母线分流效应对中压电力线载波通信网络架构的影响

王 艳,薛 晨,焦彦军,赵洪山

(华北电力大学电气与电子工程学院,河北省保定市 071003)

摘要:基于中压配电母线典型拓扑结构,分析推导母线分流效应对电力线载波通信(PLC)信道特性的影响,在此基础上提出一种自适应频点选择算法及2种中压配电网 PLC 网络架构。基于输入电抗的频点选择算法,可在保证信道质量的前提下提高选频速度,结合中压配电网实际结构,建议以近母线侧节点作为频点测试发起者。PLC 子网主节点设置于配电线路出口处的网络架构与设置于线路中部的网络架构相比较,后者可减弱母线分流效应带来的不利影响,提高 PLC 网络的经济性与可靠性。仿真结果与现场测试验证了理论分析及所提第2种网络架构的合理性。

关键词:中压配电网;电力线载波通信;母线分流;信道特性;频点选择;网络架构

0 引言

随着智能配电网研究的不断深入,大数据分析 技术的逐步应用,对配电通信网提出了越来越高的 要求^[1-4]。电力线载波通信(power line communication,PLC)技术具有天然的通信信道及 应用的灵活便利性,已成为中压配电通信网的重要 选择,在中压配电网配电自动化领域具有很强应用 潜力。城市中压配电网由变电站 10 kV 或 35 kV 侧母线引出,其拓扑结构多为一条母线带大量配电 出线,配电半径通常为数千米,且每条配电出线上跨 接多个配电变压器(简称配变)与分支线路,其拓扑 结构较输电线路复杂很多。这种电压等级的配电网 结构造成中压配电网 PLC 自身的特殊性:在中压配 电网中不允许沿线装设高频阻波器对载波信号加以 限制,载波信道环境恶劣,信号可在配电网中随意流 通。故装于配线出口附近的载波机,其发出的信号 功率会经过母线分流作用进入其他配电出线,从而 使得本出线侧获得的传输功率大大降低,本文称之 为配电网的"母线分流效应"。母线分流效应对 PLC 通信性能产生严重影响是中压配电网 PLC 通 信的共性问题。在某市变电站进行课题组研发载波 装置的现场实测表明:中压配电网拓扑结构(带有站 内配电母线)、PLC 通信频点的选择、PLC 网络架构 的设计等均对中压配电网 PLC 的通信距离、通信速 率有较大影响。

收稿日期:2018-10-29;修回日期:2019-01-03。 上网日期:2019-02-26。 信道特性分析^[5-8]是 PLC 通信频点选择与组网的基础,可借由信道的功率传输衰减特性,分析母线 分流效应对 PLC 单跳通信距离的影响。对于使用 正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing,OFDM)技术的载波装置,子载波频点 的选择对通信质量影响很大,现有 OFDM 子载波频 点选择算法由无线通信中的自适应信道认知算法演 变而来^[9-12],并未考虑中压配电网拓扑结构对 PLC 信道特性带来的特殊影响。现有中压 PLC 组网路 由算 法由以太 网、低压 PLC 路由算法演变而 来^[13-18],仿真算例也以最大通信距离简单界定节点 间能否建立链路,并未考虑中压配电网实际信道特 性与母线分流效应的影响。

本文以中压配电网典型拓扑结构为基础,阐述 母线分流效应对 PLC 信道特性、频点选择算法、网 架结构的影响。具体工作如下:①理论推导与算例 仿真相结合,阐明母线分流效应对 PLC 信道特性的 影响;②在考虑双向信道特性不对称的情况下,提出 一种 OFDM 频点选择算法;③与中压配电网典型拓 扑结构相适应,提出并比较了 2 种可行的 PLC 架 构。

1 配电母线分流效应对 PLC 信道特性影响 分析

在中国,配电网络为"环网设计,开环运行"的辐射型结构。图1给出了中国典型城市变电站10 kV 侧网络拓扑结构示意图,其10 kV 配电母线上共接 有 n 条出线,其中有 m 条电缆出线,n-m 条架空 出线(每条出线均为多分段多分支线路,图中未标示

国家自然科学基金资助项目(51807063)。

各出线的具体结构), $C_{C,1} \sim C_{C,k}$ 为k 组经一定长度 电缆接入母线的电力补偿电容器组, $C_{T,1} \sim C_{T,p}$ 为 p 台降压变压器 10 kV 侧的等效杂散电容。以出线 L_1 线路出口处与线路中部装设的 2 台 PLC 装置相 互通信为例, $1 \rightarrow 2$ (符号"→"表示信号传输方向)通 信时,装置 1 发出的信号功率大量分流进入母线上 所接其他设备中,导致装置 2 接收到的信号功率较 小;反之 2→1 通信时,装置 1 接收到的信号功率较 大,可结合理论推导与算例仿真说明母线分流效应 对 PLC 信道特性的影响。



图 1 中压配电网典型拓扑结构 Fig. 1 Typical topological structure of medium-voltage distribution network

1.1 理论推导

对于采用支路追加法^[19]建立的 PLC 信道模型,相关电路模型和推导过程如附录 A 所示。

当 PLC 发信机位于母线附近时,母线上大量线路的并入导致分流阻抗很小,母线分流效应导致信道质量变差。

1.2 算例仿真

以保定市大阳变电站 10 kV 侧配电网的具体 结构参数为仿真算例,设图 1 中 n=31,m=16,k=p=1,对应的网络具体结构见图 2,线路参数按照该 站实际线路型号设置,电缆型号为 YJV22-70mm², 架空线型号为 JKLYJ-120mm²。以出线 L_1 为研究 对象,其主干线路由电缆 (l_1, l_2) 一架空线路 (l_3, l_4) 一电缆 (l_5, l_6) 三段线路串联而成,长度分别为 1,3,1.5 km,每段主干线路中部均接有一条电缆分 支,分支长度均为 0.5 km,电缆分支及主干线路末 端均接有配变。为简化建模,假定:①出线 $L_2 \sim L_{31}$ 的等效长度均为 3 km,末端均接有一台配变;②电 力补偿电容 $C_{c,1}$ 容量取 2 400 kvar,通过长 100 m 的电缆 $L_{c,1}$ 接入母线^[20];③降压变压器 10 kV 侧等 效杂散电容 $C_{T,1}=7$ 530 pF^[21];④所有配变取为恒 定阻抗 500 $\Omega^{[5,21]}$;⑤PLC 装置看作恒压源 E_s 与内 阻抗 Z_s 相串联, Z_s =50 Ω ;⑥通信频带范围取为窄 带 3~500 kHz。



按照支路追加法建立该网络的 PLC 信道模型, 并考虑各种附加衰耗^[21],仿真求解节点 1 和 7 之间 的双向功率传输特性,如附录 B 图 B1 所示。可见 二者变化趋势大体一致,但在大部分频点下功率传 输特性曲线 $S_{1\to7}$ 较 $S_{7\to1}$ 低约 15 dB。附录 B 图 B1 中同时给出了对应的实验室测试曲线,实验室测试 曲线与仿真曲线大体一致,但部分频段略有差异,主 要原因:实验室测试中,将 10 kV 配电出线 L_1 每 250 m 的输电线路等效焊接成一个集中参数的 π 形 等值电路^[22],利用多个 π 形等值电路的级联来等效 L_1 出线,而其他各条配电出线($L_2 \sim L_{31}$)均用一个 集中参数等效模型代替;而仿真中,输电线路模型均 是用分布参数模型搭建;故两者所得曲线不可避免 地会存在一定误差,且高频段误差更明显一些。

在保定市城区内变电站进行载波通信现场实测时,分别将2台载波机安装于同一条线路的 a 和 b 这 2 个节点处,其中节点 a 位于靠近 10 kV 配电母 线的线路出口处,节点 b 位于该条线路上距离母线 约 2.5 km 处, $a \rightarrow b$ 传输时,节点 b 无法解析出 a 的信号,而在相同频点、相同信号强度下, $b \rightarrow a$ 传输时,a 却可以解析出 b 的信号,也证实了母线分流效 应的影响。

2 双向信道特性不对称条件下 OFDM 频点 选择算法

中压配电网拓扑结构及线缆参数的变化,均会导致载波信号的频率选择性衰落。实际工程应用中 很难对各通信节点进行人工配置调试。因此,要求 载波装置能够根据现场信道特性,实现自适应频点 选择。本章提出了一种基于信道输入电抗的自适应 频点选择算法,不受网络结构及线缆参数的限制,可 对任意节点的通信频率进行优选。对于多节点复杂 PLC 网络而言,可采用分层搜索、动态中继组网法。 在通信组网时,各节点根据各自的输入电抗进行频 率的筛选,并采用前导序列确定潜在工作组^[10],然 后按照本文所提算法确定各"主一从"节点间的最佳 通信频率。通信过程中,各节点在线检测通信频段 内信道的输入电抗值,根据信道输入电抗的变化自 动调整更新其潜在工作组及最佳通信频率。

2.1 基于信道输入电抗的选频算法

2.1.1 算法依据

对于任意一条n分段n分支的配电出线而言, 其 PLC 网络拓扑如附录 B 图 B2 所示,近似认为线 路传输常数为纯虚数,根据文献[23]的局部反射理 论进一步推导,得:

$$\frac{P_{1}}{P_{s}} \ge \operatorname{Re}\left(\frac{1}{Z_{eq}}\right) \frac{|Z_{e,n}|^{2} \prod_{i=1}^{n} |1 + \Gamma_{i}|^{2}}{(|Z_{in,n}| + |Z_{s}|) \prod_{j=1}^{n} (1 + |\Gamma_{j}|)^{2}}$$
(1)

式中:P。和 P1 分别为发送和接收的 PLC 信号功 率;Z。为信道末端后续网络的等效阻抗;Z。,为线 路 l_n 特性阻抗; Z_{in.n} 为从发信机侧看入信道的输入 阻抗; Z_s 为信源内阻; Γ_i 为节点j的反射系数。

可见从信源侧看入信道的输入阻抗模值 (|Z_{in,x}|)的减小有利于功率传输特性的增大。当 PLC 网络信道特性改变时,其输入阻抗将随之变 化,故可通过检测信道各频点下的输入阻抗数值,对 其传输功率进行预判。实际上,随着频率的改变,输 入阻抗电抗分量变化比电阻分量变化更为明显,电 抗分量的大小更能表明功率传输特性的强弱,故可 通过在线监测信道输入电抗来进行频点的优选。

2.1.2 基于信道输入电抗的选频算法步骤

以型号为 SM2200 的 OFDM 载波芯片为例阐 述频点选择算法。该芯片的通信频带范围为 3~ 500 kHz,每间隔约5 kHz 为一个通信频点,共 108个可选通信频点,允许选择18个子载波信道。 以 PLC 网络中节点 a 和 b 之间相互通信时的频点 选择为例进行说明。设节点 a 和 b 的初始默认频点 为在 3~500 kHz 内均匀选取的 18 个频点。本文假 定均匀选取的默认频点中总有若干频点可实现两节 点间的通信,用于建立初始连接以及选频过程中信 息交换。

步骤 1:频点预筛选。节点 a(或节点 b)依次在 108个可选频点上发送特定信号,监测输入信道的 电压、电流,求得各频点下的输入电抗绝对值 $|X_{in,a}|$ (或 $|X_{in,b}|$),以 $|X_{in,a}|$ (或 $|X_{in,b}|$)小于某阈值(监 测到的 Xin 最大值的一半)作为标准,选出节点 a (或节点 b)侧较优的频点,其集合记为频点集 f。 (或 f_{h}),作为该节点的潜在工作组。随后节点a(或节点 b)将集 $f_a(od f_b)$ 通过默认频点发送给对 侧,取其交集 fint 作为预筛选出的频点集。

步骤 2:第1次频点测试。设节点 a 为靠近母 线侧的节点,指定其为频点测试发起者(在2.2节算 例中说明原因),节点 a 依次在 f_{int} 的各个频点下发 送等强度信号,节点 b 记录能够解析出信号的频点 及其信号强度,将可解析频点记为频点集 f → b 。随 后,节点 b 将频点集 f and 及其信号强度通过默认频 点发送至节点a。

步骤 3:第 2 次频点测试。节点 b 在频点集 $f_{a \rightarrow b}$ 的各个频点处发送等强度信号,节点 a 记录能 够解析出信号的频点及其信号强度,将可解析频点 记为频点集 f bid 。至此,节点 a 得到双向可通信频 点集 f bid 及相应频点信号强度。

步骤 4:若集 f_{bid} 中频点个数 n≤18,则将其全 部选为通信频点,评估通信速率后确定两节点间可 否建立链路。

步骤 5:若 n > 18,则依次计算频点集 f_{bid} 中各 频点处的频点质量 q_i ,优选频点质量较大的前 18个频点作为子载波的最佳工作频点。

频点质量 q_i 为:

$$q_i = \alpha q_{i(a \to b)} + \beta q_{i(b \to a)} \tag{2}$$

式中:*i*为集 f_{bid} 中各个频点的序数,*i*=1,2,…,*n*; $q_{i(a \rightarrow b)}$ 为 f_{bid} 中第 i 个频点处节点 $a \rightarrow b$ 通信时的 信号强度; $q_{i(b \to a)}$ 为节点 $b \to a$ 通信时的信号强度; α $\pi\beta$ 为信号强度权重系数, $\alpha+\beta=1$,可根据实际情 况选择是侧重 $a \rightarrow b$ 的通信质量(α 取值较大),还是 侧重 $b \rightarrow a$ 的通信质量(β 取值较大)进行灵活调整。

2.2 算例仿真

以图 2 中节点 1 和 8 间相互通信时的频点选择 为例。节点1和8之间的功率传输特性(曲线 $S_{1\rightarrow8}$,曲线 $S_{8\rightarrow1}$)如附录 B 图 B3 所示,可见母线分 流效应导致 S_{1→8} 低于 S_{8→1} 约 15 dB。从节点 1 看 入信道的输入电抗绝对值(曲线 | X_{int} |) 见附录 B 图 B4,与附录 B 图 B3 中的 $S_{1\rightarrow 8}$ 相对照,可见在 $S_{1\rightarrow 8}$ 的峰值位置处 $|X_{in1}|$ 曲线呈深度凹陷,故以 |X_{in1}|小于阈值预筛选出较优的频点。

附录 B 图 B3 中,用各频点下功率衰减幅度代 替其信号强度,设定功率衰减幅度小于 40 dB 时信 号能够解析。策略①:以靠近母线侧的节点1为频 点测试发起者,选频过程中, f_{int} , $f_{1\rightarrow8}$ 和 f_{bid} 的频 点个数分别为 69,23 和 23。策略②:以离母线较远 的节点 8 为频点测试发起者,选频过程中, f int, f 8+1

和 f_{bid} 的频点个数分别为 69,65 和 23。可见 2 种 策略在第 1 次频点测试过程中均要扫描 f_{int} 中所有 69 个频点,工作量一致,但在第 2 次频点测试过程 中,策略①扫描频点数为 23,明显少于策略②的扫 描频点数 65。从频点测试工作量及选频速度出发, 建议选择靠近母线侧的节点作为频点测试发起者。

3 考虑中压配电母线分流效应的 PLC 网络 架构分析

3.1 2种中压配电网 PLC 网络架构

中压配电自动化数据传输具有集中收集数据、 分散发送控制命令的特点,故 PLC 网络应采用"一 对多"的"主一从"式结构。对于中压配电网,从母线 引出的各条配电出线一般相对独立,一条线路故障 不能影响其他线路工作。这就要求 PLC 网络需按 照配电出线划分子网,一条配电出线对应一个子网, 每个子网均为"主一从"式结构网络,子网主节点接 入站内配电自动化系统。中压配电网信道环境恶 劣,PLC 单跳通信距离一般不能覆盖整条配电出 线,每个 PLC 子网内部需要中继节点以协助距离主 节点较远的从节点接入网络,形成具有多级中继的 "主一从"式结构 PLC 子网。

结合中压配电网实际拓扑结构,本文提出2种 可行的中压配电网 PLC 网络架构。

第1种 PLC 网络架构如图 3(a)所示,中压配电 母线上每条出线为一个 PLC 子网,每个子网主节点 均装设于线路出口处,各子网主节点都经通信电缆 直接接入站内配电自动化系统。此时,所有子网主 节点均位于变电站内部,便于管理及维护,但站内需 装设大量 PLC 节点,经济性较差,且由前述分析可 知,这种网络架构下,子网主节点发出的信号功率会 大量分流进入母线,导致点对点有效通信距离 r₁ 降低。

第2种 PLC 网络架构如图 3(b)所示,在站内 母线上只装设一个 PLC 中心节点。该节点通过通 信电缆接入站内配电自动化系统,同时,通过载波与 该母线上所有配电出线的子网主节点通信。子网主 节点装设于相应线路中间部分,到母线距离为 r₁。 这种网络架构只需在站内母线上装设一个 PLC 中 心节点,经济性较好,此时,由于子网主节点装设于 距母线 r₁处的线路上,子网主节点发出的信号功率 受母线分流效应影响较小,其向远离母线方向的有 效通信距离 r₂ 较长,并且子网内从节点分布在主节 点两侧,子网主节点通信范围为 r₁+r₂,相比 r₁ 大 为增加。



Fig. 3 Two kinds of PLC network structure

在某市变电站进行现场实测时,将 PLC 发信机 装设于 10 kV 母线的配线出口处时,距离该站 1 km 环网柜处的 PLC 收信机无法解析出该信号。而将 发信机沿远离母线方向移动约 100 m,不仅距该站 1 km 处的 PLC 收信机能接收到信号,距该站 3 km 处的 PLC 收信机亦能接收到该信号,验证了第 2 种 网络架构的优越性。

3.2 2种网络架构下子网组网性能对比分析

对于每条配电出线上的 PLC 子网而言,由于配 电网结构与负载不断变动,子网内各 PLC 节点间的 信道特性也随之动态变化,静态指定中继节点效果 较差,需利用类似无线通信中的自组织网络组网算 法实现动态中继组网。本文采用分层搜索组网算法 来对比分析 2 种网络架构。

3.2.1 子网内分层搜索组网算法

如附录 B 图 B5 所示,在主节点 1 的控制下,按 照下述步骤在分层搜索^[14]过程中逐步建立网络。

步骤 1:主节点 1 广播搜索命令,子网内其他节 点若能够解析出此信号则回应主节点,主节点收到 回应后依次建立与各个节点间的链路,本次搜索到 的为第 1 层节点。例如:节点 1 搜索到节点 2,3,4。

步骤 2:在主节点控制下,第1层各节点分别搜 索子网内剩余未入网节点,搜索到的节点为第2层 节点。例如:节点2搜索到节点5和6;节点3搜索 到节点5,6,7;节点4搜索到节点6,7,8。

步骤 3: 若存在某个第 2 层节点能够与多个第 1 层节点之间建立链路,则选择链路质量最优的

1 层节点作为其上级中继。比如节点 5 能够与节点 2 和 3 建立链路,选择链路质量较好的节点 2 为其 上级中继。同理,节点 6 和 7 选择节点 3 为其上级 中继,节点 8 只能与节点 4 通信,无需选择。

步骤 4:第2 层节点继续向下搜索第3 层节点 并选择链路,以此类推,直至子网内所有节点。

3.2.2 2种网络架构下组网结果

以图 2 中出线 L_1 上的节点 1 至节点 10 为例, 采用分层搜索算法完成子网内组网。设自适应频选 过程中, $f_{bid} \ge 18$ 的两节点可建立链路,以优选出的 18 个频点的质量平均值作为两节点间的链路质量。

设子网内主一从节点方向的数据传输为上行通信,从一主节点方向为下行通信。对于配电自动化 通信网,上行通信主要传输遥信、遥测信息,数据帧 较长;下行通信主要传输遥控信息,数据帧较短。故 仿真中将上行信号强度权重系数取为 0.7,下行信 号强度权重系数取为 0.3。

1)第1种PLC网络架构组网结果

对于图 2 中的线路 L₁,节点 1 为子网主节点, 节点 2 至节点 10 为子网从节点进行组网。子网主 节点 1 首先进行第 1 层节点搜索,结果如附录 B 表 B1 所示;其次第 1 层节点分别向下搜索,得到的第 2 层节点及其节点间链路质量,如附录 B 表 B2 所 示。由于两层节点已经包含出线 L₁ 上的所有节 点,故组网过程结束,得到的网络结构如图 4 所示。



图 4 第 1 种网络架构的组网结果 Fig. 4 Networking results of the first kind of network structure

由图 4 与附录 B 表 B1 可知,主节点 1 能与距离母线较近的从节点 2,3,4,8,9 直接通信,最远传输距离 $l_{1-9}=3$ km;由图 4 与附录 B 表 B2 可知,主节点 1 以从节点 9 为中继实现与较远从节点 5,6,7,10 的通信。通过附录 B 表 B2 可看出:距离母线500 m 的节点 2 最远能与节点 7 通信,通信距离延长至 $l_{2-7}=5$ km,距离母线更远的节点 3,4,8,9 已经能与第 2 层所有节点进行通信,可见远离母线的节点有效通信距离较大。

2) 第 2 种 PLC 网络架构组网结果

第2种 PLC 网络架构中心节点位于母线上,即

将图 2 中的节点 1 看作中心节点,线路 L₁ 的子网主 节点位于线路中间部分,在节点 2 至节点 10 中选 择。由附录 B表 B1 可知,节点 1 沿线路 L₁ 的主干 部分最远可与节点 4 通信,故选择节点 4 作为子网 主节点,此时第 1 层节点搜索结果如附录 B表 B3 所示。可见经过第 1 层节点搜索,已经将子网内所 有从节点接入网络,组网过程结束,得到的网络结构 如图 5 所示。



3.2.3 2种 PLC 网络架构性能对比

由 3.2.2 节可知,在 2 种 PLC 网络架构下,均 能动态完成所有 PLC 节点的组网过程,实现中压配 电网的 PLC 通信。但相比于第 1 种网络架构,第 2 种网络架构在经济性、可靠性方面更具优势。

1)第2种网络架构只需在站内母线上装设1个 PLC装置,经济性较好;而第1种网络架构需在每 条线路出口处均装设一个 PLC装置,经济性较差。

2)基于分层搜索算法的组网过程中,2种网络 架构的中继跳数相同,但相比于第1种网络架构,第 2种网络架构由于将子网主节点移至线路中间部 分,减弱了母线分流效应的不利影响,扩展了子网主 节点在子网内的通信范围。通信范围的增大可以增 加第1层节点数量,减少子网内网络层数,这对于提 高网络可靠性具有重要意义。如图5中任意从节点 故障不会影响网络内其他从节点通信,而图4中若 节点9故障会导致节点5,6,7,10脱离网络。随着 网络层数的增多,第1种网络架构对于网络可靠性 的潜在威胁会越发强烈。

3)第2种网络架构更有利于各PLC子网的并 行运行。由于PLC通信网为总线结构,一条出线的 PLC子网内信号会通过母线分流进入其他出线的 PLC子网,出现子网跨界现象,必须考虑信道冲突 对子网并行运行造成的影响。为解决子网间信道冲 突问题,可使近母线侧不同子网的节点使用干扰协 调技术^[24](使用不同频点)或载波侦听技术^[25](选 择不同时刻)进行子网内通信。对于第2种网络架 构,由于子网主节点距离母线较远,其信号功率分流 进入其他子网较少,子网间干扰主要为靠近母线侧 不同子网从节点之间的相互干扰,且从节点不会频 繁发送信息,故频率分配较容易完成,进行载波侦听 时等待信道空闲所需时间也较少;而如果采用第 1种网络架构,由于大量子网主节点位于母线附近, 这些子网主节点与子网内从节点通信时所用频点不 断变化,且子网主节点发送信息较为频繁,频率分配 较为困难,使用载波侦听时等待时间也较长,PLC 子网的并行运行难以实现。

使用第2种网络架构也应注意一些问题:①中 心节点在PLC网络中地位极为重要,一旦故障将导 致整条母线上所有配电出线失去PLC通信网,应采 用"一主一备"的方式提高其可靠性;②子网主节点 距离母线不宜过远。随着子网主节点装设位置逐渐 远离母线,一方面子网内网络结构得以改善,子网内 通信可靠性提高,子网跨界冲突减弱,子网间并行运 行可靠性提高,但另一方面子网主节点与中心节点 间的通信可靠性却在降低,实际应用中应从网络整 体可靠性角度权衡二者利弊,合理选择子网主节点 的位置。

4 结语

本文在考虑中压配电母线分流效应基础上,分 析其对中压 PLC 信道特性、OFDM 频点选择算法 以及 PLC 网架架构带来的影响。

1)中压配电网的站内配电母线对载波信号具有 分流效应,使得 PLC 信号由母线处节点向远离母线 节点传输时特性变差。

2)提出了一种基于信道输入电抗的自适应频点 选择算法。该算法具有测试工作量小、选频速度快 的优点。结合母线分流效应造成的双向信道传输特 性不对称特点,建议以靠近母线侧节点作为频点测 试发起者。

3)考虑中压配电母线分流效应影响下,提出并 比较了2种可行的PLC网络架构。从系统经济性、 网络可靠性角度出发,建议选择第2种网络架构,即 在站内母线上只装设一个PLC中心节点,各配电出 线的子网主节点装设于相应线路中间部分。

本文仅从信道衰减特性入手分析母线分流效应 对中压 PLC 网络架构带来的影响。仿真及实验室 测试过程中载波信号是直接上信道的,并未考虑耦 合器影响。实际上,载波装置接入电力线的耦合方 式、耦合原理、阻抗匹配特性、局部强干扰等各种因 素综合作用影响着 PLC 网络的架构设计,课题组后 续将对上述内容进行更加深入的分析研究。 附录见本刊网络版(http://www.aeps-info. com/aeps/ch/index.aspx)。

参考文献

- [1] SONG Qipeng, SHENG Wanxing, KOU Lingfeng, et al. Smart substation integration technology and its application in distribution power grid[J]. Power and Energy Systems, 2016, 2(4): 31-36.
- [2] 丰颖,贠志皓,孙景文,等. 输配协同的配电网态势快速感知方法
 [J]. 电力系统自动化,2016,40(12):37-44.
 FENG Ying, YUN Zhihao, SUN Jingwen, et al. Fast situation awareness method for distribution network coordinated with transmission grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 37-44.
- [3] 葛文林,苏光,赵家庆,等.新一代配电自动化系统单元制配电网运行控制功能设计[J].电力系统自动化,2018,42(19):163-168. DOI:10.7500/AEPS20180428011.
 GE Wenlin, SU Guang, ZHAO Jiaqing, et al. Unit distribution network based operating and controlling function design in new-generation distribution automation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42 (19): 163-168. DOI: 10.7500/AEPS20180428011.
- [4] DIB L, FERNANDES V, FILOMENO M, et al. Hybrid PLC/ wireless communication for smart grids and internet of things applications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(2): 655-667.
- [5] 郭以贺,谢志远,石新春,等. 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):1185-1189.
 GUO Yihe, XIE Zhiyuan, SHI Xinchun, et al. Modeling of medium voltage power line communication channel based on multi-conductor lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1185-1189.
- [6] CATALIOTTI A, DI C D, FIORELLI R, et al. Power-line communication in medium-voltage system simulation model and on field experimental tests[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 62-69.
- [7] 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(增刊1):221-229.
 LU Wenbing, ZHANG Hui, ZHAO Xiongwen, et al. The effect of network parameters for low-voltage broadband power line channels [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(Supplement 1): 221-229.
- [8] 赵洪山,张伟韬.基于 BLT 方程的中压电力线载波通信信道建模[J].电力系统自动化,2018,42(17):155-161.DOI:10.7500/ AEPS20180331004.

ZHAO Hongshan, ZHANG Weitao. BLT equation based channel modeling for medium-voltage power line carrier communication [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 155-161. DOI: 10.7500/AEPS20180331004.

[9] MA J Y, XU Y, ZHANG D. Power allocation for orthogonal frequency division multiplexing-based cognitive radio systems with and without integral bit rate consideration [J]. IET Communications, 2011, 5(5): 575-586.

- [10] 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.
- [11] 刘盈,代鹏飞,蔡丽萍,等. 基于子带动态划分的电力线 OFDM 自适应算法研究[J]. 计算机工程与设计,2012,33(5):1720-1724.

LIU Ying, DAI Pengfei, CAI Liping, et al. Analysis of adaptive OFDM algorithm based on dynamical sub-bands division for power line carrier network [J]. Computer Engineering and Design, 2012, 33(5): 1720-1724.

- [12] IKPEHAI A, ADEBISI B, RABIE K M, et al. Energyefficient vector OFDM PLC systems with dynamic peak-based threshold estimation [J]. IEEE Access, 2017, 5: 10723-10733.
- [13] 刘晓胜,李延祥,王娟,等. 低压电力线分簇蛛网混合多径盲路 由算法及通信协议设计[J]. 电工技术学报,2015,30(增刊1): 337-345.

LIU Xiaosheng, LI Yanxiang, WANG Juan, et al. Clusteringcobweb hybrid multipath blind routing algorithm and communication protocol design for low-voltage power line communication [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(Supplement 1), 337-345.

[14] 马文静,孙凤杰,高波,等.融合工频通信的电力线载波路径搜 索算法[J].电力系统自动化,2017,41(3):141-146.DOI: 10.7500/AEPS20160709003.

MA Wenjing, SUN Fengjie, GAO Bo, et al. Path search algorithm of power line carrier merged with two way automatic communication system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 141-146. DOI: 10. 7500/AEPS 20160709003.

- [15] HEO J, LEE K, KANG H, et al. Adaptive channel state routing for home network systems using power line communications [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2007, 53(4): 1410-1418.
- [16] NEWBURY J, MILLER W. Multiprotocol routing for automatic remote meter reading using power line carrier systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(1): 1-5.
- [17] RABIE K M, ADEBISI B, GACANIN H, et al. Performance evaluation of multi-hop relaying over non-Gaussian PLC channels[J]. Communications and Networks, 2017, 19(5): 531-538.
- [18] ROBSON S, HADDAD A, GRIFFITHS H. A new methodology for network scale simulation of emerging power line communication standards [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1025-1034.
- [19] 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.
 WANG Yan, WANG Dong, ZHAO Hongshan. Research on PLC channel modeling of distribution network hybrid lines

based on branch additional method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 56-60.

[20] 王艳,王东,焦彦军,等.中压配电网无功补偿装置对 PLC 信道 特性的影响分析[J].电力系统保护与控制,2017,45(10):62-68.

WANG Yan, WANG Dong, JIAO Yanjun, et al. Analysis of PLC channel characteristics of reactive power compensation equipment in medium-voltage distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 62-68.

- [21] 焦邵华,刘万顺,郑卫文,等. 配电网载波通信的衰耗分析[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.
- [22] IEEE standard for low-frequency (less than 500 kHz) narrowband power line communications for smart grid applications: IEEE 1901. 2—2013[S]. 2013.
- [23] 王东,王艳,焦彦军,等.基于局部反射理论的中压配电网电力 线通信信道建模法[J].电力系统自动化,2017,41(2):178-183. DOI:10.7500/AEPS20160229009.
 WANG Dong, WANG Yan, JIAO Yanjun, et al. Channel modeling method of power line communication for medium voltage distribution network based on partial reflection theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(2): 178-183. DOI: 10.7500/AEPS20160229009.
- [24] 张保会,付科源,郑涛,等.用电设备智(自)联网的概念与实现 技术:(三)电力线通信关键技术[J].电力系统保护与控制, 2013,41(8):1-6.
 ZHANG Baohui, FU Keyuan, ZHENG Tao, et al. Conception and technology for the smart (autonomous) internet of power consumption equipments: Part 3 key technologies of powerline communications [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 1-6.
- [25] 汪晓岩,吴春琪,王强,等. 新型中压配电线装置在配电自动化系统中的应用[J]. 电力系统通信,2006,27(4):22-27.
 WANG Xiaoyan, WU Chunqi, WANG Qiang, et al. New MV distribution line carrier device and its application in power distribution automation system[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2006, 27(4): 22-27.

王 艳(1981—),女,博士,讲师,主要研究方向:电力线 载波通信,电力系统继电保护。E-mail: 18288061@qq.com

薛 晨(1991—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究 方向:中压配电网电力线载波通信。E-mail: xuechen678@ 163.com

焦彦军(1963—),男,博士,教授,主要研究方向:电力系 统分析与控制,电力系统继电保护等。E-mail: jiao_yanjun @263. net

(编辑 杨松迎)

(下转第 125 页 continued on page 125)

(上接第 110 页 continued from page 110)

Influence of Busbar Shunting Effect on Network Structure of Medium-voltage Power Line Communication

WANG Yan, XUE Chen, JIAO Yanjun, ZHAO Hongshan

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

Abstract: The influence of busbar shunting effect on power line communication (PLC) channel characteristics is analyzed based on the typical topology of medium-voltage distribution busbar. And then an adaptive frequency selection algorithm and two kinds of PLC network structure used in medium-voltage distribution network are proposed. The frequency point selection algorithm based on input reactance can improve the selection speed under the premise of guaranteeing the quality of the channel. Combined with the actual structure of medium-voltage distribution network, it is suggested taking the busbar-side PLC node as the initiator of frequency point test. Compared the network structure with the main node of the PLC subnet at the line exit, that one in the middle of the line can reduce the adverse influences caused by busbar shunting effect and improve the economy and reliability of PLC network. The simulation results and field test verify the rationality of the theoretical analysis and the proposed second network structure.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51807063).

Key words: medium-voltage distribution network; power line communication; busbar shunt; channel characteristics; frequency point selection; network structure