

低压电力线载波通信零线耦合方法研究

王贤辉¹, 徐鲲鹏¹, 李 铮¹, 代洪光¹, 凌志强²

(1.北京智芯微电子科技有限公司,北京 102200;2.北京智芯半导体科技有限公司,北京 102299)

摘 要:针对低压配电台区电力线信道受线路衰减、负载特性等诸多因素影响导致电力线载波通信不稳定的问题,提出一种低压电力线载波通信零线耦合方法。首先,对低压配电台区线路拓扑结构进行分析,阐述低压电力线载波通信零线耦合方法原理,建立电力线载波通信零线耦合的信道模型;然后,采用 Matlab 软件对电力线载波通信零线耦合的性能进行仿真;最后,结合施工案例对零线耦合模型的准确性及应用效果进行评估。结果表明,在典型 5 分支重负载线路条件下,零线耦合方法对电力线载波通信信道衰减降低 24.9 dB 以上;现场施工后对数据抄收成功率提升效果显著,具有安全性高、易施工等诸多优点,可作为低压配电台区电力线载波通信有效的运维手段。

关 键 词:低压配电台区;电力线载波;零线耦合;线路衰减

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2023.04.024 中图分类号:TN913.6 文章编号:1673-9140(2023)04-0222-08

Research of neutral line coupling method in low voltage power line carrier communication

WANG Xianhui¹, XU Kunpeng¹, LI Zheng¹, DAI Hongguang¹, LING Zhiqiang²

(1.Beijing SmartChip Microelectronics Technology Co., Ltd., Beijing 102200, China;
2.Beijing SmartChip Semiconductor Technology Co., Ltd., Beijing 102299, China)

Abstract: Aiming at the instability of low-voltage power line carrier communication (PLC) problem caused by many factors including line attenuation, load characteristics and so on, a neutral line coupling method of low-voltage PLC is proposed in this paper. Firstly, the topological structure of low-voltage distribution area is analyzed. Secondly, the principle of neutral line coupling method of low-voltage PLC is described, and the PLC channel models of neutral line coupling in this paper are established. Then the performance of neutral line coupling of PLC is simulated using Matlab software. Finally, the accuracy and application effect of neutral line coupling is evaluated with practical cases. The results show that the neutral line coupling method in this paper reduces the attenuation of PLC channel by more than 24.9 dB under the typical five branch heavy load line conditions; after on-site construction, the success rate of data acquisition is significantly improved. It has many advantages such as high safety and easy construction, and can be used as an effective operation and maintenance means for PLC in low-voltage distribution area.

Key words: low voltage distribution area; power line carrier; neutral line coupling; line attenuation

高速电力线载波通信 (high-speed power line communication, HPLC) 技术已经在低压配电系统获得了大规模的应用并取得良好的效果^[1]。然而,

低压配电台区电力线信道条件复杂,受线路拓扑、环境条件及负载特性等诸多因素影响,容易导致 HPLC 出现不稳定的问题^[2-6]。据文献[5]对台区用

收稿日期:2022-08-07;修回日期:2022-11-07

基金项目:国家电网公司科技项目(5600-202013166A-0-0-00)

通信作者:王贤辉(1983—),男,硕士,高级工程师,主要从事电力信息通信技术研究;E-mail:wangxianhui1@sgchip.sgcc.com.cn

电信息采集系统影响采集成功率的因素统计, HPLC 的因素占到 10%。随着新型电力系统建设的深入推进, 低压配电台区本地通信网络对业务带宽、采集频度及可靠性等提出了越来越高的要求^[1,7], 导致 HPLC 现场运维工作量大幅度增加^[2-3]。

针对以上问题, 传统的解决方法主要以安装信号中继器、调整采集终端位置以及修改采集时间避开不稳定时段等为主^[5-6]。然而, 这些方法涉及电力线路的改造, 安装位置难以选择, 解决效果难以得到保障。如何找到安全性高、易施工和效果好的 HPLC 工程运维解决方法, 是研究人员面临的一个难题。电感耦合作为一种安全可靠的载波信号耦合技术, 在中压载波通信获得了成功应用^[8-11], 其中文献[8]研究了载波信号在中压地理电缆中的耦合原理及信道模型; 文献[10]研究了中压配电网载波通信卡式电感耦合器耦合模型。电感耦合在低压配电台区载波通信理论研究方面文献相对较少, 其中文献[12]研究了低压电力线载波通信宽带耦合技术, 其研究表明, 电感耦合比电容耦合的衰减大 2~4 dB, 但电感耦合不用与电力线直接连接, 适用于线路低阻抗点信号的注入。综合研究表明, 安装在零线的电感耦合(零线耦合)是低压配电系统 HPLC 通信不稳定问题可靠运维解决方案之一^[10-13]。然而, 近年来对低压配电台区电力线载波通信零线耦合方法建模的理论研究和工程应用尚无相关报道。

在对低压配电系统线路拓扑结构分析的基础上, 本文研究低压电力线载波通信零线耦合方法, 建立低压配电台区电力线载波通信零线耦合的信道模型, 并采用 Matlab 软件对零线耦合性能提升效果进行仿真研究, 最后结合施工案例对零线耦合模型准确性以及应用效果进行验证。

1 低压配电台区线路拓扑结构分析

1.1 低压配电台区线路拓扑构成

低压配电系统位于电网的最末端, 是连接大电网与终端用户的桥梁, 直接关系到用户的电能质量和供电可靠性。配电变压器将中压配电系统的 10 kV 电压转换为 380 V/220 V 低电压, 然后通过分

支开关从配电变压器分配到配备电表的用户。低压配电网从配电间到用户配电箱的典型网络拓扑为辐射状树型复合结构, 可以由地理电缆、架空电缆及开关装置等组成, 每条低压线向若干个低压用户供电, 如图 1 所示。

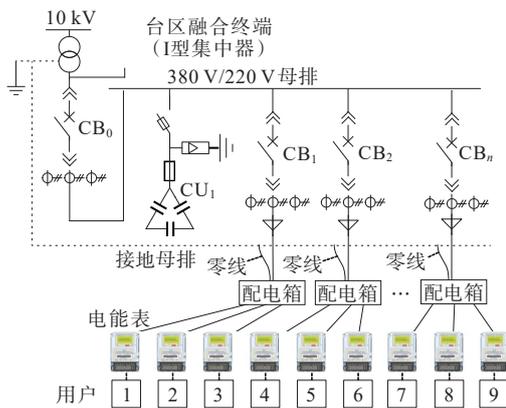


图 1 低压配电台区线路拓扑构成

Figure 1 Topology composition of low voltage distribution area

与传统的中、高压输电线网络中基于输电网实现长距离点到点的数据传输不同, 低压配电系统是一个开放式的网络, 电力线载波通信是利用其固有的辐射状树型配电网网络拓扑结构, 实现点对多点的通信, 信号会沿着配电网线路传输到配电网的每一条分支及线路的每一个节点; 每一个节点都会同时作为信号发送的源或信号接收的目的节点。

1.2 低压配电系统对电力线载波通信的影响

低压配电网电力线是用来传输交流电的, 利用电力线建立载波通信通道存在不少困难。主要表现为高频载波信号传输衰减大、环境噪声电平高以及各种干扰在多线路之间耦合等^[3,14-15]。

现有电力线载波通信主要利用 0.7~12.0 MHz 频段, 一般采用相零耦合方式将载波信号加在相线和零线之间, 受到多种条件影响, 通信稳定性随时间和线路变化差异性较大。以典型的城市环网柜应用为例, 一般集中器安装在总断路器前, 载波信号需要穿越很多配电设备, 如总断路器、无功补偿、分支断路器、多分支的地理电缆和分接箱等, 各种负载类型不同导致阻抗的变化也不相同^[14-15]。文献[15]中低压线路的峰值负载和最小负载的比率为 7:1~19:1, 阻抗变化导致载波信号衰减不稳定, 甚至超出信号接收允许的范围。

2 低压电力线载波通信零线耦合建模

零线耦合的基本原理是基于变压器电磁感应耦合的方式,将电力线导线(零线)作为副边线圈而将高频载波信号线作为原边线圈,通过一个高导磁率的磁芯或磁环构成了一个信号传输变压器,把载波信号耦合到电力线通信回路的零线上,或从零线上提取载波信号,完成载波信号在电力线上的传输。相比传统的相零耦合采用电压注入方式,零线耦合采用电流注入方式,具有更低的接入阻抗,可以一定程度上通过延长线选择合适的耦合位置(避开分支线路的信号分流),能够避开配电路路上的配电设施带来的信号衰减,阻抗匹配电路设计更为简单可靠,受负载阻抗变化影响较小,从而达到提高载波通信的稳定性和成功率的效果。

接下来本文将在研究低压配电台区电力线载波通信传统相零耦合的正、反向信道模型基础上,建立低压配电台区电力线载波通信零线耦合的正、反向信道模型。

2.1 传统相零耦合的正、反向信道模型

建立低压配电台区I型集中器/台区融合终端中央协调器(central coordinator, CCO)节点到第1级用户电表站点(station, STA)节点之间的相零耦合线路模型,为了简化模型的复杂度,不考虑三相电之间的负载不平衡性,即只建立单相线路模型,三相线路可以由3个单相线路模型构建。

一般地,电力线载波信道可表示为多段主干线路串联并带有多个分支的网络拓扑,其正向信道建模如图2所示。

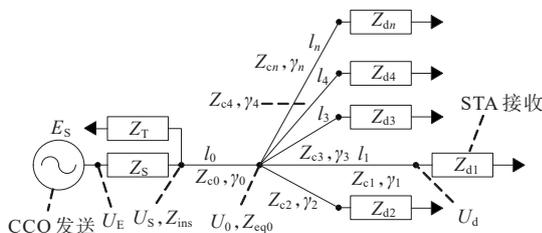


图2 正向电力线信道模型

Figure 2 Power line model of forward channel

图2中 l_i 为主干信道各段线路长度, Z_{ci}, γ_i 为对应线路特性参数, U_E, U_S, U_0, U_d 为各节点电压, $Z_S,$

Z_{di} 分别为发送源 CCO 节点和接收端 STA 节点的负载阻抗, Z_T 为变压器的阻抗, Z_{eq0} 为线路母排上除 l_0 支路以外的所有其他支路并联的等效阻抗, $i=0, 1, \dots, n$ 。

同理,其反向信道建模如图3所示, U'_E, U'_S, U'_0, U'_1 为各节点的电压, Z'_S, Z'_{d0} 分别为发送源 STA 节点和接收端 CCO 节点的负载阻抗, Z'_{eq0} 为母排除 l_1 支路以外的所有其他支路并联的等效阻抗。

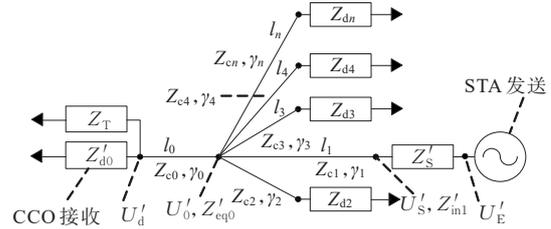


图3 反向电力线信道模型

Figure 3 Power line model of backward channel

2.2 零线耦合的正、反向信道模型

零线耦合正向电力线信道模型如图4所示, CCO 节点载波信号通过磁环注入 l_1 分支,除 l_1 分支以外的其他分支等效阻抗将对信号传输起到辅助作用,与相零耦合方式下其他分支等效阻抗对信号分流不同,其他分支等效阻抗越小,将越有利于零线耦合信号传输,记 Z_{eq1} 为采用零线耦合时母排除 l_1 支路以外的所有其他支路并联的等效阻抗。同理,零线耦合反向电力线信道模型如图5所示。

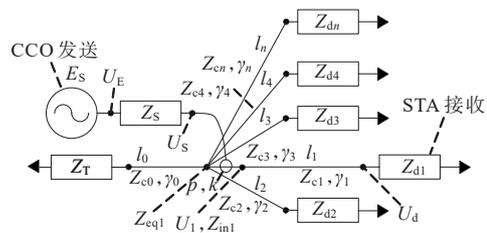


图4 零线耦合正向电力线信道模型

Figure 4 Neutral line coupled power line model of forward channel

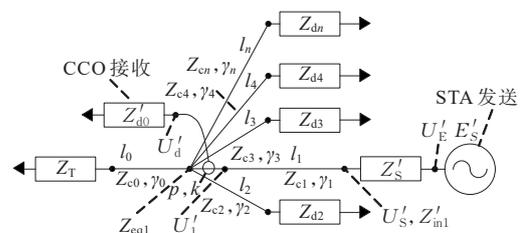


图5 零线耦合反向电力线信道模型

Figure 5 Neutral line coupled Power line model of backward channel

2.3 基于传输线理论的线路参数计算

以分析图 2 中 CCO 到 STA 之间的线路衰减为例,线路被划分为若干线段,参照文献[14,16]中模型,建立各个线段的两端口网络模型以及线路等效模型,如图 6、7 所示。

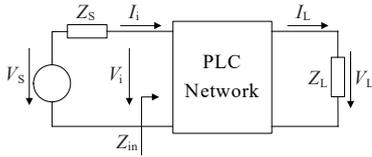


图 6 线段的两端口网络模型

Figure 6 Two port network model of line segment

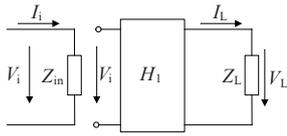


图 7 线段的衰减等效模型

Figure 7 Equivalent model of attenuation for line segment

图 7 中可归纳为一个典型的电力线网络的二端口网络模型。通过传输线模型表示为

$$\begin{bmatrix} V_i \\ I_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_L \\ I_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

等效输入阻抗表示为

$$Z_{in} = \frac{AZ_L + B}{CZ_L + D} \quad (2)$$

信号传输函数 \$H(f)\$ 可以表示为

$$H(f) = \frac{V_L}{V_i} = \frac{Z_L}{AZ_L + B} \quad (3)$$

为了获得 \$H(f)\$ 和 \$Z_{in}\$, HPLC 网络的元件从链路端开始计算,将链路分成传输线片段和若干分支阻抗进行建模,根据网络拓扑进行级联,长度为 \$l\$ 的传输线参数为

$$\begin{cases} A = \cosh(\gamma l) \\ B = Z_c \sinh(\gamma l) \\ C = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) \\ D = \cosh(\gamma l) \end{cases} \quad (4)$$

模型中特征阻抗 \$Z_c\$ 和传播常数 \$\gamma\$ 可表示为

$$Z_c = \sqrt{(R' + j\omega L') / (G' + j\omega C')} \quad (5)$$

$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} \quad (6)$$

式中, \$R'\$、\$L'\$、\$C'\$ 分别为每单位长度的电阻、电感、电容; \$G'\$ 为导线之间每单位长度的电导。

2.4 传统相零耦合正、反向信道传输函数计算

根据式(2),可以计算各个分支电缆的等效输入阻抗 \$Z_{in1} \sim Z_{inn}\$, 则 \$Z_{eq0}\$ 表示为

$$Z_{eq0} = \frac{1}{\sum_{i=2}^n \frac{1}{Z_{ini}} + \frac{1}{Z_{in1}}} \quad (7)$$

在相零耦合正向通信线路中,载波信号收发节点间的电压传输特性可以根据文 2.3 中传输线理论确定,计算公式为

$$\frac{U_d}{U_E} = \frac{U_s}{U_E} \cdot \frac{U_0}{U_s} \cdot \frac{U_d}{U_0} = \frac{Z_{ins} // Z_T}{Z_S + Z_{ins} // Z_T} \cdot \frac{Z_{eq0}}{Z_{eq0} \cosh(\gamma_0 l_0) + Z_{c0} \sinh(\gamma_0 l_0)} \cdot \frac{Z_{d1}}{Z_{d1} \cosh(\gamma_1 l_1) + Z_{c1} \sinh(\gamma_1 l_1)} \quad (8)$$

同理,对于相零耦合反向通信线路,可以计算:

$$Z'_{eq0} = \frac{1}{\sum_{i=2}^n \frac{1}{Z_{ini}'} + \frac{1}{Z'_{in0}}} \quad (9)$$

载波信号收发节点间的电压传输特性计算公式为

$$\frac{U'_d}{U'_E} = \frac{U'_s}{U'_E} \cdot \frac{U'_0}{U'_s} \cdot \frac{U'_d}{U'_0} = \frac{Z'_{in1}}{Z'_{d1} + Z'_{in1}} \cdot \frac{Z'_{in1}}{Z'_{in1} \cosh(\gamma_1 l_1) + Z_{c1} \sinh(\gamma_1 l_1)} \cdot \frac{Z'_s}{Z'_s \cosh(\gamma_0 l_0) + Z_{c0} \sinh(\gamma_0 l_0)} \quad (10)$$

2.5 零线耦合正、反向信道传输函数计算

零线耦合的信号简化模型如图 8 所示,信号通过耦合线圈接入通信分支和母排地线之间的零线上,设耦合线圈的变比为 \$p:1\$, 耦合线圈的耦合系数为 \$k\$, 不难求出:

$$\frac{U_1}{U_E} = \frac{p^2(Z_{eq1} + Z_{in1})}{Z_S + p^2(Z_{eq1} + Z_{in1})} \cdot \frac{k}{p} \cdot \frac{Z_{in1}}{Z_{eq1} + Z_{in1}} = \frac{pkZ_{in1}}{Z_S + p^2(Z_{eq1} + Z_{in1})} \quad (11)$$

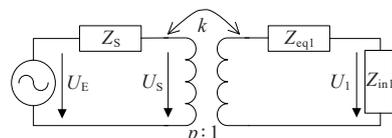


图 8 零线耦合器的信号简化模型

Figure 8 Simplified signal model of neutral line coupler

根据传输线局部反射理论可知载波信号收发节点间的电压传输特性:

$$\frac{U_d}{U_E} = \frac{U_1}{U_E} \cdot \frac{U_d}{U_1} = \frac{pkZ_{in1}}{Z_S + p^2(Z_{eq1} + Z_{in1})} \cdot \frac{Z_{d1}}{Z_{d1} \cosh(\gamma_1 l_1) + Z_{c1} \sinh(\gamma_1 l_1)} \quad (12)$$

同理,对于反向通信线路,可以计算载波信号收发节点间的电压传输特性:

$$\frac{U'_d}{U'_E} = \frac{U'_S}{U'_E} \cdot \frac{U'_1}{U'_S} \cdot \frac{U'_d}{U'_1} = \frac{Z'_{in1}}{Z'_S + Z'_{in1}} \cdot \frac{kZ'_d}{(Z'_d/p + pZ'_{eq1}) \cosh(\gamma_1 l_1) + pZ'_{c1} \sinh(\gamma_1 l_1)} \quad (13)$$

3 零线耦合仿真算例分析

3.1 低压配电台区信道模型参数选择

参照文献[14-16],选择台区变压器到用户之间的低压配电电缆型号为NAYY150SE和NAYY50SE,计算线路的基本参数如表1所示($R' = R_0 \sqrt{f}$, $G' = G_0 f$, R_0 、 G_0 分别为每单位长度的电阻、电导常数, f 为频率),该结果与文献[15]中1 kV以内电缆计算结果相近,从而验证参数的正确性。

表1 低压配电电缆的基本参数

线缆型号	$L'/$ ($\mu\text{H}/\text{m}$)	$C'/$ (nF/m)	$R_0'/$ ($10^{-5}\Omega/\text{m}$)	$G_0'/$ ($10^{-11}\text{S}/\text{m}$)
NAYY150SE	0.145	0.307	2.131	1.929
NAYY50SE	0.187	0.238	3.537	1.494

台区变压器模型参照文献[17],对高速载波通信频段取阻抗约为150 Ω ;设定配电柜线路分支数分别为5、16个;为模拟台区最坏情况,选取线路 l_2 、 l_3 、 \dots 、 l_{16} 的长度均为500 m,线路 l_1 的长度为1 km。线路用户负载参照文献[15]的测量值,考虑到供电网的阻抗随电流负载变化而变化,阻抗的变化由峰值负载和最小负载的比值来决定,设定 Z_{d1} 、 Z_{d2} 、 \dots 、 Z_{d16} 在最小负载和峰值负载下的阻值分别为40、5 Ω 。

零线耦合器参数选择方面,由于耦合信号带宽相对较宽(0.7~12.0 MHz),需要采用高频性能较好的锰锌铁氧体作磁芯实现宽频带功率信号的传输。选择磁导率 μ 范围为2 500~8 000 H/m,线圈匝数为2~5圈(根据经验3圈最佳)^[12]。

3.2 电力线载波通信零线耦合信道衰减仿真

为了验证零线耦合方式对载波通信性能的提升效果,本文选择CCO和线路 l_1 上的STA之间的正向和反向通信衰减进行仿真。作为对比,分别仿真传统的相零耦合方式和本文提出的零线耦合方式在5、16分支以及峰值负载、最小负载的不同组合条件下的信道衰减,利用Matlab软件建立模型,仿真得到信号衰减结果如图9、10所示。

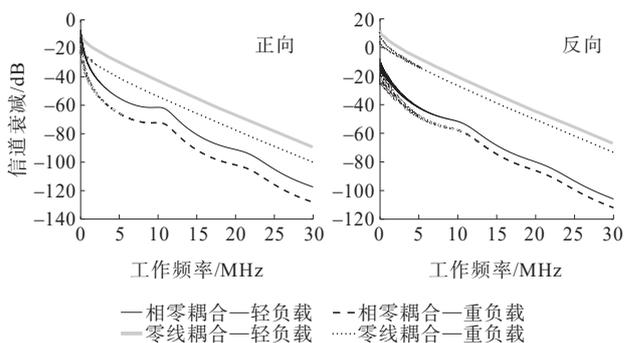


图9 5分支线路正、反向信道衰减仿真

Figure 9 Simulation of forward, backward channel attenuation of 5 branch lines

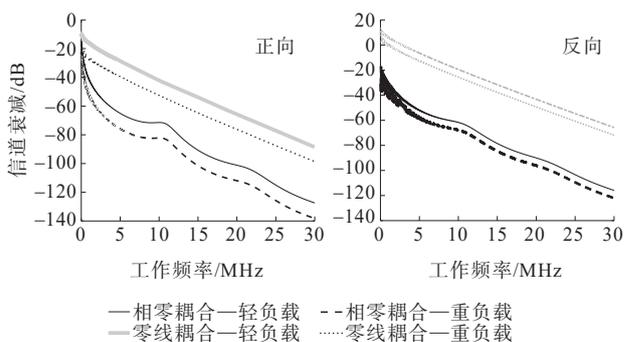


图10 16分支线路正、反向信道衰减仿真

Figure 10 Simulation of forward, backward channel attenuation of 16 branch lines

从图9、10仿真结果可以看出,在4种仿真场景中,相零耦合的通信线路衰减随负载阻抗变化、分支数量影响很大,在16分支线路重负载情况下,以5 MHz频点为例,正向信道衰减达到76.1 dB,若遇到强噪声干扰,极易出现通信不稳定情况;采用

零线耦合方式,可以将信道衰减降低到 39.7 dB。如表 2 所示,8 种典型条件下零线耦合方式相比原相零耦合方式的衰减值降低 24.9~46.6 dB。

表 2 零线耦合与相零耦合的衰减值对比

Table 2 Attenuation comparison between neutral line coupling and L-N coupling

序号	分支数	负载状态	信道方向	传统相零耦合衰减/dB	本文零线耦合衰减/dB	降低值/dB
1	5	轻	正向	55.0	29.8	25.2
2	5	重	正向	65.5	40.6	24.9
3	5	轻	反向	41.3	7.5	33.8
4	5	重	反向	48.5	13.4	35.1
5	16	轻	正向	64.9	29.0	35.9
6	16	重	正向	76.1	39.7	36.4
7	16	轻	反向	53.0	6.4	46.6
8	16	重	反向	58.3	12.5	45.8

4 零线耦合的施工工程案例

4.1 零线耦合适用性分析

文献[18]对低压配电系统接地型式规范进行了研究,对于民用建筑的低压配电系统一般采用 TT、TN-S 或 TN-C-S 接地型式,并进行等电位联结,3 种系统都有专用的 PE 线(接地线),可用于载波信号耦合,零线耦合适用范围基本可以覆盖所有低压配电系统。因此,针对配变台区供电线路衰减较大的埋地电缆、架空电缆,线路中不具备增设中继设备条件,当电力线载波通信线路衰减超出收发端之间信号接收范围时,采用零线耦合是解决载波通信连通性和稳定性的有效手段。

4.2 零线耦合施工方法

在低压配电台区电力线载波通信零线耦合施工过程中,CCO 节点模块中增设一路信号作为零线耦合回路,或从三相耦合回路中选取一路信号作为零线耦合回路;CCO 节点模块安装在采集终端中,由采集终端供电;CCO 节点模块引出射频电缆进行信号延长,通过零线耦合器把载波信号耦合到接地点和通信分支线路之间的零线上,可以是靠近 CCO 节点模块且对信号耦合有利的位置如多个输出零线的分支上,通过零线注入信号在火—零回路进行

传输,电表端 STA 节点既可以采用零线耦合方式,也可以采用原相零耦合模式,如图 11 所示。

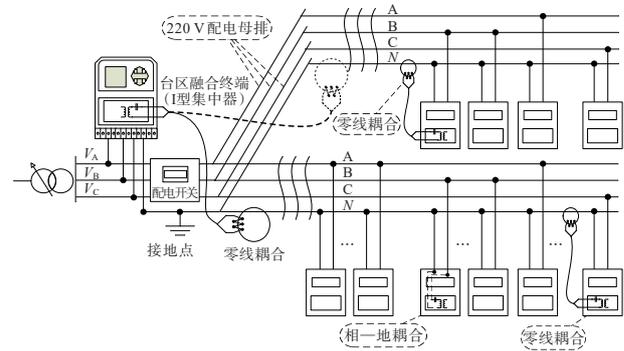


图 11 零线耦合施工示意

Figure 11 Schematic diagram of neutral line coupling construction

4.3 工程施工案例

选取天津、湖南两地通信不稳定的 2 个典型台区进行零线耦合施工,现场零线电缆均为独立走线,为施工提供了有利条件。在满足磁环内径尺寸时,可考虑多股零线同时穿过耦合器安装方式,如图 12(a)所示,当零线耦合器内径只能通过一根零线电缆时,可考虑单股零线耦合模式,采用多个磁环并连或串联连接,如图 12(b)所示。



(a) 多股零线

(b) 单股零线

图 12 零线耦合器安装效果

Figure 12 Design sketch of neutral line coupler installation

其中天津典型台区施工前、后信号衰减测试如图 13 所示(2 条直线为趋势线),以 5 MHz 频点趋势线为例,施工前衰减达 76.1 dB,施工后衰减为 44.5 dB,性能提升达 31.6 dB,测试结果与 5 分支线路正向重负载信道仿真算例基本一致(考虑现场测试误差、信号多径等影响因素),从而验证本文模型的正确性。2 个典型台区施工前均存在抄表成功率低的问题,施工后组网稳定,抄表成功率明显提升,均达到 100%。零线耦合前、后的测试结果对比如表 3 所示。

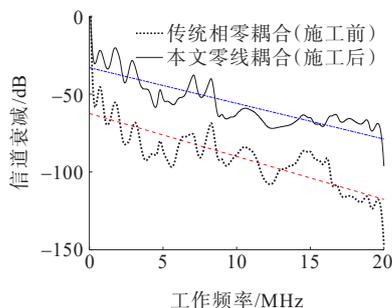


图 13 零线耦合施工前、后信道衰减测试

Figure 13 Channel attenuation test before and after neutral line coupling construction

表 3 零线耦合施工前、后的测试结果对比

Table 3 Comparison of test results before and after neutral line coupling construction

地点	台区情况	施工前效果	施工后效果
天津市 城东供电公司 城东所 某小区	塔楼小区,共 计 93 只表,单 相 90 只,动力 表 3 只,分支 数 ≤ 6 个	线路衰减大,受不 同时段负载影响较 大,抄收成功率为 67%~97% 不等	线路衰减明显降低 且稳定,台区用户 均快速入网,采集 延时明显下降,抄 收成功率 100%
长沙市 芙蓉区 张公岭 某小区	塔楼小区,共 452 户,供电 覆盖半径大, 分支数多达 16 个	线路衰减大,受南方 下雨等天气影响严 重,抄收成功率低, 小区内商业用户抄 收成功率不到 10%	线路衰减明显降低 且稳定,台区用户 均快速入网,抄收 成功率 100%, 运行稳定

5 结语

本文针对低压配电台区电力线信道条件复杂,易受线路衰减、负载特性等诸多因数影响,导致电力线载波通信不稳定的问题,提出了一种低压电力线载波通信零线耦合方法,建立了低压配电台区零线耦合的信道模型,并对零线耦合的性能进行了仿真。仿真结果表明,在典型 5 分支重负载线路条件下,文中零线耦合方法对低压电力线载波通信信道衰减降低 24.9 dB 以上,有效克服传统相零耦合方式下线路分支阻抗低和衰减大导致通信不稳定的问题。文中还结合施工案例对零线耦合方法的效果进行了验证,现场施工后对数据抄收成功率提升效果显著;文中方法具有安全性高、易施工等诸多

优点,可作为低压配电台区电力线载波通信有效的运维手段。

参考文献:

- [1] 朱彦名,徐潇源,严正,等.面向电力物联网的含可再生能源配电网运行展望[J].电力系统保护与控制,2022,50(2):176-187.
ZHU Yanming, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Prospect of renewable energy integrated distribution network operation in the power internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 176-187.
- [2] 王贤辉,郝伟琦,周春良.基于正交扩频序列的电力线信道衰减特性测量方法[J].电力信息与通信技术,2021,19(11):108-116.
WANG Xianhui, HAO Weiqi, ZHOU Chunliang. Method of power line channel attenuation characteristics measurement based on orthogonal spread spectrum sequence[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(11): 108-116.
- [3] 王勇,张明,马洲俊,等.电力线信道通信特性影响因素分析[J].电力科学与技术学报,2021,36(3):157-164+173.
WANG Yong, ZHANG Ming, MA Zhoujun, et al. Analysis of the factors influencing the communication characteristics of power line channel[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3): 157-164+173.
- [4] STIRI S, CHAOUB A, MALIKI T E, et al. Realization of a low-cost impedance matching circuit for stable power line communications: from testbeds to practical implementation [C]//19th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), Marrakech, Morocco, 2018.
- [5] 周立志,杨晓波.低压电力载波采集成功率影响因素浅析[J].农村电气化,2019(4):50-53.
ZHOU Lizhi, YANG Xiaobo. Analysis of factors affecting the success rate of low voltage power carrier acquisition[J]. Rural Electrification, 2019(4): 50-53.
- [6] 刘极星.提升低压用户用电信息采集成功率研究[J].中国电力企业管理,2021(14):65-66.
LIU Jixing. Research on improving the success rate of power consumption information collection for low voltage users[J]. China Power Enterprise Management, 2021(14): 65-66.
- [7] 张勇军,羿应棋,李立涅,等.双碳目标驱动的新型低压配电系统技术展望[J].电力系统自动化,2022,46(22):

- 1-12.
ZHANG Yongjun, YI Yingqi, LI Licheng, et al. Prospect of new low-voltage distribution system technology driven by carbon emission peak and carbon neutrality targets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 1-12.
- [8] 王艳, 李永亮, 赵洪山. 载波信号在中压地埋电缆中的耦合原理及信道模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 31-38.
WANG Yan, LI Yongliang, ZHAO Hongshan. Coupling principle and channel model of carrier signal in medium voltage buried cable[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 31-38.
- [9] 王艳, 薛晨, 焦彦军. 中压配电网 PLC 信道正反向传输特性分析[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(3): 127-134.
WANG Yan, XUE Chen, JIAO Yanjun. Forward and backward transmission characteristics analysis of PLC channel in medium voltage distribution networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3): 127-134.
- [10] 王艳, 陈家玉, 赵洪山, 等. 中压配电网载波通信卡式电感耦合器耦合模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 87-94.
WANG Yan, CHEN Jiayu, ZHAO Hongshan, et al. Clamp inductive coupler coupling model of medium voltage distribution network carrier communication[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 87-94.
- [11] CHEN B C, YU N, CHEN B, et al. Fault location for underground cables in ungrounded MV distribution networks based on ZSC signal injection[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2021, 36(5): 2965-2977.
- [12] 李建岐, 胡岚, 米硕. 低压电力线载波通信宽带耦合技术及其装置[J]. 电力系统通信, 2004, 25(4): 7-10.
LI Jianqi, HU Lan, MI Shuo. The wide-band coupling technology and device of low-voltage power line carrier communication[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2004, 25(4): 7-10.
- [13] LEE J J, IN D S, OH H M, et al. Neutral inductive coupling for improved underground medium voltage BPLC[C]// IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC), Rio de Janeiro, Brazil, 2010.
- [14] 肖勇, 钟清, 党三磊. 电力线通信—电力线窄带和宽带通信的理论与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 41-74.
XIAO Yong, ZHONG Qing, DANG Sanlei. Power line communication theory and application for narrowband and broadband communications over of power lines[M]. Beijing: China Power Publishing House, 2014: 41-74.
- [15] 栗宁, 郑福生, 杨洪. 电力线通信[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003: 160-184.
LI Ning, ZHEN Fusheng, YANG Hong. Power line communications[M]. Beijing: China Power Publishing House, 2003: 160-184.
- [16] LAMPE L, VINCK A. On cooperative coding for narrow band PLC networks[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2011, 65(8): 681-687.
- [17] 王东, 王艳, 焦彦军. 适用于 PLC 的配电变压器高频等效模型及参数提取法[J]. 电力科学与工程, 2016, 32(8): 16-21.
WANG Dong, WANG Yan, JIAO Yanjun. High frequency equivalent model and parameter extraction method suitable for distribution transformer of PLC[J]. Electric Power Science and Engineering, 2016, 32(8): 16-21.
- [18] 黄春玲. 各种接地系统在建筑电气低压配电设计中的应用研究[J]. 低碳世界, 2017(26): 103-104.
HUANG Chunling. Application research of various grounding systems in low voltage distribution design of building electrical[J]. Low Carbon World, 2017(26): 103-104.