

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180830

中压配电网载波通信卡式电感耦合器耦合模型

王艳, 陈家玉, 赵洪山, 李永亮, 张现

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 为满足载波信号在中压配电网电缆线路的耦合通信要求, 需要高耦合效率的卡式电感耦合器。提出一种中压配电网载波通信卡式电感耦合器耦合模型, 并对其耦合效率进行了分析。首先在卡式电感耦合器结构型式及电缆线路结构特征基础上, 分析卡式电感耦合器的耦合机理。然后结合罗氏线圈与松耦合变压器模型, 推导卡式电感耦合器的耦合数学模型, 修正卡式电感耦合器互感系数。并利用 ansoft 电磁软件搭建仿真模型, 验证所推导的卡式电感耦合器耦合数学模型的正确性。最后利用耦合器数学模型及仿真模型, 分析卡式电感耦合器不同影响因子: 耦合器磁环气隙、磁环相对磁导率、绕组匝数以及耦合器骨架尺寸对电缆侧电压耦合效率的影响。仿真结果与计算结果均表明, 所提耦合器数学模型能够准确地反映耦合器的耦合情况, 为电力线载波技术在智能配电网中的实用化提供了较好的分析方法和理论依据。

关键词: 中压配电网; 电力线载波通信; 卡式电感耦合器; 耦合模型

Clamp inductive coupler coupling model of medium voltage distribution network carrier communication

WANG Yan, CHEN Jiayu, ZHAO Hongshan, LI Yongliang, ZHANG Xian

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

Abstract: In order to meet the coupling communication requirements of the carrier signal in the medium voltage distribution network cable line, a clamp inductive coupler with a high coupling efficiency is required. This paper proposes a clamp inductive coupler coupling model of medium-voltage distribution network carrier and analyzes its coupling efficiency. Firstly, the coupling mechanism of the clamp inductive coupler is analyzed on the basis of the structure type of the clamp inductive coupler and the structure of the cable circuit; then, the coupled mathematical model of the clamp inductive coupler is deduced in combination with the Rogowski coil and the loose-coupling transformer model, and the mutual inductance is modified. The mutual inductance coupler is used to construct a simulation using ansoft electromagnetic software to verify the correctness of the deduced coupled mathematical model of the clamp inductive coupler. Finally, the different effects of the clamp inductive coupler are analyzed using the coupler mathematical model and simulation model. The effect of the air gap of the coupler ring, the relative permeability of the ring, the number of winding turns, and the frame size of the coupler on the voltage coupling efficiency at the cable side is analyzed. The simulation results and calculation results show that the mathematical model of the coupled coupler can accurately reflect the coupled state of the coupler, which provides a good analysis method and theoretical basis for the practical application of the power line carrier technology in the intelligent distribution network.

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

Key words: medium voltage distribution network; power line carrier communication; clamp inductive coupler; coupled model

0 引言

载波通信是将电力线作为信息传输媒介进行语

音或数据传输的一种特殊通信方式, 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, 已成为中压配电通信网的一种重要选择^[1-5]。载波通信装置是通过耦合设备将载波信号耦合到架空线或埋地电缆中的。耦合设备按耦合方式可分为电容耦合器与电感耦合器两种, 电容耦合器

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资助(2019MS081)

直接接于架空线上,而电感耦合器多用于电缆线路中。电感耦合器又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基于电磁感应原理的、非接触感应电能的耦合通信,可在不断电的情况下实现实时通信,弥补了与导线直接接触的缺点,且安装灵活便利,在中压配电网电缆线路的载波通信^[6-7]中具有较广阔的应用空间。

当前,已有很多专家学者对非接触感应电能通信方面进行了研究。文献[8]指出了一种采用可分离变压器传输能量的非接触电能传输系统。分析了可分离变压器的工作特性,得出了影响传输功率的几个因素,文献并未阐述其数学模型是否可用在非接触感应耦合电能的载波通信方向。文献[9-10]基于前人松耦合变压器的基础上,提出了松耦合变压器的互感等效电路模型,并根据松耦合变压器的特点,分析了铁芯材料、气隙大小等因素对变压器耦合的影响。同时,针对原、副边漏感的特性,进一步讨论了变压器原、副边电路补偿问题,并没有阐述其互感模型可用在什么方向。文献[11-14]综合考虑线圈谐振频率、耦合因数等因素,利用互感耦合理论对电能传输系统进行建模分析,给出系统传输功率和效率的计算方法。文献[15-16]基于磁场耦合无线电能传输技术,提出并设计了一种磁耦合系统的补偿网络,并对补偿网络进行了分析。但上述对非接触感应电能通信的研究主要集中应用在无线通信方面^[17]。而电力线载波通信是有线通信,且中压电缆线路多为一缆三芯结构,信道结构复杂、通信环境恶劣,对于电缆线路的卡接式电感耦合器耦合原理及耦合模型的研究文献甚少,文献[18]给出了电感耦合器的简单等效模型,但没有指明载波信号是耦合到电缆芯线还是屏蔽层,且未分析耦合效率的大小。

本文在分析卡式电感耦合器结构型式及耦合机理基础上,结合可分离变压器中的互感模型与罗氏线圈法,推导卡接式电感耦合器的数学模型,分析影响耦合器耦合效率的相关因素。并于ansoft软件中搭建了电磁仿真模型,将推导的数学模型与仿真模型进行对比分析,验证数学模型的准确性。

1 卡式电感耦合器耦合原理

卡接式电感耦合器是一种穿心、电磁式互感器^[19]。如图1所示,卡接式电感耦合器由两个半圆形磁环构成,其接触面之间存在微小的间隙;其初级线圈紧密缠绕在耦合器一侧的铁氧磁环上,与相

应的载波机串联形成回路,次级线圈为中压配网的电缆线路。中压配电网电缆线路多为一缆三芯线路,且每相芯线都有屏蔽层。

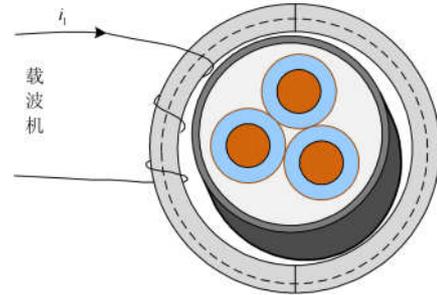


图1 卡式电感耦合器

Fig. 1 Clamp inductive coupler

当载波机发出交变的载波信号时,相当于在初级线圈上通入一载波电流 i_1 ,根据安培环路定理, i_1 将会在电感耦合器的铁氧磁环上产生一个环形的磁场,由于铁氧体磁环磁导率远大于空气的磁导率,因而其环形磁场几乎全部在耦合器磁环中。

由于耦合器卡接在电缆线路上,电缆的三相缆芯与屏蔽层均穿过耦合器磁环,即缆芯回路和屏蔽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,又可耦合到电缆三相缆芯上。并且缆芯回路和屏蔽层回路所包围的磁通完全相同,因而电缆的三相缆芯和电缆屏蔽层所产生的感应电动势大小相等,由法拉第电磁感应定律可知,电缆三相缆芯及屏蔽层上的感应电压 u_2 为

$$u_2 = -M \frac{di_1}{dt} \quad (1)$$

式中: i_1 为载波机发出的载波电流; M 表示卡式电感耦合器初级线圈与电缆回路的互感。

综上所述,若想得到电缆端耦合电压,最重要的因素是求取式(1)当中的互感因子 M 。

2 卡式电感耦合器互感因子的求取

通常互感 M 的选取是通过公式 $M = K\sqrt{L_1L_2}$ 计算得到^[20]。其中, K 表示耦合系数, L_1 表示初级线圈自感, L_2 表示次级线圈自感。 L_1 与 L_2 一般通过测量得到,而中压配电网载波通信的频段集中在50~500 kHz内,不同频带范围内测得的初级线圈电感 L_1 存在一定的误差;而电缆线圈的长度、型号的不同,也会使电缆线圈电感 L_2 的测量值存在一定的变化;并且,由于卡式电感耦合器带有一定的气隙,应用时气隙大小的不同也会影响到耦合系数 K 的大小,进而影响互感 M ,因此通过测量值求取各种频

段情况下互感 M 的准确数值存在一定难度,因而本文结合卡式电感耦合器结构原理,采用改进罗氏线圈法推导互感 M 的数学计算公式。

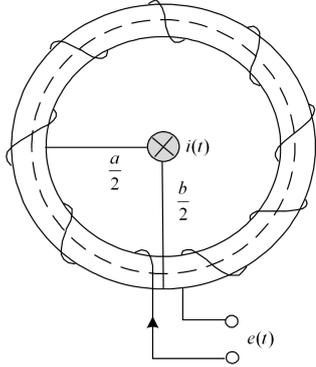


图2 罗氏线圈简化模型

Fig. 2 Simplified model of Rogowski coil

如图2所示,传统罗氏线圈是一种空心环形的线圈,在缠绕均匀的情况下使用,当线圈中心导线通入一个随时间变化的电流 $i(t)$ 时,在其周围会产生一个随时间变化的磁场,则磁场将在环形线圈的两出线端间感应出一个电势 $e(t)$,其电势的大小与罗氏线圈互感有关。其互感计算公式^[21]为

$$M = \frac{\mu_0 N h \ln(b/a)}{2\pi} \quad (2)$$

式中: μ_0 表示真空磁导率; N 表示罗氏线圈的匝数, b 表示线圈横截面的外径; a 表示线圈横截面的内径; h 为罗氏线圈的高度。

根据互感的互易原理可知,在罗氏线圈上通入一交变电流 $i(t)$ 时,其产生的磁场与穿心回路存在耦合关系,且互感的大小同式(2)。

卡式电感耦合器的结构原理与罗氏线圈较为相似,但卡式电感耦合器的初级线圈缠绕于铁氧磁环上,且铁氧磁环的磁芯存在两个微小气隙,并不是完全闭合的,所以卡式电感耦合器互感 M 的计算式需要在式(2)的基础上进行修正^[22-23]。

由磁通连续定理可知,铁氧体磁芯各个截面的磁通量 ϕ_B 应相等。

磁芯处的磁通为

$$\phi_B = B_1 S \quad (3)$$

式中: B_1 为磁芯的磁感应强度; S 为铁氧体磁环的截面积, $S = ((b-a)/2)h$, a 、 b 为铁氧体磁环对应的内、外径, h 为铁氧体磁环的高度。

气隙处的磁通为

$$\phi_B = B_0 S_0 \quad (4)$$

式中: B_0 为气隙的磁感应强度; $S_0 = ((b-a)/2)h +$

$((b-a)/2 + h)\delta$, S_0 为气隙对的截面积,在气隙内由于气隙的长度远远小于磁芯回路的长度,磁场虽有所散开,但散开不大, h 为铁氧体磁环的高度。

联合式(3)、式(4)得

$$B_0 = \frac{(b-a)h}{(b-a)h + (b-a+2h)\delta} B_1 = KB_1 \quad (5)$$

当在卡式电感耦合器初级线圈上加入一载波电流 i_1 时,根据安培环路定理,可求得耦合器磁环的有效磁导率 $\mu_{\text{有效}}$ 。

$$\int B_1 / \mu_{\text{有效}} dl = \int B_1 / \mu_r \mu_0 dl_0 + \int B_0 / \mu_0 d\delta$$

$$\text{即: } \frac{B_1}{\mu_{\text{有效}}} l = \frac{B_1}{\mu_r \mu_0} l_1 + \frac{B_0}{\mu_0} 2\delta$$

整理得耦合器磁环的有效磁导率为

$$\mu_{\text{有效}} = \frac{\mu_0 \mu_r l}{l_1 + 2K\delta\mu_r} \quad (6)$$

式中: μ_r 为磁芯材料的相对磁导率; $l = l_1 + 2\delta$ 为耦合器回路长度的平均值; l_1 为磁芯回路长度; δ 为单个气隙的长度。

将式(6)代入式(2),可将卡式电感耦合器互感的计算公式修正为

$$M = \frac{\mu_0 \mu_r l}{l_1 + 2K\delta\mu_r} \frac{N h \ln(b/a)}{2\pi} \quad (7)$$

结合式(1)可知,当卡式电感耦合器初级线圈上通入一载波电流 i_1 时,电缆侧感应电压的有效值为

$$U_2 = 2\pi f \cdot M \cdot I_1 =$$

$$2\pi f \cdot \frac{\mu_0 \mu_r l}{l_1 + 2K\delta\mu_r} \frac{N h \ln(b/a)}{2\pi} \cdot I_1 \quad (8)$$

式中, f 为载波信号的频率。

3 仿真实验

3.1 仿真结果

图3为本文应用有限元 ansoft 软件搭建的卡式电感耦合器的二维电磁场模型。以保定市常用 YJV22-3×400 电缆为例,其电缆外径 96 mm,卡式电感耦合器外径为 116 mm。在耦合器的初级线圈上加入一有效值为 1 A、工作频率为 100 kHz 的正弦交流激励源。耦合器初级线圈为 3 匝,次级线圈是匝数为 1 匝的电缆回路,耦合磁环气隙设为 0.1 mm,相对磁导率设为 2 000。在此工况下,在电缆的三个芯线上与屏蔽层的感应电势如图4所示。

由 1.1 节电磁感应定律可知,由于电缆三芯回路和屏蔽层回路处于相同的垂直磁场环境中,故电缆三相芯线感应电压和屏蔽层感应电压应该相等。通过图4的 ansoft 有限元仿真可见,其屏蔽层感应

电压和缆芯的感应电压大小完全相等，验证了卡式电感耦合器耦合原理的正确性。

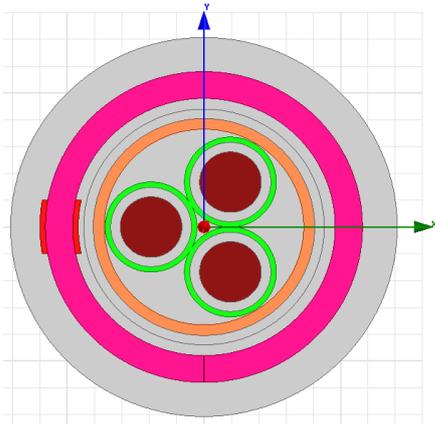


图 3 卡式电感耦合器耦合模型

Fig. 3 Coupling model of clamp inductive coupler

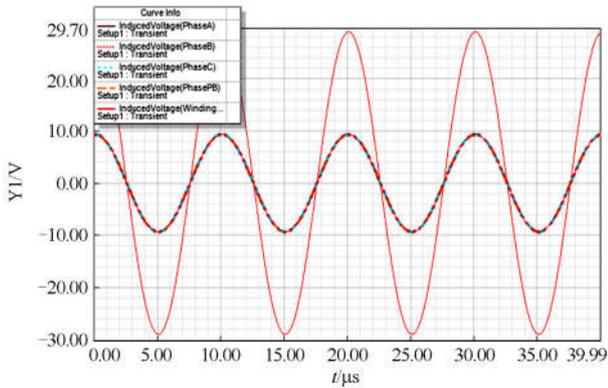


图 4 卡式电感耦合器缆芯和屏蔽层耦合电压

Fig. 4 Core and shield coupling voltage of clamp inductive coupler

在耦合器的初级线圈侧(原边)加入一有效值为 1 A、工作频率为 100 kHz 的载波电流源时，耦合器原边测得电压 $u_1 = 28.99/\sqrt{2} V$ ；电缆侧(副边)的感应电压 $u_2 = 9.32/\sqrt{2} V$ 。表 1 给出了按 3:1 理想变比计算得到的副边电压、按本文修正计算公式得到的副边电压与仿真实测电压的误差对比分析。由表 1

表 1 理想变比与修正计算误差对比分析

Table 1 Error comparative analysis of ideal variable ratio and corrected calculation

	原边 电流/A	原边仿真 电压/V	副边仿真 电压/V	副边计算 电压/V	误差/%
按变比	1	$\frac{28.99}{\sqrt{2}}$	$\frac{9.32}{\sqrt{2}}$	$\frac{9.66}{\sqrt{2}}$	3.68
按公式	1	$\frac{28.99}{\sqrt{2}}$	$\frac{9.32}{\sqrt{2}}$	$\frac{9.23}{\sqrt{2}}$	0.97

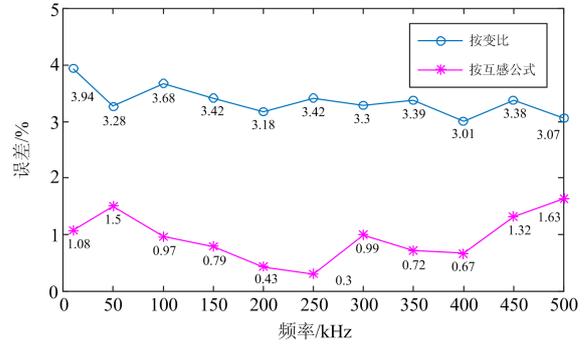


图 5 不同频点误差对比图

Fig. 5 Error comparison chart for different frequencies

可知，本文经修正互感公式后得到的副边电压与仿真实测副边电压更为接近，验证了本文推导的互感修正公式的准确性。

城市中压配电网配电台区半径在 5 km 左右，要求载波信号传输距离较长，故通信频段通常选为 10~500 kHz 窄带频带范围。为反映本文修正计算公式在不同频点下计算的准确性，图 5 给出了耦合器相对磁导率为 2 000、气隙为 0.1 mm 时，不同频点下副边耦合电压的误差分析。由图 5 可知，本文给出的修正计算公式在窄带范围内耦合电压误差不超过 1.7%，具有较高的精度。

3.2 实验室测试

为进一步验证上述仿真与理论计算值的准确性，本文在实验室进行了耦合测试，如图 6 所示。

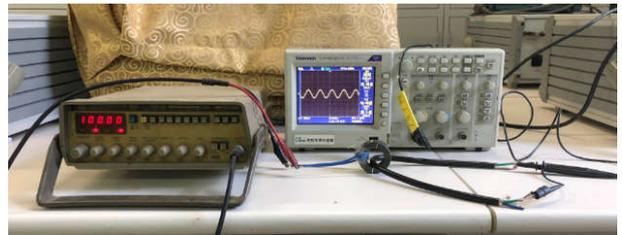


图 6 实验室测试

Fig. 6 Laboratory test

耦合器尺寸 42 mm × 25 mm × 16 mm，耦合器初级线圈由截面积为 1.5 mm² 的漆包线绕制而成，次级线圈由 3 芯 × 1.5 mm² 信号线绕制而成，测试中载波信号源为手动可调频点的信号发生器，耦合器气隙测量约为 0.1 mm，耦合器相对磁导率为 2 300 左右，初级线圈匝数为 3 匝。由于实验条件限制，表 2 给出了几个固定频点下耦合器副边电压的计算值与测量值对比结果。由表 2 可知实验测量耦合电压与计算所得耦合电压误差在 8% 以内，验证了理论推导公式的准确性。

表2 实验与理论计算对比

气隙/ mm	原边 电流/A	频率/ kHz	副边实验 测量电压/V	副边计算 电压/V	误差/ %
0.1	0.2	100	0.281	0.272	3.1
0.1	0.2	150	0.386	0.408	5.7
0.1	0.2	200	0.533	0.544	2.1
0.1	0.2	300	0.874	0.816	7.6
0.1	0.2	400	1.117	1.088	2.6

4 卡式电感耦合器耦合效率影响因素分析

由式(7)可知,卡式电感耦合器互感 M 的大小与其骨架尺寸、绕组绕线匝数、气隙和铁芯材料的磁导率等因素有关,互感 M 的大小进而会影响到电缆中耦合互感电压。

4.1 气隙对耦合电压的影响

卡式电感耦合器由两个半圆形的磁芯相接而成,两圆环连接处存在微小气隙。但由于磁芯的磁导率与空气磁导率相差较大,卡式电感耦合器的气隙并不能忽略,气隙的大小将直接影响耦合器的耦合效率。表3给出了在其他参数不变的情况下,只改变磁环气隙大小时,仿真与本文计算得到的耦合电压对比结果。由表3可知:1)随着气隙的增加,电缆侧的耦合电压明显降低;2)随着气隙的增加,本文计算得到的耦合电压与仿真测得的电压误差也明显增大。原因分析:本文在推导互感 M 时认为所有磁通集中在铁氧磁环中,未考虑漏磁的影响,但随着耦合器气隙的增加,漏磁不可忽略,故误差也会增加。实际载波机的输出电压通常为十几伏到几十伏,耦合器耦合到电缆侧的电压则更小,为了使载波信号传输距离尽量长,耦合器的两个铁氧磁环应尽量紧密接触,气隙越小越好。

表3 不同气隙下的耦合电压

气隙/ mm	原边 电流/A	频率/ kHz	副边仿真 电压/V	副边计算 电压/V	误差/%
0.02	1	100	$\frac{16.26}{\sqrt{2}}$	$\frac{16.28}{\sqrt{2}}$	0.12
0.05	1	100	$\frac{12.68}{\sqrt{2}}$	$\frac{12.63}{\sqrt{2}}$	0.39
0.1	1	100	$\frac{9.32}{\sqrt{2}}$	$\frac{9.23}{\sqrt{2}}$	0.97
0.2	1	100	$\frac{6.18}{\sqrt{2}}$	$\frac{6.02}{\sqrt{2}}$	2.59
0.4	1	100	$\frac{3.82}{\sqrt{2}}$	$\frac{3.60}{\sqrt{2}}$	5.76

4.2 铁芯材料对耦合电压的影响

由式(8)可知,提高耦合器磁环的相对磁导率可

有效提高耦合电压的数值。图7给出了在其他参数不变的情况下,只改变磁环相对磁导率时,仿真及计算得到的耦合电压对比结果。

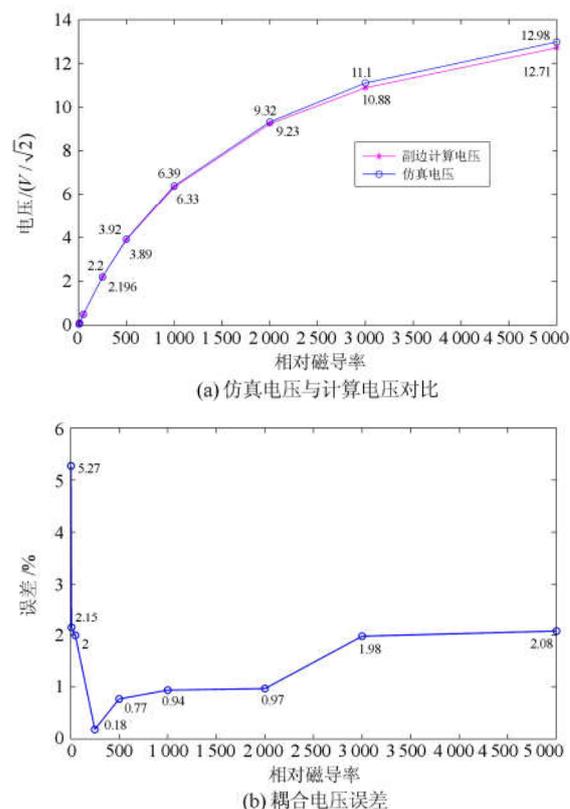


图7 仿真电压与计算电压对比结果

Fig. 7 Comparison of simulation voltage and calculated voltage

由图7(a)可知,随着磁导率的增大,耦合电压数值越来越高,但其增长趋势明显减缓;由图7(b)可知,随着磁导率的增大,耦合电压的误差也越来越大;故不能通过一味的提高铁氧磁环相对磁导率来提升耦合电压。文献[24-25]指出,铁氧体的相对磁导率越高,其低(1 MHz内)时的阻抗越大,损耗越大;高频时的阻抗越小,损耗越小,不同频段的使用区间对应着不同的最优相对磁导率。中压配网载波通信的通频段为10~500 kHz,从实际应用角度来看,卡式电感耦合器磁芯所用铁磁材料的相对磁导率也不宜过高。且应用材料的相对磁导率越高,对其工艺水平要求越高,造价也越高。因而实际应用中,要根据所使用的频率范围选择合适导磁材料制作耦合器铁氧磁环。中压配网窄带载波通信系统中,耦合器铁氧磁环常用材料为锰锌铁氧体和镍锌铁氧体,锰锌铁氧体的相对磁导率常用范围为400~10 000,其对应的频率常用使用范围为1 kHz~10 MHz。镍锌铁氧体的相对磁导率常用范围为10~2 500,其对应的频率常用使用范围为10 kHz~300 MHz。

4.3 初级线圈匝数对耦合电压的影响

对于载波发信端而言,卡式电感耦合器的初级线圈缠绕于耦合器铁氧磁环上,次级线圈为中压配网的电缆回路。可通过改变耦合器初级线圈匝数,调整耦合电压的大小。

若载波发信机为一等效电流源,则由式(8)可知,提高耦合器初级线圈匝数可有效提高耦合电压的数值。表4给出了耦合器磁环相对磁导率为2000,气隙为0.1 mm,激励电流为1 A时,不同初级线圈匝数对应的耦合电压对比。由表3可知,随着初级线圈匝数的增加,耦合器原边、副边电压均随着增长;且初级线圈在3匝时,误差最小,后随着匝数的增加,误差逐渐变大。为使电缆侧耦合电压尽量高,应增大初级线圈匝数,但随着初级线圈匝数的增加,耦合器原边电压也随之增大,而与初级线圈相连的载波发信机所能承受的最大工作电压是有限的,故耦合器初级线圈的匝数不宜过多。

表4 不同匝数下对耦合电压的影响

Table 4 Effect on coupling voltage under different numbers of turns

匝数	原边仿真 电压/V	副边仿真 电压/V	副边计算 电压/V	误差/%
1	$\frac{3.21}{\sqrt{2}}$	$\frac{3.12}{\sqrt{2}}$	$\frac{3.07}{\sqrt{2}}$	1.60
2	$\frac{12.86}{\sqrt{2}}$	$\frac{6.22}{\sqrt{2}}$	$\frac{6.15}{\sqrt{2}}$	1.13
3	$\frac{28.94}{\sqrt{2}}$	$\frac{9.32}{\sqrt{2}}$	$\frac{9.32}{\sqrt{2}}$	0.97
4	$\frac{51.45}{\sqrt{2}}$	$\frac{12.50}{\sqrt{2}}$	$\frac{12.30}{\sqrt{2}}$	1.60

同理若载波发信机为一等效电压源 U_1 时,则初级矩形线圈侧电流 $I = \frac{U_1}{X}$, $X = 2\pi f N^2 \Lambda_m$ 为初级线圈的电抗, Λ_m 为磁路磁导。结合式(8)可知,若载波发信机为一等效电压源时,电缆侧耦合电压与初级线圈的匝数成反比。为了让电缆线圈获得更大的耦合电压,应适当减少初级线圈匝数。

实际应用中,应根据载波机收发类型及电源类型,选择合适的耦合器初级线圈匝数,以提高耦合器的耦合能力,降低耦合误差。

4.4 耦合器骨架尺寸对耦合电压的影响

卡式电感耦合器要卡接于城市中压配网中的埋地电缆上,故耦合器磁环的内径不能过小,要大于等于电缆外径,否则耦合器磁环间会存在较大的气隙,影响耦合效果。同时,为了使耦合器磁芯中的磁通与电缆回路能够尽量垂直交链,耦合器的内径应当尽可能的贴紧电缆的外径,故通常取耦合器内

径与电缆外径相等。

耦合器磁环的磁阻为

$$R = \frac{l}{\mu s} = \frac{\pi \left(\frac{a+b}{2} \right)}{\mu \left(\frac{b-a}{2} \right) h} = \frac{\pi}{\mu h} \left(1 + \frac{2a}{b-a} \right)$$

耦合器的磁阻越小,损耗越低。根据磁阻的表达式,为减小耦合器损耗,应使耦合器的外径尽量粗,高度尽量高。但耦合器外径过粗,高度过高,实际安装操作不方便。根据实际厂家的生产情况,耦合器的经验高度在9~15 cm为宜。在耦合器体积确定情况下,可依次确定磁环的骨架尺寸。

5 结论

电力线载波通信是中压配电通信网的一种重要选择。卡式电感耦合器是载波信号接入中压配电网电缆线路的主要耦合设备。本文首先分析了卡式电感耦合器结构型式,结合电缆线路结构特点,阐述了卡式电感耦合器的耦合机理;在此基础上,结合罗氏线圈与松耦合变压器模型,推导了卡式电感耦合器的耦合数学模型,修正了卡式电感耦合器互感系数,利用ansoft电磁软件搭建了仿真模型,验证所推导的卡式电感耦合器耦合数学模型的正确性,并利用实验验证了理论的准确性。利用耦合器数学模型及仿真模型,分析了卡接式电感耦合器不同影响因子:耦合器磁环气隙、磁环相对磁导率、绕组匝数以及耦合器骨架尺寸对电缆侧电压耦合效率的影响。该数学模型为电力线载波技术在智能配电网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] 李建岐, 陆阳, 高鸿坚. 基于信道认知在线可定义的电力线载波通信方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5235-5243.
LI Jianqi, LU Yang, GAO Hongjian. On (power-) line defined power line communication solution based on channel sensing[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5235-5243.
- [2] 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. Study on multi-node broadband power line channel modeling[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 18-25.
- [3] 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.
- [4] 钟迪, 李启明, 周贤, 等. 多能互补能源综合利用关键技术研究现状及发展趋势[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 1-5, 55.
- ZHONG Di, LI Qiming, ZHOU Xian, et al. Research status and development trends for key technologies of multi-energy complementary comprehensive utilization system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 1-5, 55.
- [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] 薛晨, 王艳, 焦彦军. 中压配电网电力线载波通信系统自适应频点选择算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 24-29.
- XUE Chen, WANG Yan, JIAO Yanjun. Adaptive frequency selection algorithm for power line carrier communication system in medium voltage distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 24-29.
- [7] LI Z, YE L, ZHAO Y, et al. Short-term wind power prediction based on extreme learning machine with error correction[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 9-16. DOI: 10.1186/s41601-016-0016-y.
- [8] 韩腾, 卓放, 刘涛, 等. 可分离变压器实现的非接触电能传输系统研究[J]. 电力电子技术, 2004(5): 28-29, 82.
- HAN Teng, ZHUO Fang, LIU Tao, et al. Contactless power transfer system using isolation transformer[J]. Power Electronics Technology, 2004(5): 28-29, 82.
- [9] 詹厚剑, 吴杰康, 赵楠, 等. 非接触感应电能传输系统松耦合变压器参数设计[J]. 现代电力, 2009, 26(1): 40-44.
- ZHAN Houjian, WU Jiekang, ZHAO Nan, et al. Parametric design for loosely coupled transformer in contactless inductive power transfer system[J]. Modern Electric Power, 2009, 26(1): 40-44.
- [10] 王懿杰, 姚友素, 刘晓胜, 等. 无线电能传输用 S/CLC 补偿拓扑分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 34-41.
- WANG Yijie, YAO Yousu, LIU Xiaosheng, et al. Analysis on S/CLC compensation topology for wireless power transfer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 34-41.
- [11] 李阳, 张雅希, 杨庆新, 等. 磁耦合谐振式无线电能传输系统最大功率效率点分析与实验验证[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 18-24.
- LI Yang, ZHANG Yaxi, YANG Qingxin, et al. Analysis and experimental validation on maximum power and efficiency in wireless power transfer system via coupled magnetic resonances[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(2): 18-24.
- [12] 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 transform via magnetic resonance coupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(21): 161-168.
- [13] 丰昊, 蔡涛, 段善旭, 等. 一种抗宽范围耦合系数波动的三元件补偿型感应式能量传输系统[J]. 电工技术学报, 2017, 32(增刊 2): 10-17.
- FENG Hao, CAI Tao, DUAN Shanxu, et al. A three-element inductive power transfer system with high misalignment tolerance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S2): 10-17.
- [14] 夏晨阳, 解光庆, 林克章, 等. 双 LCL 补偿 ICPT 系统双谐振点特性及最大输出功率研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5200-5208, 5401.
- XIA Chenyang, XIE Guangqing, LIN Kezhang, et al. Study of dual resonance point characteristics and maximum output power of ICPT based on double LCL compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5200-5208, 5401.
- [15] 景妍妍, 曲小慧, 韩洪豆, 等. 基于可调增益恒流源补偿网络的磁场耦合无线电能传输 LED 驱动电路[J]. 电工技术学报, 2016, 31(增刊 1): 1-8.
- JING Yanyan, QU Xiaohui, HAN Hongdou, et al. The magnetic coupled wireless power transfer driver based on adjustable gain constant-current compensation network[J]. Electrical Technology, 2016, 31(S1): 1-8.
- [16] 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.
- [17] 张波, 疏许健, 黄润鸿. 感应和谐振无线电能传输技

- 术的发展[J]. 电工技术学报, 2017, 32(18): 3-17.
ZHANG Bo, SHU Xujian, HUANG Runhong. The development of inductive and resonant wireless power transfer technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(18): 3-17.
- [18] 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, 50.
LI Jianqi, LI Xiangzhen. Discussion on coupling mode of carrier communication on distribution network[J]. Power System Communications, 2007(4): 34-38, 50.
- [19] 林勇, 倪有源. 电流互感器三维磁场分析与互感计算[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(1): 27-30.
LIN Yong, NI Youyuan. 3-D magnetic field analysis and mutual inductance computation of current transducer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(1): 27-30.
- [20] 毛世通, 朱春波, 李阳, 等. 应用于无线电能传输系统的中继线圈工作性能[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 27-32.
MAO Shitong, ZHU Chunbo, LI Yang, et al. Operation performance of repeating coil for wireless power transfer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(9): 27-32.
- [21] TAO Tao, ZHAO Zhihua, MA Weiming. Precise mutual-inductance analysis of a novel clasp Rogowski coil with symmetrical double-printed imprints[C] // 2012 Sixth International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications, June 19-21, 2012, Dalian, China: 1-4.
- [22] HAGH A K A, ASHTIANI S J, AKMAL A A S. A wideband, sensitive current sensor employing transimpedance amplifier as interface to Rogowski coil[J]. Sensors & Actuators: A Physical, 2017, 256: 43-50.
- [23] FERKOVIĆ L, ILIĆ D, LENIČEK I. Influence of axial inclination of the primary conductor on mutual inductance of a precise Rogowski coil[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(11): 3045-3054.
- [24] 黄爱萍. 锰锌铁氧体损耗、磁导率和阻抗特性及制备技术究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
HUANG Aiping. Power loss, permeability and impedance characteristics and preparation technology of manganese zinc ferrites[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [25] 聂建华. 高性能 MnZn 铁氧体材料的制备及机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
NIE Jianhua. Study preparation and mechanism of high properties MnZn ferrites[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.

收稿日期: 2018-07-06; 修回日期: 2018-09-30

作者简介:

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

陈家玉(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为中压电力线载波通信; E-mail: 541618115@qq.com

赵洪山(1965—), 男, 教授, 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等。

(编辑 姜新丽)