

一种低压配电网电力线载波通信网络中继算法

戚佳金¹, 刘晓胜², 张良²

(1. 国家电网杭州市电力局, 浙江 杭州 310009; 2. 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: 建立了低压配电网电力线载波通信网络的一般路由模型, 提出并讨论一种基于蚁群优化的电力线通信中继算法, 该算法可以根据信道和通信链路的动态变化而动态地建立、维护、优化电力线通信网络路由, 保证通信网络的有效性。在此基础上, 进一步分析了所提出的中继算法在节点发生故障和信道质量明显下降时的可用性。仿真试验初步验证了该中继算法的有效性。

关键词: 电力线载波通信; 低压配电网; 网络模型; 蚁群优化; 动态中继

A power-line carrier communications relay algorithm for low-voltage distribution

QI Jia-jin¹, LIU Xiao-sheng², ZHANG Liang²

(1. Hangzhou Municipal Electric Power Bureau, State Grid Corporation of China, Hangzhou 310009, China;
2. School of Electric Engineering & Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The routing model is established for power-line carrier communications in low-voltage distribution. A power line communication relay method based on ant colony system algorithm is proposed and thoroughly discussed. The relay algorithm can construct and optimize PLC networks' dynamic routes in accordance with the variation of channel's quality. In addition, the availability of the relay algorithm is analyzed when the channel quality is deteriorative and some nodes are out of work. The simulation experiment has proven its effectiveness.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.60972065).

Key words: power line carrier communication; low-voltage distribution; network models; ant colony optimization; dynamic relay

中图分类号: TM913.6 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)14-0073-06

0 引言

低压电力线载波通信技术最具应用前景的场合为远程自动电力集抄系统。而目前电力集抄系统最大的一个问题在于受信道干扰和信号衰减的影响, 中心通信节点和设备通信节点之间直接通信成功概率较低, 导致集抄系统的抄收成功率较低。国内外对于提高低压电力线载波通信可靠性方面主要有两大方向的研究, 即增强物理层通信能力和依靠网络拓扑中继。相关研究主要集中在信道特性、噪声、衰减^[1-6]、信号调制/解调方式^[7-10]、信道估算^[11]、网络接入等^[12-17]方面。由于电力线载波通信网络不同于一般的计算机网络, 一般的计算网络有着相对稳定的链路和具有强大硬件计算能力的路由器。基于这方面的考虑, 一些学者在相关文献中已经提出电

力线通信组网方法, 这些方法在一定程度上为解决电力线通信网络“连通性”问题提供了参考方法, 但这类方法假设某节点和固定数目的相邻节点可以直接通信, 与实际情况的电力线信道时变性还有一定距离。所以, 本文考虑节点通信距离的时变特征, 将一种基于蚁群优化的动态路由策略和寻优算法应用于路由建立, 并进行了仿真验证。

1 低压电力线载波通信拓扑模型

文献[2]中给出了一种典型的低压电力线载波通信网络测试系统结构, 具有代表性。变压器二次侧为三相配电网, 每一相内的结构又是分支分级, 是一个具有三维因素的拓扑结构。低压配电网三相之间的衰减相当大^[3], 在没有相间耦合器件的情况下, 低压配电网三相之间可以看作并列且相对独立的逻辑关系, 可以用其中某一相的逻辑拓扑作为重点研究对象。所以, 笔者从文献[2]的物理拓扑结构

基金项目: 国家自然科学基金项目(60972065)

提取出一种典型的电网单相逻辑拓扑,如图 1 所示。在 100 m×100 m 范围内的电力线网络中布置 49 个节点,为了便于表述,本文统一将某相电网上的主节点和电力线载波通信节点简称为网关和节点。不失一般性,假设:(1)任意相邻的两个节点都能够保证电力线通信正确和可靠;(2)通信逻辑拓扑图为无向图;(3)每一个接口(即图 2 每个节点)都接有一个载波模块,否则认为不存在该接口;(4)在一个中心节点控制范围内每个节点有一个唯一的地址编码(ID 号)。

在实际的测试中,电力线通信网络数据链路的连通能力和范围是很有限的。文献[10]中的测试表明,使用基于 INT51X 系列芯片的电力线载波通信设备在教学大楼室内的低压配电网上进行通信测试,在不超过 30 m 的传输距离内能够成功实现文件传输,随着传输距离的增长,分支链路的增加,接收信号明显减弱。当传输距离到 50 m 左右,分支链路为 7 个时,通信无法正常进行。在这种情况下,为了建立整个通信网络内节点之间的链接,必须先建立起网关到部分节点间的通信链路,再由这些节点作为路由节点进行通信距离的扩展,才可能将所有的节点连入电力线通信网络。所以,必须解决动态中继节点的选取、维护等一系列问题。

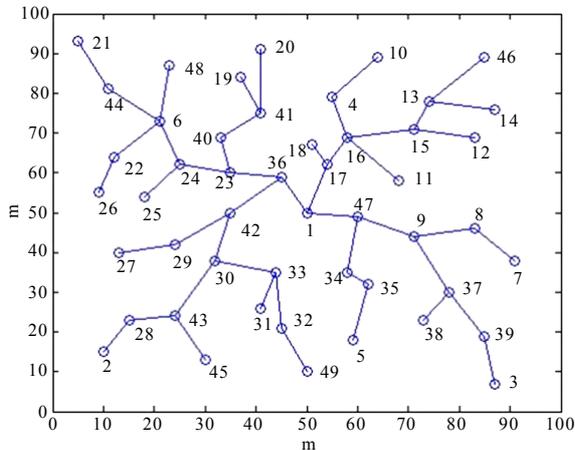


图 1 一种典型的电网单相逻辑拓扑
Fig.1 A typical single-phase logic topology

根据图 1,电力线通信组网研究可以将低压配电网抽象为有权图 $G(V,E)$, 记为 $G(V(G),E(G))$ 。如图 2 所示。其中, $V(G)$ 称为图 G 的节点集,元素 $v \in V$ 称为图 G 的一个顶点或节点。 $E(G)$ 称为图 G 的变集,元素 $e_{ij} \in E$ 记为 $e_{ij} = v_i v_j$ 为 V 中元素的有序对,称为图 G 的一条从 v_i 到 v_j 的边。在电力线通信网络中,由于信道的变化,节点间的有效通信距离是动态变化的,所以,集合 E 是动态变化的。

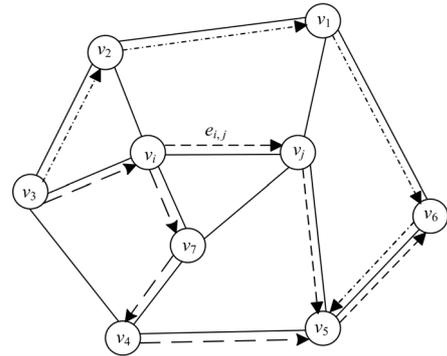


图 2 电力线通信网络的路由模型

Fig.2 Routing model of power line communication

组网研究定义了“跳数”的概念。“跳数”是指任意两个节点之间通信时,数据包到达目标节点所需被转发的次数。可以直接通信的节点,跳数为 0;需要通过 1 个中继节点转发通信的两个节点,跳数为 1,以此类推。“通信距离”这里是指网络上可以直接通信的两个节点所跨过的节点个数,相邻两个节点的通信距离为 1。该距离会随着低压配电网信道质量而变化。电力线通信网络能够组网通信的必要条件是通信距离大于等于 1。该类路由模型的计算复杂性最为简单。在该类路由模型中,再考虑网络的对称性以及简化性,可以把网络中任意节点 i 和节点 j 之间的目标函数值取为 1, 即:

$$e_{i,j} = 1 \quad (1)$$

所以,对于某一条路径 $P=(v_1, v_2, \dots, v_d)$ 上的目标优化函数可以表示为式(2):

$$f(P(v_1, v_d)) = \min \sum_{i=1}^d e_{i,j} \quad (2)$$

2 蚁群优化算法原理

目前,蚁群系统(Ant Colony System, ACS)是较为广泛应用于各类优化问题的一种人工智能算法,通过改进信息素更新规则和转移概率规则,提高算法搜索效率,避免算法早熟和陷入局部最优。ACS 可应用于通信网中路由的组合优化求解,能够较大地提高系统的可靠性和鲁棒性^[18]。

ACS 算法的描述可以分为以下几部分:

(1) 路径的构建

在 ACS 中,位于节点 i 的蚂蚁 k ,根据伪随机比例规则选择节点 j 作为下一个访问的节点。这个规则如下式所示。

$$j = \begin{cases} \arg \max_{l \in allowed_k} \{ \tau_{il}^\alpha \cdot \eta_{il}^\beta \} & q \leq q_0 \\ J & q > q_0 \end{cases} \quad (3)$$

$$J = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta}{\sum_{s \in allowed_k} \tau_{is}^\alpha \eta_{is}^\beta}, & j \in allowed_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

式中: q 为均匀分布在 $[0,1]$ 之间随数; q_0 ($0 \leq q_0 \leq 1$) 是算法的一个参数; J 是根据式(4)给出的概率分布产生出来的一个随机变量。当 $q > q_0$ 时, 按照概率进行路径搜索; 当 $q \leq q_0$ 时按照先验规律选择路径。也可以这么理解, 蚂蚁选择当前可能的最优移动方式的概率是 q_0 , 这种最优的移动方式是根据信息素的积累量和启发式信息值求出的(这种情况下, 蚂蚁继续开发已知的知识)。同时, 蚂蚁以 $(1-q_0)$ 的概率有偏向性地探索各条边。通过调整参数 q_0 , 我们可以调节算法对新路径的探索度, 从而决定算法是应该集中搜索至今最优路径附近的区域, 还是应该探索其他区域。另外, 关于 $\arg \max[y]$ 函数, 解释为: 若 $y = f(x)$, 则 $\arg \max[y]$ 表示当 y 取得最大值时 x 的值。

(2) 全局信息素更新

在 ACS 中, 只有当一只蚂蚁(至今最优蚂蚁)被允许在每一次迭代之后释放信息素。这样, ACS 的信息素更新规则由式(5)、(6)给出

$$\tau_{ij} = (1-\rho)\tau_{ij} + \rho\Delta\tau_{ij}^{bs} \quad (5)$$

$$\Delta\tau_{ij}^{bs} = \begin{cases} K(L_{rb})^{-1} & (i, j) \in \text{迭代最优路径} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (6)$$

其中: ρ 为迭代最优更新信息素挥发系数, ρ 和 K 的选择可以调整迭代最优路径信息素的增长速度; L_{rb} 表示每次迭代最优路径。对迭代最优线路进行信息素增加, 可以使搜索过程具有指导性, 搜索范围集中在迭代最优线路周围。

(3) 局部更新规则

除了全局信息素更新规则外, ACS 还采用了一个局部信息素更新规则。在路径的构建过程中, 蚂蚁每经过一条边 (i, j) , 都将立刻调用该条规则更新该边上的信息素:

$$\tau_{ij} = (1-\zeta)\tau_{ij} + \zeta\tau(0) \quad (7)$$

式中: ζ 为局部更新挥发系数; $\tau(0)$ 为信息素初值; ζ 的引入使得被选择过路径上的信息素减少。这种局部更新规则使蚂蚁更加倾向于选择没有走过的路径, 避免搜索集中到同一条线路上, 有利于新路径的发现。

3 电力线网络路径寻优

3.1 中继算法优化目标参数

为了在电力线通信网络内获得最少跳数, 优化目标函数可以表示为

$$\min N_h(X) \quad (8)$$

$$\text{s.t. } |X(i)-X(j)| \leq m \quad (9)$$

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \quad (10)$$

其中: N_h 为中心点到目的点的跳数, 它表征了路由的简洁性和快速性, 理想信道情况下, 中心节点与其他所有节点均能直接通信, 即跳数为 0; X 为网络中载波节点集; N 为节点个数; 约束条件要求任意一个节点最小可通信距离可以跨过 1 个节点; M 表示随机变化的节点可以直接通信的跨过的节点数。

每次迭代过程中发出的人工蚂蚁个数一般根据网络的复杂程度决定。图 1 的每条支路长度很有限, 故选择每批蚂蚁量为 10 只。考虑到电力线通信组网仅需要建立中心节点 1 到各节点的路由, 因此, 将人工蚂蚁均放在中心。当完成一次迭代, 则按式(5)进行全局信息素更新。其中, 取 $\rho=0.02$; K 为系数, 取 $K=300$ 。 ρ 和 K 的选择可以调整迭代最优路径信息素的增长速度。 L_{rb} 表示每次迭代最优路径的跳数(即每次迭代 10 只蚂蚁中最少的跳数)。对迭代最优线路进行信息素增加, 可以使搜索过程具有指导性, 蚂蚁的搜索主要集中在迭代最优线路周围。局部信息素更新按式(7)进行, 试验中 $\zeta=0.9$ ($0 < \zeta < 1$), $\tau(0)$ 为信息素的初始化值。 ζ 的引入使蚂蚁搜索时避免都集中到同一条线路上, 有利于新路径的发现。 ζ 越大搜索的范围会越大, 但同时收敛效果变差。

3.2 中继算法仿真实验与分析

对图 1 所示的物理拓扑结构进行 Matlab 仿真。因为在图 1 的网络结构中, 21 号节点离中心节点较远, 所以, 可以把 21 号节点作为组网仿真的目标节点。设每个节点的通信距离在 25~40 m 之间随机取值。根据前期研究的参数设定规则, 本次仿真实验中参数选择为: $q_0=0.2$, $\zeta=0.9$, $\rho=0.98$, $\alpha=1$, $\beta=1$, $\tau(0)=10$, $K=300$ 。实验结果如图 3 所示。从 Matlab 后台数据库得到的暂态最优路径为: 1-23-6-21。经过较少次数迭代后, 能够发现并收敛于最佳路径。可见, 基于 ACS 算法的动态路由组网模式, 能够适用于多约束条件下的组网要求。

同时, 也考察网络整体其他 48 个节点(中心节点除外)的路径搜寻情况。采用与 21 号节点相同的参数设置, 但延长迭代次数到 80 次。仿真结果如图 4 所示。可以看出, 经过 7 次左右的迭代寻优,

可以收敛到最小跳数为 2 跳的路径上。在整个算法过程中，第二次寻优中其实已经找到最优路径，但是，蚁群优化算法的随机性又使得算法进行了震荡，也增加了全局最优径的选择的可能。

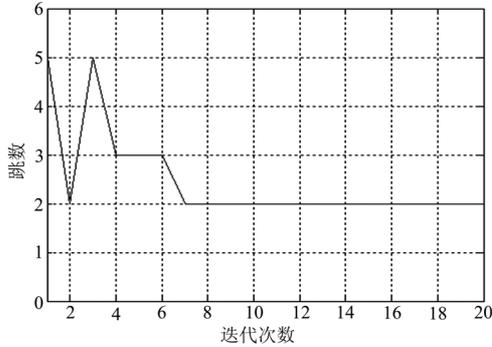


图 3 第 21 号节点的搜索结果

Fig.3 Result of simulation about the node 21st searching routes

同时也可以估算对网络中第 49 号节点建立最佳路由所需时间。设通信的速率 $s=4.8$ kbit/s，每个搜索蚂蚁数据帧 10 个字节，每次迭代 10 只搜索蚂蚁，设每个搜索蚂蚁平均跳数 10 次(实际其平均值要小于 10)，对于节点 49 设迭代 20 次找到最佳路由，若不计数数据帧在每个节点处理所用的时间，则搜索 49 号节点所用的时间为：

$$T = \frac{10 \times 8 \times 10 \times 20}{4 \times 800} \approx 3.3 \text{ s} \quad (11)$$

时间估算结果表明，距离源节点最远的 49 号节点建立最佳路由时间理论上小于 4 s，网络中其他节点建立最佳路由线路所用的时间要比该节点少。所以，从时效性的角度来看，基于蚁群算法动态路由技术能够满足组网要求。所以理论上讲，一个 49 节点的电力线通信系统初始化组网时间可以控制在 200 s 之内。

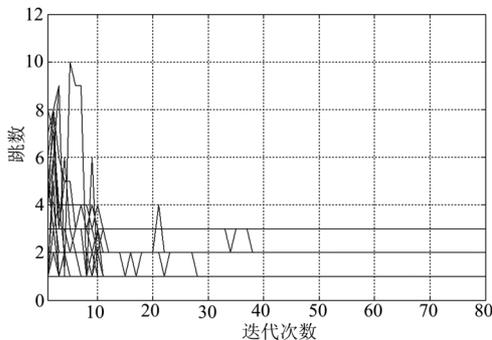


图 4 整体全部节点的搜索结果

Fig.4 Result of simulation about total nodes searching routes

4 中继算法的有效性分析

4.1 通信链路受干扰时的有效性分析

网络中通信线路受到干扰会引起通信距离改变，网络拓扑随之变化。以图 1 中的物理拓扑结构为例，假设某时刻与 23 号节点相连的线路受到干扰，23 号节点通信距离由 25~40 m 变为 20~25 m。原网络中 21 号节点最优路由线路为 1-23-6-21，此时 23-1 之间因为线路干扰已经无法通信。用 ACS 算法进行分析，参数为： $q_0=0.2$ ， $\zeta=0.9$ ， $\rho=0.98$ ， $\alpha=1$ ， $\beta=1$ ， $\tau(0)=10$ ， $K=300$ 。对 21 号节点重新构建路由，仿真结果如图 5 所示。

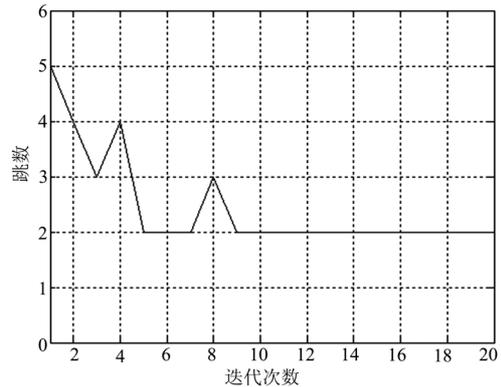


图 5 低压配电网线路受干扰时动态路由仿真结果

Fig.5 Result of simulation about dynamic route when distribution is disturbed

可以从仿真结果和后台数据看出，路由跳数还是可以收敛为 2 跳，暂态最优路由线路为 1-36-6-21。可见，蚁群动态中继算法能够适应线路干扰引起的网络拓扑变化。线路受到干扰后，可以根据协议重新启动此算法，重构路由线路，保证网络的连通性和通信线路的优良性。

4.2 通信节点失效时的有效性分析

模拟网络中的某个节点因自身故障引起网络拓扑发生变化，此情况下以该节点作为路由的通信路径失效，通信网络受到冲击，仿真分析这种网络状态下蚁群算法的抗毁性能力。以图 1 中的物理拓扑结构为例，假设某个时刻 6 号节点发生故障，丧失通信功能，则此节点在通信网络逻辑拓扑中消失。此时含有 6 号节点的路由线路将不再适用，网络路由需要重新组建。对这种情况进行仿真实验，假设节点的通信距离仍为 25~40 m，以 21 号节点作为目标节点，采用 ACS 算法，算法参数选择为： $q_0=0.2$ ， $\zeta=0.9$ ， $\rho=0.98$ ， $\alpha=1$ ， $\beta=1$ ， $\tau(0)=10$ ， $K=300$ 。对 6 号节点重新构建路由线路，仿真结果如图 6 所示。

从图 6 中可知，路由跳数最终收敛为 2 跳，仿真实验输出了三条路由线路，其中，1-24-44-21 分析可知为最优路由线路之一。可见，当网络中某节点自身发生故障引起网络拓扑结构发生变化时，ACS 动态中继算法能够针对新拓扑迅速找到最优

路由线路, 保证网络不因个别节点故障影响其他节点通信, 提高网络抗毁性。

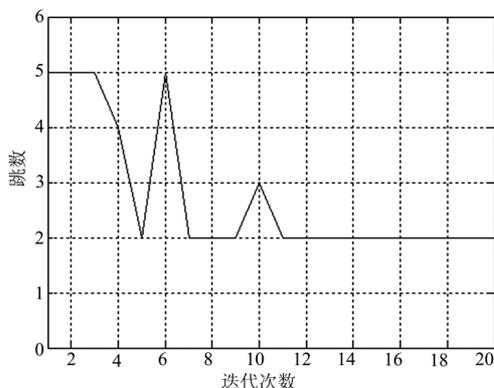


图6 节点故障状态时算法抗毁性仿真分析

Fig.6 Simulation about algorithmic survivability when node is failure

5 后续相关研究工作

文中所述和前期工作属于探索阶段, 相对而言还比较初步, 后续的工作应该考虑一下几个方面的问题, 并继续深入研究。

(1) 考虑电力线载波通信网络可连通性的网络层算法时, 也同时要关注 MAC 层的接入算法, 因为 MAC 层接入算法对于组网时间的影响较大。

(2) 在基于网络可连通性的基础上, 应该进一步考虑基于网络通信有效性和生存性的问题。

(3) 再进一步, 可以结合应用层数据类型的重要性和不同等级, 研究基于跨层感知的中继算法, 综合考虑吞吐量、时延、丢包率等因素, 以提高电力线载波通信网络的通信效率。

6 结论

文中分析了电力线载波通信技术在应用中所存在的问题和相关技术研究现状。对蚁群优化算法做了概括阐述, 并把这一优化思想应用到电力线载波通信网络中继寻优中来。通过仿真实验验证该种中继算法的可行性。提出并验证了当电力线通信信道质量变差或者某个通信节点出现故障时, 该种算法的有效性。综上所述, 文中所提出的方法和算法可以为提高电力线载波通信可靠性提供一种方法上的依据, 也为工程实现提供了一定的参考。同时也是作为提高控制网络连通性能在算法和仿真层面上的一点探索。

参考文献

[1] 高强, 黄丽妍, 侯思祖, 等. 基于独立分量分析的电力线通信的研究[J]. 通信学报, 2007, 28 (9) : 74-77.

GAO Qiang, HUANG Li-yan, HOU Si-zu, et al. Research of power line communication based on independent component analysis[J]. Journal on Communications, 2007, 28 (9): 74-77.

[2] GUO Jing-bo, WANG Zan-ji, Lü Hai-feng, 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.

[3] ZHANG You-bing, CHENG Shi-jie, et al. 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.

[4] YANG Xiao-xian, ZHENG Tao, ZHANG Bao-hui. 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.

[5] ZHENG Tao, YANG Xiao-xian, ZHANG Bao-hui, et al. Broadband transmission characteristics for power-line channels[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 (4): 1905-1911.

[6] 赵宇明, 王赞基, 郭静波, 等. 考虑功率谱限制的电力线通信比特分配算法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (5): 143-148.

ZHAO Yu-ming, WANG Zan-ji, GUO Jing-bo, et al. A novel bit-loading algorithm for energy spectrum limited power-line communication systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (5): 143-148.

[7] 郭静波, Cioffi J M. 配电网多用户通信中的动态频谱管理[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (11): 7-11.

GUO Jing-bo, Cioffi J M. Dynamic spectrum management of multi-user communications over power distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (11): 7-11.

[8] Papandreou Nikolaos, Antonakopoulos Theodore. Resource allocation management for indoor power-line communications systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22 (2) : 893-903.

[9] 张有兵, 曹一家, 程时杰. 低压电力线正交频分复用系统同步问题的量化研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (18): 36-40.

ZHANG You-bing, CAO Yi-jia, CHENG Shi-jie. Influence of synchronization errors on OFDM based communication system for low voltage power lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (18): 36-40.

[10] 韩谷静, 殷小贡, 林涛. 面向配电自动化的中压电力线高速数据通信终端设计[J]. 电工技术学报, 2007, 22 (3) : 128-132, 158.

- HAN Gu-jing, YIN Xiao-gong, LIN Tao. Design of medium voltage power-line high rate data communication terminal for power distribution automation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22 (3): 128-132, 158.
- [11] 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 Zhi-yuan, GENG Xuan, HOU Si-zu. 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.
- [12] 程晓荣, 苑津莎, 侯思祖, 等. 基于移动代理的宽带电力线通信网络管理模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (9): 74-79.
- CHENG Xiao-rong, YUAN Jin-sha, HOU Si-zu, et al. Research of management model based on mobile agent for broadband power line communication[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (9): 74-79.
- [13] 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 Qi-mei, LI Ying-min. 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.
- [14] Gao Q Yu, Chong J Y, So P H J. 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.
- [15] Heo Jongman, Lee Kamrok, Kang Hyoung Koo, et al. Adaptive channel state routing for home network systems using power line communications[J]. IEEE Transaction on Consumer Electronics, 2007, 53 (4): 1410-1418.
- [16] 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 Jia-jin, LIU Xiao-sheng, XU Dian-guo, 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.
- [17] 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 Xiao-sheng, QI Jia-jin, SONG Qi-tao, 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.
- [18] 段海滨. 蚁群算法原理及其应用[M]. 二版. 北京: 科学技术出版社, 2005.

收稿日期: 2009-08-27; 修回日期: 2010-01-20

作者简介:

戚佳金(1979-), 男, 博士, 主要从事电力系统通信、电动汽车充电技术、变电设备状态检修技术、电力系统谐波分析等领域的研究工作; E-mail: Qijiajin@gmail.com

刘晓胜(1966-), 男, 博士生导师, 教授, 博士后, 研究方向为电力线载波通信、网络通信、智能控制等;

张 良(1985-), 男, 博士研究生, 主要从事电力线通信领域的研究工作。

(上接第 48 页 continued from page 48)

- LI Jian-lin, HU Shu-ju, XU Hong-hua, et al. Studies on the low voltage ride through capability of fully converted wind turbine with PMSG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 19 (32): 92-95.
- [17] Abbey C, Joos G. Effect of low voltage ride-through (LVRT) characteristic on voltage stability[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41 (3): 1-7.
- [18] Polisetty V K, Jetti S R, Vena G K. Intelligent integration of a wind farm to a utility power network with improved voltage stability[C].//Proceedings of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty First IAS Annual Meeting. Florida(USA): 2006: 1128-1133.
- 收稿日期: 2009-08-30; 修回日期: 2009-12-15
- 作者简介:
- 王文亮(1986-), 男, 博士研究生, 研究方向为风力发电控制技术; E-mail: 08121981@bjtu.edu.cn
- 葛宝明(1971-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机及其控制;
- 毕大强(1973-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统主设备继电保护、电力电子技术在电力系统中的应用。