适用于低压电力线通信的集总参数线缆模型

郭以贺¹,霍 然¹,刘 欣¹,谢志远¹,仇 娟²
(1.华北电力大学电气与电子工程学院,河北省保定市 071003;
2.国网湖北省电力有限公司计量中心,湖北省武汉市 430014)

摘要:为在实验室环境下模拟实际低压电力线缆的信道特性,需要建立电力线通信频段下的线缆 集总参数模型。提出了一种通过电磁仿真方法获得分布电阻和电感,以及采用开路阻抗测量方法 获得分布电容的方法,在此基础上得到线缆的传输参数并将传输参数转换为 Y 参数,建立 π 形等 效电路。基于矢量匹配法求解 π 形电路各支路的无源等效电路,从而建立线缆的集总参数模型。 通过对比分布和集总参数模型下传输和阻抗特性的计算结果,证明了集总模型的准确性。所建模 型可以通过电路级联模拟各种长度的实际线缆。

关键词: 电力线通信; 集总参数模型; 分布参数模型; 矢量匹配法; 传输线

0 引言

低压电力线载波通信利用现有电力线网络传输 数据,在用电信息采集领域获得了广泛的应用,是实 现能源互联网信息传输的有效手段^[1-3]。低压电力 线网络结构复杂,从配电变压器到各个用户电表的 电力线路呈树枝状,每个分支长度不尽相同。不同 网络拓扑条件下,电力线信道的传输和阻抗特性差 别很大。

为了开展电力线通信产品的研发工作,或者测 试不同厂家载波芯片的通信性能,需要在足够多的 典型现场下进行测试。实际低压现场的信道特性各 不相同,且具有较大的随机性,单一具体场景的测试 结果难以为通信性能测试提供全面和科学的支持, 测试和研究机构都有在实验室环境搭建信道模拟系 统的需求。由于实际低压电力线路的长度可能达到 数百米以上,且带有若干分支,在实验室条件下进行 实物模拟所需空间过大,且难以灵活构建各种场景。 因此,有必要建立实际线路的等效集总参数电路,利 用该电路模拟不同长度线路的传输和阻抗特性。

受测试场景搭建的限制,大量研究工作^[4-6]都是 在数十米以内较短的线路上进行,此时电力线路的 传输线效应相对较弱,对分布参数的精度要求不必 很严格,所得结论推广到实际较长且结构复杂的线 路上时容易产生较大误差。文献[7]将 50 m 长线 路用 π 形电阻-电感-电容(RLC)电路模拟,采用电 路级联的方法,在实验室搭建实际线路的模型。文 中并未介绍 π 形 RLC 电路参数计算方法,所得仿真 与计算结果的误差偏大。文献[8]采用基于电阻网 络的可调衰减器和模拟阻抗测试电力线载波产品的 通信性能,该方法无法真实模拟实际线路衰减和阻 抗的频变性,而电力线路的深度频率选择性衰落和 输入阻抗的复杂频率特性正是影响通信性能的重要 方面。

为了解决文献[8]未能考虑电力线缆的实际参数的问题,本文基于电磁仿真和实际测量得到了线 缆的单位长度参数,基于矢量匹配法(vector fitting method)求解了π形电路结构和元件参数。多种分 支和负载情况下的测试表明,本文所建模型具有更 好的精度。所提建模方法具有普遍适用性,是对实 际线缆传输和阻抗特性的全面模拟。

1 分布参数线缆模型

1.1 基于传输线理论的模型参数分析

对于 40~500 kHz 频率范围内的低压电力线 路可以用传输线方程描述。图 1 为单相电力线路的 单位长度分布参数模型。其中单位长度参数包括电 阻 R、电感 L、电容 C,并根据实际情况忽略了电 导 G。

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)j\omega C}$$
(1)

收稿日期: 2018-06-08; 修回日期: 2018-09-02。

上网日期:2018-11-30。

河北省科技计划资助项目(17211704D);中央高校基本科研 业务费专项资金资助项目(2015MS97)。

根据单位长度参数,可以进一步得到传输线的 二次参数。其中,传播常数为^[9]:

式中:α为衰减常数;β为相位常数;ω为角速度。



Fig.1 Distribution parameters of power line

特性阻抗为:

$$Z_{\rm C} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{j\omega C}} \tag{2}$$

基于二次参数和传输线终端所接信号源和负载,可以求解线路的阻抗和传输特性。设信号源内 阻为 Z_s,负载阻抗为 Z_L,则信源端反射系数 Γ_s 和 负载反射系数 Γ_L 为:

$$\Gamma_{\rm S} = \frac{Z_{\rm S} - Z_{\rm C}}{Z_{\rm S} + Z_{\rm C}} \tag{3}$$

$$\Gamma_{\rm L} = \frac{Z_{\rm L} - Z_{\rm C}}{Z_{\rm L} + Z_{\rm C}} \tag{4}$$

设线路长度为*l*,则从源端看进去的输入阻 抗为:

$$Z_{\rm in} = Z_{\rm C} \frac{1 + \Gamma_{\rm L} e^{-2\gamma l}}{1 - \Gamma_{\rm L} e^{-2\gamma l}}$$
(5)

一段均匀电力线路两端的电压和电流可以用反 向传输参数矩阵描述,即

$$\begin{bmatrix} V_{I} \\ I_{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{0} \\ I_{0} \end{bmatrix}$$
(6)

式中: V_l 和 I_l 分别为终端电压和电流; V_0 和 I_0 分别为源端电压和电流。

4个传输参数分别为:

$$\begin{cases}
A_{11} = \cosh \gamma l \\
A_{12} = -Z_{c} \sinh \gamma l \\
A_{21} = -Z_{c}^{-1} \sinh \gamma l \\
A_{22} = \cosh \gamma l
\end{cases}$$
(7)

1.2 单位长度参数求解

电力线载波通信频率较高,电流受趋肤效应的 影响,R将大大增加。实际低压电缆的相线和零线 的间距比较小,高频电流会产生邻近效应,从而进一 步导致 R 变大。图 2 为本文测试用线缆的截面图。



由于 R 和 L 难以得到准确的解析解,一般要通 过基于有限元法的数值计算或仿真求解^[10-12],本文 基于 ANSYS 软件的二维电磁场仿真工具提取 R 和 L。结果表明,图 2 线缆的 R 基本按照频率的均 方根增长,最小值为 0.023 4 Ω/m ,最大值为 0.130 0 Ω/m 。电感值随频率递减,最大值为 0.500 μ H/m,最小值为 0.409 μ H/m。

真空中间距为 s, 半径为 r 的两个圆导线的单位长度电容为:

$$C_0 = \frac{\pi \varepsilon_0}{\operatorname{arccosh} \frac{s}{2r}} \tag{8}$$

式中:ε。为真空的介电常数。

实际低压线缆常使用聚氯乙烯(PVC)等材料作 为绝缘层和护套。PVC的高频介电常数难以直接 测量,而且铜导线周围所使用的绝缘材料也往往不 止一种,同时中间有空气存在,因此无法使用 式(8)直接计算实际单位长度电容 C。本文结合对 一段电力线的开路阻抗进行测量,间接求得 C,具有 直接、准确、简单的优点。

根据传输线理论,长度为*l*的传输线在终端开 路时的输入阻抗为:

$$Z_{\rm ino} = Z_{\rm C} \frac{1 + e^{-2\gamma l}}{1 - e^{-2\gamma l}} \tag{9}$$

S₂₁定义为端口 2 接匹配负载时,端口 1 到端口 2 的电压传输系数,如下式所示。

$$S_{21} = \frac{V_l}{0.5V_{\rm s}} = \frac{(1 + \Gamma_{\rm L})(1 - \Gamma_{\rm s})e^{-\gamma l}}{1 - \Gamma_{\rm s}\Gamma_{\rm L}e^{-2\gamma l}} \qquad (10)$$

式中:Vs为信号源电压。

由于在 500 kHz 以下频段电导 G 的影响基本 可以忽略,且线路满足低损耗线条件 R≪ωL。

式(1)和式(2)的近似结果为:

$$\gamma \approx \frac{R}{2Z_{\rm C}} + j\omega \sqrt{LC} \tag{11}$$

$$Z_{\rm c} \approx \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{12}$$

式(9)可简化为:

$$Z_{ino} \approx Z_{C} \frac{1 + e^{-\frac{Rt}{Z_{C}}} e^{-2j\omega t \sqrt{LC}}}{1 - e^{-\frac{Rt}{Z_{C}}} e^{-2j\omega t \sqrt{LC}}}$$
(13)

从 $\omega = 0$ 开始,随着频率的升高, γ 变大, $|Z_{ino}|$ 变小,阻抗基本呈容性,其后 Z_{ino} 的模值和相角出现 振荡,振荡周期由L,C和线路长度l决定。为了确 定C的具体数值,本文采用非线性优化算法,根据l和L的数值,以C为待求变量,以式(13)计算结果 和实际测量结果均方误差最小为目标。C的初始值 由ANSYS软件的电容仿真结果为基础,仿真时取 PVC 的相对介电常数为 3。本例中求解得到的 0.03~1 MHz 频段内 C 的数值为 56.1 pF/m, 波动 范围不超过 0.5%。

1.3 分布参数模型验证

为了验证分布参数模型的准确性,采用矢量网络分析仪测量 S 参数,进一步得到一段均匀电力线的阻抗和衰减特性。

对于一段末端开路的电力线,在始端将线路与 网络分析仪的 PORT1 端口相连,并测量其反射系 数 S₁₁,可进一步得到其输入阻抗为:

$$Z_{\rm in} = 50 \, \frac{1 + S_{\rm 11}}{1 - S_{\rm 11}} \tag{14}$$

图 3 对比了基于式(13)计算得到的 160 m 线缆 开路阻抗和实际测量结果,可见两者的差别很小。 为了体现模型的适用性,文中所有计算和分析的频 段范围从窄带电力线通信使用的 40~500 kHz 延 扩至 0.03~1 MHz。



Fig.3 Open-circuit impedance of 160 m cable

由图 3 可见,在低频段,阻抗相角接近于-90°, 基本 呈 容性,模值随着频率的升高而变小,在 0.33 MHz 附近达到第一个极值点。在 0.33 ~ 0.66 MHz 频段,开路阻抗相角接近于 90°,基本呈 感性,阻抗模值随频率的升高而变大。此后随着频 率的升高,开路阻抗的模值和相角周期性振荡。这 也体现了均匀传输线开路阻抗的频变特性。

将一段电力线的两端分别接网络分析仪的 PORT1和PORT2,可以测量其传输特性。在端口 2所接匹配负载为网络分析仪的参考阻抗 Z_0 ,而非 传输线的特性阻抗 Z_c 。当使用网络分析测量时, $Z_s=Z_L=Z_0=50 \Omega$ 。

图 4 为基于式(10)计算得到的 160 m 线路 S₂₁,以及采用矢量网络分析仪实际测量的数值。由 图 4 可见,两者模值和相位的差别都很小,这也进一 步验证了分布参数模型的准确性。



2 基于矢量匹配法的集总参数建模

为了建立一段线缆的集总模型,需要基于 Y 参数建立 π 形等效电路。由于线缆分布参数的均匀性,等效电路中两个并联分支相同。如图 5 所示,本 文以 10 m 为单位建立电力线缆的 π 形等效电路, 在此基础上可以通过电路级联,模拟各种长度的线 缆特性, Y_1 , Y_2 为线路导纳。



图 5 π形等效电路 Fig.5 Equivalent circuit of π type

将式(7)表示的传输参数转化为 Y 参数矩阵, 并根据其对称性,得到 Y 参数矩阵 y 表达式为:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{12} & Y_{11} \end{bmatrix}$$
(15)

式中:Y₁₁和 Y₂₂分别为端口1和2的自导纳;Y₁₂为 端口1和端口2的互导纳。

集总参数电路元件数值与Y参数的关系为:

$$Y_1 = -Y_{12}$$
 (16)

$$Y_2 = Y_{11} + Y_{12} \tag{17}$$

本文使用矢量匹配法建立 π 形电路各元件的无 源等效电路。在有理函数逼近的方法中,矢量匹配 法是一种高效稳定的方法,该方法于 1999 年提出, 随后文献[13-15]对该方法进行了无源性和极点位 置优化处理,使其在有理函数逼近时性能更为优越。

矢量匹配法首先对阻抗测量结果进行有理函数 逼近,得到其极点和留数。然后,对极点和留数进行 分类处理,根据不同类别计算出 RLC 串并联等效电 路的参数值。该方法考虑了频变参数的影响,所建 立的 RLC 串并联电路可直接用于电路实现。 首先求解 10 m 线路的 Y 参数,根据式(17)得 到 Y_2 ,结果表明 Y_2 的实部远小于虚部,为了使集总 参数电路在满足精度要求的前提下尽量简单,忽略 实部数值, Y_2 等效为 281 pF 的电容,该值基本上等 于单位长度电容 C 数值的 5 倍。考虑到 π 形等效 电路有两个并联分支 Y_2 ,故其总的等效电容为 C 的 10 倍,这也体现了集总模型和分布参数模型的内在 联系。

同理,Y₁ 是 10 m 线路的分布电阻和分布电感 串联结果的等效,矢量匹配的结果综合反映了两者 的频变特性。综合考虑电路综合结果的精度和复杂 度,Y₁ 由 2 个电阻电感串联分支组成。最后得到的 电路综合结果如图 6 所示。

20.38	3 Ω 22.35 μH	
0.188	<u>3Ω 5 μH</u>	
\pm 281 pF	281 pF	
0		

图 6 10 m 线缆的集总参数模型 Fig.6 Lumped parameter model of 10 m cable

图 7 对比了采用 π 形集总参数模型和 10 m 长 分布参数模型得到的 Y 参数,考虑到 Y 参数矩阵的 对称性,只比较 Y₁₁和 Y₁₂的实部和虚部数值。由 图 7 可见各条曲线的误差都很小,集总参数模型具 有很好的精度。



以 10 m 为单位长度进行集总参数建模,方便 采用级联方式进行实际数百米长线路的模拟,级联 的阶数不至于过多,对于余下的小于 10 m 的部分, 可以采用本文方法单独建立集总电路。实践表明, 建立集总模型的单位长度越大, π 形等效电路的内 部结构越复杂。当 Y_1 的实部在整个频段内出现负 数的比例过高时,矢量匹配法及其无源优化方法甚 至会失效。针对本文使用的线缆及建模的频段,单 位长度不宜超过 30 m。综合以上因素,本文选择 10 m 作为集总建模的单位长度。

3 模型验证

建立了特定长度电力线的集总参数模型后,可 以通过电路级联的方法获得其他长度下的电力线等 效模型。为了进一步验证集总参数模型的准确性, 搭建了如图 8 所示的电力线网络,节点 1 和 2 分别 接网络分析仪的发送和接收端口。网络具有两个长 度分别为 60 m 和 20 m 的分支线路,主干线路由 3 段线路组成,长度为 120 m。



考虑到低压载波通信中主要关注信道的传输和 阻抗特性,在节点3和4为开路状态下,图9比较了 采用集总模型和实际测量得到的S₂₁数值。与文 献[7]相比,传输模型的精度有了显著的提高。



图 10 比较了在节点 2,3,4 都为开路状态下,采 用集总模型和实际测量得到的节点 1 处的输入阻 抗。与文献[8]相比,本文所提的集总模型,能有效 地模拟信道传输和阻抗特性的频变规律,是对实际 长线传输效应的准确表征。

与图 3 无分支线路相比,图 10 所示开路阻抗中 容性和感性交替变化的频率间隔不再近似相等。受 分支线路的影响,在 0.74 MHz 附近频段后,开路阻 抗再次呈现感性,模值也随之继续增大,直至 0.97 MHz 后开始呈现容性。电力线信道特性受线 路分布参数、拓扑结构和用电设备等因素的影响,传 输和阻抗特性往往会呈现复杂的频率选择性。为了 进一步验证集总模型的适用性,搭建了其他不同负 载和分支的场景,详细的对比结果见附录 A 和附录 B。



Fig.10 Input impedance with all branches open

大量测试表明,在低压窄带电力线通信的 500 kHz以下频段,输入阻抗特性和 S_{21} 代表的传输 特性都有很好的吻合度。随着频率的升高,误差逐 渐变大,主要原因在于为了使集总模型结构尽量简 单,忽略了 Y_2 的实部。整体而言,集总模型在 1 MHz频段内具有较好的精度。

4 结语

本文研究了 0.03~1 MHz 频段单相低压线缆 的分布参数模型,基于电磁仿真和实际测量得到了 线缆的单位长度参数。基于矢量匹配法得到了π形 等效电路的元件数值,分析了集总电路模型和分布 参数模型的关系,所得集总模型原理清晰且结果准 确性较高,通过网络级联方法可以方便得到各种长 度线缆模型。所建模型能准确描述线缆本身的传输 和阻抗特性,适用于实验室环境下信道特性的模拟。 测试结果验证了模型在多分支及不同负载条件下的 准确性。

需要指出的是,本文主要针对窄带电力线通信 场景下的线缆进行了集总参数建模。针对宽带情况,为保证集总模型的单位长度不至于过小,需要进 一步研究矢量匹配法的无源优化算法,建立集总模 型所需的无源等效电路。此外,以多导体传输线理 论为基础,针对常见多芯低压线缆建立集总参数模 型,也是值进一步研究的问题。

附录见本刊网络版(http://www.aeps-info. com/aeps/ch/index.aspx)。

参考文献

[1] 刘雯静,郭静波.面向双向互动需求的高速窄带电力线通信组网 与路由机制[J].电力系统自动化,2016,40(2):12-19.DOI: 10.7500/AEPS20150526009. LIU Wenjing, GUO Jingbo. Networking and routing of highspeed narrowband power line communications for bidirectional interaction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2): 12-19. DOI: 10.7500/AEPS20150526009.

[2] 刘晓胜,崔莹,徐殿国.低压电力线通信组网性能优化方法[J].电 力自动化设备,2017,37(12):16-21. LIU Xiaosheng, CUI Ying, XU Dianguo. Performance

optimization for low voltage power line communication [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 16-21.

- [3] 卢文冰,张慧,赵雄文,等.网络参数对低压宽带电力线信道的影响[J].电工技术学报,2016,31(1):221-229.
 LU Wenbing, ZHANG Hui, ZHAO Xiongwen, et al. The effect of network parameters for low-voltage broadband power line channels [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 221-229.
- [4] 付科源,郑涛,张保会,等.电力线载波通信中电网结构参数对信 道容量的影响[J].电力系统自动化,2015,39(13):94-100.DOI: 10.7500/AEPS20140707013.
 FU Keyuan, ZHENG Tao, ZHANG Baohui, et al. Effect of power network parameters on channel capacity in power line carrier communication [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 94-100. DOI: 10.7500/ AEPS20140707013.
- [5] 王毅,邓子乔,温慧安,等.基于多节点的低压宽带电力线信道建 模方法研究[J].电力系统保护与控制,2018,46(3):18-25.
 WANG Yi, DENG Ziqiao, WEN Huian, et al. Study on multinode broadband power line channel modeling[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 18-25.
- [6] THOMAS M S, CHANDNA V K, ARORA S. Indoor power line channel characterization for data transfer and frequency response measurements [C]// International Conference on Sustainable Mobility Applications, Renewables and Technology, November 23-25, 2015, Kuwait City, Kuwait: 1-8.
- [7] 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. DOI:10.7500/AEPS20160307006.
 WANG Yan, WANG Dong, ZHAO Hongshan. Power line carrier 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. DOI: 10.7500/AEPS20160307006.
 [9] 邻航 何咸 陈淦 等 宽进电力线载波点对点通信性能测试来会
- [8] 邹航,何威,陈瑜,等.宽带电力线载波点对点通信性能测试平台 设计[J].电测与仪表,2016,53(21):100-105.
 ZOU Hang, HE Wei, CHEN Yu, et al. Design of point to point communication performance testing platform for broadband power line carrier[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2016, 53(21): 100-105.
- [9] CLAYTON R P. Analysis of multiconductor transmission lines[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.
- [10] LOVRIC D, BORAS V, VUJEVIC S. Accuracy of approximate formulas for internal impedance of tubular cylindrical conductors for large parameters [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2011, 16(1): 171-184.
- [11] CIRINO A W, DE PAULA H, MESQUITA R C, et al. Cable parameter variation due to skin and proximity effects: determination by means of finite element analysis[C]// 35th

Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, November 3-5, 2009, Porto, Portugal: 4073-4079.

- [12] 逯贵祯,郭庆新,曾冬冬.多导体传输线的邻近效应和分布参数研究[J].电波科学学报,2016,31(3):611-615.
 LU Guizhen, GUO Qingxin, ZENG Dongdong. Proximity effect and the distribution parameters of multi-conductor transmission line[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2016, 31(3): 611-615.
- [13] GUSTAVSEN B, SEMLYEN A. Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting[J]. IEEE Transations on Power Delivery, 1999, 14(3): 1052-1061.
- [14] GUSTAVSEN B, SEMLYEN A. Enforcing passivity for nadmittance matrices approximated by rational functions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(1): 97-104.

[15] GUSTAVSEN B. Improving the pole relocating properties of vector fitting[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1587-1592.

郭以贺(1979—),男,通信作者,博士,讲师,主要研究方向:电力线通信和配电网自动化。E-mail: yihe_guo@163. com

霍 然(1992—),女,硕士研究生,主要研究方向:电力 线信道建模。

刘 欣(1980—),男,博士,副教授,主要研究方向:电力 系统电磁兼容和电力系统过电压数值计算。

(编辑 鲁尔姣)

Lumped Parameter Cable Model for Low Voltage Power Line Communication

GUO Yihe¹, HUO Ran¹, LIU Xin¹, XIE Zhiyuan¹, QIU Juan²

(1. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Metrology Center of State Grid Hubei Electric Power Co. Ltd., Wuhan 430014, China)

Abstract: In order to simulate the channel characteristics of actual low voltage power cable in laboratory environment, the lumped parameter cable model should be established under the power line communication band. A method is proposed to obtain the resistance and inductance by electromagnetic simulation and capacitance combined with the method of measuring and calculating distributed capacitances in open circuit tests. And on this basis, the transmission parameters of the cable are obtained. The transmission parameters are converted to Y parameters, and the π -type equivalent circuit is established. Based on the vector matching method, the passive equivalent circuits of each branch of the π -type equivalent circuit are solved, and the lumped parameter cable model is established. By comparing the calculation results of transmission and impedance characteristics with the distributed and lumped parameter models, the accuracy of lumped model is proved. The model can simulate actual cables of various lengths by circuit cascades.

This work is supported by Science and Technology Project of Hebei Province (No. 17211704D) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2015MS97).

Key words: power line communication; lumped parameter model; distributed parameter model; vector fitting method; transmission line