

配电网载波通信信道的分析和建模

郭以贺, 谢志远

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 为实现可靠和高速的 10 kV 电力线载波通信, 有必要对配电网载波信道的传输特性进行研究。基于二端口网络和传输线理论, 建立了配电网载波信道的转移矩阵模型。该模型的参数容易计算和测量, 能够分析网络中任意 2 个节点之间的信号传播规律。基于该模型给出了线路整体工作衰减的计算方法, 揭示了线路产生频率选择性衰落的原因。针对配电网中大量存在的阻抗不匹配环节, 分析了配电网中部分线路的工作衰减。结果表明, 该衰减值与线路其他部分有关, 传统简单估算的结果误差较大。基于 PSpice 建立了一个 10 kV 线路的信道模型, 验证了理论方法的正确性, 并据此提出了对通信系统设计的建议。

关键词: 配电网; 载波通信; 信道模型; PSpice; 衰减

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)03-0049-04

0 引言

电力线是电力部门的专用资源, 以电力线为通信介质进行数据传输具有极大的优势。中压(10 kV)电力线载波通信技术的采用, 不仅可以为电力系统配电网自动化业务提供传输通道, 提高电力通信网的覆盖范围, 也可以成为需求侧管理和促进营销网络发展的重要手段^[1]。

中压配电网载波通信的研究热点包括: 耦合技术、网络中继方式、调制解调方式、通信协议等。电力线信道的传输特性是影响载波通信可靠性的关键因素, 是研究上述各项技术的基础^[2-5]。只有对电力线信道的模型有充分的理解, 才能采取相应的措施, 实现高速和可靠的电力线载波通信。

1 配电网的信道模型

中压配电网单根电力线的长度通常超过 3 km, 而传输信号的频率通常高于几十千赫兹, 所以应当按照传输线理论分析信道特性。实际的电力线通常是由导体数大于 2 的多导线构成, 各导线间存在着相互耦合效应, 因此不能直接用平行双线系统描述。一种常用的处理方法是采用模式变换以消除导体间的相互耦合。经模式变换解耦后的各模分量仍然遵循传输线方程^[6-8]。本文基于单一模式分量来研究信道特性和信号传输规律, 实际情况下, 只要求解各个模量电压的矢量和就可以得到最终结果。

1.1 电力线信道的建模思路

中压配电网的接线和元件参数非常繁杂, 有架空线和电缆网, 干线上接有许多长度、截面各不相同的支线, 以及支线上的多次支接。为了得到信道模型, 将一段均匀的电力线用一个二端口网络表示, 整个

收稿日期: 2009-08-06; 修回日期: 2009-11-17
基金项目: 华北电力大学青年教师科研基金资助项目

+++++

电力线网络可以看成是多个二端口网络的级联。一个典型的二端口网络,其端口特性可以用转移矩阵表示。下面讨论采用转移矩阵对电力线基本结构进行建模的方法。

1.2 均匀架空线或电缆的模型

一个典型的二端口网络如图 1 所示。

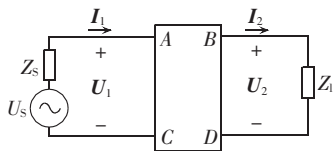


图 1 二端口网络模型

Fig.1 Model of two-port network

假设

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = T$ 称为网络的转移矩阵。

将一段长度为 l , 传播常数为 γ , 特性阻抗为 Z_c 的均匀电力线看作二端口网络, 其转移矩阵^[9]为

$$T_a = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & Z_c \sinh \gamma l \\ \frac{\sinh \gamma l}{Z_c} & \cosh \gamma l \end{bmatrix} \quad (2)$$

电力线路高频参数与导线排列方式、导线型号、档距、弧垂等有关, 可根据多导体传输线理论求解^[10]。不同规格和种类的线路, 其特性阻抗和传播常数一般不同。一般架空线路的特性阻抗值为 $300 \sim 500 \Omega$, 电缆线路的特性阻抗变化较大, 一般为 $10 \sim 100 \Omega$ 。

1.3 分支线路的模型

图 2 所示为分支线路模型, 设分支线的长度为 l_b , 特性阻抗为 Z_b , 传播常数为 γ_b , 终端所接变压器的等效阻抗为 Z_{in} , 则分支的输入阻抗为

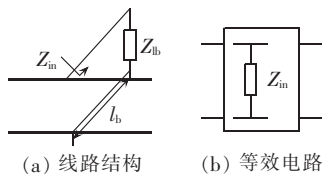


图 2 分支线路模型

Fig.2 Model of branch line

$$Z_{in} = Z_b \frac{Z_{in} \cosh \gamma_b l_b + Z_b \sinh \gamma_b l_b}{Z_b \cosh \gamma_b l_b + Z_{in} \sinh \gamma_b l_b} \quad (3)$$

分支线的影响可以归结为等效输入阻抗并联在主干线上的作用, 输入阻抗的转移矩阵为

$$T_b = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_{in} & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.4 总体模型

电力线信道可以归结为 2 类不同单元的组合。一类是不同二次参数的架空线或电缆线路形成的串联单元, 另一类是不同长度分支线的等效输入阻抗形成的并联单元。建模中总可以把参数相同的一段主干线路或分支线的输入阻抗等效成一个二端口网络, 把电力线看成是若干个二端口网络的级联。若每一个二端口网络的转移矩阵为 T_i , 则级联后总的矩阵为

$$T_c = \begin{bmatrix} A_c & B_c \\ C_c & D_c \end{bmatrix} = \prod_1^n T_i \quad (5)$$

实际通信系统中, 通常在一条 10 kV 馈线上设置多个 FTU 和 TTU。当研究不同节点之间的信号传输特性时, 可以将信号源和负载之间的电力线路等效成一个二端口网络, 根据网络的参数就可以得到信号的衰减特性。

2 线路的衰减特性分析

工作衰减定义为阻抗和电源内阻相等的负载直接接到电源所得的视在功率 S_1 与经过二端口网络后阻抗为任意值的负载所取得的视在功率 S_2 之比的自然对数的一半, 即

$$a_{gz} = \frac{1}{2} \ln \frac{S_1}{S_2} \quad (6)$$

2.1 线路的整体工作衰减

当求得从信号源到负载之间的二端口网络的转移参数后, 可以求得网络两侧的特性阻抗为

$$Z_{c1} = \sqrt{\frac{A_c B_c}{C_c D_c}}, \quad Z_{c2} = \sqrt{\frac{D_c B_c}{C_c A_c}} \quad (7)$$

这时假设负载为 Z_{lc} , 信号源内阻为 Z_{sc} , 则二端口网络的工作衰减为^[9]

$$a_g = a_c + \ln \left| \frac{Z_{sc} + Z_{c1}}{2\sqrt{Z_{sc} Z_{c1}}} \right| + \ln \left| \frac{Z_{lc} + Z_{c2}}{2\sqrt{Z_{lc} Z_{c2}}} \right| + \ln \left| 1 - \frac{Z_{sc} - Z_{c1}}{Z_{sc} + Z_{c1}} \cdot \frac{Z_{lc} - Z_{c2}}{Z_{lc} + Z_{c2}} e^{-2g_c} \right| \quad (8)$$

其中, g_c 为二端口网络的固有传输常数, a_c 为二端口网络的固有衰减常数。式(8)第 1 项 a_c 是网络本身的固有衰减, 它是工作衰减的基础; 第 2 项是由于电源内阻与网络特性阻抗不匹配引起的附加衰减; 第 3 项是由于负载阻抗与网络特性阻抗不匹配引起的附加衰减; 第 4 项是由于网络两端阻抗都不匹配, 相互影响引起的附加衰减。

后 3 项是与频率相关的, 可能得正, 也可能得负。也就是说, 工作衰减可能大于也可能小于固有衰减。线路固有的阻抗不匹配, 必然导致严重的频率选择性衰落。由于电力线路的固有特点, 线路驻波的存在一般不至于引起线路的电压击穿, 工作衰减最小时, 并不一定是阻抗匹配时, 所以, 通信系统设计时不必过分强调阻抗匹配。

2.2 部分线路引起的衰减

实际中常见一小段电缆串联在架空线路之间的情况, 假设电缆的特性阻抗为 20Ω , 架空线路的特性阻抗为 400Ω , 文献[11]认为信号经过电缆后的衰减为 7.7 dB 。文献[12]认为衰减为 12 dB 。当分析网络中部分线路(如一小段地理电缆)的影响时, 可以将部分线路等效成一个二端口网络 T_2 , 将该网络与信号源之间等效成二端口网络 T_1 , 将该网络与负载之间的网络等效成二端口网络 T_3 。网络模型如图 3 所示。设

$$T_m = \begin{bmatrix} A_m & B_m \\ C_m & D_m \end{bmatrix} \quad m=1, 2, 3$$

为了求解 T_2 的工作衰减,可以先求出从端口 P_1 向信号源方向看去的等效电压源 U'_s 和内阻 Z'_s ^[13],则

$$U'_s = \frac{U_s}{A_1 + C_1 Z_s}, \quad Z'_s = -\frac{B_1 + D_1 Z_s}{A_1 + C_1 Z_s} \quad (9)$$

从 P_2 向负载侧看去的网络等效成一个输入阻抗 Z'_l (见图 4)。

$$Z'_l = \frac{A_3 Z_l + B_3}{C_3 Z_l + D_3} \quad (10)$$

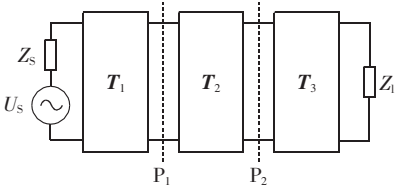


图 3 考虑部分电路工作衰减的等效电路
Fig.3 Equivalent circuit for calculating partial line attenuation

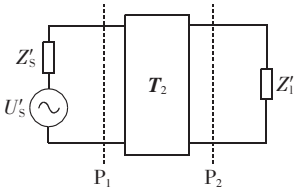


图 4 部分电路对衰减影响的简化模型
Fig.4 Simplified model of Fig.3

按照公式(8)就可以求解该网络的工作衰减。文献[11-12]2种结论都未考虑到衰减的频率相关性。对网络中任何部分的衰减进行分析时,必须考虑到线路整体的影响。

从上述分析可知,不同的配电网网络呈现不同的频率选择性,而某个配电网的拓扑结构又可能经常变动,所以配电网载波通信系统必须具有一定的自适应能力。为了清楚地揭示配电网信道的基本特性,本文给出了一个 PSpice 仿真模型。

3 配电网信道特性的 PSpice 仿真分析

根据实际的配电网特点,建立一个简单的仿真网络如图 5 所示,其中 AB 段 500 m,BC 段 160 m,CD 段 400 m,DE 段 1000 m,EF 段 1000 m,分支 BG 段 300 m,分支 CH 段 240 m,分支 EI 段 50 m。A 点为变电站,G、H、D、I、F 为端接的配电变压器,B 点为信号源所在位置。

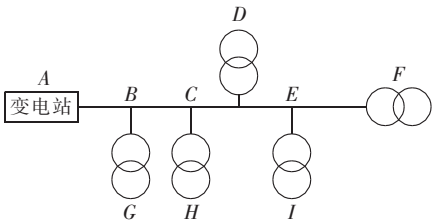


图 5 配电网的简化模型
Fig.5 Simplified model of distribution network

3.1 载波信道基本元件模型

采用自下而上的方法研究电力线信道时,首先

要建立配电网中各个元件的模型,本文在实际测量和参考相关文献的基础上,对配电网常见的元件采用如下模型:对配电网载波信号而言,实际离线测量的结果表明电力变压器在 50~500 kHz 的高频情况下呈容性,这里采用 1000 pF 的电容作为变压器模型^[11,14-15]。变电站降压变压器 10 kV 侧等值电容取 22600 pF^[11]。架空线路采用无损耗传输线模型,特性阻抗取 400 Ω,地埋电缆特性阻抗取 20 Ω。考虑到实际元件的参数与本文所取典型值通常会有差别,本文的仿真方法在多种参数下均实验过,结论具有普遍意义。

3.2 信道特性的总体描述

图 6 为 H、D、F 点的电压在 100~500 kHz 下的仿真结果。

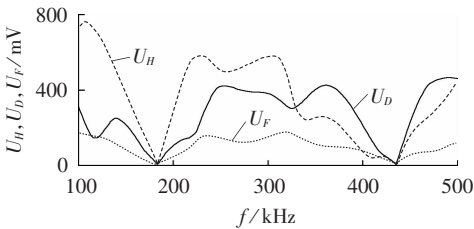


图 6 网络中不同位置的电压幅度
Fig.6 Voltage magnitude of different locations

从图中可见,在整个频率范围内,频率呈现选择性衰落,这主要是由于阻抗失配和多径传输引起的。不同地点所呈现的频率选择性衰落并不一致,在整个频率段内存在若干个深度频率选择性频段。

对各个地点而言,在整个频率范围内,都存在着一系列衰减可以接受的频率段,这说明在这些频段内组织通信信道是可能的。采用 OFDM 和扩频通信能有效地对抗多径衰落,但是如果恰当地找到衰减较小、带宽较宽的频段无疑有助于提高通信速率和可靠性。对于窄带通信方式,可以在通信之前,先进行信道的估计,找到衰减较小的频段,避开深度衰落的频率段。

同一频率下,不同的位置可能呈现不同的峰谷值。在一主多从的模式下,理想的通信频段应该能使尽量多的从节点都能与主节点建立通信。对于少数难以通信的节点,可以考虑选择其他的通信频率段,或者设置专门的中继节点。

3.3 部分线路对衰减的影响

将 CD 段内加上 50m 的电缆后,仿真结果如图 7 所示。可见,对于不同频率,加入电缆后的影响并

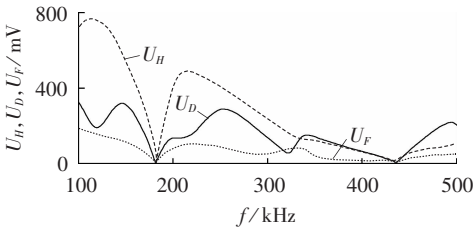


图 7 加入电缆后的电压幅度
Fig.7 Voltage magnitude of different locations when a cable added

不一致,不能认为加入电缆后会增加固定量的衰减。对于分支线路也可以得到类似的结论,即不能简单地利用线性叠加的原理,考虑分支线路、混合线路等的影响,否则一些衰减较小的频段将会被忽视。

4 结论

本文建立了基于转移矩阵的中压配电网载波通信信道的模型,该模型具有参数易于计算和测量的优点。利用该模型分析了信道的衰减特性,论述了信道产生频率选择性衰落的原因,提出了网络中部分线路对整体衰减影响的分析方法,通过 PSpice 仿真验证了分析的正确性,提出了对通信系统设计的建议。

参考文献:

- [1] 汤效军. “十一五”期间电力线载波通信的发展对策[J]. 电力系统通信,2006,27(10):75-79.
TANG Xiaojun. Considerations of power line carrier communication development during the 11th five-year plan period [J]. Power System Communications,2006,27(10):75-79.
- [2] GOTZ M,RAPP M,DOSTERT K. Power line channel characteristics and their effect on communication system design [J]. IEEE Communications Magazine,2004,42(4):78-86.
- [3] ZIMMERMANN M,DOSTERT K. Analysis and modeling of impulsive noise in broad-band powerline communication [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,2002,44(1):249-258.
- [4] 李荣伟,吴乐南. 10 kV 中压配电网载波通信信道的建模[J]. 电路与系统学报,2006,12(6):19-24.
LI Rongwei,WU Lenan. Modeling of carrier channel over 10 kV distribution lines[J]. Journal of Circuits and Systems,2006,12(6):19-24.
- [5] WOUTERS P A A F,van DER WIELEN P C J M, VEEN J, et al. Effect of cable load impedance on coupling schemes for MV power line communication[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(2):638-645.
- [6] 杨晓宪,郑涛,张保会,等. 10 kV 中压电力线信道传输特性测量与研究(一)——信道传输的一般特性[J]. 电力自动化设备,2006,26(11):1-7.
YANG Xiaoxian,ZHENG Tao,ZHANG Baohui,et al. Measurement and research of channel transmission properties on 10 kV medium voltage power lines part 1:general properties [J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(11):1-7.
- [7] HARDY M E,ARDALAN S,O'NEAL JR J B,et al. A model for communication signal propagation on three phase power distribution lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1991,6(3):966-972.
- [8] HEDMAN D E. Propagation on overhead transmission lines I-theory of modal analysis[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1965,84(3):200-205.
- [9] 湖南省邮电学校. 有线传输原理[M]. 北京:人民邮电出版社,1979:78-90.
- [10] CATALIOTTI A,DAIDONE A,TINE G. Power line communication in medium voltage systems: characterization of MV cables [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2008,23(4):1896-1902.
- [11] 焦邵华,刘万顺,郑卫文,等. 配电网载波通信的衰减分析[J]. 电力系统自动化,2000,24(8):37-40.
JIAO Shaohua,LIU Wanshun,ZHENG Weiwen,et al. Attenuation analysis of distribution line carrier channels in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2000,24(8):37-40.
- [12] 李艳龙,陈维千. 在城市 10 kV 配网上实现载波通信[J]. 电力系统通信,2001,22(3):5-11.
LI Yanlong,CHEN Weiqian. Realization of carrier communications over the city 10 kV power distribution network[J]. Power System Communications,2001,22(3):5-11.
- [13] 李晓蓉,陈章友,吴正娴. 微波技术[M]. 北京:科学出版社,2005:200-203.
- [14] HEMMINGER R C,GALE L J,AMOURA F,et al. The effect of distribution transformers on distribution line carrier signals [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1987,2(1):36-40.
- [15] HEMMIGER R C,GALE L J,O'NEAL JR J B. Signal propagation on single phase power distribution lines at power line carrier frequencies [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1987,2(1):28-35.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

郭以贺(1979-),男,河北玉田人,讲师,博士研究生,研究方向为电力系统通信和配电网自动化(E-mail:yihe_guo@163.com);

谢志远(1964-),男,河北辛集人,教授,博士,研究方向为配电网自动化和信号与信息处理。

Analysis and modeling of distribution line carrier communication channel

GUO Yihe,XIE Zhiyuan

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

Abstract: The characteristics of 10 kV power line carrier communication channel are studied to achieve the reliable and high-speed communication. Based on the theory of two-port network and transmission line,the ABCD-parameter matrix channel model is established. It is easy to calculate and measure the parameters of model and analyze the propagation law of signal transmission between any two nodes. Based on the model, the method of line attenuation calculation is given and the causes of frequency selective fading are revealed. For the impedance mismatch in distribution network,the partial line attenuation is analyzed,which shows that,it is related to the other parts and the traditional simple estimation may lead to a serious error. A 10 kV power line carrier communication channel model is built with PSpice to verify the correctness of the theoretical method and some proposals are put forward for the planning of communication system.

This work is supported by the Youth Foundation of North China Electric Power University.

Key words: distribution network; carrier communication; channel model; PSpice; attenuation