量进行相应的阶数处理, 然后再进行下一节点的电压向量计算。

由此可得信源节点 1 与收信节点 k 之间的电压响应函数为:

$$H(f) = 20 \log_{10} \frac{U_k(f)}{U_1(f)} \quad (21)$$

其中, f 为发送频率; $U_1(f)$ 、 $U_k(f)$ 分别为信源节点 1、收信节点 k 的导体电压大小。

4 仿真验证

为验证本文建模方法的正确性与有效性, 分别在不同配电网拓扑结构下, 对比分析采用本文方法和 Pspice 电路仿真得到的信道特性。

图 9 为一简单的配电网, 参数设置如下: 传输线 L_1 、 L_2 、 L_{3a} 、 L_{3b} 、 L_4 、 L_5 为架空线路, 其长度分别为 20、100、200、100、100、20 m, 型号均为 LGJ-120/7; 传输线 L_6 — L_8 为电缆, 其长度分别为 100、100、200 m, 线路型号均为 YJV22-3×240; 电缆的屏蔽层和铠装层在线路始端和末端均经 2 Ω 电阻接地; 变压器模型采用文献[15]中实测的 100 kV·A 配电变压器; 信源节点与收信节点的 PLC 设备均采用相地耦合或

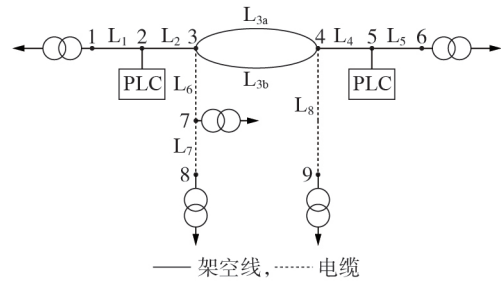


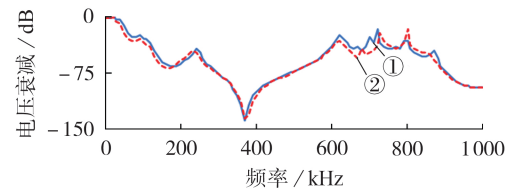
图9 简单配电网

Fig.9 Simple distribution network

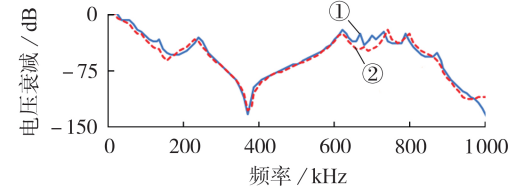
者相间耦合, 设备内阻均取为 50 Ω, 载波频率为 10 kHz~1 MHz, 信源节点的电压为 5 V。

对于有损传输线, 当忽略导线的集肤效应时, 可用多段集总 π 型电气短线来近似模拟分布参数线路^[16-17]。故本文以 10 m 为一段电气短线在 Pspice 中搭建如图 9 所示的集总电路模型。

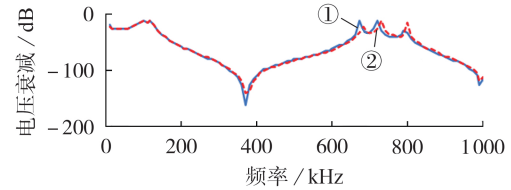
图 10 是在图 9 网络拓扑结构基础上, 采用相地耦合和相间耦合时, 由本文方法和 Pspice 电路仿真得到的电压衰减特性对比图。其中, 图 10(a) 和图 10(c) 为节点 3、4 间只存在 L_{3a} 这一条线路时的结果,



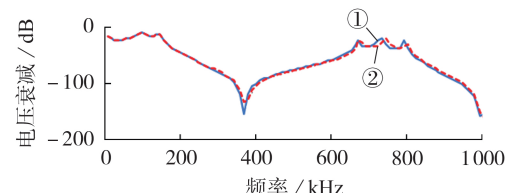
(a) 相地耦合不含环网



(b) 相地耦合含环网



(c) 相间耦合不含环网



(d) 相间耦合含环网

① 电路仿真, ② 本文方法

图10 简单配电网的衰减特性

Fig.10 Attenuation characteristics of simple distribution network

图10(b)和图10(d)为节点3、4间存在 L_{3a} 、 L_{3b} 这2条线路时的结果。

由图10可知,采用本文方法与集总 π 型电路仿真结果基本吻合,验证了本文方法对混合型网络信道建模的正确性与有效性;且本文所提方法不受配电网拓扑结构限制,无论配电网网络结构是环形拓扑结构还是辐射型拓扑结构,该建模方法均能准确地反映信道的传输特性,具有较强的模型适应性。由2种耦合方式所得结果对比可知,不同的耦合方式对载波信号传输特性的影响不同,实际应用中需根据网络拓扑结构及线路类型选取最佳的耦合方式。

为证实本文方法对于混合型中压配电网信道建模的实际有效性,本文在实验室搭建了一段简单的混合型中压配电网,其拓扑结构如图11所示,传输线 L_1 、 L_2 为电缆线,传输线 L_3 为架空线,其中,电缆线为2根6 m长的铜芯铜网RVVP3×0.75屏蔽线,每段电缆屏蔽层均用1 Ω 电阻接地(模拟环网柜接地);架空线为3根5 m长的BV-1 mm²单芯铜线;配电变压器选用510 Ω 固定电阻^[8];测试频率范围为10 kHz至1 MHz。当在节点1注入信号时,节点3与节点4的电压衰减特性的计算结果与仿真结果如图12所示。

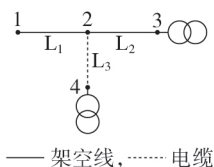


图11 实验室模型

Fig.11 Laboratory model

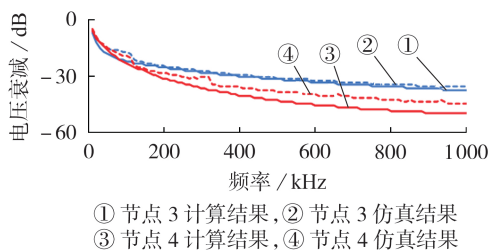


图12 节点3、4的计算结果与仿真结果

Fig.12 Calculation and simulative results of Node 3 and Node 4

由图12可见,采用本文方法的计算结果与实验室仿真结果相差不大,且变化趋势一致,从而验证了本文方法对于混合型配电网信道建模的有效性。节点4的测试与仿真衰减幅值存在误差的原因是由于本文使用3根单芯铜线模拟三相架空线,与实际的线路敷设条件和方式存在一定的差异,使得仿真时架空线的电气参数与实际测试时的电气特性存在一定误差,且结果受到实验室环境中的电磁噪声等因

素的影响。

附录D图D1为河北省某市城区一条10 kV配出线的实际网络拓扑,线路类型及线路长度、信源与受信节点的位置在图中均已标明;电缆和架空线路型号、变压器模型等其他参数与图9相同;信源节点的PLC设备的耦合方式设置为卡接式耦合,原副边耦合电压比设置为3:1^[18],受信节点的耦合方式设置为相地耦合和相间耦合。为验证本文方法在实际复杂配电网中载波信道建模的有效性,基于图D1所示配电网进行仿真验证,本文方法和电路仿真所得的电压衰减特性如图13所示。

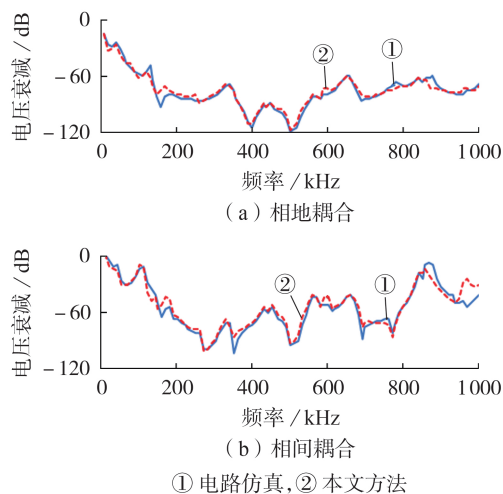


图13 复杂配电网的衰减特性

Fig.13 Attenuation characteristic of complex distribution network

由图13可知,采用本文方法与集总 π 型电路仿真所得电压响应曲线的变化趋势基本一致,验证了本文方法的正确性。实际配电网包含了大量的分支与混合线路,采用本文方法可以有效地建立实际配电网的PLC信道模型,实现对信道特性的分析与预测,为PLC技术在配电物联网中的实用化提供了较好的分析方法和理论依据。

5 结论

高效、快捷、经济的配电网通信技术是配电物联网发展的内在需求,PLC技术以其独有的优势使得其在配电网通信技术中占有重要的地位。实际配电网大多为电缆-架空线混合型网络,对混合型网络载波特性进行分析对PLC技术的推广应用至关重要。本文以配电网的实际线路类型和拓扑结构为基础,使用链参数矩阵表征配电线路的 $2n$ 端口模型,在此基础上,分别得到了配电网终端节点、传输线-传输线分支和环网分支的输入阻抗计算方法,从而求得配电网PLC信源的输入阻抗,在此基础上通过信源节点的边界条件和各条传输线的链参数以及各个节点处的输入阻抗得到PLC受信节点的电压向量,实

现对混合型配电网的PLC信道建模。本文方法原理简单、可移植性强,不受网络拓扑结构限制,能够实现含架空线和电缆线的混合型配电网PLC信道建模,为PLC技术在电力物联网中的规划设计及推广应用提供了重要的理论基础。

由本文方法可知,对于配电网中的复杂分支,建模时仅需知道该分支的输入阻抗参数,网络的传输特性中即包含了其对载波信号的影响。因此对于实际配电网中结构未知的复杂分支而言,可首先利用自顶向下的建模方法,通过实测数据与数学拟合得到该分支的输入阻抗参数,再通过本文方法建立该配电网的信道模型,这样能够进一步提高模型的准确性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 王艳,薛晨,焦彦军. 中压配电网静态中继结合的分级分层电力线载波通信路由算法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12): 8-15.
WANG Yan, XUE Chen, JIAO Yanjun. Hierarchical classification PLC routing algorithm combining static relay with dynamic relay in medium voltage distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 8-15.
- [2] 胡正伟,贺冬梅,谢志远. 基于FastICA算法的电力线通信OFDM信号分离方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(12): 212-217.
HU Zhengwei, HE Dongmei, XIE Zhiyuan. OFDM signal separation method for power line communication based on FastICA algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 212-217.
- [3] 胡正伟,贺冬梅,谢志远. 面向电力线通信的OFDM符号定时同步算法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(5): 144-150.
HU Zhengwei, HE Dongmei, XIE Zhiyuan. OFDM symbol timing synchronization algorithm for PLC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5): 144-150.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] GONZÁLEZ-SOTRES L, FRÍAS P, MATEO C. Power line communication transfer function computation in real network configurations for performance analysis applications[J]. IET Communications, 2017, 11(6): 897-904.
- [8] 王东,王艳,焦彦军,等. 基于局部反射理论的中压配电网电力线通信信道建模[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(2): 178-183.
WANG Dong, WANG Yan, JIAO Yanjun, et al. Channel modeling method of power line communication for medium voltage distribution network based on partial reflection theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(2): 178-183.
- [9] 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.
- [10] 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): 155-161.
ZHAO Hongshan, ZHANG Weitao. BLT equation based channel modeling for medium-voltage power line carrier communication[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 155-161.
- [11] 赵洪山,张伟韬,王艳. 基于改进模式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): 177-184.
ZHAO Hongshan, ZHANG Weitao, WANG Yan. Modified mode decomposition based channel characteristic analysis of power line carrier communication of medium-voltage underground cables[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 177-184.
- [12] 徐政,钱洁. 电缆电气参数不同计算方法及其比较[J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 689-697.
XU Zheng, QIAN Jie. Comparison of different methods for calculating electrical parameters of power cables[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 689-697.
- [13] ENRIQUE A. 柔性交流输电系统在电网中的建模与仿真[M]. 程新功,张勇,王中华,等译. 北京:机械工业出版社, 2011: 43-45.
- [14] 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.
- [15] CATALIOTTI A, COSENTINO V, DI CARA D, et al. Measurement issues for the characterization of medium voltage grids communications[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(8): 2185-2196.
- [16] PAUL C R. Analysis of multiconductor transmission lines [M]. Hoboken, USA: John Wiley & Sons Inc., 2008: 312-314.
- [17] 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.
- [18] 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.

作者简介:



王艳

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

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

赵洪山(1965—),男,河北沧县人,教授,博士,主要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(E-mail: Zhaohshcn@126.com)。

(编辑 任思思)

(下转第33页 continued on page 33)

Influence factor tracing of operation risk for distribution network with distributed generations

HAO Lili¹, WANG Hui², WANG Guodong¹, HUANG Mei³, XU Xiaoyi³, LIU Haitao⁴

(1. College of Electrical Engineering and Control Science, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

2. NARI Group Corporation(State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

3. State Grid Nantong Electric Power Co., Ltd., Nantong 226006, China;

4. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: With a large number of distributed generations integrated, the power supply structure and operating mode of traditional distribution network have changed. Researching the influence factors of operation risk for distribution network with distributed generations is helpful to improve the safety and reliability of power grid. The probabilistic models of distributed generation intermittent output and load demand are established. Monte Carlo method is used to simulate random operation scenarios, Cholesky decomposition ordering is used to make wind speed, light intensity, load and other random variables meet the spatio-temporal correlation, represent scenarios and their probability are determined by scenario clustering, and the operation risk of distribution network is calculated. In addition, the influence factor tracing of distribution network operation risk is carried out in terms of the configuration of distributed generations and important loads, the connection position of tie lines, and the proportion of automatic control switches.

Key words: distributed power generation; distribution network; randomness; operation risk; topological structure; influence factors

(上接第 26 页 continued from page 26)

PLC channel modeling of medium voltage distribution Internet of Things overhead line-cable hybrid line

WANG Yan, WANG Yang, ZHAO Hongshan, CHEN Hao, CHEN Zixuan

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

Abstract: Aiming at the hybrid connection of overhead lines and cables in MV (Medium Voltage) distribution network, a PLC (Power Line Communication) channel modeling method of hybrid MV D-IoT (Distribution Internet of Things) based on input impedance matrix is proposed. Firstly, the structural parameters of overhead lines and cable lines in MV distribution network are analyzed, the phase-mode transformation matrix of two types of lines is derived based on the theory of multi-conductor transmission line, and the chain-parameter equation of the transmission line is written. Secondly, the impedance matrix relationship at the connection point of various types of distribution lines is emphatically analyzed. According to the actual topology of distribution network, the distribution network is divided into different types of network branch, the calculation method of input impedance matrix of various branches is given, and the input impedance of each node and source node in the network is obtained in sequence. Finally, according to the input impedance and boundary conditions of the source node combined with the chain parameter matrix of each transmission line and the input impedance matrix of each node, the voltage vector of any node in the network is obtained, thereby realizing the channel modeling of PLC for hybrid D-IoT. Theoretical analysis and simulation verification show the correctness and effectiveness of the proposed modeling method.

Key words: distribution Internet of Things; power line communication; hybrid lines; multi-conductor transmission lines; input impedance; channel modeling

附录 A

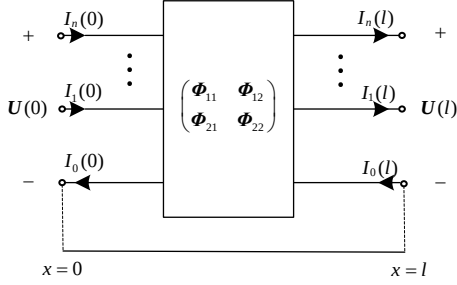


图 A1 多导体传输线 2n 端口形式

Fig.A1 2n port form of multi-conductor transmission line

附录 B

对于图 5 所示的架空线-电缆型节点而言，未降阶处理前，输入阻抗矩阵 $\mathbf{Z}_{in2,2}$ 具有如下形式：

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \\ U_P \\ U_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & b & c & e \\ b & a & b & c & e \\ b & b & a & c & e \\ c & c & c & d & f \\ e & e & e & f & g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_P \\ I_K \end{bmatrix} \quad (\text{B1})$$

即：

$$\mathbf{U}_2 = \mathbf{Z}_{in2,2} \mathbf{I}_2 \quad (\text{B2})$$

其中， $\mathbf{U}_2$ 为传输线 L_2 始端的电压向量； $\mathbf{I}_2$ 为流入传输线 L_2 始端的电流向量； $a-g$ 为 $\mathbf{Z}_{in2,2}$ 中的各个元素。

考虑到电缆在连接点处，屏蔽层和铠装层分别通过电阻 z_g 接地，即：

$$\begin{cases} U_P = -z_g I_P \\ U_K = -z_g I_K \end{cases} \quad (\text{B3})$$

联立式 (B1) 的第 4、5 行方程和式 (B3) 可得：

$$\begin{cases} I_P = p I_A + p I_B + p I_C \\ I_K = q I_A + q I_B + q I_C \end{cases} \quad (\text{B4})$$

其中， p 、 q 可由下面公式计算得到：

$$\begin{cases} p = \frac{fe - (z_g + g)c}{z_g^2 + (g + d)z_g + gd - f^2} \\ q = \frac{fc - (z_g + d)e}{z_g^2 + (g + d)z_g + gd - f^2} \end{cases} \quad (\text{B5})$$

将式 (B4) 代入式 (B1) 中，可得加入接地电阻后节点 2 的输入阻抗矩阵 $\mathbf{Z}'_{in2,2}$ 为：

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a' & b' & b' \\ b' & a' & b' \\ b' & b' & a' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (\text{B6})$$

即：

$$\mathbf{U}'_2 = \mathbf{Z}'_{in2,2} \mathbf{I}_2 \quad (\text{B7})$$

其中， $\mathbf{U}'_2 = (U_A \ U_B \ U_C)^T$ 为电缆缆芯的电压向量； $\mathbf{I}'_2$ 与 $\mathbf{U}'_2$ 表示类似。

$\mathbf{Z}'_{in2,2}$ 为降阶后传输线 L_2 在节点 2 处看入网络的输入阻抗矩阵，其各元素的表达式如下：

$$\begin{cases} a' = a + c p + \dots \\ b' = b + c p + \dots \end{cases} \quad (\text{B8})$$

附录 C

对于图 8 所示环网分支，传输线 L_a 与传输线 L_b 的链参数矩阵为：

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_{2a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ I_{1a} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} U_2 \\ I_{2b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{11} & \mathbf{B}_{12} \\ \mathbf{B}_{21} & \mathbf{B}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ I_{1b} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{C1})$$

其中， $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 分别为传输线 L_a 和传输线 L_b 的链参数矩阵； U_1 和 U_2 分别为节点 1 和 2 的电压向量； I_{1a} 、 I_{1b} 和 I_{2a} 、 I_{2b} 分别为传输线 L_a 、 L_b 始末两端的电流向量； $I_1 = I_{1a} + I_{1b}$ 为流入环网的总电流向量； $I_2 = I_{2a} + I_{2b}$ 为流出环网的总电流向量。

式 (C1) 可写为：

$$\begin{cases} U_1 = (\mathbf{B}_{11} - \mathbf{A}_{11})^{-1} \mathbf{A}_{12} I_{1a} - (\mathbf{B}_{11} - \mathbf{A}_{11})^{-1} \mathbf{B}_{12} I_{1b} \\ U_2 = \frac{1}{2} (\mathbf{A}_{11} + \mathbf{B}_{11}) U_1 + \frac{1}{2} \mathbf{A}_{12} I_{1a} + \frac{1}{2} \mathbf{B}_{12} I_{1b} \\ I_2 = (\mathbf{A}_{21} + \mathbf{B}_{21}) U_1 + \mathbf{A}_{22} I_{1a} + \mathbf{B}_{22} I_{1b} \end{cases} \quad (\text{C2})$$

将输入阻抗表达式 $U_2 = \mathbf{Z}_{in2} I_2$ 代入上式可得：

$$U_1 = \mathbf{A} I_{1a} + \mathbf{B} I_{1b} \quad (\text{C3})$$

$$\mathbf{A}_2 = \mathbf{M}^{-1} \left(\frac{1}{2} \mathbf{A}_{12} - \mathbf{Z}_{in2} \mathbf{A}_{22} \right) \quad (\text{C4})$$

$$\mathbf{B}_2 = \mathbf{M}^{-1} \left(\frac{1}{2} \mathbf{B}_{12} - \mathbf{Z}_{in2} \mathbf{B}_{22} \right) \quad (\text{C5})$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{Z}_{in2} (\mathbf{A}_{21} + \mathbf{B}_{21}) - \frac{1}{2} (\mathbf{A}_{11} + \mathbf{B}_{11}) \quad (\text{C6})$$

由式 (C2) 中的第 1 个公式和式 (C3) 可得 I_{1a} 和 I_{1b} 的关系为：

$$I_{1a} = \mathbf{K} I_{1b} \quad (\text{C7})$$

$$\mathbf{K} = [(\mathbf{B}_{11} - \mathbf{A}_{11})^{-1} \mathbf{A}_{12} - \mathbf{A}_2]^{-1} [(\mathbf{B}_{11} - \mathbf{A}_{11})^{-1} \mathbf{B}_{12} + \mathbf{B}_2] \quad (\text{C8})$$

由于 $I_1 = I_{1a} + I_{1b}$ ，将上式代入式 (C3) 可得环网分支的输入阻抗 $\mathbf{Z}_{in1}$ 为：

$$\mathbf{Z}_{in1} = (\mathbf{A}_2 \mathbf{K} + \mathbf{B}_2)(\mathbf{E}_m + \mathbf{K})^{-1} \quad (\text{C9})$$

其中， $\mathbf{E}_m$ 为 m 阶单位矩阵。

附录 D

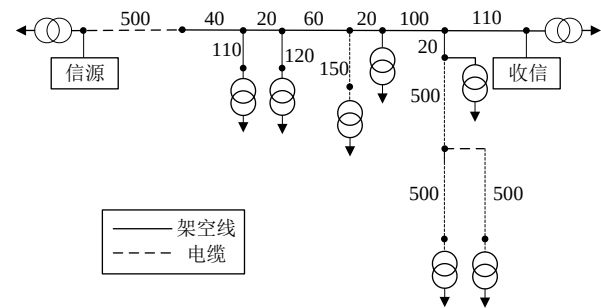


图 D1 河北某城区 10kV 配电出线网络拓扑

Fig.D1 10kV distribution outlet network topology in a certain urban area of Hebei