

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190084

载波信号在中压埋地电缆中的耦合原理及信道模型

王艳, 李永亮, 赵洪山

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 载波信号在中压埋地电缆中的耦合特性及信道模型是分析其传输特性的基础。在电磁感应原理基础上, 结合卡接式电感耦合器耦合方式及中压埋地电缆的结构形式, 推导卡接式电感耦合器的耦合模型。然后依据实际中压配网拓扑结构及电缆接地方式, 利用多导体传输线理论及支路追加法搭建载波信号在中压埋地电缆中的信道模型。最后在信道模型基础上, 分析载波信号在中压埋地电缆各导电层中的传输特性及不同位置的总传输特性, 并对其进行了仿真及实验室测试。结果显示: 载波信号在三相缆芯中传输特性完全一致; 载波信号强度在铠装层最大, 屏蔽层次之, 三相缆芯最小; 每流经一次环网柜, 载波信号强度均会出现-15 dB左右的衰减。

关键词: 载波信号; 埋地电缆; 耦合模型; 信道特性; 传输特性

Coupling principle and channel model of carrier signal in medium voltage buried cable

WANG Yan, LI Yongliang, ZHAO Hongshan

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

Abstract: The coupling characteristics and channel model of the carrier signal in the medium voltage buried cable are the basis for analyzing the transmission characteristics. Based on the principle of electromagnetic induction, combined with the coupling mode of the snap-in inductive coupler and the structure of the medium-voltage buried cable, the coupling model of the snap-in inductive coupler is derived. Then, according to the actual medium voltage distribution network topology and cable grounding method, the multi-conductor transmission line theory and the branch addition method are used to construct the channel model of the carrier signal in the medium voltage buried cable. Finally, based on the channel model, the transmission characteristics of the carrier signal in the conductive layers of the medium voltage buried cable and the total transmission characteristics of the different locations are analyzed, and the simulation and laboratory tests are carried out. The results show that the carrier signal has the same transmission characteristics in the three-phase cable core; the carrier signal strength is the largest in the armor layer, the shielding level is the smallest, and the three-phase cable core is the smallest; the carrier signal strength will have an attenuation of about -15dB for each time through the ring network cabinet.

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

Key words: carrier signal; buried cable; coupling model; channel characteristics; transmission characteristics

0 引言

智能配电网作为智能电网的关键环节, 可实现对分布式电源、微网、负荷等的灵活控制, 提高负荷的供电可靠性和管理水平^[1-3]。而通信网络作为信

息传输的通信信道, 也是智能配电网建设所要考虑的重要内容。电力线载波通信利用现成的配电网作为通信信道, 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, 电力线载波通信是解决配电网通信瓶颈的有效方式之一^[4]。

埋地电缆铺设在地下电缆沟内, 基本上不占用地面空间, 一条缆沟可同时容纳多条电缆。除了露

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资金项目资助(2019MS081)

出地面的户外终端部分外，电缆几乎不受自然气象因素和周围环境的影响。随着我国对于环境保护意识以及城市土地利用率的重视程度越来越强，地理电缆已逐渐成为城区配电网建设的首选方式。然而，电缆线路设计的初衷是作为电能传输分配的通道，并不是为了实现通信目标。载波信号耦合于电缆线路及其在电缆线路上的传输势必存在相应衰减。因此对载波信号在中压地理电缆中的耦合原理、信道模型及其传输特性的研究具有重要的理论意义及应用价值。

载波信号经电感耦合器耦合于电缆线路上。耦合器可分为注入式电感耦合器与卡接式电感耦合器，注入式电感耦合器需接于电缆屏蔽层，安装方式不方便，且安装过程存在安全隐患；而卡接式电感耦合器是一种非接触式的、基于电磁感应原理的耦合通信装置，可在不断电的情况下实现实时通信，安装灵活便利，在中压配电网电缆线路的载波通信中具有较广阔的应用空间。目前，针对于这种非接触式的电感耦合器方面的研究已经取得一些成果：文献[5]利用等效电路对其进行建模分析，理论分析得出传输效率和传输功率的最佳频率；文献[6]基于场线耦合理论，提出一种新型补偿网络，分析得到传输效率和传输功率与耦合系数、工作频率、负载电阻之间的曲线关系。但对于通过这种非接触式的电感耦合器实现载波通信的相关研究还相对较少。

中压地理电缆多为一缆三芯结构，耦合器采用卡接式电感耦合方式时，载波信号既可耦合到电缆屏蔽层、铠装层，又可耦合到电缆的三相缆芯中，并且三者之间存在交互影响。同时，电缆每经一个环网柜就有接地等实际问题的存在，使得载波信号在电缆线路中的传输模型及传输特性较为复杂。目前，在国内，载波信号在电缆线路的传输模型中，大多只考虑以电缆屏蔽层为传输信道^[7]，并未考虑电缆缆芯、铠装层以及二者与屏蔽层之间相互联系对载波信号的影响；在国外，虽然计及电缆各导电线对载波信号的影响，但载波信号的传输特性分析主要还是以室内低压电缆为分析对象^[8-11]，对中压配电网电缆线路而言并不具有通用性。

本文结合卡接式电感耦合器耦合方式及中压地理电缆的结构形式，分析卡接式电感耦合器的耦合原理，推导耦合特性函数；然后在实际配网电缆

结构和接地方式的基础上，利用多导体传输线理论和支路追加法搭建中压配网电缆线路信道数学模型，并推导载波信号在中压地理电缆中的传输函数；最后，考虑电缆线路结构对称性，理论分析并仿真验证了载波信号在中压地理电缆各导电层中的传输衰减特性。

1 卡接式电感耦合器耦合模型

1.1 中压配电网电缆线路结构

中压配电网常用三芯铠装电缆截面图如图1所示。图中：三芯铠装电缆由内而外分别为相导体(A,B,C三相缆芯)、内(相)绝缘、屏蔽层、内衬层、铠装层和外被层。由于实际电缆各相屏蔽层相互接触，分析电缆参数时可将屏蔽层考虑为一个花瓣形的整体。

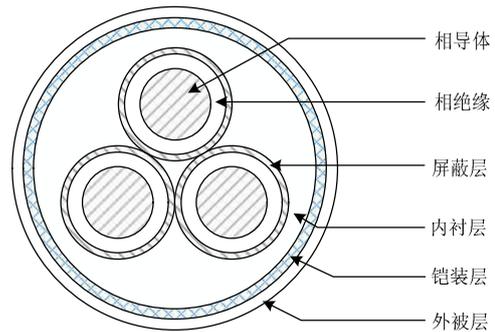


图1 中压配电网常用三芯铠装电缆截面图

Fig. 1 Cross-sectional view of three-core armored cable commonly used in the medium distribution network

1.2 卡接式电感耦合器基本结构

图2所示为卡接式电感耦合器实物图，其主要结构是由两个铁磁材料的半圆环组成，安装时将两个半磁环咬合，并使电缆嵌入磁环之间。由于耦合器不能紧密包裹电缆，且两半磁环接触面之间存在



图2 卡接式电感耦合器实物图

Fig. 2 Physical picture of embedded inductive coupler

微小的间隙, 故耦合器基本结构可近似等效为一个松耦合变压器。其通入载波信号的一次线圈缠绕在圆磁环上, 电缆线路则等效为二次线圈。

由于耦合器卡接在电缆线路上, 电缆的三相缆芯、屏蔽层和铠装层均穿过耦合器磁环, 即缆芯回路、屏蔽层和铠装层回路处于相同的垂直磁场环境中。由电磁感应原理可知, 载波信号既可耦合到电缆屏蔽层、铠装层, 又可耦合到电缆三相缆芯上。并且缆芯回路与屏蔽层、铠装层回路所包围的磁通完全相同, 因而电缆的三相缆芯、电缆屏蔽层和铠装层所产生的感应电动势大小相等。

1.3 卡接式电感耦合器模型

当耦合器一次侧线圈通入载波信号时, 根据法拉第电磁感应定律, 二次侧感应电动势为

$$e_2 = -N_2 \frac{d(\phi_{m1})}{dt} + N_2 \frac{d(\phi_{m2} + \phi_{\sigma 2})}{dt} \quad (1)$$

式中: ϕ_{m1} 、 ϕ_{m2} 分别为耦合器一、二次侧电流产生穿过磁环的主磁通; $\phi_{\sigma 2}$ 为二次侧的漏磁通; N_1 为一次侧线圈匝数; N_2 为二次侧线圈的匝数, 由于电缆直接嵌入耦合器中, 故 $N_2 = 1$ 。

由磁路的欧姆定律可知

$$\phi_{m1} R_m = N_1 i_1, \quad \phi_{m2} R_m = N_2 i_2, \quad \phi_{\sigma 2} R_{\sigma 2} = N_2 i_2 \quad (2)$$

式中: R_m 为主磁通对应磁阻; i_1 、 i_2 分别为耦合器一二次侧电流; $R_{\sigma 2}$ 为二次侧漏磁通对应磁阻。

将式(2)代入式(1)整理可得:

$$e_2 = -\frac{N_1 N_2}{R_m} \frac{d(i_1)}{dt} + \left(\frac{N_2^2}{R_m} + \frac{N_2^2}{R_{\sigma 2}} \right) \frac{d(i_2)}{dt} \quad (3)$$

在实际运行过程中, 卡接式电感耦合器二次侧的电缆线路经延伸后接于配电终端, 故二次侧(即电缆侧)负载阻抗较大, 二次侧电流较小, 可近似考虑为二次侧没有电流流通。因此式(3)变为

$$e_2 \approx -\frac{N_1 N_2}{R_m} \frac{d(i_1)}{dt} \quad (4)$$

图3所示为卡接式电感耦合器磁环几何结构图。设: a 、 b 分别为磁环的内外半径, δ 为两个半磁环之间的气隙长度, h 为磁环的高度。结合图3, 并考虑气隙磁通的边缘效应^[12], 则有:

$$R_m = R_{\delta} + R'_m = \frac{2\delta}{\mu_0 (h+\delta)(b-a+\delta)} + \frac{\pi(a+b)}{\mu_{fe} h(b-a)} \quad (5)$$

式中: R_{δ} 、 R'_m 分别为主磁通经气隙和磁环的磁阻; μ_0 、 μ_{fe} 分别为气隙和磁环对应的磁导率。

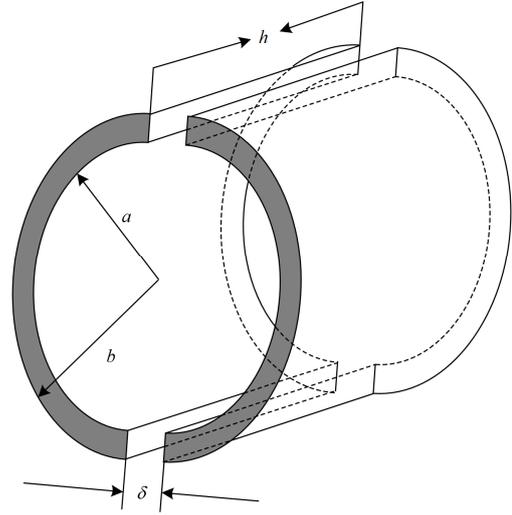


图3 卡接式电感耦合器磁环几何结构图

Fig. 3 Magnetic ring geometry of embedded inductive coupler

将式(5)代入式(4), 整理可得耦合器一次侧线圈通入载波信号时, 二次侧感应电动势有效值为

$$E_2 \approx KI_1 \quad (6)$$

式中:

$$K = \frac{2\pi\mu_0\mu_{fe}h(h+\delta)(b-a+\delta)(b-a)N_1N_2f}{2\mu_{fe}\delta h(b-a) + \pi\mu_0(h+\delta)(b-a+\delta)(a+b)}; \quad f$$

为载波信号的频率。

1.4 卡接式电感耦合器模型实验室测试

为验证所推导卡接式电感耦合器模型的准确性, 本文进行了实验室测试。测试所用耦合器主要参数如表1所示。

表1 实验室耦合器模型主要参数

Table 1 Main parameters of the laboratory coupler model

内径/ mm	外径/ mm	高/ mm	气隙/ mm	一次侧 匝数	磁环磁导率/ (H/m)	气隙磁导 率/(H/m)
26	43	15	0.5	3	$4\pi \times 10^7 \times 2300$	$4\pi \times 10^7$

表2给出了一次侧电流为有效值0.1 A时, 不同频点下二次侧感应电动势的测量值与理论值的

表2 理论值与测量值对比

Table 2 Comparison of theoretical and measured values

频率/kHz	测量值/V	理论值/V	相对误差/%
100	0.52	0.536 8	3.13%
150	0.82	0.805 1	1.85%
200	1.03	1.073 5	4.05%
250	1.27	1.342 0	5.37%
300	1.50	1.610 4	6.86%

对比结果。分析可知实测电压与理论计算所得耦合电压相对误差整体上随频率的增大而逐渐增大,但都在7%以内,验证了理论推导公式的准确性。

2 载波信号在中压地理电缆中的传输线模型

由第1节分析可知,载波信号经卡接式电感耦合器分别耦合到电缆屏蔽层、铠装层及三相缆芯上。所以,载波信号在电缆线路上共有5个以地为回路的传输导体:3个缆芯导体,1个屏蔽层导体和1个铠装层导体。由于几个导体之间相互影响,载波信号在中压地理电缆中的传输特性变得复杂。

2.1 中压地理电缆参数矩阵

中压地理电缆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} 、 \mathbf{L} 分别为单位长度电阻矩阵和单位长度电感矩阵, \mathbf{G} 、 \mathbf{C} 分别为单位长度电导矩阵和单位长度电纳矩阵, ω 为载波信号角频率。

由于载波信号在电缆线路上共有5个传输导体,同时考虑到电缆缆芯参数的一致性和电缆结构的对称性,则电缆单位长度阻抗矩阵为

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{Cs} & Z_{CCm} & Z_{CCm} & Z_{CSm} & Z_{CAm} \\ Z_{CCm} & Z_{Cs} & Z_{CCm} & Z_{CSm} & Z_{CAm} \\ Z_{CCm} & Z_{CCm} & Z_{Cs} & Z_{CSm} & Z_{CAm} \\ Z_{CSm} & Z_{CSm} & Z_{CSm} & Z_{Ss} & Z_{SAm} \\ Z_{CAm} & Z_{CAm} & Z_{CAm} & Z_{SAm} & Z_{As} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: Z_{Cs} 、 Z_{Ss} 、 Z_{As} 分别为电缆各相缆芯、屏蔽层和铠装层的自阻抗; Z_{CCm} 为电缆各相缆芯之间的互阻抗; Z_{CSm} 、 Z_{CAm} 、 Z_{SAm} 分别为电缆各相缆芯与屏蔽层、各相缆芯与铠装层和屏蔽层与铠装层的互阻抗。各项阻抗参数可由文献[13]计算得到。

根据电缆结构知电缆单位长度导纳矩阵为稀疏矩阵,如式(8)所示。

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_{Cs} & 0 & 0 & -Y_{Cs} & 0 \\ 0 & Y_{Cs} & 0 & -Y_{Cs} & 0 \\ 0 & 0 & Y_{Cs} & -Y_{Cs} & 0 \\ -Y_{Cs} & -Y_{Cs} & -Y_{Cs} & 3Y_{Cs} + Y_{SA} & -Y_{SA} \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{SA} & Y_{SA} + Y_{AE} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: Y_{Cs} 、 Y_{SA} 、 Y_{AE} 分别为各相电缆缆芯与屏蔽层、屏蔽层与铠装层和铠装层与地之间的导纳。各项导纳参数可参考文献[13]。

2.2 载波信号在中压地理电缆中的相模变换

由于电缆线路的参数矩阵为非对角阵,各回路间存在相互耦合,故在多导体传输线^[9,12-13]理论基

础上,利用相模变换法对矩阵进行解耦,求解载波信号在地理电缆中传输线方程。

根据多导体传输线理论列写电缆线路的传输线方程:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{U}(x)}{dx} = -\mathbf{Z}\mathbf{U}(x) \\ \frac{d\mathbf{I}(x)}{dx} = -\mathbf{Y}\mathbf{I}(x) \end{cases} \quad (9)$$

式中:

$$\mathbf{U} = [U_{ac} \ U_{bc} \ U_{cc} \ U_s \ U_A]^T$$

$$\mathbf{I} = [I_{ac} \ I_{bc} \ I_{cc} \ I_s \ I_A]^T$$

U_{ac} 、 U_{bc} 、 U_{cc} 和 I_{ac} 、 I_{bc} 、 I_{cc} 分别表示三相缆芯的电压和电流,由于电缆三相缆芯呈“品”字型结构,具有对称性,故 $U_{ac}=U_{bc}=U_{cc}=U_c$ 、 $I_{ac}=I_{bc}=I_{cc}=I_c$; U_s 、 I_s 分别为电缆屏蔽层的电压和电流; U_A 、 I_A 分别为电缆铠装层的电压和电流。

根据文献[14-15]分析可得式(9)的方程解为

$$\begin{cases} \mathbf{U}(x) = \mathbf{Z}_c \mathbf{T}_1 (e^{-\gamma x} \mathbf{I}_m^+ + e^{\gamma x} \mathbf{I}_m^-) \\ \mathbf{I}(x) = \mathbf{T}_1 (e^{-\gamma x} \mathbf{I}_m^+ - e^{\gamma x} \mathbf{I}_m^-) \end{cases} \quad (10)$$

式中: \mathbf{T}_1 与 γ 矩阵满足等式关系 $\mathbf{T}_1^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{Z} \mathbf{T}_1 = \gamma^2$; 电缆特征阻抗矩阵满足等式关系 $\mathbf{Z}_c = \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{T}_1 \gamma \mathbf{T}_1^{-1}$; \mathbf{I}_m^+ 、 \mathbf{I}_m^- 为待定系数,可以根据边界条件求解。

结合边界条件 $x=0$ 、 $x=l$, 整理得电缆首末段实际电压电流的关系为

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

式中:

$$\begin{aligned} \Phi_{11}(l) &= \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{T}_1 \cosh(\gamma l) \mathbf{T}_1^{-1} \mathbf{Y}; \\ \Phi_{12}(l) &= -\mathbf{Z}_c \mathbf{T}_1 \sinh(\gamma l) \mathbf{T}_1^{-1}; \\ \Phi_{21}(l) &= -\mathbf{T}_1 \sinh(\gamma l) \mathbf{T}_1^{-1} \mathbf{Z}_c^{-1}; \\ \Phi_{22}(l) &= \mathbf{T}_1 \cosh(\gamma l) \mathbf{T}_1^{-1}. \end{aligned}$$

3 中压地理电缆线路载波信道模型

实际中压配电网电缆线路拓扑结构通常每隔一段距离设立一个环网柜,向就地负荷或以分支线路形式向附近负荷供电。为避免配电网短路故障时电缆屏蔽层等出现感应过电压^[16-17],通常配电网电缆线路屏蔽层和铠装层两端都直连环网柜角铁而接地。本节根据中压配网电缆线路拓扑结构及环网柜接线方式,利用支路追加法^[18]建立载波信道模型。

3.1 卡式电感耦合器模型

由第 1 节的电磁感应原理可知, 载波信号是经卡接式电感耦合器耦合于电缆上的, 故实际建模过程中需要考虑耦合器特性影响。

图 4 为采用卡式电感耦合器耦合方式, 结合中压配电网电缆线路结构及接地方式所搭建的含环网柜的简单网络拓扑图。图中载波信号的输入电流 I_S 经耦合器将信号耦合于电缆线路上。由于载波电流在耦合器耦合磁环上产生的主磁通与电缆侧各导体均相交链, 因此耦合器接入点处电缆各导体产生的感应电动势均相等, 故耦合器接入点处电缆各导体电压相等, 记为 U_0 , 由式(6)可知, $U_0 = KI_S$ 。图中: l_i ($i=1,2$) 为第 i 段电缆的长度; $\mathbf{U}_i = [U_{aCi}, U_{bCi}, U_{cCi}, U_{Si}, U_{Af}]^T$ ($i=1,2$) 为环网柜 i 处电缆对应的三相缆芯、屏蔽层和铠装层的电压列阵; $\mathbf{I}_{j1} = [I_{aCj1}, I_{bCj1}, I_{cCj1}, I_{Sj1}, I_{Aj1}]^T$ 、 $\mathbf{I}_{j2} = [I_{aCj2}, I_{bCj2}, I_{cCj2}, I_{Sj2}, I_{Aj2}]^T$ ($j=1,2$) 分别为第 j 段电缆对应的三相缆芯、屏蔽层和铠装层的始端和末端电流阵列, 电流方向均为从耦合器端指向配电终端; $\mathbf{I}_{10} = [I_{S10}, I_{A10}]^T$, 其中, I_{S10} 、 I_{A10} 分别为电缆屏蔽层和铠装层在环网柜 1 处流经大地的电流。

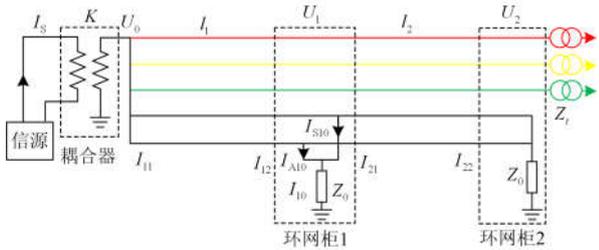


图 4 中压配电网电缆线路拓扑简图

Fig. 4 Simple topology diagram of the medium voltage distribution network cable line

3.2 环网柜处等效负荷阻抗矩阵的求取

配电电缆每经过一个环网柜时, 三相缆芯均要

$$\begin{bmatrix} 1/K & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}(l_1) & -\mathbf{E} & \Phi_{12}(l_1) & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}(l_1) & \mathbf{0} & \Phi_{22}(l_1) & -\mathbf{E} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{E} & \mathbf{0} & \mathbf{E} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{G}^T \\ \mathbf{0} & \Phi_{11}(l_2) & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{E} & \Phi_{12}(l_2) & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Phi_{21}(l_2) & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \Phi_{22}(l_2) & -\mathbf{E} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{E} & \mathbf{0} & \mathbf{Z}_L & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{G} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Z}'_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ I_{11} \\ I_{12} \\ U_2 \\ I_{21} \\ I_{22} \\ I_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_S \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (13)$$

级联于下一条线路或直连于配电变压器, 而屏蔽层和铠装层都要经环网柜角铁接地。因此, 每经过一次环网柜时, 环网柜处均可等效出一个负荷, 根据环网柜所处位置以及有无配变的不同, 其等效负荷阻抗矩阵也有所不同:

1) 无直连配变的中间环网柜(如图 4 中的环网柜 1): 由于该处环网柜没有直连配变, 只有电缆屏蔽层、铠装层经环网柜角铁接地形成的等效负荷 Z_0 , Z_0 为等效接地小电阻^[19]。结合基尔霍夫电压、电流定律有 $U_{S1} = U_{A1} = I_{S10}Z_0 + I_{A10}Z_0$, 其中, U_{S1} 、 U_{A1} 分别为电缆屏蔽层、铠装层经环网柜 1 时的电压。改写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} U_{S1} \\ U_{A1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_0 & Z_0 \\ Z_0 & Z_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{S10} \\ I_{A10} \end{bmatrix} = \mathbf{Z}'_0 \begin{bmatrix} I_{S10} \\ I_{A10} \end{bmatrix} \quad (12)$$

因此对于无直连配变的中间环网柜, 其等效负荷阻抗矩阵可表示为 \mathbf{Z}'_0 。

2) 具有直连配变的中间环网柜: 此时环网柜处不仅有电缆屏蔽层、铠装层接地形成的等效负荷, 还存在本地配变的负载。因此对于接有直连配变的中间环网柜而言, 其等效负荷阻抗矩阵为

$$\mathbf{Z}_L = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_t & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Z}'_0 \end{bmatrix}, \text{ 其中 } \mathbf{Z}_t = \begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 & Z_2 \\ Z_2 & Z_1 & Z_2 \\ Z_2 & Z_2 & Z_1 \end{bmatrix} \text{ 为配电变}$$

压器高频等效参数^[20], 由文献[20]知: 若 Z_{pg} 为配电变压器相地阻抗, Z_{pp} 为配电变压器相间阻抗, 则有 $Z_1 = Z_{pg}$ 、 $Z_2 = Z_{pg} - 0.5Z_{pp}$ 。

3) 终端环网柜(如图 4 中的环网柜 2): 终端环网柜直连配变, 与直连配变的中间环网柜形式一致, 其等效负荷阻抗矩阵仍为 \mathbf{Z}_L 。

3.3 中压地理电缆线路载波信道传输方程

由于载波信号在电缆中的传输为多导体传输, 故在追加支路时, 各环网柜处节点电压以及电缆线路的流经电流均为一个五阶的列阵。因此图 4 中压配电网电缆线路拓扑结构对应的非齐次线性方程组为

式中：由于耦合器接入点处电缆各导体电压相等，结合第 2 节推导的电缆传输线方程，则有： $B(l_1)$ 为 $\Phi_{11}(l_1)$ 各行之和形成的列阵； $C(l_1)$ 为 $\Phi_{21}(l_1)$ 各行之和形成的列阵。 E 为五阶的单位阵，

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

基于克拉默法则可求出上式对应的非齐次线性方程组的解，求得载波信号各个位置相对于耦合接入点的传输函数，进而分析载波信号在电缆中的传输特性。

4 中压电缆线路载波信道传输特性

4.1 传输特性分析

载波信号在电缆各导电线的衰减特性分析：

1) 由于电缆三相缆芯具有参数的一致性和结构的对称性，且电缆三相缆芯末端统一连接配电变压器，而配电变压器高频参数矩阵仍具有对称性^[20]，因此在不同的测试位置，载波信号在三相缆芯中传输特性随频率的变化规律，三者均应完全相同。

2) 由于配网地理电缆的屏蔽层和铠装层在每经过一次环网柜时都要经环网柜角铁而接地，而电缆的三相缆芯则需连接于配电变压器，由于配电变压器高频等效阻抗多为数百欧姆，而屏蔽层和铠装层经环网柜角铁接地的接地电阻只有几欧姆。又由于载波信号经耦合器耦合于电缆各导体上的电势均相等，故根据电路并联关系可知，载波信号主要在电缆屏蔽层和铠装层中传输。虽然配网地理电缆屏蔽层电阻率小于铠装层电阻率，但由于屏蔽层截面积远小于铠装层截面积，故总体上电缆屏蔽层电阻值大于铠装层。综上所述，载波信号在电缆中传输时，铠装层的信号强度最大，屏蔽层次之，三相缆芯最小。

3) 由于载波信号主要在电缆屏蔽层和铠装层中传输时，每流经一次环网柜，其信号功率强度都要通过环网柜角铁而流失一大部分，故载波信号在中压电缆线路中的传输范围受到一定限制，在远距离多节点网络的传输过程中需要设置中继节点。

4.2 传输特性验证

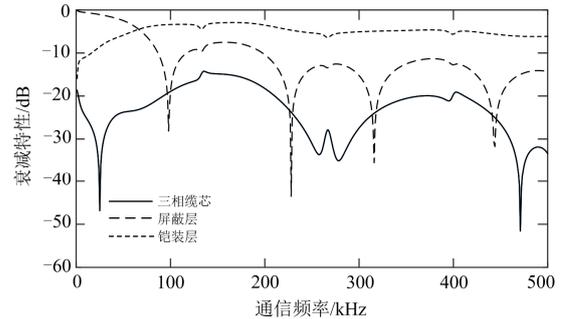
为验证所得载波信号在电缆线路上的传输特性，对图 4 所示配电网络进行了仿真。

图 5 分别给出了载波信号流经环网柜前后电缆线路不同导电层中的衰减特性，其中，耦合器相关参数如表 3 所示；配变高频参数采用文献[18]提供数据，环网柜接地电阻 $Z_0 = 3 \Omega$ ， l_1 、 l_2 长度分别为 1 500 m、1 000 m，电缆型号均采用保定市 10 kV

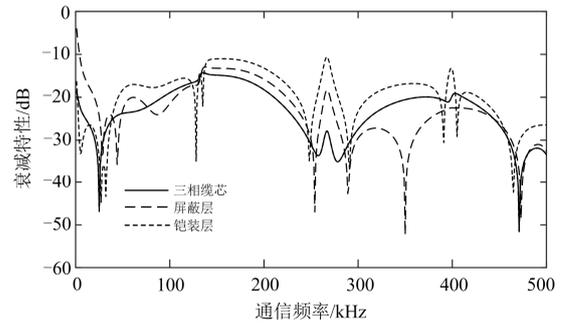
电压等级常用电缆型号 YJV22-3*240mm²。

表 3 耦合器模型主要参数

内径/ mm	外径/ mm	高/ mm	气隙/ mm	一次侧 匝数	磁环磁导率/ (H/m)	气隙磁导 率/(H/m)
192	268	112	0.5	3	$4\pi \times 10^{-7} \times 2300$	$4\pi \times 10^{-7}$



(a) 经环网柜1前



(b) 经环网柜1后

图 5 载波信号经环网柜前后电缆各导电层衰减特性

Fig. 5 Attenuation characteristics of the conductive layers of the cable before and after the cable network passing through the ring network cabinet

由图 5 可知，载波信号在三相缆芯中传输特性随频率的变化规律完全一致。且由图 5(a)可知，载波信号经卡式电感耦合器耦合到电缆线路上时，铠装层中的信号强度最大，屏蔽层次之，三相缆芯最小。与文献[21-22]所得结果基本吻合，验证了仿真结果的准确性。对比分析载波信号流经环网柜 1 前后的衰减特性可见，经环网柜 1 后铠装层和屏蔽层中的载波信号强度明显降低。

图 6 给出了载波信号在不同位置的总信号强度衰减特性曲线。

由图 6 可知，在经过环网柜 1 前载波信号功率衰减约为 -5 dB 左右；而经过环网柜 1 后，载波信号功率出现了较大衰减，基本在 -10~ -25 dB；经过环网柜 2 之后，载波信号大都衰减到 -35 dB 以下。

为验证信道建模方法的有效性及其仿真结果的正确性，实验室搭建了如图 4 所示单芯电缆级联型式的拓扑网络。其中，电缆采用铜芯铜网同轴视频

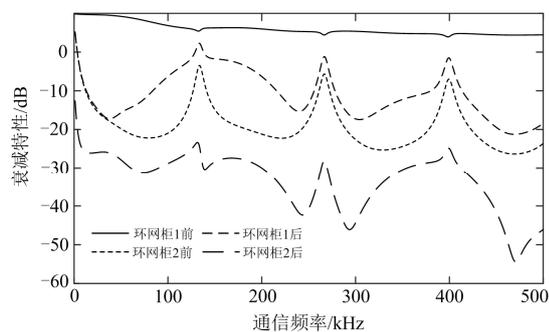


图 6 载波信号在不同位置的总信号强度衰减特性

Fig. 6 Total signal strength attenuation characteristics of carrier signals at different locations

线,其型号为 YES-BNC-C,两段电缆长度均为 6 m,每段电缆屏蔽层均采用 $1\ \Omega$ 电阻接地(模拟环网柜接地),第 2 段电缆芯线末端接 $51\ \Omega$ 电阻。实验室分别测试了第 1 段电缆末端、第 2 段电缆首端和第 2 段电缆末端的载波信号强度。图 7 所示为载波信号传输特性随频率变化的实验室测试与仿真结果对比图。

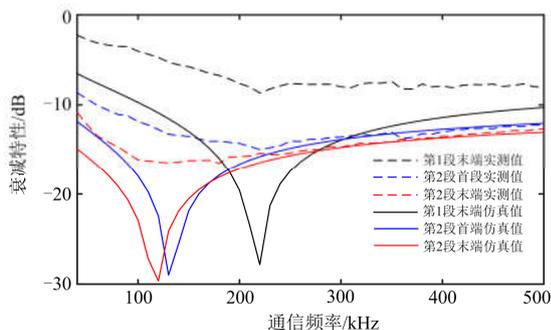


图 7 实验室测试与仿真结果对比图

Fig. 7 Comparison of laboratory test and simulation results

由图7可知:载波信号在电缆线路中不同位置的实验室测试结果与仿真结果变化趋势基本一致,验证了信道建模方法的正确性;在第2段电缆首末两端载波信号强度衰减变化较小,而在第1段电缆末端与第2段电缆首端载波信号衰减强度相差较大,约 $-7\ \text{dB}$ 左右,验证了载波信号在流经环网柜后传输功率将出现较大流失理论的正确性。

5 结论

本文结合卡接式电感耦合器耦合方式及中压地理电缆的结构形式,分析了卡接式电感耦合器的耦合原理,提出了一种卡接式电感耦合器耦合模型。然后在实际配网电缆结构和接地方式的基础上,利用多导体传输线理论和支路追加法搭建了中压配网电缆线路信道数学模型,推导了载波信号在中压地

埋电缆中的传输函数,其建模方法原理清晰,可移植性强。最后,在信道模型基础上,考虑电缆线路结构对称性,仿真分析了载波信号在中压地理电缆各导电层中的传输衰减特性。结果显示:载波信号在三相缆芯中传输特性完全一致;载波信号强度在铠装层最大,屏蔽层次之,三相缆芯最小;每流经一次环网柜,载波信号强度均会出现 $-15\ \text{dB}$ 左右的衰减。为 PLC 技术在智能配网电缆线路中的实用化提供了较好的分析方法和理论依据。

参考文献

- [1] HE Yuqing, CHEN Yuehui, YANG Zhiqiang, et al. A review on the influence of intelligent power consumption technologies on the utilization rate of distribution network equipment[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 183-193. DOI: 10.1186/s41601-018-0092-2.
- [2] 谢伟, 王少荣, 张勇, 等. 优化智能配电网动态特性的技术方法[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 863-871. XIE Wei, WANG Shaorong, ZHANG Yong, et al. Technical methods for optimizing dynamic characteristics of smart distribution network[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 863-871.
- [3] 王良. 智能配电网自动化应用实践的几点探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 12-16. WANG Liang. Discussion on the practice of intelligent distribution network automation application[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 12-16.
- [4] LE Jian, WANG Cao, WU Zhou, 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.
- [5] 唐治德, 杨帆, 徐阳阳, 等. 磁耦合谐振式无线电能传输系统功效同步研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(21): 161-168. TANG Zhide, YANG Fan, XU Yangyang, et al. Research on power-efficiency synchronization of wireless power transfer via magnetic resonance coupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(21): 161-168.
- [6] 董纪清, 杨上苹, 黄天祥, 等. 用于磁耦合谐振式无线电能传输系统的新型恒流补偿网络[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4468-4476. DONG Jiqing, YANG Shangping, HUANG Tianxiang, et al. A novel constant current compensation network for magnetically-coupled resonant wireless power transfer system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4468-4476.

- [7] 李建岐, 李祥珍. 配电网载波通信耦合方式的探讨[J]. 电力系统通信, 2007(4): 34-38.
LI Jianqi, LI Xiangzhen. Discussion on couplingmode of carrier communication on distribution network[J]. Power System Communications, 2007(4): 34-38.
- [8] KHALIL K, GAZALET M G, CORLAY P, et al. An MIMO random channel generator for indoor power-line communication[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 1561-1568.
- [9] 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 Hui'an, et al. Research on multi-node based low voltage broadband power line channel modeling method[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 18-25.
- [10] 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.
- [11] CORCHADO J A, CORTÉS J A, CAÑETE F J, et al. An MTL-based channel model for indoor broadband MIMO power line communications[J]. IEEE Transactions on Selected Areas in Communications, 2016, 34(7): 2045-2055.
- [12] UMANS S. 电机学[M]. 刘新正, 苏少平, 高琳, 译. 7版. 北京: 电子工业出版社, 2014: 1-7.
- [13] 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.
- [14] PAUL C R. 多导体传输线分析[M]. 杨晓宪, 郑涛, 译. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2013: 176-193.
- [15] KANE M M, KULKARNI S V. MTL-based analysis to distinguish high-frequency behavior of interleaved windings in power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2291-2298.
- [16] 王雄伟, 张哲, 尹项根, 等. 多回单芯电力电缆并联运行护套感应电压的计算与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 77-84.
WANG Xiongwei, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Calculation and analysis of sheath induced voltage for multi-circuit single-core power cable lines in parallel[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 77-84.
- [17] 孙毅, 张轶, 贺之渊, 等. 柔性直流输电系统电缆护套过电压仿真[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3528-3533.
SUN Yi, ZHANG Yi, HE Zhiyuan, et al. Simulation of cable sheath over-voltage in VSC-HVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3528-3533.
- [18] 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 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, 85.
- [19] 邹宏亮, 孙云莲, 张弛, 等. 多回路电力电缆不同敷设方式对环流的影响[J]. 高电压技术, 2016, 42(8): 2426-2433.
ZOU Hongliang, SUN Yunlian, ZHANG Chi, et al. Effects of different multi-loop laying ways on circulating current of power cable[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(8): 2426-2433.
- [20] 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. Model of medium voltage power line communication channel based on multi-conductor lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1183-1190.
- [21] RUMOLD J, TER HASEBORG J L. Field excitation of complex multiconductor cable bundles-simulations and measurements[C] // 2001 IEEE EMC International, August 13-17, 2001, Montreal, Que, Canada: 57-62.
- [22] ZHU Ke, LEE W K, PONG P W T. Energization-status identification of three-phase three-core shielded distribution power cables based on non-destructive magnetic field sensing[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(22): 7405-7417.

收稿日期: 2019-01-19; 修回日期: 2019-06-10

作者简介:

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

李永亮(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为中压电力线载波通信。E-mail: 330968153@qq.com

(编辑 葛艳娜)