

电力线信道通信特性影响因素分析

王 勇¹, 张 明¹, 马洲俊¹, 司 宇², 李秋生¹, 黄毕尧²

(1. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司, 江苏 南京 210019; 2. 全球能源互联网研究院有限公司, 北京 102200)

摘 要:电力线为传输电能而设计,复杂的配电网拓扑结构使得电力线通信信道环境恶劣,信道特性变化规律复杂,严重影响信号传输的质量和效率。为应对上述问题,利用传输线二端口网络,建立电力线信道的数学模型,进而仿真分析电网结构及网络参数对信道电压幅频特性以及网络输入阻抗特性的影响。通过分析发现,信号衰减峰谷值的位置受主线路长度的影响较小,分支线路长度影响信号衰减峰谷个数。并且,信道电压传输幅频特性的衰减峰频率处,网络的输入阻抗值相等。

关 键 词:电力线通信;通信特性;传输线理论;输入阻抗

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.03.015 中图分类号:TM734 文章编号:1673-9140(2021)03-0157-08

Analysis of the factors influencing the communication characteristics of power line channel

WANG Yong¹, ZHANG Ming¹, MA Zhoujun¹, SI Yu², LI Qiusheng¹, HUANG Biyao²

(1. Nanjing Power Supply Branch of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China;
2. Global Energy Internet Research Institute Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: The power line is designed for the electricity transmission. The complicated distribution network topology induces the deteriorated communication channel and complex channel characteristics of the power line, which deteriorates the quality and efficiency of the signal transmission. To deal with the above problems, the mathematical model of the power line channel is established by utilizing the two-port network of the transmission line. Based on the model, it is simulated and analyzed that the influence of the power network structure and network parameters on magnitude-frequency characteristics of the channel voltage and network input impedance. It is found that in the magnitude-frequency characteristics, the peak and valley positions have a low correlation with the length of the main line, and the number of the peak and valley has a high correlation with the length of the branch line. Besides, the input impedance of the network is equal at the peak frequency.

Key words: power line communication; communication characteristics; transmission line theory; input impedance

电力线通信技术(power line communication, PLC)以电力线为媒介,将通信信号耦合到电力线路上进行数据传输,相比较于其它的通信方式,PLC因不需要额外的铺设线路且后期运营费用较少而被广泛应用于用电信息采集、远程抄表、智能家居等系统中^[1]。随着智能电网以及电力物联网的推进^[2-9],电力线通信技术无疑会得到越来越多的关注。然而,电力线被设计的初衷是为了电能的输送,它的信道特性受时间和频率的影响很大,此外配电网拓扑结构复杂多变,负载的随机切入切出、开关器件动作等都会影响电力线通信的载波性能^[10]。总体而言,电力线通信信道具有干扰严重、时变性大、工作环境恶劣等特点,因此对电力线信道通信特性的研究是尤为重要的。

目前电力线信道所面临的主要障碍是信号的频率选择性衰落问题,导致这一现象的主要原因是网络中交叉节点处的阻抗失配以及线路上携带的分支结构等^[11],而阻抗的失配往往又是由于系统拓扑结构的改变而引起,因此研究线路的长度、沿线分支以及沿线负荷的变化对信道通信特性的影响尤为关键。

建立精确的信道模型,是展开对电力线信道通信特性研究的前提,按模型参数的获取方法,电力线信道的建模方法可分为自上而下法和自下而上法^[12-13]。自上而下法的主要思想是将电力线信道看作为“黑盒”,不考虑网络的内部结构特性,利用多径模型拟合一个确定的参数函数来模拟载波信道的频率响应,其理论基础是信号传输的多径效应,但此信道模型为非线性模型且模型参数的获取较为困难。自下而上法结合传输线理论,从各段电力线的特性与长度、负载的阻抗等基本物理参数出发,利用传输线相关理论计算信道频率响应的表达式,此种建模方法虽然计算量较大,但便于分析网络中能够影响信道通信特性的各种参数以及影响的规律。

目前电力线通信信道的相关研究中,有关配电网拓扑以及网络参数对电力线信道通信特性的研究匮乏,而分析这些因素对信道通信特性的影响规律,对提升电力线通信的性能以及载波机的调制有着重大的理论意义和实用价值。为此,该文基于传输线理论,建立电力线信道的二端口数学模型,进而通过Matlab 仿真分析信号源频率在 2~30 MHz 宽带频

率范围内电网结构以及网络参数对电力线信道通信特性的影响规律。

1 电力线信道通信特性分析

1.1 输入阻抗特性

将信道的输入端想象成为电阻的两端,这个电阻的阻值即为信道的输入阻抗值^[14],其在制约着信号耦合效率的同时,也影响着整个网络的输入功率,是表征 PLC 信道的重要参数之一。受信号频率、网络拓扑以及系统中随机负荷的影响,很难对其进行准确的测量,此外,输入阻抗也会受时间的影响,且通常情况下白天的值比晚上低得多。

1.2 衰减特性

高频信号的衰减是描述电力线信道通信特征的另一重要特性,其主要由线路衰减和耦合衰减两部分组成,且通常情况下,线路衰减是造成信道衰减特性的主要原因。线路的衰减与信号的传输距离及信号源频率都有着密切的联系,通常情况下,信号的衰减强度随传输距离的增大而增大,然而由于地区之间的差异(例如城乡之间的用电差异)以及电力线内部的不均匀分布,信号往往会出现驻波、反射、多径传输等现象,使得信号的衰减往往与传输距离之间的关系变得尤为复杂。而耦合衰减则主要是由于信号被耦合至线路上的过程中,发送电路的输出阻抗与电力线的输入阻抗不匹配引起的。

1.3 噪声干扰特性

噪声干扰是 PLC 信道的另一重要特性,噪声具有较强的随机性,且相互之间是独立存在的,时间、地点、设备等都影响着噪声的分布,这也使得对噪声特性的分析较为困难。PLC 信道内的噪声类型可具体划分为背景噪声和脉冲噪声 2 大类^[15],其中,背景噪声的变化程度较为平缓,并且受时间的影响程度较弱,而脉冲噪声的变化程度尤为强烈,并且时变性非常强,因而很难对其进行定量的描述。同时,脉冲噪声也会对功率谱上的密度范围产生剧烈的影响,甚至会直接导致信息在传输过程中出现严重的错码情况,从而严重制约了电力线通信的传输质量。

尽管 PLC 信道内的噪声干扰特性很难去定量描述,但噪声本身有着一定的规律可循,主要包括随

机性、连续性、周期性以及多变性。

2 电力线信道模型的建立

2.1 传输线理论

电力线通信中载波信号的最高频率可达数十兆赫兹,此时应将电力线视为传输线^[16],它的频率远大于工频 50 Hz,对应的波长也不再远大于电力线路的长度,电压、电流的值将会随着空间的变化而变化,这时应该考虑传输线路的分布参数模型。此时对应线路的首末端电压、电流为

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cosh(\gamma l) + Z_t \dot{I}_2 \sinh(\gamma l) \\ \dot{I}_1 = \dot{U}_2 \cosh(\gamma l) + \dot{U}_2 \dot{I}_2 \sinh(\gamma l) / Z_t \end{cases} \quad (1)$$

式中 l 为电力线的长度, m; γ 、 Z_t 分别为线路的传播常数以及特征阻抗,当线路的分布参数给定时,有:

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L) / (G + j\omega C)} \quad (2)$$

$$Z_t = \sqrt{(R + j\omega L) (G + j\omega C)} \quad (3)$$

式中 R 、 L 、 G 、 C 分别为电力传输线路的单位长度电阻(mΩ/m)、电感(nH/m)、电容(pF/m)、电导值(S/m)。

2.2 二端口网络

将传输网络看作为一个简单的二端口网络,如图 1 所示。由射频电路的定义可知,端口网络可由参量矩阵进行表征^[17],基于此,该文选用参量矩阵对该端口网络进行描述,即

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \cdot \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

此外,由闭合回路电压方程可得到:

$$\begin{cases} \dot{U}_s = \dot{U}_1 + \dot{I}_1 Z_s \\ \dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_p \end{cases} \quad (5)$$

联立式(4)、(5)即可得到网络的输入阻抗表达式,即

$$Z_{in}(f) = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{T_{11} Z_p + T_{12}}{T_{21} Z_p + T_{22}} \quad (6)$$

信道频率响应可以用负载端电压与源端电压的比值表示,即

$$H(f) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_s} = \frac{Z_p}{T_{11} Z_p + T_{12} + T_{21} Z_s Z_p + T_{22} Z_s} \quad (7)$$

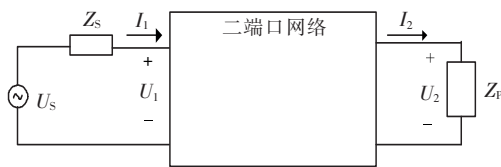
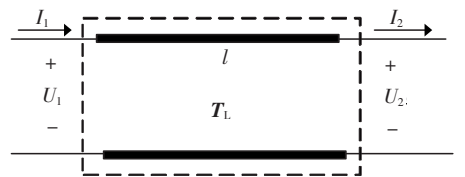


图 1 二端口网络

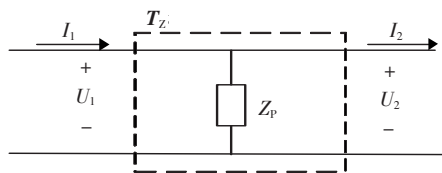
Figure 1 Two port network

2.3 网络传输矩阵分析

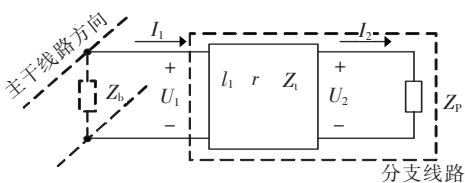
实际的传输网络常见的主要由三部分组成:传输线缆、并联阻抗以及分支线路,利用 2.2 节所述的二端口网络模型,分别求出每个分支网络所对应的参数矩阵,通过级联即可得到整个网络的传输矩阵。根据式(6)、(7)即可求得网络的输入阻抗以及信道频率响应。其中,分支网络二端口如图 2 所示。



(a) 传输线二端口网络



(b) 并联阻抗二端口网络



(c) 分支线路二端口网络

图 2 网络分解示意

Figure 2 Network decomposition diagram

2.3.1 传输线传输矩阵

传输线缆的等效二端口网络如图 2(a)所示,将传输线缆为均匀传输线时,由式(1)可得到传输线缆的参数矩阵,即

$$\mathbf{T}_L = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_t \sinh(\gamma l) \\ \sinh(\gamma l) / Z_t & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 l 为传输线缆的长度。 \mathbf{T}_L 传输参量矩阵,表征传输线上任意两点间的电压与电流的变化关系。

2.3.2 并联阻抗参量矩阵

传输网络中常伴有独立的并联阻抗分支,其等效二端口网络如图 2(b)所示,由基尔霍夫电压、电流定律得到,即

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 \\ \dot{I}_1 = \dot{U}_2/Z_P + \dot{I}_2 \end{cases} \quad (9)$$

由式(4)可得到并联阻抗的传输参量矩阵表达式,即

$$\mathbf{T}_Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_P & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.3.3 分支线路传输矩阵

实际的传输网络中,一条传输线往往带有一条或多条分支线路,甚至有的分支线路会继续伴随附加的分支线路。这种情况和并联阻抗的情况类似^[18],其等效端口网络图如图 2(c)所示。当一条线路带有分支线路,且该分支线路的负载阻抗已知时,可以将其等效看作为跨接在主干线路两端的并联阻抗,阻抗大小 Z_b 可以参考式(6)求得,则分支线路的传输参量矩阵表达式为

$$\mathbf{T}_b = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_b & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{Z_1 \cosh(\gamma l) + Z_P \sinh(\gamma l)}{Z_P Z_1 \cosh(\gamma l) + Z_1^2 \sinh(\gamma l)} & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

3 电力线信道通信影响因素分析

3.1 主线路长度对电力线信道通信特性的影响

如上所述,给定任意传输网络拓扑,建立其信道的数学模型。图 3 所示为带有一条分支线路的简单电力网络,通过对相关参数的设置,利用仿真软件 Matlab 仿真分析主干线路长度对电力线信道通信特性的影响,其中,线路的分布参数取值: $R = 1 \text{ m}\Omega/\text{m}$, $L = 276 \text{ nH}/\text{m}$, $C = 96 \text{ pF}/\text{m}$, $G = 0$ 。取末端负载阻抗 Z_L 和信号源的内阻 Z_s 均为 50Ω ,支路负载阻抗 Z_{L1} 为 5Ω ,沿线支路 l_1 保持为 15 m 不变,依次增加主干线路的长度,分别设置为 30 m 、 100 m 、 500 m 、 1 km ,仿真分析在 $2 \sim 30 \text{ MHz}$ 宽带频段范围内,信道电压幅频特性以及网络输入阻抗

特性的变化规律,仿真结果如图 4 所示。

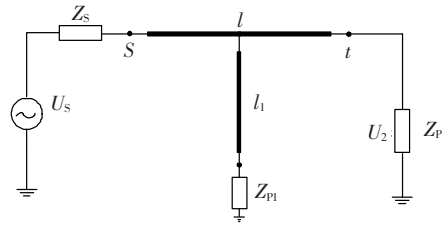
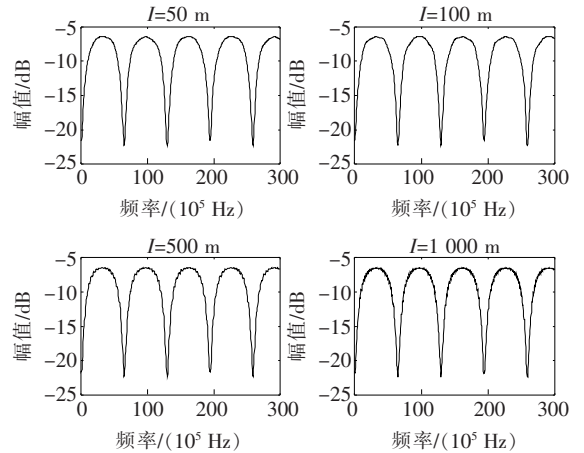
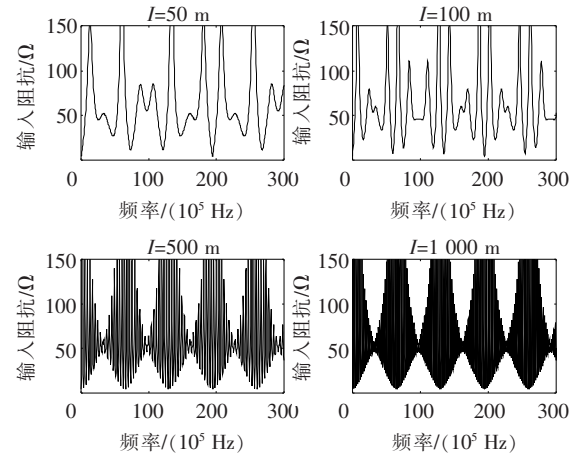


图 3 简单电力网络

Figure 3 Simple power network



(a) 主干线路长度对电压幅频特性的影响



(b) 主干线路长度对网络输入阻抗的影响

图 4 主干线路长度对信道通信特性的影响

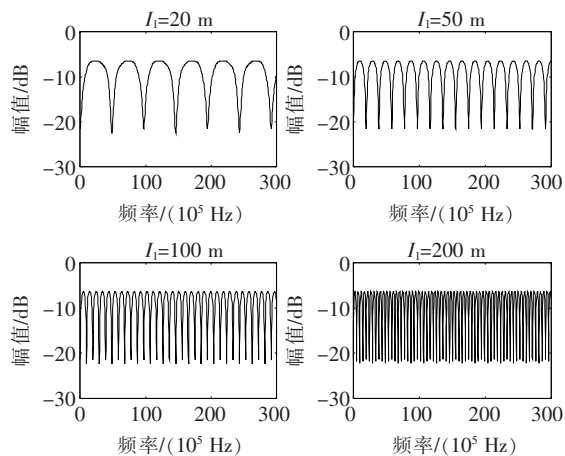
Figure 4 The influence of main line length on channel communication characteristics

由图 4(a)可知,主线路长度的递增,信号衰减所对应的衰减峰和衰减谷的位置是不改变的,同时,在峰谷处的幅值受主线路长度的影响较小。由图 4(b)可知,随主线路长度的逐渐增加,网络的输入阻抗特性变化规律较为复杂,但对比图 4(a)、(b)可以发现,在对应电压幅频特性的衰减峰频率处,网络

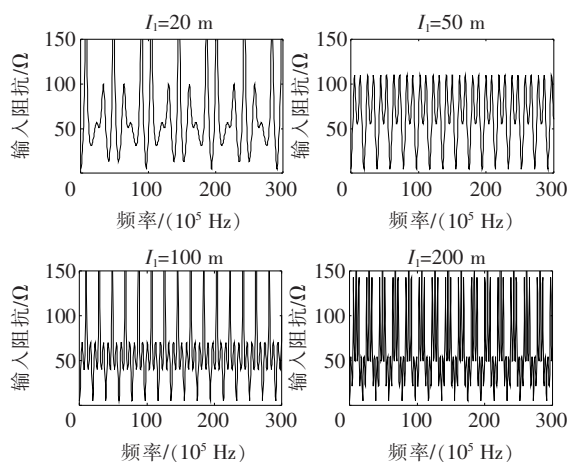
输入阻抗的值不发生改变。

3.2 沿线支路长度对电力线信道通信特性的影响

对图 3 所示的简单网络拓扑,设置信号源阻抗 Z_s 、负载阻抗 Z_L 仍然保持 50Ω 不变,支路负载阻抗 Z_{L1} 为 5Ω ,设置主干线路的长度 $l = 100 \text{ m}$ 不变,通过改变分支线路长度 l_1 ,依次设置为 20 、 50 、 100 、 200 m ,仿真结果如图 5 所示。由图 5(a)可知,沿线支路长度的变化基本不会影响电压幅频特性的峰值,但同一信号源频段内衰减峰谷的个数会随着支路长度的增长而增多,这说明分支线路长度的增加会加重信号的频率选择性衰落。同时对比图 5(a)、(b)可以发现,在对应信道电压幅频特性的衰减峰频率处,网络输入阻抗的值也保持不变。



(a) 沿线支路长度对电压幅频特性的影响



(b) 沿线支路长度对网络输入阻抗的影响

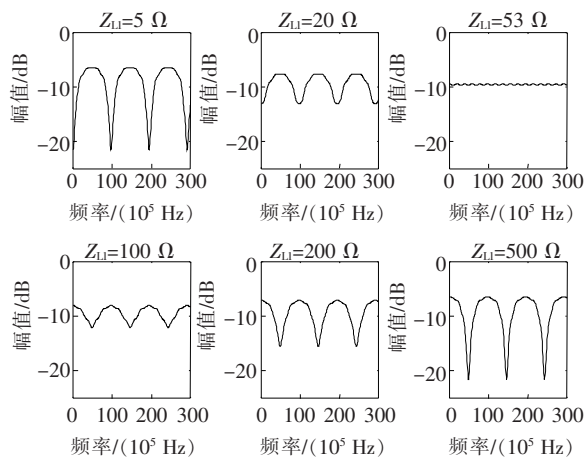
图 5 沿线支路长度对信道通信特性的影响

Figure 5 The influence of branch line length on channel communication characteristics

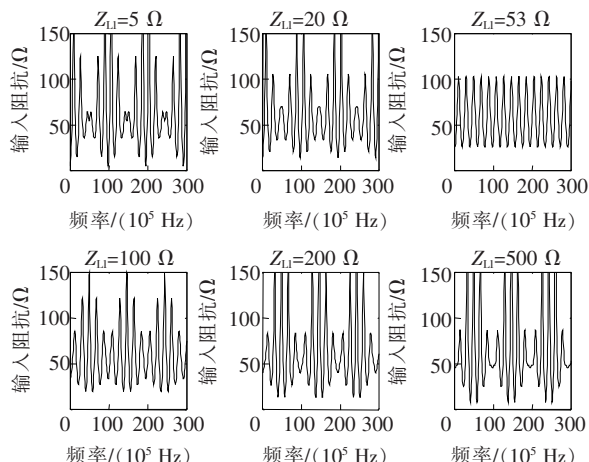
3.3 支路负载阻抗对电力线信道通信特性的影响

在电力线通信中,高频载波信号主要以横电磁

波形式在电力线中传输^[19]。其特征阻抗为行波电压与行波电流之间的比值,其值为传输线路单位长度电感参数 L 与电容参数 C 之比的平方根,由计算可知约为 53Ω 。如前文所述,导致信号频率选择性衰落的主要原因之一是阻抗失配,而所谓的阻抗失配指的是负载阻抗与激励源内部阻抗之间的相互匹配,从而使输出功率达到最佳的一种状态,换言之沿线支路负载的阻抗与线路特性阻抗之间的关系直接影响了信号的传输效率^[20]。基于此,分别设置沿线支路负载阻抗小于、等于、大于线路特性阻抗 3 种情况,信号源阻抗以及线路末端阻抗仍为 50Ω ,主干线路长度为 100 m ,沿线支路长度为 20 m ,仿真分析结果如图 6 所示。



(a) 分支线路负载对电压幅频特性的影响



(b) 分支线路负载对网络输入阻抗的影响

图 6 分支线路负载对信道通信特性的影响

Figure 6 The influence of branch line load impedance on channel communication characteristics

由图 6(a)可知,当沿线支路负载阻抗等于线路的特性阻抗时,信号传输的幅值近似为一条平滑的

曲线;当沿线支路负载阻抗小于特性阻抗时,随着支路负载阻抗的增加,信道电压传输幅频特性的衰减峰处的幅值变化较小,但衰减谷处的幅值逐渐减小;而当沿线支路负载阻抗大于线路特性阻抗时,衰减谷处的幅值逐渐增大。由图 6(b)可知,当沿线支路负载阻抗小于线路特性阻抗时,随着分支负载阻抗的增加,对应信道电压传输幅频特性的衰减峰频率处,网络输入阻抗的值均为一个固定值,且随着支路负载阻抗的增大而增大;当沿线支路负载阻抗大于线路特性阻抗时仍有此规律;当沿线支路负载阻抗等于线路特性阻抗时,此时网络输入阻抗特性的波形接近正弦波。

3.4 单节点分支数对电力线信道通信特性的影响

实际的传输网络拓扑,通常主线路段会带有一条或多条分支线路,而电力线上的多分支是造成信号频率选择性衰落的另一重要因素,线路分支情况大体可以分为 2 类:单节点连接的多分支结构以及多节点连接的多分支结构。其中,单节点分支网络拓扑如图 7 所示,假设各段电力线参数均相同, $Z_s = Z_L = 50 \Omega$, $Z_{L1} = 5 \Omega$, $l = 100 \text{ m}$, $l_1 = 25 \text{ m}$, 改变网络的分支数目 n , 仿真分析单节点连接的分支数目对信道特性的影响规律。仿真结果如图 8 所示。

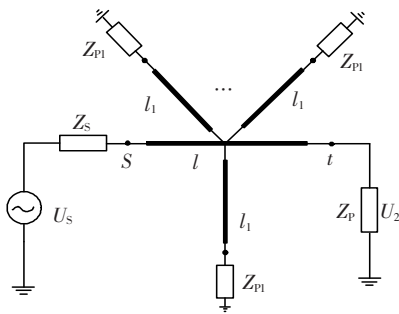
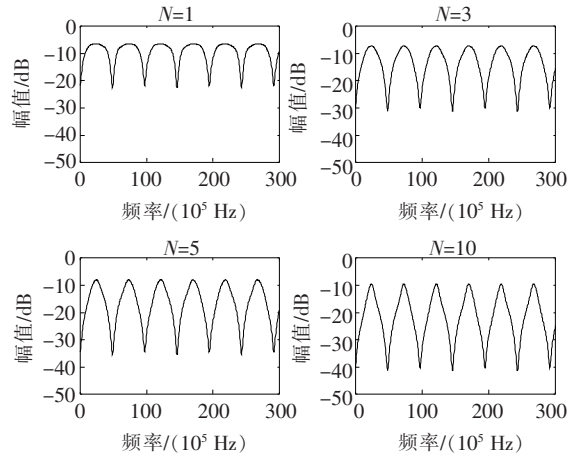


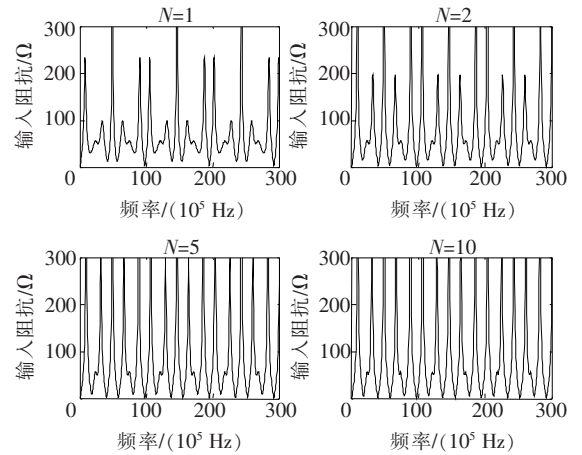
图 7 单节点分支网络

Figure 7 Single node branch network

由图 8(a)可知,电压传输幅频特性的峰谷位置以及衰减峰处的幅值基本不受单节点分支数目的影响,但在衰减谷处的幅值会随着分支数的逐渐增多而有所增加。同时,随着分支数目的增多,衰减峰频率处的波形出现明显的尖峰。由图 8(b)可知,在对应信道电压传输幅频特性的衰减峰频率处,网络输入阻抗的值均不发生改变。



(a)单节点分支数对电压幅频特性的影响



(b)单节点分支数对网络输入阻抗的影响

图 8 单节点分支数对信道通信特性的影响

Figure 8 The influence of single-node branch number on communication characteristics

3.5 多节点分支数对电力线信道通信特性的影响

多节点分支的网络如图 9 所示,假设分支网络沿主线路均匀分布,每段线路的长度 l_0 为 50 m,分支线路长度为 25 m,信号源的内阻 Z_s 以及末端负载 Z_L 仍为 50 Ω ,分支线路负载阻抗 Z_{L1} 为 5 Ω 。仿真结果如图 10 所示。

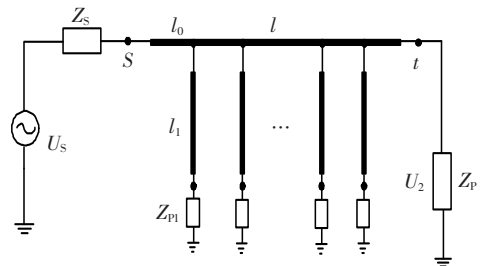
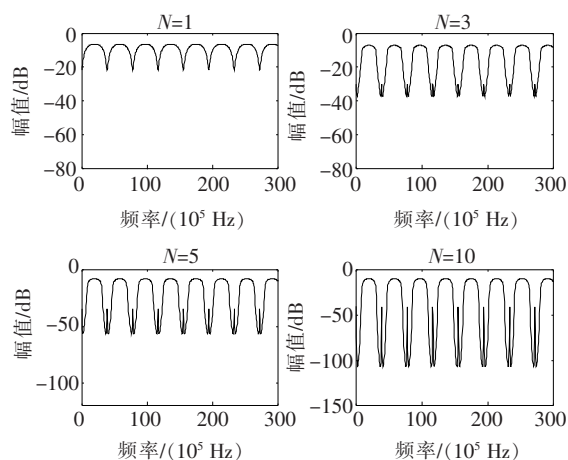
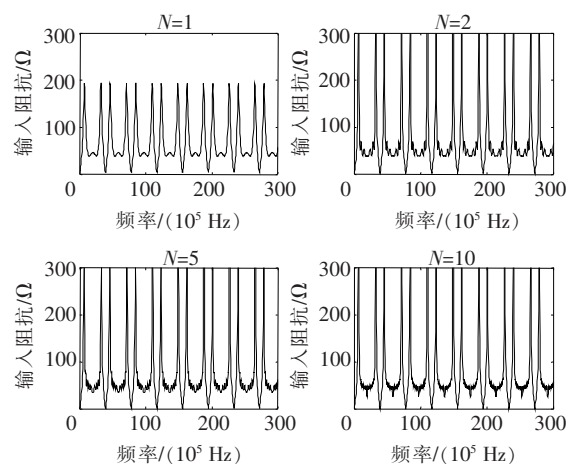


图 9 多节点分支网络

Figure 9 Multi-node branch network



(a)多节点分支数对电压幅频特性的影响



(b)多节点分支数对网络输入阻抗的影响

图 10 多节点分支数对信道通信特性的影响

Figure 10 The influence of branch number of multi node on communication characteristics

由图 10(a)可知,电压传输幅频特性的衰减峰处的幅值基本不受多节点分支数目的影响,但衰减谷处的幅值随着分支数目的增多逐渐增加。此外,波形出现明显的小尖峰,并且尖峰处的幅值随着分支数的增多而逐渐增大,这是因为随着分支节点数的增多,信号在节点处反射而引起的多径传输效应较为严重而引起的。由图 10(b)可知,随着分支数的增多,网络输入阻抗的峰值显著增大,这是极其不利的。同时,随着分支数的增多,在对应电压传输幅频特性的衰减峰频率处附近,网络输入阻抗特性变化复杂,但此时对应的网络输入阻抗的值保持为一个固定值。

4 结语

由于阻抗不匹配以及多径效应的影响,高频信

号在电力线上传输的过程中,信号频率选择性衰落严重,展开对电力线信道通信特性的研究分析,对电力线通信载波性能的调制具有重要的理论意义和实用价值。

该文研究表明,主干线路以及分支线路的长度基本不影响信号衰减的峰谷值位置和大小,但会造成网络的输入阻抗变化复杂,此外,分支线路长度的增大会造成同一频段内信号衰减峰谷个数增多;当沿线负载阻抗与线路的特性阻抗相等时,此时信道电压传输幅频特性趋为一条平滑的曲线,对应的网络等效阻抗波形也近似为正弦波;当主线路带有分支线路时,信号传输幅频特性的衰减峰位置和大小基本不受分支数目的影响,但衰减谷处的幅值随着分支数目的增多而逐渐增大;随着电力网络拓扑结构及网络参数的改变,网络输入阻抗变化规律复杂,但在对应信道电压传输幅频特性的衰减峰频率处,网络输入阻抗的值保持不变。

参考文献:

- [1] 李松浓,胡晓瑞,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.
- [2] 胡迅,彭道刚,张浩,等. 基于 IEC 61850 的智能馈线自动化通信技术研究[J]. 电力科学与技术学报,2017,32(4): 108-114.
HU Xun, PENG Daogang, ZHANG Hao, et al. Research on communication technology for smart feeder automation based on IEC 61850[J]. Journal of Electrical Power Science and Technology,2017,32(4): 108-114.
- [3] 付婷,蔡宇翔,李宏发,等. 智能电网中非结构化数据可视化技术研究[J]. 电网与清洁能源,2019,35(1): 44-48+61.
FU Ting, CAI Yuxiang, LI Hongfa, et al. Research on visualization of unstructured data in smart grids[J].

- Power System and Clean Energy, 2019, 35(1): 44-48+61.
- [4] 魏恩伟, 张之涵, 李伟华, 等. 基于柔性直流技术的智能电网配电系统电压稳定性分析[J]. 智慧电力, 2019, 47(10): 99-103.
WEI Enwei, ZHANG Zhihan, LI Weihua, et al. Voltage stability analysis in intelligent power distribution system based on VSC-HVDC[J]. Smart Power, 2019, 47(10): 99-103.
- [5] 周静, 孙媛媛, 胡紫巍, 等. 智能电网信息通信架构演进探讨[J]. 中国电力, 2018, 51(3): 131-135.
ZHOU Jing, SUN Yuanyuan, HU Ziwei, et al. Discussion on smart grid information & communication architecture evolution[J]. Electric Power, 2018, 51(3): 131-135.
- [6] 胡永红, 张超, 文一帆, 等. 智能电网终端融合通信接入网切换策略[J]. 电测与仪表, 2019, 56(23): 90-96.
HU Yonghong, ZHANG Chao, WEN Yifan, et al. Switching strategy of smart grid terminal fusion communication access network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(23): 90-96.
- [7] 何奉禄, 陈佳琦, 李钦豪, 等. 智能电网中的物联网技术应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 58-69.
HE Fenglu, CHEN Jiaqi, LI Qin hao, et al. Application and development of internet of things in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 58-69.
- [8] 张立静, 盛戈皞, 江秀臣. 泛在电力物联网在变电站的应用分析与研究展望[J]. 高压电器, 2020, 56(9): 1-10.
ZHANG Lijing, SHENG Gehao, JIANG Xiuchen. Application analysis and research prospects of ubiquitous power internet of things in substation[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(9): 1-10.
- [9] 刘喜梅, 马俊杰. 泛在电力物联网在电力设备状态监测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 69-75.
LIU Ximei, MA Junjie. Application of the ubiquitous power internet of things in state monitoring of power equipment[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 69-75.
- [10] 李艳, 张安龙, 郑曦. 配电网广域保护信息流建模与通信性能分析[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 53-60.
LI Yan, ZHANG Anlong, ZHENG Xi. Modeling and communication performance analysis of wide-area protection information flow in distribution network[J]. Journal of Electrical Power Science and Technology, 2019, 34(2): 53-60.
- [11] 谢文旺, 孙云莲, 黄雅鑫. 基于改进随机森林的电力线通信优化算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 22-29.
XIE Wenwang, SUN Yunlian, HUANG Yaxin. Research on power line communication optimization algorithm based on improved random forest[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 22-29.
- [12] 李钰, 刘灏, 田建南, 等. 适用于主动配电网 PMU 的数据传输协议与通信性能分析[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 3-10.
LI Yu, LIU Hao, TIAN Jiannan, et al. Communication protocol and performance analysis for the PMU of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2019, 34(2): 3-10.
- [13] 郭以贺, 霍然, 杨哲, 等. 低压电力线宽带通信信道建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 6300-6309.
GUO Yihe, HUO Ran, YANG Zhe, et al. Modeling of low voltage power line as broadband and communication channel[J]. Proceeding of the CSEE, 2019, 39(2): 6300-6309.
- [14] 张慧, 赵雄文, 卢文冰, 等. 基于图论的宽带电力线 MIMO 信道特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(7): 2041-2049.
ZHANG Hui, ZHAO Xiongwen, LU Wenbing, et al. Research on broadband MIMO power line channel characteristics based on graph theory[J]. Proceeding of the CSEE, 2019, 39(7): 2041-2049.
- [15] 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(S1): 221-229.
LU Wenbing, ZHANG Hui, ZHAO Xiongwen, et al. Influence of network parameters on low voltage broadband power line channel[J]. Journal of Electrical Technology, 2016, 31(S1): 221-229.