

# 中压配电网静态中继结合的分级分层 电力线载波通信路由算法

王艳, 薛晨, 焦彦军

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

**摘要:** 为了满足中压配电网配电自动化系统高可靠性、高实时性的数据传输需求, 电力线载波通信(PLC)技术需要灵活可靠的路由组网算法。在分析中压配电网结构特点的基础上, 提出了一种静态中继相结合的分级分层 PLC 路由算法。根据中压配电网的拓扑结构, 采用静态中继法将 PLC 网络分为 3 个级次, 保证网络整体逻辑结构与配电网的物理结构大致相符, 加快 PLC 网络的组网速度; 每一级次内使用改进分层搜索算法进行动态中继自组网, 保证组网的灵活性与可靠性。仿真结果表明所提算法能够根据配电网的结构及信道环境自适应地组网, 路由优化过程兼顾了链路质量与中继负载均衡性; 所提算法计算量小、组网速度快, 通过调整算法中的权重参数可以灵活满足组网对可靠性与实时性的不同要求。

**关键词:** 智能电网; 中压配电网; 电力线载波通信; 路由算法; 信道质量; 负载均衡

**中图分类号:** TN 914

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.12.002

## 0 引言

智能电网的进一步发展对中压配电网配电自动化通信提出了更高的要求, 不论是直接接入中压配电网的分布式电源 DG(Distributed Generation)还是通过配电变压器间接接入中压配电网的低压智能用电负荷等新兴设备, 均需实时传输大量的配电自动化数据。电力线载波通信 PLC(Power Line Communication)技术成本低、组网方式灵活, 已成为未来配电自动化通信的首选方式之一<sup>[1]</sup>。但 PLC 网络信道环境恶劣、干扰严重、时变性大, 灵活完善的网架结构与节点自组网路由算法是保障中压配电网 PLC 系统可靠运行的关键。

近年来, 蚁群算法<sup>[2-3]</sup>、人工蛛网算法<sup>[4]</sup>、遗传算法<sup>[5-6]</sup>等人工智能方法被大量应用到低压 PLC 路由算法的研究中, 人工智能方法属于随机全局寻优算法, 实现过程复杂、占用大量软硬件资源、寻优时间较长; 信道状态自适应路由算法<sup>[7]</sup>能够根据信道状态动态分配路由, 但概率泛洪法的引入产生了较大的网络延时, 这些算法对于低压抄表系统尚可满足其集抄需求, 但难以满足中压配电自动化数据传输高实时性的应用要求。传统分层搜索算法<sup>[8-11]</sup>简单迅速, 可以保证路由中继跳数较少, 但路由优化指标单一, 搜索结果不一定最优, 而且算法没有考虑配电网中的干扰因素。上述算法均未考虑配电网的结构特点, 导致组网过程具有盲目试探性。基于多叉树遍历

的组网算法<sup>[12]</sup>虽然结合了配电网结构, 但不够灵活, 当配电网中有较强干扰时可能导致路由算法失效。基于组合优化的路由算法<sup>[13]</sup>需在网络规划阶段计算路由表, 再进行 PLC 节点布置, 与中压配电网 PLC 节点固定已知的情况有所出入。由于电力线信道的复杂特性, PLC 网络逻辑拓扑为时变的分裂总线结构<sup>[14]</sup>, 为了保证其可靠运行, 须使用能够动态分配中继的自适应组网算法。但完全动态分配中继可能导致 PLC 网络逻辑结构与配电网物理结构差异较大<sup>[15-16]</sup>, 当配电网结构发生变化时往往会有大量节点丢失, 这些节点在重新搜索入网时耗时较多。因此, 应恰当地将动态中继与静态中继路由算法相结合, 充分发挥二者的优势。

本文在分析中压配电网结构特点的基础上, 提出一种静态中继相结合的分级分层 PLC 路由算法。利用静态中继法进行网络级次划分, 每一级次内采用动态中继路由优化算法。该算法计算量较小、组网速度快, 能够同时保证通信链路的可靠性与 PLC 网络中继节点的负载均衡性。

## 1 基于中压配电网结构的 PLC 网络架构

### 1.1 典型中压配电网拓扑结构

为了保证供电可靠性与运行灵活性, 我国中压配电网多为“环网设计、开环运行”, 具有典型的多分段、多连接结构特点。图 1 为一种常见的“手拉手”类型中压配电网示意图, 变电站 A 的一条出线 A-a 与变电站 B 的一条出线 B-b 在末端由联络开关  $K_4$  相连, 出线 A-a、B-b 的主干线路分别由分段开关分为 3 段、2 段, 各主干分段上接有 1~2 条分支线路, 主干与分支线路上接有配电变压器、分布式电源等设备。

收稿日期: 2017-04-10; 修回日期: 2017-10-17

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2016-MS90)

Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2016MS90)

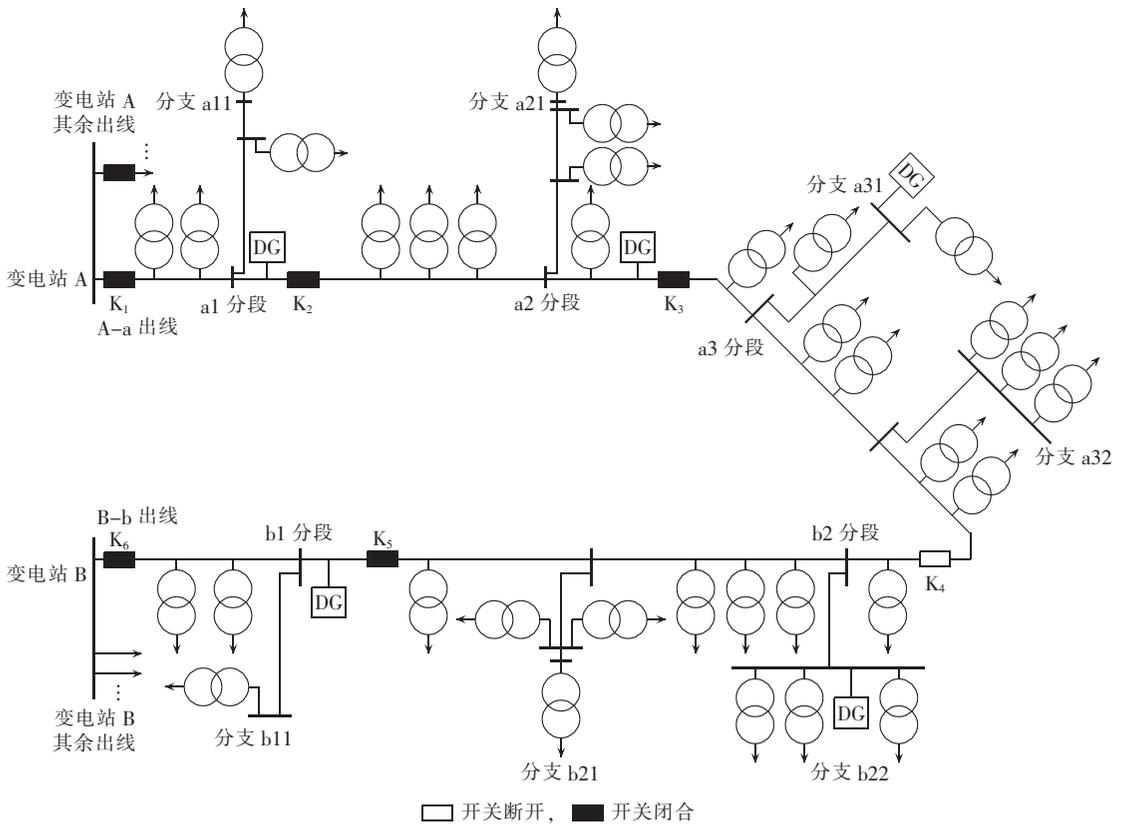


图 1 典型“手拉手”中压配电网拓扑图

Fig.1 Topology of typical “hand in hand” medium voltage distribution network

各分段开关、联络开关的开断相互配合,以便配电网结构优化或故障时的配电网重构。

由图 1 可见,中压配电网网络拓扑结构具有复杂多变性,而载波信号的传输完全依附于配电网结构,在配电网重构后 PLC 网架结构也随之改变,其组网算法需要适应这种变化,做出快速调整。

虽然中压配电网结构较为复杂,但当分段开关状态发生改变导致配电网结构变化时,主干分段连同其上所接的分支与设备会整体转移到另一条线路上,且发生转移的分支的内部结构不发生变化。例如当  $K_4$  闭合、 $K_3$  断开时,  $a_3$  主干分段上的配电变压器与分支  $a_{31}$ 、 $a_{32}$  均接入 B-b 出线,且结构不变。在 PLC 网络的组网过程中,应充分利用配电网各个主干分段整体转移的特点设计网架结构,实现配电网结构发生改变时 PLC 节点的整体迁移,加快 PLC 网络的重构速度。

## 1.2 分级分层中压配电网 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,因此 PLC 系统组网多采用“一对多”的主-从式网络结构。本文针对中压配电网的结构特点,提出一种静态中继与动态中继相结合的组网方式:人工选取静态中继节点以合理区分网络级次,形成多级子网,保证网络整体逻辑结构与配电网物理结构大致相符,各级子网主节点分别

管理各自网内的节点,加快 PLC 网络的组网与重构速度;在每一级网络内采用动态中继形成主-从结构的分层子网络,保证组网的灵活性与可靠性,结合图 2 进行说明。

与图 1 相对应,图 2 中标出了 PLC 节点的分布情况:线路的出口断路器以及各个分段开关、联络开关处采用数字高频网桥<sup>[17]</sup>接入 PLC 节点;各个配电变压器、分布式电源处也均设置 PLC 节点,设定节点的标号为其物理 ID。

中压配电网载波通信三级网络架构如下:同一变电站中各中压配电出线的主节点均直接接入该站的配电自动化系统,构成 PLC 变电站区域网;每条中压配电出线上的 PLC 节点形成一个一级子网,每个一级子网中有一个一级子网主节点(▲)与若干个一级子网从节点(●或■);每条分支线路(如分支  $a_{11}$ )的 PLC 节点组成一个二级子网,每个二级子网就近选择主干上的一级子网从节点作为该二级子网的主节点(■)。这样形成区域网-一级子网-二级子网的三次 PLC 网络结构,其中一级子网主节点(▲)、二级子网主节点(■)根据中压配电网的拓扑结构静态指定,每个一级子网或二级子网内部由动态中继自组网算法完成组网。在这种三级网络架构中,二级子网主节点也是特殊的一级子网从节点,负责将本二级子网内部的信息汇总后与一级子网主节点进行通

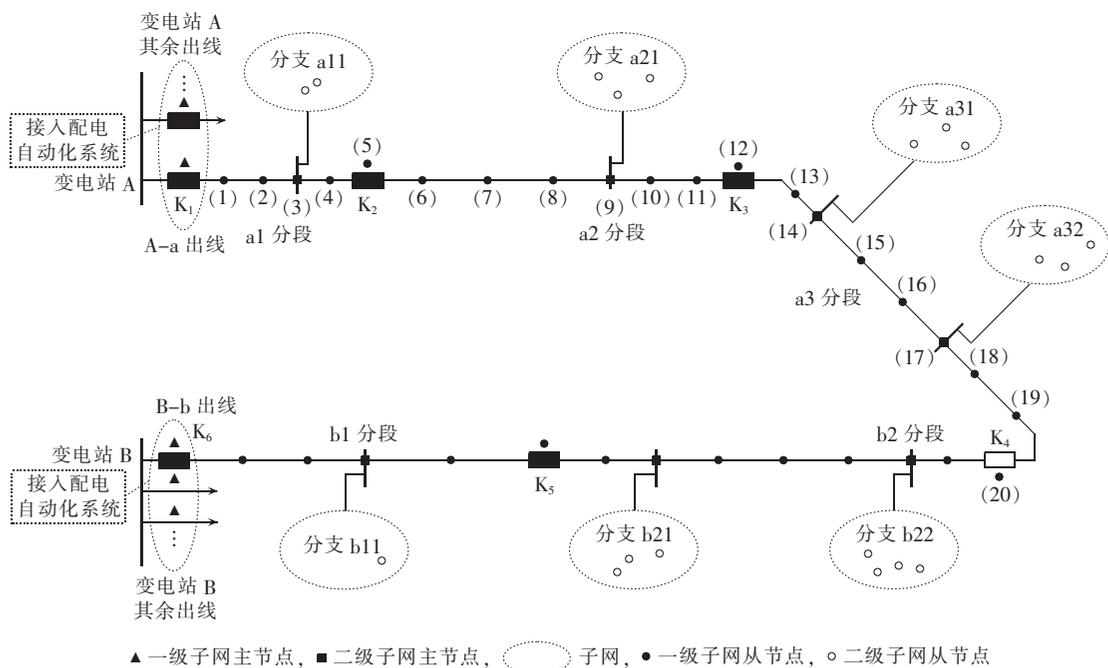


图 2 PLC 网络结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of PLC network structure

信。与 PLC 三级网络架构相对应,PLC 节点地址域由网络标识与节点标识组成,网络标识用于确定节点所属的子网,节点标识用于区分本子网内各个节点,组网过程中节点接收到信息时首先解析出地址域,若数据包不属于本子网则不予回应。

按此结构形成的 PLC 网络在组网与网络重构过程中具有优势。组网过程中,变电站区域网采用轮询方式访问各一级子网;每条配电出线一、二级子网的组网过程由于静态中继的存在可并行进行,以加快组网速度,如 A-a 出线 3 段主干线路上的所有一级子网节点组网,与各分支 a11、a21、a31、a32 上的二级子网节点组网过程可同时进行。但是,由于电力线介质是共享介质,PLC 网络具有总线通信的特点,各子网在组网过程中不可避免地会产生冲突。对于采用正交频复用技术的载波装置而言,将所有可供选择的频点合理划分为不同频点组,对于物理上相邻的子网设置使用不同频点组进行组网,当频点组个数少于相邻的子网个数时,进一步结合虚拟载波侦测技术以避免总线冲突,现场运行经验表明了该技术的可行性<sup>[18]</sup>。网络重构过程中,分支上的二级子网内部组网形式不变,只需将对应的二级子网主节点接入新的一级子网即可,节省了分支上各节点分别入网的时间,加快了网络重构速度;且二级子网主节点由于静态指定,预留有较大的存储空间,能够暂存要上行发送的数据,所以在网络重构过程中二级子网从节点仍可正常向其二级子网主节点发送数据。

## 2 子网内部分层优化路由算法

为了保证 PLC 网络的可靠性与灵活性,三级

PLC 网络架构中的一、二级子网内部仍采用动态中继的自组网算法。针对中压配电网 PLC 网络节点数较少、对通信实时性要求较高的特点,采用改进分层搜索路由算法,同时兼顾负载均衡与链路质量进行路由优化,实现自适应动态组网。

### 2.1 算法步骤

与图 2 中的一级子网 A-a 相对应,图 3 给出了改进分层搜索路由算法示意图,其中节点标号为物理 ID,在同一 PLC 子网中具有唯一性。

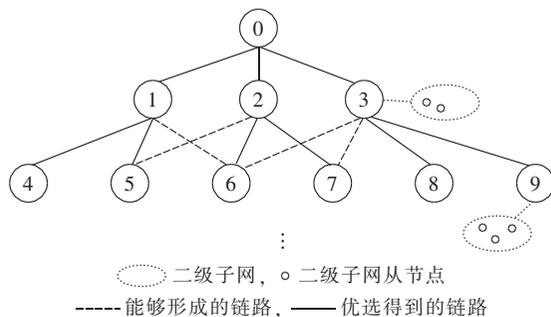


图 3 分层优化路由算法示意图

Fig.3 Schematic diagram of hierarchical optimization routing algorithm

**a.** 子网主节点 0 广播搜索从节点命令,收到该广播的从节点以物理 ID 为标识,应答主节点,请求注册入网。

**b.** 主节点根据收到的从节点请求注册入网信息,向该从节点返回允许注册命令以及本子网的标识符。经过步骤 **a**、**b** 后,搜索到的节点为第一层节点。如图 3 中主节点 0 通过搜索得到第一层节点 1、2、3,建立链路 0-1、0-2、0-3。在建立链路的同时,根

据双方的通信情况确定链路质量  $Q$  值(为了便于 2.2 节中阐述层间优化算法,本文假定  $Q$  值越小对应的链路质量越好)。由于主节点 0 到第一层节点之间的链路唯一,故无需优化。

c. 第一层节点按照物理 ID 由小至大分别搜索剩余所有节点,剩余节点若能接收到某节点的搜索信号则应答该节点,第一层节点记录应答节点的物理 ID 与对应的链路质量,并汇报给主节点。此步骤搜索到的节点归为第二层节点。如节点 1 搜索到 3 个节点,得到链路 1-4、1-5、1-6 的链路质量分别为  $Q_{1-4}$ 、 $Q_{1-5}$ 、 $Q_{1-6}$ 。

d. 若某个第二层节点存在多个第一层中继节点,则按 2.2 节算法进行层间链路优化,选定唯一中继节点。

e. 第二层节点继续向下搜索第三层节点,并优化第二、三层之间的链路。依此类推,直至搜索到该子网内的所有节点。

## 2.2 层间链路优化算法

设定可选上层中继个数较少的节点具有较高的入网优先级,若 2 个节点的入网优先级相同则优先使编号较大的节点入网。层间链路优化过程中,按照下层节点的入网优先级由高至低依次将各节点接入网络。

考虑中继节点的负载均衡性,定义中继节点  $j$  的负载数  $F_j$  为:

$$F_j = a + b + c \quad (1)$$

其中,  $a$  为节点  $j$  所接的二级子网节点数;  $b$  为节点  $j$  已接的下层节点数;  $c$  为节点  $j$  所接的下层节点所带的二级节点数。以节点 3 为例,在优化前未接第二层负载,此时  $a=2$ 、 $b=0$ 、 $c=0$ ,节点负载数  $F_3=2$ ;链路优化过程中先后接入了节点 9、8,形成链路 3-9、3-8,此时  $a=2$ 、 $b=2$ 、 $c=3$ , $F_3=7$ 。优化过程中每接入一个下层节点则需对其所接入的上层节点的负载数进行更新。

定义中继节点  $j$  与下层节点  $k$  之间的链路优化指数  $Y_{j-k}$  为:

$$Y_{j-k} = \alpha Q_{j-k} + \beta F_j \quad (2)$$

其中,  $Q_{j-k}$  为节点  $j$ 、 $k$  间的链路质量;  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为链路质量加权系数和负载均衡度加权系数,令  $\alpha + \beta = 1$ ,可根据链路质量和负载均衡度的占比进行灵活调整。

以图 3 中第一层节点与第二层节点间的链路优化为例,阐述层间链路优化步骤如下。

a. 确定链路优化前各节点的负载数。第二层节点入网前,已知第一层节点的负载数  $F_1=0$ 、 $F_2=0$ 、 $F_3=2$ ,第二层节点的负载数  $F_4=F_5=\dots=F_8=0$ 、 $F_9=3$ 。

b. 确定第二层节点的入网优先级。节点 4、8、9

只有一个上层中继,优先级最高;节点 5、7 具有 2 个上层中继,优先级次之;节点 6 有 3 个上层中继,优先级最低。

c. 将优先级最高的第二层节点按编号由大到小(9,8,4)依次入网,形成链路 3-9、3-8、1-4,更新第一层中继节点的负载数  $F_1=1$ 、 $F_3=7$ 。

d. 将优先级次之的第二层节点按编号由大到小(7,5)依次入网。节点 7 具有 2 个上层中继,故分别求取链路优化指数  $Y_{2-7}$ 、 $Y_{3-7}$ ,选定链路优化指数最小者 2-7 作为节点 7 的优选链路,即节点 7 通过中继节点 2 完成入网,同时更新节点 2 的负载数  $F_2=1$ 。节点 5 的入网优化过程与节点 7 相同,其通过中继节点 1 完成入网,同时更新  $F_1=2$ 。

e. 节点 6 入网优选链路的过程与步骤 d 相同。分别求取  $Y_{1-6}$ 、 $Y_{2-6}$ 、 $Y_{3-6}$ ,选定链路优化指数最小者 2-6 作为节点 6 的优选链路,即节点 6 通过中继节点 2 完成入网,同时更新  $F_2=2$ 。至此第二层节点优化入网完毕。

上述层间链路优化算法同时考虑了链路质量与负载均衡,较高的链路质量能保证节点间的通信可靠性,减少错误帧重发次数<sup>[14]</sup>,负载均衡可以避免个别节点数据流量过大而产生较高时延<sup>[11]</sup>,二者对于提高中压配电网 PLC 系统的实时性与可靠性均具有重要意义。

## 3 仿真实验

### 3.1 不同权重系数下路由优化结果

以图 2 出线 A-a 的一级子网为例仿真实验验证其组网过程。结合出线 A-a 的拓扑结构,设其一级子网主节点的物理 ID 为 0,从节点共 20 个,物理 ID 为 1—20,其中一级子网从节点 3、9、14、17 分别为二级子网 a11、a21、a31、a32 的二级子网主节点。在  $xOy$  平面上,将一级子网主节点放置于坐标原点,由于城市配电网台区半径通常小于 5 km,故由坐标点(0,0)到(5,5)km 由近及远依次生成 20 个坐标点代表一级子网中的各个从节点。对于任意两点  $j$ 、 $k$ ,取信道质量  $Q_{j-k}$  等于两点间距离  $d$ ,仿真中以  $Q_{j-k} \leq 2.5$  作为两节点间能够建立链路的标准。

链路质量加权系数  $\alpha=0.1$ 、负载均衡度加权系数  $\beta=0.9$  时,组网优化结果如图 4 所示。由图 4 可见,分层优化路由算法将 20 个一级子网从节点全部接入网络中,路由优化结果保证了中继节点负载较为均衡。如第一层节点 5、7 均可作为节点 10 的中继,由于节点 7 已接有较多负载,节点 10 自动选择距离较远但尚未接负载的节点 5 作为其中继。

改变加权系数,令  $\alpha=0.7$ 、 $\beta=0.3$ ,其余参数不变,则路由优化结果如图 5 所示。

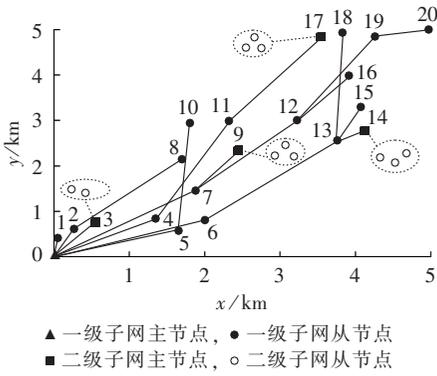


图 4  $\alpha=0.1, \beta=0.9$  时分层优化组网结果

Fig.4 Networking result by hierarchical optimization algorithm when  $\alpha=0.1$  and  $\beta=0.9$

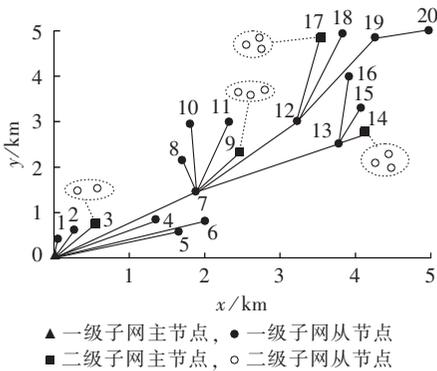


图 5  $\alpha=0.7, \beta=0.3$  时分层优化组网结果

Fig.5 Networking result by hierarchical optimization algorithm when  $\alpha=0.7$  and  $\beta=0.3$

图 5 与图 4 相比,虽然信道环境相同,但链路权重加大影响了路由优化结果,使得路由算法更倾向于选择链路质量较优的路径,而较少考虑负载的均衡性。如节点 10 不再选择距离较远但没有负载的节点 5 为中介,而是选择距离较近但负载数较多的节点 7 为中介。

表 1、表 2 分别列出了图 4 和图 5 中各层节点的编号、负载数与负载数方差,对比可知表 2 中第一、二层的节点负载数方差均增大,可见由于优化更侧重保障链路质量,导致负载均衡度下降。实际应

表 1  $\alpha=0.1, \beta=0.9$  时各层节点的负载分布

Table 1 Load distribution of each hierarchy when  $\alpha=0.1$  and  $\beta=0.9$

层级	节点编号	$F_j$	负载数方差
第一层	1,2,3,4,5,6,7	0,1,2,1,1,1,5	2.24
第二层	8,9,10,11,12,13	0,3,0,4,2,6	4.58
第三层	14,15,16,17,18,19	3,0,0,3,0,1	1.81

表 2  $\alpha=0.7, \beta=0.3$  时各层节点的负载分布

Table 2 Load distribution of each hierarchy when  $\alpha=0.7$  and  $\beta=0.3$

层级	节点编号	$F_j$	负载数方差
第一层	1,2,3,4,5,6,7	0,0,2,0,0,0,9	9.67
第二层	8,9,10,11,12,13	0,3,0,0,6,6	7.25
第三层	14,15,16,17,18,19	3,0,0,3,0,1	1.81

用中,在链路容量宽裕的情况下优化应侧重链路质量以保证通信可靠性;当链路容量紧张时,优化则需侧重负载均衡性,避免因部分节点负载过多而增大数据传输时延。

### 3.2 有干扰情况下路由组网结果

为了验证算法在有干扰信道环境下的组网能力,在区域内定义一条斜率为  $-1$  的干扰界限  $l$ (由于节点沿斜率为  $1$  的方向分布,在节点间引入的干扰源则相当于一斜率为  $-1$  的干扰界限),节点  $j, k$  间连线中点到  $l$  的距离  $r$  越小,  $Q_{j-k}$  越大,对应的链路质量越差。考虑干扰情况下,设  $Q_{j-k} = d + e, e = 0.2 \times (5\sqrt{2} - r)$  为引入干扰源后的附加  $Q$  值增量。 $e$  值的引入模拟了实际 PLC 节点在不同方向、不同通信距离下的情况,靠近干扰源时  $r$  值减小,  $e$  值增大,信道质量变差,节点间通信距离较短,反之则通信距离较长。

在节点 3、4 之间设置干扰界限,其余参数与图 4 相同,组网结果如图 6 所示。

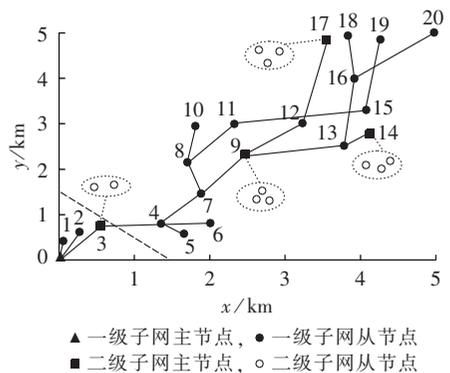


图 6 有干扰时的分层优化组网结果

Fig.6 Networking result by hierarchical optimization algorithm with interference

图 6 与图 4 相比,虽然各节点位置未变,但干扰源的引入导致信道质量发生变化,路由组网结果随之改变。PLC 网络由 4 层增加为 7 层。由于节点 3、4 之间的干扰,节点 4—7 不再能与主节点 0 直接通信,需通过节点 3 接入网络。在干扰界限附近,算法以较短的节点间通信距离保证链路质量,远离干扰时通信距离增大。可见所提算法在存在干扰的信道环境下也能够自适应组网。

### 3.3 实验室测试

图 7 为河北省保定市 10 kV 城市配电网拓扑图,实线为架空线,虚线为电缆,各段线路长度标于图中(单位为 m)。参考实际线路型号及参数,搭建该配电网的实验室 RLC 电路模型,为了使实验室 RLC 电路模型尽量与实际配电网相符,搭建模型前分别计算不同线路型号下长度为 50 m 的线路参数,将每 50 m 线路等效焊接成一个集中参数的 RLC 电路  $\pi$  型模型,利用多个 RLC 电路  $\pi$  型模型的级联

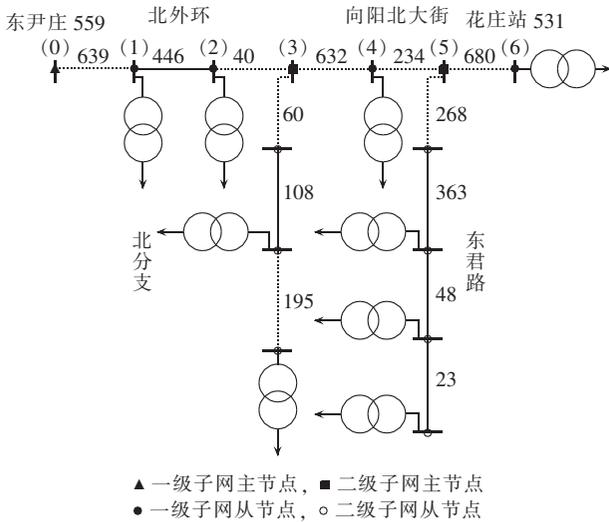


图 7 10 kV 城市配电网拓扑图  
Fig.7 Topology of 10 kV city distribution network

等效一条 10 kV 分布参数输电线路。测试中使用自行研制的载波机,该载波机使用正交频分复用调制技术,允许在 3~500 kHz 范围内的 108 个频点内选择 18 个子载波频点进行通信,组网测试在 170~430 kHz 范围内均匀选取的 18 个固定频点下完成。

测试中链路质量  $Q$  取为 18 条子载波通道平均丢包率的 100 倍,并假定平均丢包率大于 10% 时链路无效。对图 7 主干线路上的节点 0—6 进行一级子网组网测试,其中节点 3、5 为二级子网主节点,分别带 3 个、4 个二级子网从节点。当  $\alpha=0.3, \beta=0.7$  时组网结果如图 8 所示,其中链路上的数字为平均丢包率。由图 8 可见,采用本文算法能够在兼顾链路质量与中继负载均衡性的基础上很好地完成一级子网组网过程。

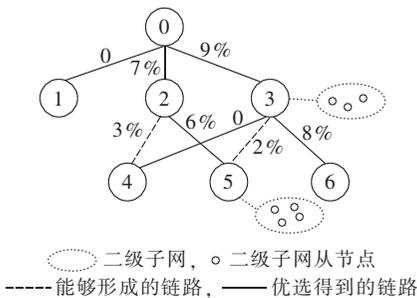


图 8 实验室测试组网结果  
Fig.8 Networking result of laboratory test

### 3.4 本文算法与其他路由算法对比

#### a. 本文算法与蚁群路由算法对比。

针对图 2 中压配电网出线 A-a 情况,表 3 给出了本文分级分层路由算法与蚁群路由算法的对比分析。

依据文献[2-3]估算采用蚁群算法组建网络所需的节点间通信次数。在没有进行网络分级情况下,图 2 中出线 A-a 上的 PLC 从节点共 31 个,则每次

表 3 本文算法与蚁群算法的结果对比  
Table 3 Result comparison between proposed algorithm and ant colony algorithm

算法	组网节点数	节点间通信次数
蚁群算法	31	192200
本文算法	20	273(图 4,5), 153(图 6)

迭代最大蚂蚁数为 62。设各从节点平均需进行 20 次迭代搜索得到最优路径,每只蚂蚁平均经过 2.5 次中继到达目标节点,考虑到蚂蚁到达目标节点后需沿原路径返回主节点,则组网时共需进行的节点间通信次数约为  $n_1=62 \times 20 \times 31 \times 2.5 \times 2=192200$ (次)。而本文所提路由算法在网络分级结构下,一级子网与二级子网组网过程并行进行,组网时间由所需通信次数较多的一级子网组网过程决定。依据 2.1 节所述,上层节点每搜寻到一个下层节点需要与之交互通信 3 次,图 4 出线 A-a 的一级子网中共有 20 个从节点,分层搜索组网后得到的第一至四层的节点数分别为 7、6、6、1,则建立网络共需进行的节点间通信次数约为  $n_2=(7+7 \times 6+6 \times 6+6 \times 1) \times 3=273$ (次),对于图 5、图 6 也可以进行类似估算。由表 3 中 2 种算法的对比结果可见:对于同样的组网规模,分级分层组网算法将整个网络划分成多个子网,减少了子网内节点数,组网所需的节点间通信次数远小于蚁群算法。

#### b. 本文算法与非交叠分簇路由算法对比。

非交叠分簇路由算法与本文算法均属于分层搜索路由算法,组网所需的节点间通信次数在一个数量级上,故重点比较 2 种算法的中继负载均衡性。依据文献[10]的非交叠分簇路由算法对图 2 出线 A-a 的一级子网进行组网,其各层节点负载分布如表 4 所示。与表 1 对比可知,表 4 中各层节点负载数方差均较大,表明本文算法在中继负载均衡性上要优于非交叠分簇路由算法。

表 4 非交叠分簇路由算法各层节点负载分布  
Table 4 Load distribution of each hierarchy of irreciprocal clustering algorithm

层级	节点编号	$F_j$	负载数方差
第一层	1,2,3,4,5,6,7	1,0,6,2,0,1,1	3.67
第二层	8,9,10,11,12,13	0,9,0,5,1,0	11.58
第三层	14,15,16,17,18,19	4,0,0,3,0,0	2.81

## 4 结论

智能配电网是未来中压配电网发展的方向,随着分布式电源与智能用电设备直接或间接接入中压配电网,对配电自动化数据传输的可靠性与实时性要求越来越高,这对中压 PLC 网络组网与重构算法提出了很高的要求。中压配电网 PLC 网络信道环境恶劣,需要合理的网架结构与自适应能力强的组网算法满足其应用需求。

a. 本文在分析中压配电网结构特点的基础上,提出一种具有区域网、一级子网、二级子网的三级次 PLC 网络架构,采用静态中继法进行网络级次划分,各级子网内部采用动态中继法进行分层自适应组网。这种网络架构能够实现组网过程的并行进行,且重构过程中二级子网可以整体转移,提高了 PLC 网络的组网与重构速度。

b. 针对中压配电网 PLC 网络在分级架构下子网内节点数较少但对实时性要求较高的特点,提出一种改进分层搜索路由算法。可根据网络信道环境进行自适应组网,路由优化灵活,兼顾了链路质量与负载均衡,计算量小,需要的节点间通信次数较少。

### 参考文献:

- [1] 舒悦,陈启美,李英敏. 跻身未来的电力线通信(七)PLC 组网方案及应用[J]. 电力系统自动化,2003,27(12):90-94.  
SHU Yue, CHEN Qimei, LI Yingmin. Predictive schemes for future power line communication (part seven) power line communication network forms and their application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 90-94.
- [2] 苏海峰,石经纬,梁志瑞,等. 基于 GIS 和改进元胞自动机的输电线路路径自动选择[J]. 电力自动化设备,2016,36(12):109-114, 122.  
SU Haifeng, SHI Jingwei, LIANG Zhirui, et al. Automatic transmission line path selection based on GIS and improved CA[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 109-114, 122.
- [3] 刘晓胜,戚佳金,宋其涛,等. 基于蚁群算法的低压配电网电力线通信组网方法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(1):71-76.  
LIU Xiaosheng, QI Jiajin, SONG Qitao, et al. Method of constructing power line communication networks over low-voltage distribution networks based on ant colony optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 71-76.
- [4] 刘晓胜,张良,周岩,等. 低压电力线载波通信新型组网模型性能分析[J]. 电工技术学报,2012,27(11):271-277.  
LIU Xiaosheng, ZHANG Liang, ZHOU Yan, et al. Performance analysis of novel low-voltage power line communication model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 271-277.
- [5] 陈可,胡晓光. 基于遗传自适应蚁群系统算法的中继路由方法[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(2):571-579.  
CHEN Ke, HU Xiaoguang. Method of relay routing based on genetic adaptive ant colony system algorithm[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(2): 571-579.
- [6] XING Ningzhe, ZHANG Sidong, SHI Yue, et al. PLC-oriented access point location planning algorithm in smart-grid communication networks[J]. China Communications, 2016, 13(9): 91-102.
- [7] HEO J, LEE K, KANG H K, 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.
- [8] 陈可,胡晓光,丁健. 基于自动抄表系统的复费率载波电能表设计及中继算法研究[J]. 电力自动化设备,2011,31(8):139-143.  
CHEN Ke, HU Xiaoguang, DING Jian. Design of concentrator based on electric line broadband carrier and relay routing algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(8): 139-143.
- [9] 戚佳金,刘晓胜,徐殿国,等. 低压电力线通信分簇路由算法及网络重构[J]. 中国电机工程学报,2008,28(4):65-71.  
QI Jiajin, LIU Xiaosheng, XU Dianguo, et al. Cluster-based routing algorithm and reconstruction method of power line communication over lower-voltage distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 65-71.
- [10] 梅杨,宗群龙. 基于节点相关度的电力线载波通信路由算法[J]. 电力自动化设备,2010,30(3):95-97.  
MEI Yang, ZONG Qunlong. Routing algorithm of power line communication network based on node relevance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(3): 95-97.
- [11] 潘丹,邵卫. 电力线载波抄表系统的负载均衡算法研究[J]. 信息化纵横,2009,28(17):26-30.  
PAN Dan, SHAO Wei. Research on load-balance algorithm for meter reading system based on power line communication[J]. Information Vertical and Horizontal, 2009, 28(17): 26-30.
- [12] 彭启伟,张浩. 基于多叉树遍历的中压配电网载波自适应中继算法[J]. 电力系统通信,2009,30(3):81-84.  
PENG Qiwei, ZHANG Hao. Adaptive relay algorithm in MV distribution line carrier based on enumerating multi-branch tree[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2009, 30(3): 81-84.
- [13] CANALE S, GIORGIO A D, LANNA A, et al. Optimal planning and routing in medium voltage powerline communications networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 711-719.
- [14] 董亚波,高峰. 低压电力线载波通信网络结构分析[J]. 电网技术,2003,27(2):58-62.  
DONG Yabo, GAO Feng. Analysis of structure of carrier communication network for low voltage power line[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 58-62.
- [15] 吕敬伟. 低压电力线载波通信网络组织算法研究[D]. 北京:中国石油大学(华东),2013.  
LÜ Jingwei. Research on network organizing algorithm in low-voltage power line communication network[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2013.
- [16] BIAGI M, GRECO S, LAMPE L. Geo-routing algorithms and protocols for power line communications in smart grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, PP(99): 1-10.
- [17] 焦邵华,矫坚,由欣,等. 具有高可靠性的网络化配电网载波系统的研究与实现[J]. 电网技术,2000,24(12):32-36.  
JIAO Shaohua, JIAO Jian, YOU Xin, et al. Study and implementation of network based distribution line carrier system with high reliability[J]. Power System Technology, 2000, 24(12): 32-36.
- [18] 汪晓岩,吴春琪,王强,等. 新型中压配电网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.

### 作者简介:



王艳

王艳(1981—),女,黑龙江富裕人,讲师,博士,研究方向为中压电力载波通信、电力系统继电保护(E-mail: 18288061@qq.com);

薛晨(1991—),男,河南南阳人,硕士研究生,通信作者,研究方向为中压电力载波通信(E-mail: xuechen678@163.com);

焦彦军(1963—),男,河北保定人,教授,博士,主要研究方向为电力系统分析与控制、电力系统继电保护等。

## Hierarchical classification PLC routing algorithm combining static relay with dynamic relay in medium voltage distribution network

WANG Yan, XUE Chen, JIAO Yanjun

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

**Abstract:** In order to meet the high reliability and high real-time requirement of data transmission in medium voltage distribution network automation system, PLC (Power Line Communication) technology needs flexible and reliable network routing algorithm. Based on the analysis of structure characteristics of medium voltage distribution network, a hierarchical classification PLC routing algorithm combining static relay with dynamic relay is proposed. According to the topology of medium voltage distribution network, the PLC network is divided into three levels by static relay method, which can ensure the overall logical structure of the communication network conforming to the physical structure of the distribution network, and accelerate the networking process. An improved hierarchical search algorithm is used in each level to ensure the flexibility and reliability of networking. Simulative results show that the proposed algorithm can adapt to the network structure and the channel environment, and the routing optimization process takes the link quality and relay load balance into account. The proposed algorithm has low computational complexity and fast networking speed. By adjusting the weight parameters of the algorithm, it can meet the networking's different requirements of reliability and real-time.

**Key words:** smart grid; medium voltage distribution network; power line communication; routing algorithm; channel quality; load balancing

(上接第 7 页 continued from page 7)

## Discussion on cooperative control architecture of cyber-physical distribution network system

LI Peikai<sup>1</sup>, CAO Yong<sup>1</sup>, XIN Huanhai<sup>1</sup>, DAI Pan<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Corporation Economic Research Institute, Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** With the organic integration and coordination of computing, communication and control technologies, CPS (Cyber-Physical System) has contributed to the change of power system operation mode and provided a new approach for its intelligent construction. As an important component of cyber-physical power system, the cyber-physical distribution network system must have the functions of real-time control and optimized dispatch when large-scaled distributed new energy resources are connected to the distribution network in the future. On this background, the control architecture of cyber-physical distribution network system is studied. Considering the components and key functions of CPS, the frame structure of cyber-physical distribution network system is designed including the active distribution network and micro-grid technologies. On this basis, aiming at the multi-level and distributed-coupled cooperative control strategy of cyber-physical distribution network system, a complete cooperative control architecture of cyber-physical distribution network system is built, including the distributed physical architecture with sensing, computation technologies and controlled objects and the hierarchy abstract architecture with the internal unity and external interconnectivity.

**Key words:** cyber-physical system; cyber-physical distribution network system; control architecture; cooperative control; distributed mode