



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电力线通信技术

Powerline Communication Technologies

杨 刚 等编著

- ◎ 庖解电力线通信的底层构架
- ◎ 直面电力线通信的时代方向
- ◎ 目击人类通信文明的烽火再燃



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电力线通信技术

杨 刚 等编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书从电力线的传输网络特性出发,首先讲述电力线数据通信中的主要问题和研究方向,包括信道建模、调制方案等;然后通过对国内外相关标准的理解,解析构建电力线通信系统的基础技术;最后,重点以国家智能电网为背景,描绘电力线通信技术在智能电网中的巨大应用前景。

本书思路清晰,生动活泼,既充满了前沿性的展望,也不乏严谨的论证;不仅可以作为高等院校相关专业的教学用书,还可供从事电力线通信相关工作的技术人员、管理人员参考。

本书配有ppt教学课件,读者可以登录华信教育资源网(www.hxedu.com.cn)免费注册后下载。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电力线通信技术 / 杨刚等著; —北京:电子工业出版社, 2011.1
ISBN 978-7-121-12241-5

I. ①电… II. ①杨… III. ①电力线载波通信系统 IV. ①TM73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 218184 号

策划编辑:田宏峰

责任编辑:窦 昊 特约编辑:刘 涛

印 刷:北京市天竺颖华印刷厂

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:11 字数:218 千字

印 次:2011 年 1 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:33.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前言

电力线通信系统是采用电力线传送数据的一种通信方式，具有用户多、分布广、不需要重新布线等优点，可以作为实现网络通信的有效手段，也是未来国家四网融合目标的旗帜性突破，更是国家电网战略部署的现实需要，不仅全方位地补充和完善了我国的通信平台，而且提升了我国在物联网技术上的全球竞争性和前沿性。

挑战，是机会的温床。在传感器网络技术快速崛起的今天，电力线通信技术不仅仅是其他无线通信的“润色”，更将会成为一个无法取代的存在！无论是遍及千家万户的家庭电网，还是分布在天圆地方的高压电线，电力线的传输不再局限于电气信号，还承载着华夏民族，乃至全球人民的感知欲望。

电力线通信技术，依然是一个陌生而又成熟的存在，因为它离我们的生活近在咫尺，却又远不可及。本书作者长期从事电力线通信技术的理论研究和实践开发工作，在西安电子科技大学开课授业也已6年，根据学生的学习反馈情况和电力线通信技术的发展情况，对电力线通信技术有着新的了解和认识。作为一项新兴的通信技术，电力线通信技术虽然在国外开展较早，但相关专著、教材种类依然较少，而且总体上看，书籍更新速度远远跟不上技术的发展速度，无法满足研究人员和学者的需求。因此，作者结合历年来的理论研究和实际科研项目情况，整理编写了本书，希望通过图文并茂的解释，将大家带入电力线通信不一样的世界。

为了让读者更好地学习电力线通信中的关键技术，融会贯通地掌握不同章节的知识要点，每一章都会有树状形式的“脑图”作为本章概要，提示本章内容，也希望读者能够根据这些“脑图”，举一反三，将知识永远凝聚在头脑中。

本书介绍了电力线通信技术的基本理论和核心技术问题，共分为9章。第1章是导言，回顾了过去几年中，国内外电力线通信技术的研究动态和发展趋势；第2章描述了电力传输网系统及其特性，对电力网络的拓扑结构和通信带宽进行分析；第3章分析了电力线的信道特性，通过信道建模，构建电力线传输函数，是电力线数据通信的基础；第4章介绍了现有的电力线通信标准，展望即将和我们见面的G.hn标准；第5章论述了电力线通信中的OFDM（Orthogonal Frequency Division Multiplexing）技术，这是未来通信技术的核心；第6章讲述了多种信道估计的方法，它是OFDM技术中数据解调与均衡的基础；第7章通过讲解传输协议的使用、设备协调和家庭网关，整体构建电力线通信系统；第8章整理了智能电网的构架，重点讨论了中国智能电网的发展方向，独创性地阐述了智能电网传输系统和符合中国国情的电力线通信解

决方案，列举了智能家庭网络系统和智能网关的概念框图，描述了未来家庭电力线通信的美好蓝图；第9章简述物联网的起源和发展，刻画了电力线通信技术在物联网下与众不同的应用前景。

作者从2006年开始着手编撰本书，转眼已是四年，期间电力线通信技术快速发展着，如同穿梭而去的光阴一般。四年时光的反复修改和雕琢，让我不禁犹豫，是科技走得太快，还是自己渐渐地跟不上了它的脚步？现在回首，自己更像是一个爬山的远行者，总想先一步登上山顶感受旭日东升的壮观，却没有发现日出的光晕一直伴随着自己，在山脚下，在山路间。我一直以为最可怕的不是逝去的年华，而是奋不顾身的投入感。很庆幸，我还保有这样的激情，无论是踏过低潮，还是巅峰对话！感谢那些山脚下和山顶的人，你们是我最好的风景！

参与本书编写的有胡金辉、徐田田、聂鹏鹏、肖宇彪、刘永亮、白樱锋等。还有许多老师、同学以不同的形式对本书作出了贡献，在此一并致谢。

感谢我的博士导师之一，A. Wittneben 教授，是他将我带入了电力线通信（Powerline-Kommunikation）这一领域，并对我在德国的研究与生活给予了细致的指导与照顾。感谢电子工业出版社的田宏峰编辑为本书所做的辛勤工作。

在本书即将付印之际，我们拿到了合作伙伴之一的某国际知名通信企业所提供的 Atheros AR7400 PLC Modem，作为当前国际最高水平的产品，其标称 PHY 层双向传输速率达到 500 Mbps！此外，获悉在 2010 年教育部新近审批设置的专业中，信息网络作为国家战略性新兴产业发展方向得到重点体现，有将近 40 所高校院系获批了包括“物联网工程”、“传感网技术”和“智能电网”三个物联网相关的专业。对于与这些专业密切相关的电力线通信技术，这是一个好消息。相信电力线通信技术将与其他技术手段一起，为“感知中国”、“智能电网”、“智慧地球”作出一份贡献，正春华枝俏，待秋实果茂，与君共勉。拙文共鉴，抛砖引玉，恳请各界领导、专家、同行多多批评指教。联系邮箱是 gyangxidian@gmail.com。

作 者

2010 年 8 月 于西安

注：本书的动画蜗牛图标已进行了商标注册。

目 录

第 1 章 导言	1
1.1 国外电力线通信技术介绍	2
1.2 我国电力线通信技术研究现状	3
思考题	5
第 2 章 电力传输网系统及其特性	6
2.1 现行电力网络拓扑结构	7
2.1.1 低压供电网的拓扑结构	7
2.1.2 PLC 接入网的组织	8
2.1.3 家庭内部 PLC 网络结构	11
2.1.4 逻辑网络模型	12
2.2 作为通信介质的电力网络分析	14
2.2.1 PLC 信道带宽分类	15
2.2.2 PLC 传输信道特点	16
2.2.3 电磁兼容	16
2.2.4 干扰的影响和速率限制	19
思考题	20
第 3 章 电力线数据通信基础	21
3.1 信道特性分析	22
3.1.1 信道的输入阻抗分析	22
3.1.2 信道衰减特性分析	24
3.1.3 信道噪声特性分析	27
3.1.4 噪声建模方法	29
3.2 信道建模	37
3.2.1 时域模型	38
3.2.2 传输矩阵模型	39
3.3 对电力线衰减特性的具体测量与描述	44
3.3.1 由电力线的长度引起的信号衰减	45
3.3.2 分支造成的衰减	46

3.3.3 相同的长度和分支数情况下的衰减	47
思考题	47
第 4 章 电力线通信标准	48
4.1 HomePlug	49
4.1.1 HomePlug 1.0 概述	49
4.1.2 HomePlug AV 概述	55
4.2 G.hn	61
4.2.1 G.hn 发展现状	61
4.2.2 G.hn 家庭网络拓扑结构	63
4.2.3 G.hn 家庭网络参考模型	65
4.3 其他标准	66
4.3.1 IEEE P1901	66
4.3.2 HomePlug BPL 与 HomePlug C&C	67
4.3.3 HD-PLC	69
4.3.4 PRIME	69
思考题	70
第 5 章 电力通信及通信系统的调制方案	71
5.1 传统的载波调制方案	72
5.1.1 ASK	72
5.1.2 PSK	73
5.1.3 FSK	74
5.1.4 三种调制方案的简单比较	75
5.2 OFDM 调制技术的研究	76
5.2.1 OFDM 基本原理	76
5.2.2 多载波调制和 FFT	77
5.2.3 OFDM 性能分析	79
5.2.4 OFDM 在 PLC 中的应用	80
5.3 电力线载波芯片	86
5.3.1 宽带 PLC 芯片	86
5.3.2 窄带 PLC 芯片	87
思考题	91
第 6 章 信道估计	92
6.1 信道估计的基本准则和算法	93
6.2 基于导频的非盲信道估计	93

6.2.1	导频的分布形式	93
6.2.2	信道估计准则	94
6.2.3	内插方法	95
6.3	基于判决反馈的信道估计方法	98
6.4	盲信道和半盲信道估计	98
6.5	其他信道估计方法	99
6.5.1	基于 AVSF 算法的信道估计	99
6.5.2	基于自组织映射的循环平稳 PLC 信道的估计	101
	思考题	102
第 7 章	电力通信系统的构建	103
7.1	电力线通信协议的设计	104
7.1.1	协议模型分析	104
7.1.2	低压电力线载波通信协议的设计	107
7.1.3	MAC 层结构	110
7.2	设备协调	121
7.2.1	耦合技术	121
7.2.2	用户端设备	124
7.2.3	局端设备	126
7.3	基于电力线的家庭网关	127
7.3.1	电力线家庭网关的功能	127
7.3.2	电力线家庭网关的特点	128
7.3.3	电力线家庭网关的设计要求	128
7.3.4	电力线家庭网关的基本组成	129
	思考题	134
第 8 章	智能电网概述	135
8.1	智能电网的发展	136
8.2	智能电网的构架	139
8.3	中国特色智能电网及其意义	141
8.3.1	中国智能电网的设计特点	141
8.3.2	智能电网的意义	144
8.4	智能电网中的电力线通信	144
8.4.1	基于电力线通信的家庭电力系统服务	145
8.4.2	智能电表	147
	思考题	151

第 9 章 电力线通信与物联网	152
9.1 物联网的起源和发展	153
9.2 物联网中的电力线通信部署	154
9.2.1 医疗卫生	155
9.2.2 现场监控	156
9.2.3 智能交通	157
9.2.4 智能家居	158
思考题	161
参考文献	162

第1章 导 言



前 言

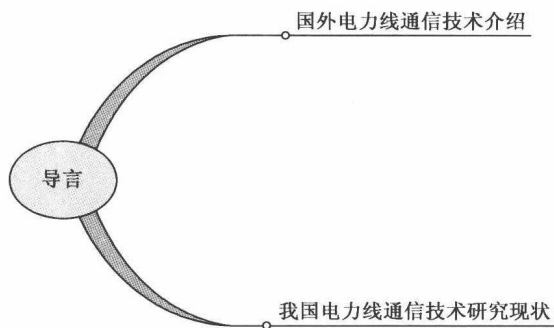
这是一个幸运的时代，我们幸运得错过了飞鸽传书，错过了烽火狼烟，错过了漫长等待却只有片语只言，通信本来就不属于望穿秋水这样的字眼，更应该像一幅画卷，咫尺天涯却又近在身边。

“下一代通信网络”是这个时代的缩影，我们遇见了用户需求的井喷，遇见了运营商的开放，遇见了电力线通信技术从默默无闻到炙手可热的成长。

——遇见便不再错过



本章概要



只要有心的跳动，就会有血的潮汐。



电力线通信技术是采用电力线传送数据的一种通信方式。该技术将载有信息的高频信号加载到电力线上,用电力线进行数据传输,通过专用的电力线调制/解调器将高频信号从电力线上分离出来,传送到终端设备。

从占用频率带宽的角度来看,电力线通信可分为窄带 PLC (NB-PLC) 和宽带 PLC (BB-PLC)。窄带 PLC 的载波频率范围,在不同国家、不同地区是不一样的,美国为 50~450 kHz,欧洲为 3~149.5 kHz (95 kHz 以下用于接入 Access 通信,95 kHz 以上用于户内 In-House 通信),中国为 40~500 kHz。宽带 PLC 的载波频率范围,在美国为 4~20 MHz (HomePlug Specification v 1.0),主要用于户内;欧洲为 1.6~10 MHz (Access) 和 10~30 MHz (In-House),这是 ETSI 标准,CENELEC 标准分界点为 13 MHz,欧盟委员会从 2002 年开始正在协调统一;中国尚无宽带 PLC 的标准。

从实现的通信速率来看,可分为低速 PLC (LS-PLC) 和高速 PLC (HS-PLC)。

从电压等级来看,可以分为高压配电线 (35 kV 以上)、中压配电线 (30 kV/10 kV) 和低压配电线 (低于 380 V)。

1.1 国外电力线通信技术介绍

国外对于电力线通信的研究起步很早,早在 1975 年,就已经诞生了第一个电力线通信的专利,步入 21 世纪的今天,电力线通信的研究日趋抢眼。

电力线通信技术的研究热潮可以分为以下几个方面:

① 电力线的信道特性是制约其技术发展的瓶颈。由于电力线是一种复杂的传输媒介线,其上存在大量的噪声,负载多且工作状态随时间变化,配置情况复杂。电力线对传输信号的不利影响主要表现为具有随机性的信道损耗、信道噪声和多径效应,因此,如何准确描述信道传递函数和噪声环境是非常重要的,尤其是对脉冲噪声的探索,已经成为近年来研究信道建模的关键之一。

② OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 是下一代通信系统的核心技术。为了更有效地利用电力线信道带宽和频谱资源,OFDM/OQAM 开始逐渐受到研究人员的重视,在脉冲噪声干扰下,甚至比 CP-OFDM (OFDM with Cyclic Prefix) 系统有更加出色的频谱利用率。

③ 电力线通信组网技术现在已经成为研究的重点。宽带电力线通信系统强调频谱资源分配问题、电力线信号耦合问题、多址接入问题,以及恶劣通信环境与多用户服务质量 QoS (Quality of Service) 中信道估计问题,这些问题不仅至关系着技术本身的突破,也会阻缓电力线通信行业加入四网融合战略的脚步。



从电力线通信应用的角度来看,未来应用于家庭宽带接入和智能电网的趋势日益明显。与家庭宽带接入市场越来越扑朔迷离的格局相比,智能电网无疑将会是电力线通信技术最大的发挥舞台,包括 Advanced Digital Design、CURRENT Group、Landis+Gyr、STMicroelectronics、uSyscom 和 ZIV Medida 等公司都已经加入了 PRIME (Powerline-Related Intelligent Metering Evolution),共同探讨智能电表等智能仪表的标准化和产品化工作。此外,物联网应用的契机也给了不同媒介通信系统一个合作的平台,电力线通信系统正在和其他通信媒介一起,组成互相补充的多通道传感器网络,让感知无处不在。

从技术标准的制定上来看,PLC 的通信标准和 EMC 标准是目前欧美各国讨论的重点。在 PLC 通信标准方面,目前的标准化程度还不高,由于各种技术正在试验比较和不断发展,现在还没有形成统一制式的局面,PLC 标准化的主要方向是:频率使用范围及其应用范围划分、发射频率灵活控制技术、PLC 系统之间的共存协调、电磁兼容性(电磁干扰与抗扰度限值及测试方法)等,虽然 HomePlug 提出的 HomePlug 1.0 和 HomePlug AV 作为行业的先驱标准,但 ITU 提出的 G.hn 正在试图统一电力线通信的市场规范,两者在编码技术上的分歧将会影响电力线产品的市场走向。在 EMC 方面,欧洲早已通过法制化的条令 EMC-D 来解决 EMC 的污染问题,在此法令下,EMC 各级别的标准由欧洲标准化组织(CEN)、欧洲电工标准化委员会(CENELEC)和欧洲电信标准组织(ETSI)联合制定。美国所提出的 FCC Part 15 是目前世界上比较完备合理的网络 EMC 技术标准。相比之下,Powerline-Related Intelligent Metering Evolution 虽然成立较晚,但针对智能电表的窄带通信标准已经走向成熟。

1.2 我国电力线通信技术研究现状

中国电力科学研究院是我国研究电力线通信技术的主要科研机构,从 1997 年开始研究 PLC 技术,主要考虑 PLC 技术用于低压抄表系统,传输速率较低。1998 年开发出了样机,并通过了试验室功能测试,1999 年在现场进行了试运行,获得了产品登记许可。1999 年 5 月开始进行 PLC 系统的研究开发工作。主要对我国低压配电网网络的传输特性进行了测试,并对测试结果进行了数据处理和分析,基本取得了我国低压配电网传输特性和参数,为进行深入研究和系统开发提供了依据。2000 年开始引进国外的 PLC 芯片,研制出了 2Mbps 的样机,2001 年下半年进行了小规模现场试验,试验效果良好。2003 年研发了国家电力调度通信中心电网调度自动化系统,为国家智能电网的开展打下了理论基础。2003 年进行了低压配电网电力线高速通信技术研究,2005 年完善了电力线通信(PLC)宽带接入系统。



深圳国电科技有限公司是国家电力公司的直属企业,2000年初就开始研制室内 PLC 产品。2004 年,研发了 200 Mbps 电力线接入产品,传输距离达到 700 m。目前,国电科技公司已有 200 m 电力线通信系统完整解决方案。

北京中电飞华通信股份有限公司(简称为中电飞华)是由国网信息通信有限公司和各网省电力公司共同参控股组建的股份制公司,是经工业和信息化部批准的全国性增值电信运营商和综合的信息服务提供商。公司提供电力线专网通信、电力专网电话、电力广域网服务,成功研发了包括低压用户远程抄表系统、广域电网检测系统等一系列电力信息化产品。

《国家电网公司“十一五”通信规划》把电力线载波通信技术的研究列入了重大研究课题中,表明了我国在近期将要执行的电力通信技术政策与当前的技术发展和应用是相适应的,也反映了电力行业对电力线载波技术和设备发展的要求。这一要求在“十一五”期间突出地反映在特高压和中压等级的电力线载波应用两个方面。

在特高压电力线载波通信方面,“十五”规划要求重点研究特高压电力线载波高频信号传输特性、高频耦合特性以及噪声特性等问题和关键技术,期间成果显著。2009 年 1 月,由中国电力科学研究院投资和建设的中国首个特高压输电工程——1 000 kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程正式投入运行;2009 年 5 月,国家电网投资建设的向家坝—上海±800 kV 特高压直流输电示范工程,国内生产的首台 400 kV 低端换流变压器成功通过全部型式的试验;2009 年 10 月,由南方电网公司投资的 800 kV 云广特高压直流工程所有高端换流变通过出厂试验;这些都意味着国家智能电网的关键技术已获得了巨大的成功。

在中压电力线载波通信方面,“十五”规划要求对于中压 PLC 宽带技术,特别是传输距离、传输速率以及耦合方式等方面的问题开展研究,同时要加强信息安全和网络管理问题的研究,提前制定相关技术标准和规范,提升自主开发能力,提高中压 PLC 技术的整体研究水平。2007 年,国电通信中心组织北京中电飞华通信股份有限公司、北京意科通信技术有限责任公司共同完成《中压 PLC 技术实用化研究》,分别在城市和农村 10 kV 电力线上搭建了中压 PLC 试验平台及测试环境,并进行了大量的系统性能测试。国家智能电网的配电网自动化和用户远程自动抄表系统依赖于中压电力线通信的发展,因此,研究中压电力线通信也将成为当务之急。

在低压电力线载波方面,国内厂商主要集中于策划 PLC 整体解决方案,并且提出了许多可行的应用方案。这些方案都无法避免这样的事实——PLC 芯片制约着传输速度,但由于对市场占有的敏感性和自身研发实力的不成熟,目前国内没有厂家有时机和能力去生产 PLC 芯片。

我国的电力线通信技术虽然起步较晚,但是随着国家投资力度的加大和科研实力的厚积薄发,无论是国家电网这样丰碑式的工程,还是民用化的宽带接入,都将不再遥远。



本章是我们学习电力线通信技术的起点，概述了国外电力线通信技术的发展趋势，从技术难点、应用方向到标准进展情况，指明了我们今后的前进目标，回顾了中国电力线通信技术的起步和探索，憧憬了电力线通信的美好未来。希望你们能和作者一起感受电力线通信技术改变世界的魅力！

思 考 题

1. 什么是电力线通信技术？
2. 电力线通信技术最大的用武之地在哪里？
3. 影响电力线通信技术发展的瓶颈有哪些？
4. 谈谈政府决策和市场导向对电力线通信技术的影响。

第2章 电力传输网系统及其特性



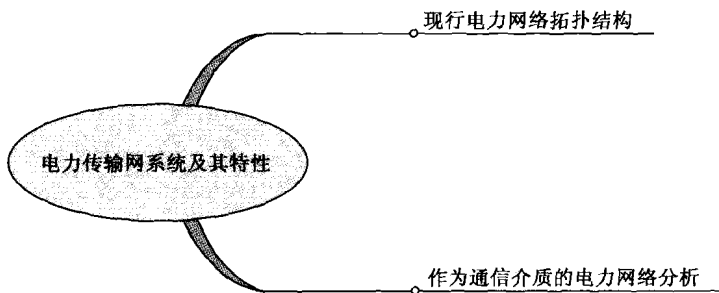
前言

电力线通信的拓扑结构是由低压供电网的拓扑结构决定的，我们没有办法改变低压供电网的结构来适应通信接入网的要求，但是我们可以采用不同的方法来组织电力线的接入网，比如基站的位置、网络的分段，这些都可以影响网络的工作。

本章将从实际电力线网络拓扑结构出发，论述低压电力线的组织结构和家庭内部网络的电力结构，从宏观角度描述电力线网络的部署情况，并以此出发，介绍不同频段占用类型的电力线通信方式——窄带电力线通信和宽带电力线通信。



本章概要



环境不改变，不如改变我们自己。



2.1 现行电力网络拓扑结构

2.1.1 低压供电网的拓扑结构

低压供电网是由各种各样不同的技术的产品来组成的（包括不同类型的电缆、变压器等），是按照已有的电力行业标准来安装的。电力网中存在架空电缆和地下电缆，它们具有不同的传输特点，甚至还有两种方式的混合。低压供电网的拓扑结构在不同的地方也有不同的结构，影响电力线通信网络结构的因素有：

（1）网络位置

一个电力线通信网络可能位于居民住宅区、工业区或者商业区；另外，在农村和城镇的住宅区也有差别。在工业区和商业区存在更多的电力用户，他们都是电力线通信服务的潜在用户，并且可以预见商业区的用户所需要的服务要求与工业区用户特别是居民区的用户的服务要求还有较大的差距，同样的差距也存在与农村和城镇之间。

（2）用户密度

各个网络中的用户的数量以及用户的集中度均不同，在用户密度比较低的地区，如农村，在一个网络中可能只有一个用户。相反，在用户密度比较高的地区，如城镇的居民区，在一个很小的一块中就可能存在很多的用户，而在大的商业区，在一座建筑里就存在大量的用户，用户密度非常高。

（3）网络长度

在各个供电网络中，变压器与用户之间的最长的距离也是不一样的，这种差别在农村和城镇之间是很明显的。

（4）网络设计

低压供电网通常包含几个网络分支，并且各个网络都是不一样的。

图 2.1 表示一个电力线通信的可能的结构。在这个网络中存在几个分支，每个分支均具有不同的拓扑连接以及用户数量，用户密度不同，对称或非对称地分布在低压网络中或各个分支上，分支的长度也不相同。整个网络和它的分支都具有树形拓扑。

因为低压供电网络存在着很大的差别，不可能指定一个典型的网络结构。但是可以定义一些特征值，也可以通过以下的一些信息描述一个典型电力线通信网络的平均结构。



- 网络中用户数：为 250~400（只是电力线通信的潜在用户）；
- 网络分支数：大约为 5；
- 一个网络分支用户数：为 50~80；
- 网络长度：大约为 500 m。

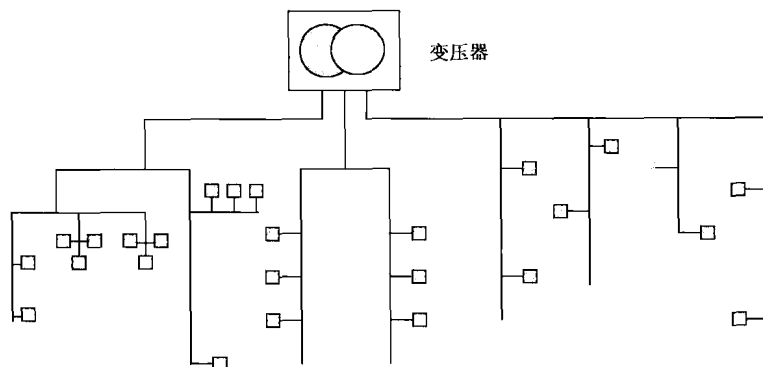


图 2.1 低压供电网可能的拓扑

2.1.2 PLC 接入网的组织

在一个 PLC 接入网中有一个通信基站，这个基站将 PLC 接入系统连到主干网上（广域网），因此基站在一个 PLC 网络的中心位置。基站位置的设置可以参考以下两种方案：

① 基站在变压器的位置接入 WAN，PLC 接入网保持低压供电网拓扑，如图 2.2 所示。

② 将基站设在接近 PLC 用户的地点或其他任何位置。PLC 网络的拓扑结构就改变了，将不同于供电网的拓扑结构，如图 2.3 所示。

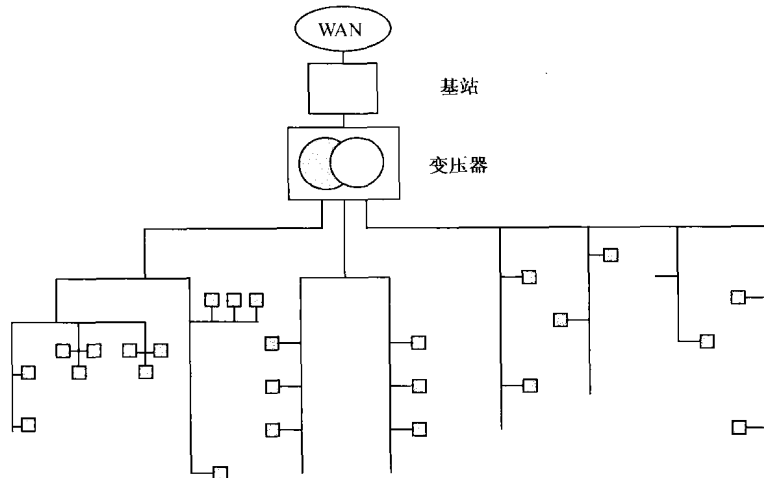


图 2.2 基站设在变压器的 PLC 网络结构