低压电力线通信组网性能优化方法

刘晓胜,崔 莹,徐殿国

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:低压电力线载波通信介质访问控制(MAC)接入协议是影响组网性能的重要因素之一。针对低压电力 线通信信道非对称性导致组网性能相对较低的问题,提出面向低压电力线通信改进人工蛛网荷载受限的 改进型自适应 p-坚持载波侦听多路访问(CSMA)优化方法。详叙了低压配电网物理拓扑映射为改进人工蛛 网逻辑拓扑的组网过程;运用所提方法对改进人工蛛网的吞吐量、分组传输时延进行优化,即根据已知参与 信道竞争的活跃节点数,动态调整接入概率,控制节点发送数据分组行为,使信道处于最佳传输状态,保证 了组网性能。仿真结果验证了所提方法的有效性。

关键词:能源互联网;低压电力线通信;接入控制;组网性能;改进p-坚持载波侦听多路访问 中图分类号:TM 73 文献标识码:A DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.12.003

0 引言

美国学者杰里米·里夫金提出"能源互联网"的概念^[1],指出未来能源互联网的本质是互联网式的电网。受当前技术的制约,能源互联网的研究将从配电端开始^[2-3],低压电力线通信 LVPLC(Low Voltage Power Line Communication)作为终端与电网公司信息交换的直接方式,应用于能源互联网建设中非常有竞争力。由于电力线通信介质访问控制(MAC)接入协议控制节点接入信道,是报文在信道上发送与接收的直接控制者,对信道状态的感知是最快的,所以 MAC 接入协议能否高效利用有限的信道资源对加强 LVPLC 自组网有重要作用,也是影响整个组网性能的关键因素之一。

现阶段国内外学者围绕该方向展开了诸多研究,部分人员采用载波侦听多路访问(CSMA)或时分 多址访问(TDMA)机制。CSMA 机制在应用中存在一 定的问题,即当较多的节点同时响应网关的查询指 令竞争发送数据时,易造成多节点同时忙闲,导致忙 时竞争频繁,影响网络性能;TDMA 机制要求节点时 钟严格同步,一定程度上限制了其应用。之后更多学 者对 p-坚持 CSMA(p-Persistent CSMA)展开研究。 从文献[4]对 p-坚持 CSMA 建模的研究可知,参数 p 对网络性能有决定性影响,采用固定接入概率不 能保证接入负载变化时的网络性能。文献[5]忽略信 道噪声、隐终端等因素,建立吞吐量与接入概率的数 学模型,但未考虑信道的非对称性对模型的影响。文 献[6]建立时隙利用率与接入概率的数学模型,但文 中仅研究如何优化竞争窗口,未对吞吐量展开进一步

收稿日期:2017-05-12;修回日期:2017-11-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677034)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51677034)

探索。文献[7]针对无线射频通信标签发送数据的盲 目性,提出改进 p-坚持 CSMA 防冲突方法,该方法 有效降低了数据包的碰撞概率,但未对吞吐量、接入 时延等指标展开研究。文献[8]将博弈论引入 p-坚持 CSMA 网络的接入控制中,为自私节点设计了合理 机制,在网络稳定的情况下提高了吞吐量,但该方 法未考虑信道的非对称性,也未综合考虑其他的性 能指标。

本文针对 LVPLC 非对称信道影响网络性能的 问题,建立更为合理的数学模型,提出改进型自适应 p- 坚持 CSMA 优化方法。本文首先研究了将低压配 电网物理拓扑映射为改进人工蛛网逻辑拓扑的方 法;然后,提出改进型人工蛛网的动态组网方法,并 在非对称信道环境下建立吞吐量、分组传输时延的数 学模型,研究其与接入概率间的关系;最后,通过仿 真验证本文方法的有效性。

1 低压配电网网络拓扑

1.1 低压配电网物理拓扑

一般地,低压配电网络的典型物理拓扑是树形 结构,该物理拓扑主要是由变压器二次侧电缆及相 连的诸多电气负载节点组成^[9],如图1所示。由于低 压电力线信道的频率选择性衰落特性会对高频载波



图 1 典型低压配电网拓扑 Fig.1 Typical topology of low voltage distribution network

第 37 卷第 12 期

2017年12月

信号产生较大幅度的衰减,传输距离有限。在低压配 电二次侧相间无载波信号耦合器的情况下,高频载 波信号较难实现跨相传输,可认为二次侧 A、B、C 三 相彼此相互独立。基于此,以某一相为例,重点对 LVPLC 网络的通信逻辑拓扑展开研究。

1.2 LVPLC 逻辑拓扑

为建立可靠的 LVPLC 链路,需建立负载节点(简称节点)间的通信逻辑拓扑关系。由于节点投入与切出的随机性较强,且自身工作状态会发生变化,通信信道也随之发生改变,导致 LVPLC 网络逻辑拓扑发生变化。现阶段 LVPLC 网络逻辑拓扑通常被抽象为树形拓扑^[10],其组网拓扑随信道变化的自适应性相对较差。因此,本文提出一种适用于 LVPLC 的改进型人工蛛网组网方法。

2 基于改进型人工蛛网组网方法

在 LVPLC 网络中节点彼此是对等的,组网前不 存在网关、中继等,这就要求在不需外界控制的情况 下,节点自主选出网关、中继及终端。另外,由于隐终 端的存在,组网过程中节点接收信标帧、数据帧的冲 突概率增大,导致组网不稳定,降低了组网性能。基 于此,本文提出了改进型人工蛛网组网方法用以解 决上述问题。

2.1 限制与约束

LVPLC 组网本质是建立节点间的通信逻辑拓 扑,为便于研究,假设某相配电网分支有 n(n>1)个 节点且物理链路连通,约定:

a. 所有节点均有唯一的 MAC 地址;

b. 任意节点至少可与其他节点通信,即不存在 孤立节点;

c. 网关不重复分配终端设备标识符 TEI(Terminal Equipment Identifier),且对分配的 TEI 不进行 回收;

d. 中继级数不超过5级。

2.2 改进型人工蛛网组网方法

2.2.1 改进型人工蛛网逻辑拓扑

人工蛛网拓扑是受自然界蜘蛛网启发而提出的 拓扑模型¹¹¹,本质思想是将星形/环形拓扑相结合而 构成的网状网拓扑。该拓扑通过对可用链路进行裁

剪, 摒弃部分通信链路冗余, 为网络的稳定性带来了性能 上的提升。基于此,本文为进 一步提高组网稳定性与健壮 性, 提出了改进型人工蛛网拓 扑。相比人工蛛网拓扑, 改进 型拓扑结构中的子节点间可 以不形成环网, 如图 2 所示。



◎ 网关, ○子节点 图 2 准人工蛛网拓扑 Fig.2 Topology of accurate artificial cobweb

2.2.2 改进型人工蛛网组网算法

鉴于现阶段 CSMA 与 TDMA 机制的不足,本文 以 TDMA 为基本多址接入方式,且采用固定与动态 相结合的调度算法,固定分配时隙采用 TDMA 方式, 动态分配时隙采用基于竞争 CSMA 的方式,优化并 提出一种 CSMA 与 TDMA 机制相结合的改进型人 工蛛网组网机制。

a. 步骤 1: 网关的自主选取。采用"MAC 地址映 射随机延时"的机制确定节点随机延时的长短。若节 点 MAC 地址较小,则经映射后的随机延时也较短。 具体地,节点统一上电后先静默 5 s,随机延时最短 的节点将向通信半径内的其他节点发出网关选取的 信标帧。等待响应帧间隔 RIFS(Response Inter Frame Space)后,接收节点向发端节点回复应答帧 ACK (ACKnowledgment)。若发端成功接收 ACK,则网关 选取成功,否则选取失败。当延时最短的节点接收到 ACK 时,该节点状态机将由初始态切换至未注册的 网关状态;其他节点在接收到延时最短节点发出的网 关选取的信标帧后,其状态将由初始态切换至未注 册的子节点状态。

b. 步骤 2: 网关为自身分配信标时隙, 如图 3 所示。在信标时隙中, 网关以广播方式发送组网的信标帧。收到该帧后, 子节点将以 CSMA 机制抢占信道。 若 2 个或 2 个以上子节点同时抢占信道, 则发生碰撞, 子节点将随机退避一定时间, 再重新监听信道状态, 当信道空闲时, 子节点将再次抢占信道。

SLOT₀ CP₀ (a) 网关信标时隙								
SLOT ₁	CP1	SLOT ₂	CP ₂	SLOT ₃	CP ₃	SLOT ₄	CP_4	
(b) 子节点信标时隙								

图 3 网关/子节点信标时隙

Fig.3 Gateway/Station beacon slot

c. 步骤 3:假设子节点 *s* 抢到信道,则向网关 *q* 发送注册请求帧,如图 4 所示。网关收到该请求帧后 回复 ACK,避免子节点重复注册。SLOT₀ 结束后,在 汇聚区 CP₀内,网关向子节点发送注册确认帧。子节 点收到后回复 ACK,然后解析该帧可获得网关分配 的 TEI,并建立与网关之间的连接。网关/子节点的 状态机分别由未注册状态切换至已注册网关/子节



图 4 LVPLC 改进型人工蛛网网络 Fig.4 Improved artificial cobweb network for LVPLC

点状态。

d.步骤 4:为避免组网层级较深导致维护开销过 大的问题,网关将再分配 1 轮信标时隙,使未入网子 节点尽可能多地注册到第 1 层网络。若有新节点加 入,则重复上述机制,否则第 1 层组网完成。

e. 步骤 5: 网关根据子节点注册入网的顺序, 每 轮仅为4个子节点分配信标时隙^{112]},即子节点受控 TDMA 机制,如图 3(b)所示。若第1层入网节点个数 多于4.则网关将在下一轮继续为剩余子节点分配时 隙,直至分配完毕为止。为简化该过程,以第1层节 点入网顺序分别为 s、t 为例,说明剩余 n-3 个子节 点的入网过程。具体地,网关分别为子节点 s、t 分配 组网的信标时隙,节点s接收该信标时隙后,在SLOT, 时间段中向其通信半径内的子节点发出组网的信标 帧:若已入网的子节点收到该帧,则将。存入邻居 表,并建立连接;若是未入网的子节点收到该帧,则 向 s 发送注册请求帧。假设节点 a 向 s 发送了注册 请求帧,则s收到后向其回复ACK。通信半径内的其 他未入网的子节点注册机理类似。当 SLOT₁ 结束后, 子节点s在CP1段向网关发送注册请求汇总帧。网 关收到后向节点 s 回复 ACK,再发送注册确认汇总帧。 当子节点。收到注册确认汇总帧时,先向网关回复 ACK,再解析出网关为新入网节点分配的 TEI, 创建 关联指示帧,以广播方式为新节点分配 TEI。新入网 节点收到 TEI 后,建立与节点 s 间的连接,至此第 2 层组网完毕,子节点 s、t 升级为中继节点,新入网的 节点 a—g 也由未注册状态切换到注册状态。组建后 的改进型人工蛛网络如图4所示。

2.2.3 改进型人工蛛网组网实例

图 5 所示为文献[13]提出的一种典型单相低压 配电网。以 OMNeT++4.0 为仿真环境,在二次侧电网 800 m×800 m 范围内设置 30 个节点。根据改进型蛛 网组网方法,设节点最大通信半径为 260 m,组网结 果如图 6 所示。改进型人工蛛网将树形网络分割成 由多个不规则的改进人工蛛网为子网组成的分级网 络。这为研究改进型人工蛛网的网络性能提供了前 提条件。



图 5 树形网络 Fig.5 Tree type network



图 6 改进型人工蛛网组网 Fig.6 Networking of improved artificial cobweb network

3 基于改进型人工蛛网的网络性能模型

网络性能指标包括吞吐量、分组传输时延及丢 包率等,其中,吞吐量最为重要。因此,本文重点对 LVPLC改进型人工蛛网的吞吐量、分组传输时延的 数学模型进行研究,并提出改进的数学模型。

3.1 吞吐量模型

3.1.1 条件与限制

a. 网内节点个数 n 受到一定限制(1 $\leq n \leq 30$);

b. 每轮参与信道竞争活跃节点数是已知的;

c. 队列总有数据分组等待发送,满足饱和条件;

d.节点每次只发送1个长度固定的数据分组, 通信过程的丢包仅由碰撞导致:

e. 在一定时间尺度内节点通信距离保持不变;

f. 不使用请求发送/清除发送(RTS/CTS)。

3.1.2 吞吐量数学模型

在 LVPLC 时隙网络中,节点在采用 p—坚持 CSMA 发送数据分组时,需检测信道状态。若信道空闲,则 以概率 $p_0(0 < p_0 < 1)$ 发送数据分组;否则节点选择不 发送或以概率 $1 - p_0$ 延迟发送。节点按既定协议单 调地发送数据分组,网络运行相对简单,不需关注拥 塞情况,因此,组网性能相对较低。基于此,本文对 LVPLC 改进型人工蛛网的饱和吞吐量进行研究。

LVPLC 网络饱和吞吐量^[14]为:

$$S = \frac{P_{s}E[\text{DATA}]}{P_{s}T_{s} + P_{1}T_{1} + P_{c}T_{c}} = np_{0}(1 - p_{0})^{n-1}E[\text{DATA}] \div \\ \{ [np_{0}(1 - p_{0})^{n-1}T_{s} + (1 - p_{0})^{n}T_{1} + [1 - np_{0}(1 - p_{0})^{n-1} - (1 - p_{0})^{n}]T_{c} \}$$
(1)
$$T_{s} = \text{PRS}_{0} + \text{PRS}_{1} + T_{\text{FRAME}} + \text{RIFS} + T_{ACK} + \text{CIFS}$$
(2)

 $T_{s} = \text{PRS}_{0} + \text{PRS}_{1} + T_{\text{FRAME}} + \text{RIFS} + T_{\text{ACK}} + \text{CIFS}$ (2) $T_{c} = \text{PRS}_{0} + \text{PRS}_{1} + T_{\text{FRAME}} + \text{CIFS}$ (3)

其中,E[DATA]表示数据分组有效载荷; P_s 为节点成 功发送数据分组的概率; P_1 为信道空闲概率; P_c 为数 据分组冲突概率; T_s 为成功传输数据分组的时间,包 括 2 个优先权解决时隙 PRS₀、PRS₁,数据分组传输时 间 T_{FRAME} ,响应帧间隔 RIFS,ACK 时间 T_{ACK} 及竞争帧间 隔 CIFS(Contention Inter Frame Space); T_c 为数据分 组碰撞时检测信道的冲突时间; T_1 为信道空闲时间。 如果以S最大化为目标函数,则节点最优接入概 率 p_{option} 为:

$$p_{\text{option}} = \frac{\sqrt{[n+2(n-1)(T_c/T_l-1)]/n} - 1}{(n-1)(T_c/T_l-1)} \approx \frac{1}{n\sqrt{T_c/(2T_l)}}$$
(4)

当网络接入负载较重时,节点以概率 poption 自适 应发送数据分组(即自适应 p-CSMA 方法),一定程 度上降低了冲突概率,提高了网络饱和吞吐量。然 而,上述模型未考虑非对称信道对网络性能的影响。 3.1.3 吞吐量改进模型

针对上述吞吐量模型的不足,本文对模型进行改进,提出一种改进型自适应 p-CSMA 优化方法。该模型更符合 LVPLC 网络的真实情况,但也增大了研究的难度与复杂度。具体地,设在任意时隙内网关/子节点发送数据分组概率分别为 $\tau_1, \tau_2(\tau_1, \tau_2)$ 相互独立且为常数),网关成功发送数据分组的下行概率为:

$$P_{\rm s1} = \tau_1 (1 - \tau_2)^{n-1} \tag{5}$$

n-1个子节点中任意一个成功发送数据分组的上行概率为:

$$P_{s2} = (1 - \tau_1)(n - 1) \tau_2 (1 - \tau_2)^{n-2}$$
(6)

定义上、卜行带苋控制比例因于为:

$$r = P_{\rm s1} / P_{\rm s2} \tag{7}$$

在任意时隙内节点发送成功概率为:

$$P'_{\rm s} = P_{\rm s1} + P_{\rm s2} \tag{8}$$

时隙空闲概率为:

$$P'_{1} = (1 - \tau_{1})(1 - \tau_{2})^{n-1}$$
(9)
网络饱和吞吐量的改进模型为:

$$S' = \frac{E[DATA]}{T_{s} + T_{I} \left[\left(1 - \frac{T_{c}}{T_{I}} \right) \frac{P'_{I}}{P'_{c}} + \frac{T_{c}}{T_{I}} \frac{1}{P'_{c}} - \frac{T_{c}}{T_{I}} \right]}$$
(10)

以吞吐量 S'最大为目标函数,需保证式(11)最小。

$$\left(1 - \frac{T_{\rm c}}{T_{\rm I}}\right) \frac{P_{\rm I}'}{P_{\rm s}'} + \frac{T_{\rm c}}{T_{\rm I}} \frac{1}{P_{\rm s}'} - \frac{T_{\rm c}}{T_{\rm I}}$$
(11)

対式(11)中
$$\tau_2$$
 永禰寺市令其寺丁 0,待:
 $(1-\tau_2)^{n+1}(1-\tau_1)^2(\sigma-T_c)+\tau_2(1-\tau_1)^2(1-\tau_2)^n \times$
 $(\sigma-T_c)+T_c(1-\tau_2)(1-2\tau_1)-$
 $T_c \tau_2(1-\tau_1)(n-1)=0$ (12)
将式(7)代入式(12)得:

$$(1-\tau_2)^{n+2}(\sigma-T_c) + \tau_2(1-\tau_2)^{n+1}(\sigma-T_c) + T_c(1-\tau_2)^2 - T_c \tau_2(1-\tau_2)(n-1) - T_c n r \tau_2^2(nr+n-1) = 0$$
(13)
当 $\tau_2 \ll 1$ 时由泰勒展式可知.

$$(1 - \tau_2)^n \approx 1 - n \tau_2 + \frac{n(n-1)}{2} \tau_2^2 \qquad (14)$$

将式(14)代入式(13)后整理得:

$$\frac{n(n+1)}{2} \tau_{2}^{3}(\sigma - T_{c}) + \tau_{2}^{2}(\sigma - T_{c}) \left[\frac{n(n+1)}{2} + T_{c}n\right] + \sigma - \tau_{2}[(\sigma - T_{c})(n+1) + T_{c} + T_{c}n^{2}r^{2} + T_{c}n^{2}r + T_{c}nr - nT_{c}] = 0$$
(15)

根据盛金公式,式(15)有3个根。由于 $\tau_2 \in [0, 1]$,舍弃大于1和小于0的2个根,仅保留 $\tau_{2option}$ 。根据 式(7),当确定r后可得出 τ_{1_option} 。在非对称信道的 LVPLC 网络中,发/收端的节点分别以概率 τ_{1_option} 、 τ_{2_option} 发送数据分组(即改进型自适应 p-CSMA), 可得网络吞吐量的最优值。

3.2 分组传输时延模型

在保证了网络吞吐量,本文继续对网络的分组传输时延进行研究。定义 D 为网络的分组传输时延,则有:

$$D = T_{\rm s} + D_{\rm s} + D_{\rm c} + T_{\rm slot} \tag{16}$$

其中,D_s为节点竞争信道过程中,其他节点成功发送 数据分组使信道处于忙碌态的平均时间;D_c为数据 分组冲突使信道处于忙碌态的平均时间;T_{slat}为节点 竞争信道过程占用时隙的总时间(包括总退避时间 和其他节点成功发送或出现冲突的等待时间)。

下面将对 D_s, D_c, T_{sol} 进行理论推导。

假定网内任意 2 个节点均可互相侦听及传输数 据分组,即每个节点对信道需求的概率是相同的。因 此,在一段较长的时间内,每个节点成功发送一次数 据分组的概率也是相同的,且在一个节点连续 2 次 成功发送的间隔之间,其他节点也必定各自都有一 次成功的发送。定义 N_s为时间段内其他节点成功发 送数据分组的次数,则 N_s=n-1。因此,在1 个节点竞 争信道过程中,其他节点成功发送数据分组使信道处 于忙碌态的平均时间为:

$$D_{\rm s} = T_{\rm s} N_{\rm s} = T_{\rm s} (n-1) \tag{17}$$

再根据式(8)可得:

 $P[N_{c}=i] = (1-P'_{s})^{i}P'_{s} \quad i=0,1,...$ 其中, N_{c} 为连续发送冲突的次数, 其均值见式(19)。 $E[N_{c}] = \sum i P[N_{c}=i] =$

$$\frac{1 - (1 - \tau_2)^{n-1} - (1 - \tau_1)(n-1)\tau_2(1 - \tau_2)^{n-2}}{\tau_1(1 - \tau_2)^{n-1} + (1 - \tau_1)(n-1)\tau_2(1 - \tau_2)^{n-2}} (19)$$

网内连续 2 次成功发送的时间间隔冲突次数为 $E[N_e]$, 同理, 时间 D 内有 n 个节点成功发送了数据 分组, 可推导出:

$$D_{\rm c} = nE[N_{\rm c}]T_{\rm c} \tag{20}$$

定义变量 N_{slot} 为一次退避中包含的连续空闲时 隙数,则 N_{slot} 为随机整数的概率如下:

$$P[N_{slot}=i]=P_{1}^{i}(1-P_{1}) \quad i=0,1,\cdots$$

$$N_{slot}$$
的均值为:

$$E[N_{slot}]=P_{1}/(1-P_{1}) \quad (21)$$
总空闲时隙时间为.

$$\begin{split} & \sum_{\text{slot}} = (E[N_{c}] + n)E[N_{\text{slot}}]\delta = \\ & \delta[(1 - \tau_{1})(1 - \tau_{2}) - (1 - \tau_{1})(1 - \tau_{2})^{n} + \\ & n \tau_{1}(1 - \tau_{1})(1 - \tau_{2})^{n} + (n - 1)^{2}(1 - \tau_{1})^{2} \tau_{2}(1 - \tau_{2})^{n-1}] \\ & [\tau_{1}(1 - \tau_{2}) - \tau_{1}(1 - \tau_{1})(1 - \tau_{2})^{n} + (1 - \tau_{1})(n - 1) \tau_{2} - \\ & (1 - \tau_{1})^{2}(n - 1) \tau_{2}(1 - \tau_{2})^{n-1}] \end{split}$$

$$(22)$$

第 37 卷

将式(2)、(17)、(20)、(22)代入式(16)中,可得: $D=nT_s+nT_c \times$ $\frac{1-(1-\tau_2)^{n-1}-(1-\tau_1)(n-1)\tau_2(1-\tau_2)^{n-2}}{\tau_1(1-\tau_2)^{n-1}+(1-\tau_1)(n-1)\tau_2(1-\tau_2)^{n-2}} +$ $\delta[(1-\tau_1)(1-\tau_2)-(1-\tau_1)(1-\tau_2)^n +$ $n\tau_1(1-\tau_1)(1-\tau_2)^n + (n-1)^2(1-\tau_1)^2\tau_2(1-\tau_2)^{n-1}]$ ÷ $[\tau_1(1-\tau_2)-\tau_1(1-\tau_1)(1-\tau_2)^n + (1-\tau_1)(n-1)\tau_2 (1-\tau_1)^2(n-1)\tau_2(1-\tau_2)^{n-1}]$ (23) 其中, δ 为1个时隙持续的时间,数值上等于 T_{1o}

4 仿真与结果分析

本文对饱和状态下 LVPLC 改进型人工蛛网吞 吐量、分组传输时延等指标进行仿真。在接入不同 活跃节点数的条件下,比较自适应 p-CSMA 与改进 型自适应 p-CSMA 对网络性能的影响,仿真参数如 表 1 所示。

Table 1 Simulation	parameters
参数	参数值
带宽	1.8~20 MHz
PRS_0	35.84 µs
PRS_1	35.84 µs
RIFS	140 µs
CIFS	100 µs
PHY 层速率	1 Mbit/s
MAC 层数据分组传输时间	7.15 ms
Payload 传输时间	$6 \mathrm{ms}, 24 \mathrm{ms}$
Payload 长度	128 Byte, 512 Byte
数据分组长度	136 Byte, 520 Byte

表1 仿真参数

图 7 为数据分组的有效载荷 Payload 为 128 Byte 时,接入节点数与网络吞吐量间的关系曲线。由图 7 可见:采用本文方法的情况下,r=3 时的网络吞吐 量比 r=1 时提高约 1.8%;由于本文模型考虑了不对 称信道的约束,所以与文献[14]的自适应 p-CSMA 方法相比,性能会相对降低,更贴近真实情况,也符 合预期研究目标。具体地,当 r=1 和 r=3 时,采用本 文方法的网络吞吐量比采用自适应 p-CSMA 方法时 分别降低约 3.5%、1.8%。



图 / Payload 丙 128 Byte 时的网络谷吐重对比 Fig.7 Comparison of network throughput when Payload is 128 Byte

图 8 为数据分组的有效载荷 Payload 由 128 Byte

增至 512 Byte 时,接入节点数与网络吞吐量间的关系曲线。由图 8 可见:采用本文方法的情况下,有效载荷 Payload 由 128 Byte 增至 512 Byte 后,r=1 和 r=3 时的网络吞吐量分别提高了约 17%、16.2%;采用本文方法的情况下,r=3 时的网络吞吐量比r=1时提高了约 1.1%;r=1 和r=3 时,采用本文方法的网络吞吐量比采用自适应p-CSMA方法时分别降低了约 1.9%、1%。



图 8 Payload 为 512 Byte 时的网络吞吐量对比 Fig.8 Comparison of network throughput when Payload is 512 Byte

图 9 为接入节点数与分组传输时延之间的关系 曲线。由图9可以看出:当接入节点数相对较少时,自 适应 p-CSMA 方法与本文方法的分组传输时延都 较小:当接入节点数逐渐增大时,由于发送冲突增加 使得信道处于忙碌态的平均时延 D_e 增加;当有效载 荷为 128 Byte 且 r=1 时,相比自适应 p-CSMA 方法, 采用本文方法后的分组传输时延增加约 9.4%;当有 效载荷为 128 Byte 并且 r=3 时,采用本文方法后的 分组传输时延约为采用自适应 p-CSMA 方法时的 2.57倍;在有效载荷增加至512 Byte的情况下,相比 自适应 p-CSMA 方法,r=1 和 r=3 时,采用本文方法 的分组传输时延分别增加约 0.75 %、36.2%;在有效 载荷为 512 Byte 的情况下采用本文方法时, r=1 时, 分组传输时延是有效载荷为 128 Byte 的情况下采用 本文方法时的 2.12 倍, r=3 时, 分组传输时延相对有 效载荷为 128 Byte 的情况下采用本文方法时提高了 约 29.6%。



★ 有效载荷为 128 Byte,自适应 p-CSMA 方法
 → r=1 且有效载荷为 128 Byte,改进自适应 p-CSMA 方法
 → r=3 且有效载荷为 128 Byte,改进自适应 p-CSMA 方法
 → 有效载荷为 512 Byte,自适应 p-CSMA 方法
 → r=1 且有效载荷为 512 Byte,改进自适应 p-CSMA 方法
 → r=3 且有效载荷为 512 Byte,改进自适应 p-CSMA 方法
 → r=3 且有效载荷为 512 Byte,改进自适应 p-CSMA 方法
 ④ 9 网络传输时延对比

Fig.9 Comparison of saturation delay time

20

5 结论

针对 LVPLC 信道非对称严重影响组网性能的问题,本文提出一种面向 LVPLC 改进人工蛛网荷载 受限的改进型自适应 p-CSMA 优化方法。该方法根 据已知参与信道竞争的活跃节点数,动态调整收发 端节点接入概率,提升网络吞吐量及介质访问延迟 等性能。

a. 与自适应 p-CSMA 方法相比,本文方法可通 过控制带宽比例因子有效提高网络吞吐量:当有效 载荷为 128 Byte 时,最大可提高约 1.8%;当有效载 荷增至 512 Byte 时,最大可提高约 17%。

b. 与自适应 *p*-CSMA 方法相比,本文方法可通 过控制带宽比例因子有效增加数据分组传输时延, 有效载荷为 128 Byte 时,最大可增加至采用自适应 *p*-CSMA 方法时的约 2.57 倍;有效载荷增至 512 Byte 时,相比 128 Byte 时采用本文方法,传输时延最大提 升为 2.12 倍。

由于现阶段对 LVPLC 组网性能研究相对较少, 本文在这方面也属于基础性研究,后续将会在接入 网络活跃节点数的动态感知等方面继续开展组网性 能的纵向研究。

参考文献:

 王璟,王利利,林济铿,等. 能源互联网结构形态及技术支撑体系 研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(4):1-10.
 WANG Jing,WANG Lili,LIN Jikeng, et al. Energy internet mor-

phology and its technical support system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4):1-10.

[2] 盛万兴,段青,梁英,等. 面向能源互联网的灵活配电系统关键装 备与组网形态研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(15):3760-3769.

SHENG Wanxing, DUAN Qing, LIANG Ying, et al. Research of power distribution and application grid structure and equipment for future energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35 (15):3760-3769.

[3] 邓建玲. 能源互联网的概念及发展模式[J]. 电力自动化设备, 2016,36(3):1-5.

DENG Jianling. Concept of energy internet and its development modes[J]. Electric Power Auomation Equipment, 2016, 36(3): 1-5.

- [4]何伟,南敬昌,潘峰. 改进的动态 p-坚持 CSMA 协议[J]. 计算机 工程,2010,36(21):118-120.
 HE Wei,NAN Jingchang,PAN Feng. Improved dynamic *p*-persistent CSMA protocol[J]. Computer Engineering,2010,36(21):118-120.
- [5] VLACHOU C, BANCHS A, HERZEN J, et al. On the MAC for power-line communications; modeling assumptions and performance tradeoffs[C]//2014 IEEE 22nd International Conference on Network Protocols(ICNP). Raleigh, NC, USA; IEEE, 2014;456-467.
- [6] AYAR M, LATCHMAN H A. A delay and throughput study of adaptive contention window based HomePlug MAC with prioritized traffic classes [C] // 2016 International Symposium on Power

Line Communications and its Applications(ISPLC). Bottrop,Germany:IEEE,2016:126-131.

- [7] AMENDOLA D,CORDESCHI N,SHOJAFAR M,et al. Performance evaluation of a multi-frame persistent neighbor discovery strategy based on sift-distribution in DTN RFID networks[C]//International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (SPECTS 2014). Monterey, CA, USA : IEEE, 2014:647-653.
- [8] 王乐,毛剑琳,诸浩富,等. 基于演化博弈论的 p-坚持 CSMA 网络接入控制研究[J]. 计算机科学,2016,43(9):146-151.
 WANG Le,MAO Jianlin,ZHU Haofu, et al. Evolutionary game theory-based access control study for p-persistent CSMA networks[J]. Computer Science,2016,43(9):146-151.
- [9] 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. Clustering cobweb 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.

- [10] 刘晓胜,张良,周岩,等. 低压电力线通信人工蛛网结构可靠性分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(28):142-149.
 LIU Xiaosheng,ZHANG Liang,ZHOU Yan, et al. Reliability analysis of artificial cobweb structure for power line communication of low voltage distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2012,32(28):142-149.
- [11] ZHANG L,LIU X S,PANG J W,et al. Reliability and survivability analysis of artificial cobweb network model used in the low-voltage power-line communication system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5):1980-1988.
- [12] IEEE Standards Association. IEEE standard for broadband over power line networks; medium access control and physical layer specifications; IEEE Std1901[S]. [S.I.]; IEEE, 2010.
- [13] GAO Q,YU J Y,CHONG P H J,et al. Solutions for the "silent node" problem in an automatic meter reading system using power-line communications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(1):150-156.
- [14] VLACHOU C,BANCHS A,HERZEN J,et al. How CSMA/CA with deferral affects performance and dynamics in power-line communications [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2017,25(1):250-263.

作者简介:



刘晓胜(1966—),男,黑龙江齐齐哈尔 人,教授,博士,主要研究方向为电力线载波 通信、无线电能传输、智能控制等(E-mail: liuxsh@hit.edu.cn);

崔 莹(1987—),男,黑龙江宝清人,博 士研究生,主要研究方向为低压电力线载波 通信(E-mail:cuiying794758706@126.com); 徐殿国(1960—),男,黑龙江大庆人,教

刘晓胜

授,博士,研究方向包括电力电子技术、电力传动自动化、信息 网络家电及其智能控制技术等。

(下转第42页 continued on page 42)

Key technologies for reliability assessment of distribution network cyber physical system

JIANG Zhuozhen, LIU Junyong, XIANG Yue

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The high integration of physical and cyber system is the development tendency of smart distribution network in the future, so the key technologies of reliability assessment for distribution network CPS(Cyber Physical System) are summarized and prospected. Starting with the excavation of physical and cyber system's risk origins in distribution network, the influence factors are analyzed further, based on which, classification methods and specific mathematical expressions of reliability assessment index for physical and cyber system of distribution network and establish technologies of reliability assessment index for CPS are summarized and then the research progress of reliability assessment algorithms and methods is discussed. Four aspects are prospected for distribution network CPS:heterogeneous data processing, modeling and simulation, reliability assessment index and method, generalized attack and defense mechanisms.

Key words: cyber physical system; smart distribution network; generalized attack; reliability assessment; defense mechanism

(上接第 21 页 continued from page 21)

Performance optimization for low voltage power line communication

LIU Xiaosheng, CUI Ying, XU Dianguo

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The low voltage PLC(Power Line Communication) media access control protocol is an important factor that affect the network performance. In order to improve the relatively low network performance caused by the asymmetric PLC channels, an improved adaptive *p*-persistent CSMA optimization method for improved artificial cobweb with limited load in low voltage PLC is proposed. The networking process of the media access control layer of three-phase distribution network being mapped into the improved artificial cobweb is described in detail. The proposed method is applied to optimize the throughput and average package delay of cobweb, i.e. dynamically adjust the access probability and control the grouping behavior during data transmission based on the amount of known active nodes participating in channel competition, which makes the channel in the best transmission status and ensures the network performance. The simulative results show that the proposed method is effective.

Key words: energy internet; low voltage power line communication; access control; network performance; improved *p*-persistent CSMA