基于终端通信质量的 10 kV 电力线通信组网方法

胡正伟,谢志远,郭以贺,刘 珊
(华北电力大学 电子与通信工程系,河北 保定 071003)

摘要:提出了一种根据终端之间通信质量进行动态组网的方法,可以实现集中器与终端之间通信质量最优路径的选择。该方法首先通过集中器与终端之间建立通信得到初始组网信息,并根据终端与集中器之间的中继级数进行分层,然后对每个终端与其他终端的通信成功次数进行统计,在一个统计周期结束后,集中器征调统计结果,并进行计算分析得到每条路由的通信质量,为每个终端选择通信质量最优的各级中继站。同时为了适应电力线信道的强时变性,可以合理选择统计周期大小,并在每个统计周期内更新路由信息。该算法与理论上的组网算法相比具有简单易实现、计算量小等优点。算法的实际运行需要制定相关协议和增加一定的硬件功能。通过仿真实例验证了所提方法的正确性和有效性。

关键词:电力线通信;配网自动化;组网;通信
中图分类号:TP 212;TM 727 **文献标识码**:A DOI:10.3969/j.issn.1006-6047.2013.09.026

0 引言

电力线通信由于不需重复铺设线路,且具有投资小、可靠性高、灵活性强等优点,成为城市配电自动化通信的首选方式之一[1]。但是由于电力线信道具有高衰减、强噪声、阻抗不匹配等特点,使电力线通信的使用受到了一定的限制。为了实现可靠、高效的电力线通信,国内外很多学者、机构对电力线通信进行了大量的研究:按电压等级划分,研究主要集中在低压 220 V[1-13]和中压 10 kV[14-16]2 个电压等级;按提高电力线通信的可靠性方面划分,研究主要集中在增强物理层通信能力[1-6]和建立网络中继[7-16]两大方向。增强物理层通信能力的相关研究主要集中在信道特性、噪声、衰减、信源和信道编码、信号调制方式等。建立网络中继的相关研究主要集中在组网的算法研究,文献[7-8]利用蚁群算法进行组网,文献[9-10]利用分簇算法进行组网,文献[11]提出了基于 QoS 的电力线通信组网算法。本文从工程实用角度出发,针对 10 kV 电力线通信的特点,提出了统计各个终端与系统中其他终端的通信质量来选择最优中继站,从而实现电力线通信组网。与文献[7-11]中的算法实现相比,该方法具备简单易实现、计算量小等优点。

本文的研究是在陕西某 10 kV 电力线示范网配网自动化工程的基础之上进行的。工程采用 ARM 控制器和专用电力线载波芯片实现了 10 kV 电力线通信嵌入式系统。当前现场运行采用信息管理后台人工指定固定中继站的方式实现组网,因此存在很多弊端。为了能够根据电网实际运行情况实现动态组网,本文提出了基于终端通信质量的动态组网方法。

收稿日期:2013-03-18;**修回日期**:2013-07-19
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61172075);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(916111204)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61172075) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(916111204)

1 10 kV 电力线通信的拓扑结构

一般情况下,电力线通信以一个集中器为核心,通过电力线与终端进行通信,其总线拓扑一般呈树形结构,图 1 为陕西省某 10 kV 中压配电网的实际网络拓扑结构图。图中 1—14 为通信终端的 ID,集中器与终端之间通过电力线进行信息交换。由于集中器与所有的终端使用电力线这一公共资源,原则上它们之间可以直接通信,但是由于电力线信道具有衰减、噪声、阻抗不匹配等特点,超过一定距离后,集中器与终端之间无法进行直接通信,此时需要通过选择中继进行组网实现通信。

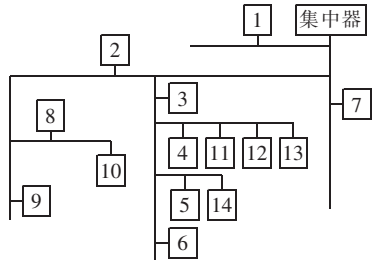

图 1 10 kV 电网拓扑结构示意图
Fig.1 Topological structure of 10 kV power grid

2 算法的适用条件

a. 系统工作在主从模式,即集中器发起通信,终端响应集中器的命令,并发送相应数据给集中器。集中器在规定的时间内,收到正确的终端数据后,发起下次通信,否则认为通信失败。

b. 通信协议支持统计数据由终端发送至集中器。在一个统计周期结束后,集中器发送一条征集每

个终端与其他终端的通信成功次数的命令。每个终端按照一定的格式把数据发送给集中器。集中器根据统计数据进行分析计算,为每个终端选择最佳通信路由。

通过设置图 2(a)中的功能码,定制征调统计数据命令。中继路由表除了标识集中器到目的终端的路由信息外,还标识了目的终端的中继级数及数据的上行/下行方向。图 2(b)中的统计数据为相应的通信成功次数。

起始字节	目的终端 ID	中继路由表	功能码	校验字节	结束字节

(a) 集中器发送数据的帧格式

起始字节	目的终端 ID	中继路由表	统计数据	校验字节	结束字节

(b) 目的终端发送数据的帧格式

图 2 通信协议的帧格式

Fig.2 Frame format of communication protocol

c. 因为实际工程中可以通过制定专用的通信协议并对嵌入式处理器进行编程统计终端之间通信成功次数,所以选择通信成功率作为通信质量的衡量标准:

通信成功率=通信成功次数/通信总次数×100%

3 算法组网原理

假设系统包含 N 个终端,每个终端具有唯一的站号标识 ID。假设 ID 为 1、2、…、N,依此定义集合 $F=\{1,2,\cdots,N\}$。系统工作在主从模式下,集中器以广播的形式发送命令给终端。终端接收到命令后,进行以下分析:首先比较目的终端 ID 与自身 ID 是否一致,若一致则根据具体命令向集中器发送相应数据;若不一致,再比较中继路由表中是否存在中继 ID 与自身 ID 一致,若存在则作为中继站将接收的数据按照路由表进行传递。若该终端 ID 与其收到命令的目的终端 ID、中继列表中的 ID 都不一致,则该终端在本次通信中不进行数据转发,只判断收到的数据来自哪个终端或集中器,并进行计数。

3.1 初始路由生成

在时限 T_m 内,集中器按终端 ID 从小到大依次尝试直接与所有终端进行通信。定义能够与集中器直接进行通信的终端集合为 R_1,集合 R_1 中的终端个数为 n_{R_1}。若 $n_{R_1}=N$,表示 $R_1=F$,则停止分层;否则,集中器按 ID 从小到大的顺序依次选择剩余终端作为目的终端。对于每个目的终端,同样按照 ID 从小到大的顺序选择集合 R_1 中的终端作为 1 级中继站,尝试与当前目的终端进行通信。选择第 1 个能与当前目的终端建立通信的集合 R_1 中的终端作为 1 级中继站,将该目的终端归为 1 级中继通信终端集合,并停止对其的尝试,转而尝试其他剩余终端。若集合 R_1 中的所有终端都不能与当前目的终端建立通信,则放弃对其的 1 级中继通信尝试。

定义经过集合 R_1 中的终端进行 1 级中继后能够建立通信的终端集合为 R_2,集合 R_2 中的终端个数为 n_{R_2}。若 $n_{R_1}+n_{R_2}=N$,表示 $R_1\cup R_2=F$,则停止分层;否则,集中器以集合 R_1 中的终端为 1 级中继站,以集合 R_2 中终端为 2 级中继站,尝试与剩余终端进行通信,方法与 1 级中继站的选择相同。依此类推,直到所有终端与集中器之间都建立起通信。图 3 为根据上述分层方法,将系统中所有终端进行分层得到的分层结果示意图,假设共分为 L 层,每层的终端个数分别为 $n_{R_k}(k=1,2,\cdots,L)$。

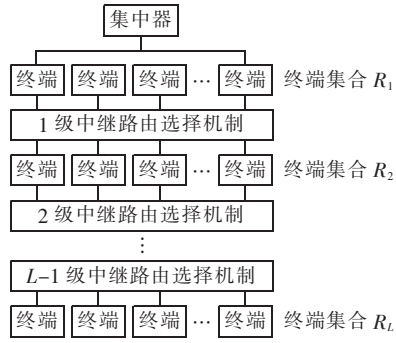

图 3 分层结果示意图

Fig.3 Result of layering

由以上分析可以发现,k 级通信终端集合是 $k+1$ 级通信终端的 k 级中继站集合。当 $k=1$ 时,直接通信的终端集合 R_1 为 1 级中继站集合;当 $1<k<L$ 时,R_k 为 k 级中继通信终端集合,且为 $k+1$ 级中继站集合;当 $k=L$ 时,R_k 为 k 级中继通信终端集合,由于分层结束,不再作为中继站集合使用。

3.2 最优路径选择

经过初始分层得到的路由不一定是最佳的,如何得到最佳的通信路径是本文所要解决的问题。在图 3 中,第 k 层与第 $k+1$ 层之间通过 k 级($1\leqslant k\leqslant L-1$)中继路由选择机制进行最佳路由选择,本文的方法可以看作是一种中继路由选择机制。

假设在寻找最佳路由的过程中,所有通信终端的通信状态,即与集中器之间的中继级数不发生改变,本算法表现为每一层对应的集合中的元素不发生改变。这个假设在实际工程中具有一定的合理性,因为当通信质量下降时,首先考虑的是进行通信频率的切换,其次才考虑中继的更换。因此,可以认为中继级数在一定的时间段内保持稳定。

为了方便介绍该算法,定义以下几个参数。

a. 轮询周期 T_p:集中器把 N 个终端依次轮询一遍的时间。1 个轮询周期内,集中器共发送 N 条指令,每个终端统计是否能够收到其他终端发出的信息。T_p 的大小与集中器管理的终端个数、终端的中继级数有关:终端个数越多,T_p 越大;中继级数越多,T_p

越大。

b. 统计周期 T_s:定义 M 个轮询周期为 1 个统计周期,即 $T_s=MT_p$。M 可以根据电网的实际情况设置为定值,也可以进行动态调整。

c. 通信成功次数 C_{ij}:统计周期内站号 ID 为 i 的终端收到站号 ID 为 j 的终端的次数,其中 $i,j\in F$ 且 $j\neq i$。

3.2.1 通信质量的获取

通信成功次数的获得,需要集中器和相互通信的 2 个终端合作进行。

集中器负责分析在 1 个统计周期内,每个终端参与通信的次数,包括作为目的终端和中继站的次数,每发送 1 条指令分析 1 次。每个终端作为目的终端的次数即为 M,而每个终端作为中继站的次数 S 要通过分析通信协议帧格式的中继路由表字段得到。因此,在 1 个统计周期内,每个终端参与通信的总次数为 $2S+M$,S 乘 2 的原因是中继站在一次通信过程中包含上行数据和下行数据 2 次发送过程。

因为本文方法是为了寻找最优路由,所以不关心同一层终端之间的互相统计结果,而只关心本层内的终端与相邻层内的终端的双向通信成功率,即统计集合 R_{k-1} 的终端与集合 R_k 的终端之间相互通信成功率。只有能够进行双向通信,才认为通信成功。因为集中器具备管理所有终端的功能,每个终端所处的分层集合是可知的。但层内的相互通信统计结果是必要的,因为终端可能随电力线信道特性出现从一个分层到另一个分层的变换。

假设 i、j 为终端的 ID,且 $i\in R_{k-1}$,$j\in R_k$。C_{ij} 为终端 i 成功接收终端 j 的发送数据的次数,同理,C_{ji} 为终端 j 成功接收终端 i 的发送数据的次数。

在一个统计周期结束后,集中器发送征调各个终端的统计数据的命令,各个终端将其统计数据上传给集中器,集中器负责进行统计结果分析与处理。

根据以上分析,可以得到终端 j 与终端 i 的通信质量表达式为:

$$Q_{ij}=Q_{ji}=\min\left(\frac{C_{ji}}{M+2S_i},\frac{C_{ji}}{M+2S_j}\right)\times 100\%$$

其中,$2S_j$、$2S_i$ 分别为在统计周期内终端 j 与终端 i 作为中继站发送数据的次数;当 $k=L$ 时,$S_j=0$。

3.2.2 通信质量的分析

处在不同集合中的终端,其通信质量的决定因素也不同。下面首先分析特殊集合中的终端通信质量表达式,然后得到终端的通信质量的一般表达式。

3.2.2.1 直接通信的终端

直接通信的终端与集中器之间不需要中继站。在该方法中,直接通信的终端与集中器之间在统计周期 T_s 内的通信质量,记为 $Q_{i_1}\big|_{i_1\in R_1}$。

3.2.2.2 1 级中继通信的终端

1 级中继通信终端与集中器之间,经过 1 级中继站进行通信。因此,1 级中继通信终端的通信质量取决于 2 条路径。

a. 路径 1:集中器与 1 级中继站集合 R_1 中的终端的通信质量 $Q_{i_1}\big|_{i_1\in R_1}$。

b. 路径 2:1 级中继站集合 R_1 中的终端与目的终端的通信质量 $Q_{i_2i_1}\big|_{i_1\in R_1,i_2=C}$($C$ 为常数),目的终端为 1 级中继通信终端集合 R_2 中的任一终端。

ID 为 $i_2(i_2\in R_2)$的终端的最优 1 级中继站的选取算法为:

$$i_{2\mathrm{m}}=\max\{\min\{Q_{i_1}\big|_{i_1\in R_1},Q_{i_2i_1}\big|_{i_1\in R_1,i_2=C}\}\}\tag{1}$$

即目的终端的通信质量取决于 1 级中继站的上行链路和下行链路二者中的通信质量最小值,而最优 1 级中继站为通信质量为最大值时对应的 1 级中继站。

3.2.2.3 2 级中继通信的终端

2 级中继通信终端与集中器之间经过两级中继进行通信,其通信质量取决于 3 条路径:

a. 路径 1 是集中器与 1 级中继站集合 R_1 中的终端的通信质量 $Q_{i_1}\big|_{i_1\in R_1}$;

b. 路径 2 是 1 级中继站集合 R_1 中的终端与 2 级中继站集合 R_2 中的终端的通信质量 $Q_{i_2i_1}\big|_{i_1\in R_1,i_2=C}$;

c. 路径 3 是 2 级中继站集合 R_2 中的终端与目的终端的通信质量 $Q_{i_3i_2}\big|_{i_2\in R_2,i_3=C}$。

ID 为 $k(k\in R_3)$的终端的最优通信路径选取算法为:

$$i_{3\mathrm{m}}=\max\{\min\{\max\{\min\{Q_{i_1}\big|_{i_1\in R_1},Q_{i_2i_1}\big|_{i_1\in R_1,i_2=C}\}\}\big|_{i_2\in R_2},Q_{i_3i_2}\big|_{i_2\in R_2,i_3=C}\}\}\tag{2}$$

将式(1)代入式(2)可得:

$$i_{3\mathrm{m}}=\max\{\min\{i_{2\mathrm{m}}\big|_{i_2\in R_2},Q_{i_3i_2}\big|_{i_2\in R_2,i_3=C}\}\}\tag{3}$$

3.2.2.4 L 级中继通信终端

L 级中继通信终端与集中器之间经过 $L-1$ 级中继进行通信,其通信质量取决于 $L-1$ 条路径。根据前文得出的结论,可得 ID 为 $i_L(i_L\in R_L)$的 L 级中继通信终端的最优通信路径选取算法为:

$$i_{L\mathrm{m}}=\max\{\min\{i_{L-1\mathrm{m}}\big|_{i_{L-1}\in R_{L-1}},Q_{i_Li_{L-1}}\big|_{i_{L-1}\in R_{L-1},i_L=C}\}\}$$

其中,$i_{L-1\mathrm{m}}$ 为 $L-1$ 级中继通信终端的最优通信路径。

由此,该算法的一般表达式如下:

$$\begin{cases}i_{L\mathrm{m}}=Q_{i_1} & L=1\\ i_{L\mathrm{m}}=\max\{\min\{i_{L-1\mathrm{m}}\big|_{i_{L-1}\in R_{L-1}},Q_{i_Li_{L-1}}\big|_{i_{L-1}\in R_{L-1},i_L=C}\}\}\end{cases}\tag{4}$$

4 算法复杂度分析

采用运算复杂度来衡量本文算法的复杂度。本文算法主要执行数值比较运算和除法运算,比较运算的算法复杂度为 $O(n)$,而除法运算的复杂度为 $O(n^2)$,n 为执行运算的次数。由前面的定义可知每级终端

的个数为 $n_{R_k}(k=1,2,\cdots,L)$，满足 $n_{R_1}+n_{R_2}+n_{R_3}+\cdots+n_{R_L}=N$。

a. 直接通信不需要组网，其算法复杂度 $O_1(N)$ 为：

$$O_1(N)=0$$

b. 1 级中继通信的算法复杂度 $O_2(N)$ 为：

$$O_2(N)=2n_{R_1}^2+(3n_{R_1}-1)n_{R_2}$$

c. 2 级中继通信的算法复杂度 $O_3(N)$ 为：

$$O_3(N)=2n_{R_1}^2+(3n_{R_1}-1)n_{R_2}+2n_{R_2}^2+(3n_{R_2}-1)n_{R_3}$$

d. L 级中继通信的算法复杂度 $O_L(N)$ 为：

$$O_L(N)=2n_{R_1}^2+(3n_{R_1}-1)n_{R_2}+2n_{R_2}^2+(3n_{R_2}-1)n_{R_3}+\cdots+2n_{R_{L-1}}^2+(2n_{R_{L-1}}-1)n_{R_L}=\sum_{i=2}^{L}2n_{R_{i-1}}^2+(2n_{R_{i-1}}-1)n_{R_i}$$

由于受终端总数 N 为定值的制约，算法复杂度与层数不是正比例关系。除了与层数有关外，算法复杂度还与每层的终端个数有关。

5　算法仿真

本文以两级中继通信为例验证所提算法的有效性。取 $N=11$，即 $n_{R_1}+n_{R_2}+n_{R_3}=11$，且 $n_{R_1}、n_{R_2}、n_{R_3}\in[1,9]$。表 1 描述了 $n_{R_1}、n_{R_2}、n_{R_3}$ 的所有组合及其复杂度。

表 1　$N=11$ 时 $n_{R_1}、n_{R_2}、n_{R_3}$ 取值及相应复杂度

Tab.1 Setting of $n_{R_1}, n_{R_2}, n_{R_3}$ and corresponding complexity when $N=11$

$n_{R_1}、n_{R_2}、n_{R_3}$ 组合	算法复杂度	$n_{R_1}、n_{R_2}、n_{R_3}$ 组合	算法复杂度	$n_{R_1}、n_{R_2}、n_{R_3}$ 组合	算法复杂度
119	24	272	181	515	76
128	54	281	199	524	106
137	82	317	42	533	134
146	108	326	72	542	160
155	132	335	100	551	184
164	154	344	126	614	99
173	174	353	150	623	129
182	192	362	172	632	157
191	208	371	192	641	183
218	31	416	57	713	126
227	61	425	87	722	156
236	89	434	115	721	184
245	115	443	141	812	157
254	139	452	165	821	187
263	161	461	187	911	192

从表 1 中可以发现复杂度最大值为 208，此时 $n_{R_1}=1, n_{R_2}=9, n_{R_3}=1$；复杂度最小为 24，此时 $n_{R_1}=1, n_{R_2}=1, n_{R_3}=9$。

本文以 $n_{R_1}=5、n_{R_2}=5、n_{R_3}=1$ 为例进行分析，此时算法复杂度为 184。假设初始组网得到的网络拓扑示意图如图 4 所示，可知集合 $R_1=\{1,2,3,4,5\}$，集合 $R_2=\{6,7,8,9,10\}$，集合 $R_3=\{11\}$。

若选择 100 个轮询周期作为 1 个统计周期，则 $M=100$，在图 4 所示的拓扑结构下，各终端的发送次数如表 2 所示。

统计周期结束后，集中器得到统计数据并进行计算，可以得到通信质量数据。实际中通信质量的高低与电力线信道的信噪比成正比。信号强度的大小决定于线路对信号的衰减，由于线路上负载的开关影响线路的阻抗匹配，导致了信号的衰减呈现随机特性；负载的运行及开关都会产生各种噪声，导致了噪声呈现随机特性，因此信噪比具有随机特性，与信噪比相对应的通信质量也呈现出随机特性，其值可以为 1~100 内的任意数据，因此可以假设得到一组如表 3—5 所示的数据。Q_i 表示集合 R_1 中的终端作为目的终端的通信质量，Q_{j-i} 表示 ID 为 j 的终端与 ID 为 i 的终端的通信质量，Q_{k-j} 表示 ID 为 k 的终端与 ID 为 j 的终端的通信质量，其中，$i\in R_1, j\in R_2, k\in R_3$。

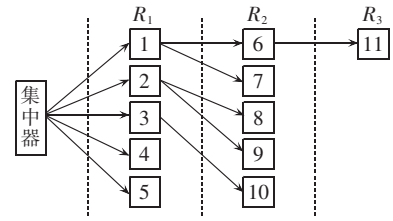

图 4　初始组网拓扑结构示意图

Fig.4 Topology of original networking

表 2　$M=100$ 时各终端的发送次数

Tab.2 Sending times of different terminals when $M=100$

终端 ID	发送次数	终端 ID	发送次数
1	700	7	100
2	500	8	100
3	300	9	100
4	100	10	100
5	100	11	100
6	300		

表 3　直接通信终端通信质量 Q_i

Tab.3 Terminal communication quality of direct communication

ID	通信质量	ID	通信质量
1	$Q_1=91$	4	$Q_4=77$
2	$Q_2=92$	5	$Q_5=80$
3	$Q_3=86$		

表 4　集合 R_1 与 R_2 终端之间的通信质量 Q_{j-i}

Tab.4 Communication quality between R_1 and R_2

终端 i	终端 j				
	6	7	8	9	10
1	$Q_{6-1}=94$	$Q_{7-1}=87$	$Q_{8-1}=85$	$Q_{9-1}=91$	$Q_{10-1}=89$
2	$Q_{6-2}=89$	$Q_{7-2}=93$	$Q_{8-2}=92$	$Q_{9-2}=88$	$Q_{10-2}=97$
3	$Q_{6-3}=91$	$Q_{7-3}=96$	$Q_{8-3}=88$	$Q_{9-3}=89$	$Q_{10-3}=93$
4	$Q_{6-4}=88$	$Q_{7-4}=89$	$Q_{8-4}=86$	$Q_{9-4}=95$	$Q_{10-4}=95$
5	$Q_{6-5}=92$	$Q_{7-5}=90$	$Q_{8-5}=89$	$Q_{9-5}=87$	$Q_{10-5}=90$

表 5　集合 R_3 与 R_2 终端之间的通信质量 Q_{k-j}

Tab.5 Communication quality between R_3 and R_2

终端 k	终端 j				
	6	7	8	9	10
11	$Q_{11-6}=91$	$Q_{11-7}=93$	$Q_{11-8}=91$	$Q_{11-9}=95$	$Q_{11-10}=90$

得到通信质量数据后，需要根据算法进行最佳路由选择，具体方法如下。

a. 首先为集合 R_2 中的终端在集合 R_1 中选择最优的1级中继站。

① 对表3和表4执行算法1，得到表6的结果，阴影表示与表4相比被改写的部分。算法1中用数组表示通信质量。这一步实现了1级中继站上行链路和下行链路的通信质量的比较，整个链路的通信质量取二者的最小值。算法1如下：

```
for (i=1;i<6;i++)
{for (j=6;j<11;j++)
    {
      if(Q[j][i]>Q[i])
          {Q[j][i]=Q[i];}
      else
          {Q[j][i]=Q[j][i];}
    }
}
```

表6 对表4数据执行算法1后的结果

Tab.6 Data of tab.4 processed with algorithm 1

终端 i	终端 j				
	6	7	8	9	10
1	$Q_{6-1}=91$	$Q_{7-1}=87$	$Q_{8-1}=85$	$Q_{9-1}=91$	$Q_{10-1}=89$
2	$Q_{6-2}=89$	$Q_{7-2}=92$	$Q_{8-2}=92$	$Q_{9-2}=88$	$Q_{10-2}=92$
3	$Q_{6-3}=86$	$Q_{7-3}=86$	$Q_{8-3}=86$	$Q_{9-3}=86$	$Q_{10-3}=86$
4	$Q_{6-4}=77$	$Q_{7-4}=77$	$Q_{8-4}=77$	$Q_{9-4}=77$	$Q_{10-4}=77$
5	$Q_{6-5}=80$	$Q_{7-5}=80$	$Q_{8-5}=80$	$Q_{9-5}=80$	$Q_{10-5}=80$

② 对表6中的数据执行算法2，可以得到表7的数据，阴影部分的行ID为列ID的中继站，并且所有链路的通信质量的最大值都写入了第1行。算法2如下：

```
for (j=6;j<11;j++)
{temp1=Q[j][1];
   t[j]=1;
   for (i=2;i<6;i++)
   {if (Q[j][i]>temp1)
       {temp1=Q[j][i];
          t[j]=i;//得到1级中继站ID
       }
    else
       {temp1=temp1;
          t[j]=t[j];
       }
   }
   Q[j][1]=temp1;//得到最佳通信质量
}
```

表7 对表6数据执行算法2后的结果

Tab.7 Data of tab.6 processed with algorithm 2

终端 i	终端 j				
	6	7	8	9	10
1	$Q_{6-1}=91$	$Q_{7-1}=92$	$Q_{8-1}=92$	$Q_{9-1}=91$	$Q_{10-1}=92$
2	$Q_{6-2}=89$	$Q_{7-2}=92$	$Q_{8-2}=92$	$Q_{9-2}=88$	$Q_{10-2}=92$
3	$Q_{6-3}=86$	$Q_{7-3}=86$	$Q_{8-3}=86$	$Q_{9-3}=86$	$Q_{10-3}=86$
4	$Q_{6-4}=77$	$Q_{7-4}=77$	$Q_{8-4}=77$	$Q_{9-4}=77$	$Q_{10-4}=77$
5	$Q_{6-5}=80$	$Q_{7-5}=80$	$Q_{8-5}=80$	$Q_{9-5}=80$	$Q_{10-5}=80$

b. 为集合 R_3 中的终端在集合 R_2 中选择最优的2级中继站。

① 对表5和表7执行算法3，得到表8的结果。阴影表示与表5相比被改写部分。算法3如下：

```
k=11;
i=1;
for (j=6;j<11;j++)
   {
     if (Q[k][j]>Q[j][i])
         {Q[k][j]=Q[j][i];}
     else
         {Q[k][j]=Q[k][j];}
   }
```

表8 对表5数据执行算法3后的结果

Tab.8 Data of tab.5 processed with algorithm 3

终端 k	终端 j				
	6	7	8	9	10
11	$Q_{11-6}=91$	$Q_{11-7}=92$	$Q_{11-8}=91$	$Q_{11-9}=91$	$Q_{11-10}=90$

② 对表8执行算法4，得到表9所示结果。阴影部分对应的列ID为行ID的2级中继站，最大值写入第1列。算法4如下：

```
k=11;
i=1;
temp2=Q[k][6];
t[k]=6;
for(j=7;j<11;j++)
   {
     if(Q[k][j]>temp2)
         {temp2=Q[k][j];
           t[k]=j;//得到2级中继站ID
         }
     else
         {
         temp2=temp2;
         t[k]=t[k];
         }
   }
Q[k][6]=temp2;//得到最佳通信质量
```

表9 对表8数据执行算法4后的结果

Tab.9 Data of tab.8 processed with algorithm 4

终端 k	终端 j				
	6	7	8	9	10
11	$Q_{11-6}=92$	$Q_{11-7}=92$	$Q_{11-8}=91$	$Q_{11-9}=91$	$Q_{11-10}=90$

c. 经过前面算法处理，可以得到当前统计周期结束后，如图5所示的组网拓扑结构。比较图5和图4可以发现，该方法实现了对终端7、9、10、11的路由进行了优化。

当 R_3 含有多个终端时，按照终端11寻找最佳路由的原理，得到其他终端的最佳通信路由。同理，也可以为 L 级通信选择最优通信路由。

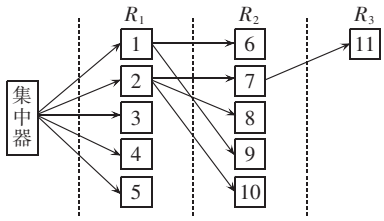

图 5 优化的组网拓扑结构示意图

Fig.5 Topology of optimized networking

在实际工程应用中,本方法还可以从以下几个方面降低复杂度:

a. 在上行链路和下行链路对称的工程应用中,只需统计单向通信质量即可;

b. 设置通信质量阈值,只有当某一目的终端的通信质量低于该阈值时,才征调与该目的终端相关的统计数据,其他不相关数据不进行传输,降低通信复杂度,但以降低实时最优为代价;

c. 在实际的 10 kV 配电网中可以合理地为每个集中器分配其管理的终端个数来控制算法的复杂度。

6 结论

本文从工程应用角度出发,提出了一种通过统计终端与其他终端的通信质量来选择最优通信路径的方法。该算法具有计算量小、易实现等优点,其运行需要通信协议支持、终端具备统计功能、集中器具备数据分析功能。本文算法的正确性和有效性已经在理论上得到验证,因此对工程实践具有一定的参考价值。下一步的研究工作将在 10 kV 电力线配电网中运行算法,以实际运行数据作为依据对其做进一步的改进和提高。

参考文献:

[1] GUO Jingbo,WANG Zanji,LU Haifeng,et al. Transmission characteristics of low-voltage distribution networks in China and its model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(2):1341-1348.

[2] ZHANG Youbing,CHENG Shijie. A novel multicarrier signal transmission system over multipath channel of low-voltage power line [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2004,19(4):1668-1672.

[3] YANG Xiaoxian,ZHENG Tao,ZHANG Baohui. Measurement and research of the characteristics of noise distribution in three-phase four-wire low-voltage power network channels[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2007,22(1):122-128.

[4] PAPANDREOU N,ANTONAKOPOULOS T. Resource allocation management for indoor power-line communications systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2007,22(2):893-903.

[5] 谢志远,耿烜,侯思祖. 基于判决反馈的正交频分复用低压电力线通信信道估计的研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(23):66-70.
XIE Zhiyuan,GENG Xuan,HOU Sizu. Channel estimation based on decision feedback for OFDM system in low-voltage power line communication[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(23):66-70.

[6] 孙秀娟,罗运虎,刘志海,等. 低压电力线载波通信的信道特性分析与抗干扰措施[J]. 电力自动化设备,2007,27(2):43-46.
SUN Xiujuan,LUO Yunhu,LIU Zhihai,et al. Channel characteristics analysis and anti-jamming measures of low-voltage power line carrier communication[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(2):43-46.

[7] 刘晓胜,周岩,戚佳金. 电力线载波通信的自动路由方法研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(21):76-81.
LIU Xiaosheng,ZHOU Yan,QI Jiajin. Method study of automatic routing for power line communication[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(21):76-81.

[8] 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.

[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. Simulation study on 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] 冉庆华,吴玉成,祁美娟. 低压电力线载波通信网络自动组网方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(10):53-58.
RAN Qinghua,WU Yucheng,QI Meijuan. Research on automatic routing method of low-voltage power line carrier network [J]. Power System Protection and Control,2011,39(10):53-58.

[11] 戚佳金,徐殿国,周岩,等. 低压电力线通信网络特性模型与组网算法[J]. 中国电机工程学报,2009,29(16):56-62.
QI Jiajin,XU Dianguo,ZHOU Yan,et al. Characteristics model and routing algorithm of power-line communications over low-voltage distributions[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(16):56-62.

[12] 王华林,张礼勇,张旭辉. 基于低压电力线通信技术计算机网络的研究[J]. 哈尔滨理工大学学报,2009,14(6):5-8,12.
WANG Hualin,ZHANG Liyong,ZHANG Xuhui. Study on the computernetworks based on low powerline communication technology[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology,2009,14(6):5-8,12.

[13] 侯思祖,杨丽,陈璐. 低压电力线远程抄表自动路由搜索算法研究[J]. 低压电器,2008(16):25-28,62.
HOU Sizu,YANG Li,CHEN Lu. Research on automatic routing algorithm for remote meter reading in low voltage power line [J]. Low Voltage Apparatus,2008(16):25-28,62.

[14] 谢志远,吴晓燕,杨星,等. 10 kV 电力线载波通信自动组网算法[J]. 电力系统自动化,2012,36(16):88-92.
XIE Zhiyuan,WU Xiaoyan,YANG Xing,et al. Automatically dynamic routing algorithm for 10 kV power-line carrier communication[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(16):88-92.

[15] 谢志远,吴晓燕,胡正伟,等. 10 kV 电力线通信自动中继算法研究与应用[J]. 中国电力,2012,45(11):82-85.
XIE Zhiyuan,WU Xiaoyan,HU Zhengwei,et al. Research and

application of automatic relay algorithm for 10 kV distribution network powerline communication[J]. Electric Power,2012,45(11):82-85.

[16] 彭启伟,张浩. 基于多叉树遍历的中压配电线载波自适应中继算法[J]. 电力系统通信,2009,30(197):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(197):81-84.

作者简介:

胡正伟(1978-),男,山东昌邑人,讲师,博士,研究方向为智能电网通信关键技术(**E-mail**:hzwwizard@hotmail.com);

谢志远(1964-),男,河北辛集人,教授,博士,研究方向为配网自动化和电力系统通信。

10 kV power line communication networking based on communication quality between terminals

HU Zhengwei,XIE Zhiyuan,GUO Yihe,LIU Shan

(Department of Electronic and Communication,North China Electric Power University,Baoding 071003,China)

Abstract: A dynamic networking method based on the communication quality between terminals is proposed to realize the best routing selection according to the communication quality between concentrator and terminal,which generates the original networking information by establishing the communication between concentrator and terminal,sets the hierarchical layers according to the number of relay stages between concentrator and terminal,counts the successful communication times between any two terminals,calculates the communication quality of each routing for each statistical cycle,and selects the best communication routing between terminal and concentrator. The statistical cycle should be properly set to fit the time variation feature of power line communication and the routing information should be updated for each cycle. Compared with the theoretical networking method,the proposed method is easy to implement with less calculation load. Its practical implementation needs some relative protocols and hardware supporting. Simulative results verify its validity and effectiveness.

Key words: power line communication; distribution automation; networking; communication

(上接第143页 continued from page 143)

转子匝间短路故障监测[J]. 电力系统自动化,2011,35(13):83-87,107.
HAO Liangliang,SUN Yuguang,QIU Arui,et al. Monitoring of field winding inter-turn short circuit based on unbalanced current effective value in main protection[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(13):83-87,107.

[48] 桂林,王祥珩,王维俭,等. 大型汽轮发电机中性点引出方式及保护配置方法:中国,CN101702512A[P]. 2005-09-07.

作者简介:

郝亮亮(1985-),男,山东烟台人,讲师,博士,研究方向为电力系统主设备继电保护、新能源与电力电子技术、电力系统分析与控制(**E-mail**:hll.bjtu@gmail.com)。

Review and prospect of online rotor inter-turn short circuit monitoring for synchronous generator

HAO Liangliang,WU Junyong

(School of Electrical Engineering,Beijing Jiaotong University,Beijing 100044,China)

Abstract: The principles of five online rotor inter-turn short circuit monitoring methods are introduced and evaluated:fault monitoring based on magnetic field measurement,shock pulse,shaft voltage monitoring, electrical parameter monitoring and unit vibration monitoring. The research progress of electrical parameter monitoring method is introduced in three aspects:the fault mathematical modeling,the fault characteristic and mechanism and the fault monitoring based on the internal unbalanced current of stator phase windings. The researches of online rotor inter-turn short circuit monitoring techniques are prospected from three aspects:the sensitive monitoring without dead-zone,the fault monitoring of generator unequipped with branch current transformer and the online fault location,and some preliminary concepts are given.

Key words: synchronous generators; field winding; inter-turn short circuit; fault diagnosis; monitoring