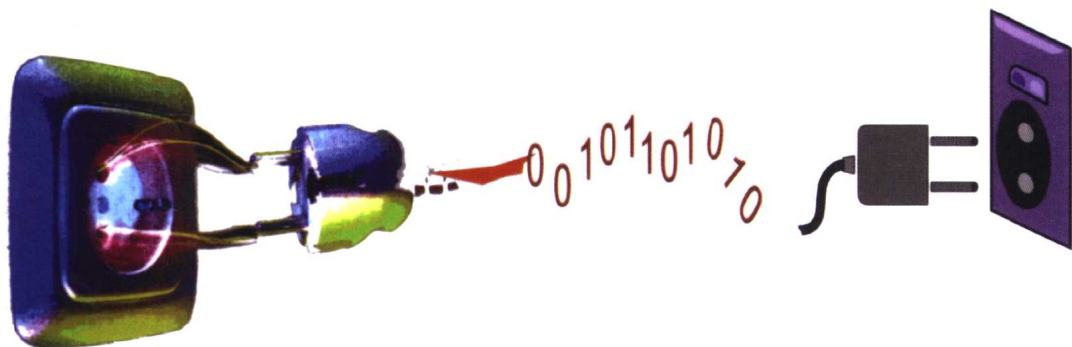


电力线通信

[德] Klaus Dostert 著
栗宁 郑福生 杨洪 译

Powerline Communications



- ▶ 除因特网接入以外的其他应用：仅从墙上电源插口就可实现从家庭/楼宇自动化到数字化音频及视频的应用
- ▶ 最新的相关经济性、法规问题

- ▶ 提高数据速率，减小电磁兼容问题
- ▶ 适用于系统评估员、策划人员、设计人员及技术实施人员



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

电力线通信

[德] Klaus Dostert 著
栗宁 郑福生 杨洪 译

Powerline Communications



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

本书是一部定位于以容易理解的语言,提供给未来用户关于电力线通信技术的书籍。该书以较为易懂的方式涵盖了该技术的各个方面,从多方面阐述了这种技术的可行性、局限性、存在的问题及其解决办法,同时指出了电力线通信的进一步发展对未来的重要意义。

全书共分引言、电力供应系统及其特性、电力线数据通信的历史发展、基于欧洲标准的在低压级的新应用、信号传输的可能性和限制、适用的电力线通信调制方式及通信系统原理、结论以及下一步的工作,共七大部分,在最后一章中还给出了相关读书列表和参考书目。

本书可以作为从事电力线通信产品开发和工程技术人员的参考材料,也可作为从事相关技术和课题研究人员的参考书目。

Powerline Communications (ISBN 0-13-029342-3)

Klaus Dostert

Authorized translation from the English language edition, entitled Powerline Communications, published by Prentice-Hall, Inc, Copyright©2001 Prentice Hall PTR

All rights reserved.

No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from the Publisher.

CHINESE SIMPLIFIED language edition published by China Electric Power Press Copyright©2003

本书由美国培生集团授权出版。

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2002-4750

图书在版编目(CIP)数据

电力线通信/ Klaus Dostert 著; 栗宁, 郑福生, 杨洪译. —北京: 中国电力出版社, 2003

ISBN 7-5083-1864-1

I. 电… II. ①K… ②栗… ③郑… ④杨… III. 电力线载波通信系统 IV. TM73

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 100539 号

书 名: 电力线通信

编 著: Klaus Dostert

翻 译: 栗宁 郑福生 杨洪

责任编辑: 丁雁 张佳音

出版发行: 中国电力出版社

地址: 北京三里河路 6 号 邮政编码: 100044

网址: <http://www.cepp.com.cn>

印 刷: 北京丰源印刷厂

开 本: 787 × 1092 1/16 印 张: 15.25 字 数: 313 千字

书 号: ISBN 7-5083-1864-1

版 次: 2003 年 12 月北京第 1 版 2003 年 12 月第 1 次印刷

定 价: 30.00 元

版权所有 翻印必究

电力线通信 PLC (Powerline Communication) 技术的研究在上个世纪早期就已开始, 各种低速电力载波系统在电力系统生产调度方面也已应用多年, 近几年, 通过电力线进行高速数据传输的系统开始出现, 并在欧洲、北美洲、南美洲、亚洲等地区建设了多个试验网, 有的地区还利用电力线通信技术开展了商业运营。国际和各国的标准化组织也在积极制定相应的电力线通信标准和法规。

随着技术的不断发展, 电力线通信技术将不仅仅只用于电力系统生产调度, 它可以作为一种宽带技术, 向社会用户提供商业化运营服务。电力线通信技术与以太网、ADSL、无线通信等技术相比, 有其独特的特点, 该技术不需要在建筑物内重新布线, 只需利用建筑物内已有的电线, 在进行电力传输的同时, 可以实现对数据、语言和视频等多项业务的承载, 做到“四网合一”。终端用户设备只需要插入电源插头, 就可以进行因特网浏览、接收网络电视节目、打公用电话或者可视电话、组建家庭网络、实现家庭自动化等, 同时利用电力线通信技术, 还可以提供电力系统远程监控、远程抄表等业务。目前, 国内的一些公司已经开始采用电力线通信技术开展商业运营。国家电网公司的主管单位也正在与信息产业部一同制定电力线通信的标准规范, 并积极推动电力线通信技术在我国的商业化运营, 形成电力行业新的经济增长点。

本书概括了电力线通信技术的各个方面, 从电力线通信技术的起源、理论到其具体应用, 以及最新研发结果和标准规范方面, 并指出了这种技术的可行性和局限性, 指出了存在的问题和解决办法, 并在最后讨论了电力线通信的进一步发展和对未来的重要意义。本书可以作为从事电力线通信产品开发和工程技术人员的参考材料, 也可作为从事相关技术和课题研究人员参考书目。

本书由栗宁主译, 主要翻译人员郑福生、杨洪, 均在电力系统从事了多

年的通信和管理工作的，前者目前任国家电网公司国电通信中心副主任，后者目前任国家电网公司国电通信中心副总工程师，张勇进同志也参加了本书的翻译工作。在此还要感谢国家电网公司国电通信中心总工程师曹惠斌对本书的翻译工作进行了指导。

由于译者水平有限，翻译时间紧迫，疏漏和不足在所难免，敬请专家和广大读者指正。

前言

Foreword

“电力线”这个词或多或少地出现在媒体当中已经有一段时间了。但是所有的这些宣传和描述都不足以概括对于这种技术的真正见解，以及该技术向公众推广的可能性。因为电力线对于信息传输来说是种独特的介质，即使是专家，对于这一课题也并不完全熟悉。这也许有助于解释为什么到目前为止电力线通信的研发还处于低迷的状态。电力线有价值的应用仅限于小环境中，诸如楼宇自动化或者远程读表。电力线在相关使用频率范围以及允许传输等级方面的极其严格的规定也限制了电力线通信的发展。

这种状况随着电信和电力市场运营的开放迅速地发生了变化。结果之一就是要求在本地环路级别上具有多种可选的快速数据连接。然而由于所有电话网络中的铜线仍同出一源，实际上该级别上的通信仍是由电话网通信所垄断的，电力线通信可以提供理想化的解决方案，主要是因为供电基础设施比任何通信网络布局都密集。从供应者到民用室内的电源插座的供电基础设施已然很完备，而且随时可以准备使用，无需任何额外安装费用。这意味着诸如由室内电源插座快速接入因特网的此类应用已经不仅仅是停留在想象中了，而是逐渐成为事实。这样高速的发展，以至于需要以简便形式将有关电力线通信的信息提供给未来用户，让他们可以欣然接受这种新鲜事物。

遗憾的是，关于电力线通信的学术著作比较匮乏。当前的出版物可大致分为两类：

1. 定位于非常专业的专家以及阐述具体技术细节的学术著作。
2. 在大型研讨会上，用于吸引人们对于“电力线”这一新鲜事物注意的宣传性新闻稿件，其中没有任何有用的技术背景信息。

大量的信息表明，本书是第一部定位于以容易理解的语言，提供给未来用户关于电力线通信这种技术的书籍。本书深入浅出地讲述了电力线通信技术的各个方面：从电力线通信的起源到它的可行性以及局限性，并将近期的研发结果也包括了进去。此外，本书还涉及了经济方面和法规方面的问题。本书的概述部分提供了关于电力线通信的应用前景、从电信的角度阐述了供电系统在通信方面的用途。接下来的章节阐述了基于现有标准的电力线通信的使用，包括其高数据速率通信的特点以及物理局限。其他的章节讨论了关于电磁兼容性如何解决的问题。本书对有前途的传输和接入方式、最新的设备和系统发展都进行了讨论，在最后一章对电力线通信的进一步发展及其对未来的重要意义作了说明。

目录

Contents

译者序

前言

1 引言	1
2 电力供应系统及其特性	3
2.1 电网拓扑和电气结构	3
2.1.1 高压级	3
2.1.2 中压和低压级	11
2.1.3 干扰环境	20
3 电力线数据通信的历史发展	27
3.1 传统应用类型的可能性及其限制	27
3.1.1 电力线载波传输 (CTP)	27
3.1.2 脉动载波信号 (RCS)	35
4 基于欧洲标准的在低压级的新应用	46
4.1 频率范围在长波广播波段以下的欧洲 CENELEC 标准 EN 50065	46
4.1.1 对信号电平进行限制的影响	48
4.1.2 对信号频谱进行限制的影响	49
4.2 信号耦合、信号衰减、接入阻抗	51
4.2.1 信号耦合	51
4.2.2 传输衰减	57
4.2.3 接入阻抗	57
4.3 基于 EN 50065 所使用的调制和接入方法	59
4.3.1 窄带调制方法及其特性	59
4.3.2 扩频技术	62
4.3.3 伪噪声直接序列 (PN-DS)	63

4.3.4 跳频 (FH)	63
4.4 系统实现举例	68
4.4.1 匹配滤波和同步——导论	68
4.4.2 通过波型表进行数字信号合成	88
4.4.3 电力线通信数字最优接收器技术	93
4.4.4 POWERNET-EIB 用于楼宇自动化中	115
4.4.5 针对冲击噪声的纠错编码	124
4.4.6 白噪声下的编码传输状态 (AWGN 环境中)	133
4.4.7 电力公司的有关电能增值业务的通信系统	134
4.4.8 用混合信号 ASIC 实现的集成微系统原理	139
4.4.9 码元处理多载波方法——概要	147
4.4.10 有关电能增值业务的调制解调器的具体实现	148
5 市场开放带来的革新潜力——信号传输的可能性和限制	154
5.1 电信市场的开放	154
5.2 楼宇高速数据传输设备 (最后一米解决方案) ——Home Plug 电力线联盟	155
5.2.1 Home Plug 电力线联盟的使命和发展前景	155
5.3 低压网络上的电信接入 (最后一英里解决方案)	156
5.4 能源市场的放开 (自由的电力交易)	158
5.5 带宽需求和频率分配	159
5.6 信道特性, 在 PLC 使用的高频上的耦合及测量技术	160
5.6.1 高频信号的耦合	161
5.6.2 高频测量系统和测量结果	163
5.6.3 高频传输特性	171
5.7 电力线信道模型	176
5.8 高频干扰环境	180
5.9 接入阻抗	184
5.10 估算电力线信道容量	185
5.10.1 电力线信道的仙农定理	185
5.10.2 接入信道容量估算	187
5.10.3 室内信道容量估算	187
5.11 电磁兼容性: 问题和解决方案	189
5.11.1 与无线业务的兼容性	189
5.11.2 不同 PLC 系统的兼容性	195
5.11.3 在最近的将来对法规的期望	196
5.12 网络调节措施——可行性和有效性分析	197

6 适用的 PLC 调制方式及通信系统原理	201
6.1 引言	201
6.1.1 对宽带技术的基本考虑	201
6.2 单载波调制与 CDMA	202
6.3 PLC 信号特性和电平限制的测量	204
6.4 正交频分复用 (OFDM) ——一种高速 PLC 的多载波方式	205
6.5 正交频分复用 (OFDM) 信号合成、载波调制与解调	208
6.5.1 OFDM 发射器	210
6.5.2 OFDM 接收器	211
6.6 用于高速 PLC 的 OFDM——概要	212
7 结论以及下一步的工作	215
8 读书列表和参考书目 (按主题排列)	217
8.1 高压线路的载频调制	217
8.2 脉动载波信号	217
8.3 标准和规范问题	217
8.4 扩频技术	218
8.5 通信基础、系统论及射频技术	219
8.6 电力线通信 (PLC) 相关电子电路设计及应用说明	219
8.7 电力配电网络通信	220
8.7.1 低频信道分析和模型化	220
8.7.2 低比特率 PLC 的系统概念, 实验调制解调器和测试结果	221
8.7.3 关于 PLC 的博士论文和有价值的论文	224
8.7.4 高速 PLC 的信道分析、模型化和系统概念	224
8.8 会议进展	228
8.9 有关电力线通信 (PLC) 的书籍	229
8.10 电力线通信 (PLC) 的相关网址	229
本书主要缩写	231

1

引言

某一天也许上网也会变得和插上电源接通您的音响一样容易。电力线通信利用现有电线在家庭网络环境中实现宽带通信，它能传送电信服务到家庭或商业公司。

尽管电力线通信具有很多优越性，但是一涉及到法规和经济相关的问题，它就只能远离现实，并且那些问题阻碍了它的新发展。除非相应标准和法规得到了全球化发展，否则电力线至多只能作为冷门技术在小环境中求发展。

经由供电干线的通信要追溯到 80 年前。虽然电力网络设计用于无损耗电力传输，并没有考虑到电信需求；但它在早期即可同时传输电力和可靠数据，并达到满意程度。起初，只有供电公司能使这点变得有利可图，但这种状况最近发生了变化。

电信和电力市场运营的开放始于 1998 年。供电公司不得不面对电力市场的竞争，从而迫使他们希望在开放的电信市场领域开展新的业务范围。“电”产品可扩展为特殊的增值服务，例如自动远程读表、提供各种透明的费率计划等，或者通过在“家庭自动化”领域的其他服务来持久地加强他们的客户基础。其中，在本地环路中通过电力网络来为电信服务桥接所谓的“最后一英里”的通信更能引起人们的兴趣。这样可以为现有全国电信网络提供真正的可选方案，就好像德国的德国电信（Deutsche Telekom）在为所有家庭提供了所有类型的语音、传真和数据服务，特别是快速低成本的因特网接入之外，还在室内使用电力线承载与局域网一样的数字音频视频信息以及其他数据。这个课题引起了全球范围的关注，美国的 HomePlug 联盟和欧盟的信息社会技术（IST）正在计划组织将这一课题推进。

电力线通信的可行性和结果将会是如此的基础和易于理解以至于很难预期。在本地环路中以配电系统形式出现的新通信途径的价值已经被供电公司和业界所承认。大量的研究和现场试验已表明：当电压等级为中、低级频率范围约为 20MHz 左右时，电力传播网络的通道容量，或者说该通道的数据速率，已达到每秒大约几百兆比特。可见这里包含着巨大的创新潜能，并能带来相当可观的经济价值——例如高速接入的费用曾经对于因特网用户是一个巨大的阻碍，但如果能从墙上的电源插座接入因特网，世界上最大

的信息库将通过无处不在的电力设施为世界上任何地点的任何人开放，使这种状况发生戏剧性的变化。

与无线广播不同，因特网用户可以选择他们喜爱的话题，打开他们认为有价值的信息媒体，这一切将逐渐变得普遍，是因为经由家中墙上的电插座即可实现因特网接入，既简便又相对便宜。全球通信、信息采购、购买和贸易将变得无处不在，因为从墙上电源插座通过消耗电量就可以实现因特网接入。

当然，电力网络的使用并非没有限制，因为若占用一个频率波段超过 $9\text{kHz} \sim 20\text{MHz}$ 的范围，现有服务例如长波、中波和短波无线电和无线电业余爱好者波段将会被覆盖。因此应考虑频率分配、级别限制，并权衡解决方案。又由于电力网络通信主要是电力线路承载的，所以需要建立适当的测量方法来防止未经许可的高辐射信号，目前需要做大量的工作以找出保证电磁兼容性（EMC）的方法。这个问题和电力线通信的其他问题将在本书的以后章节中进行阐述。

本书第 2 章阐述了供电系统及其用途。第 3 章叙述了电力线数据通信的历史发展。第 4 章讨论了基于欧洲标准使用低电压等级的可能性，特别是欧洲 CENELEC 标准 EN 50065。第 5 章讲述了针对目前电力市场开放而产生的创新潜质。第 6 章介绍了通信系统概念和硬件设施。第 7 章对电力线通信进行了简要的总结和展望。最后，第 8 章根据所述问题排列出了广泛的参考书目。

2

电力供应系统及其特性

2.1 电网拓扑和电气结构

以下研究的出发点是在供电系统的各个电压等级中典型网络结构的分析（如图 2-1 所示）。整个系统被划分为三个等级：高压级（110 ~ 380kV），中压级（10 ~ 30kV）和低压级（0.4kV），每一级适应一定距离的桥接，不同的电压等级间通过变压器互连，采用适当的设计以使电能损耗能在供电频率时（50Hz 或 60Hz）达到最低。对于主要用于数据通信的高载频来说，变压器是一道“天然的”障碍，这就导致一个必然的隔离。因此建议在规划通信系统过程中要建立相应的等级结构。

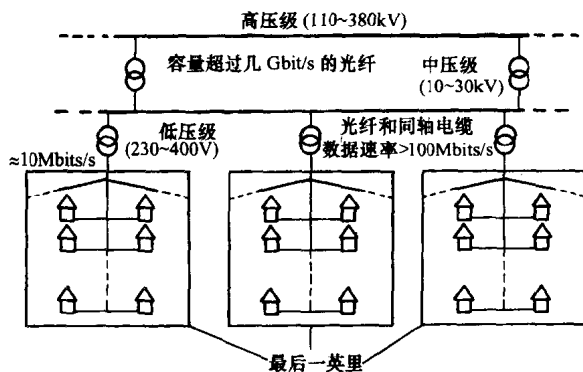


图 2-1 电能供应系统的结构和相关数据流

2.1.1 高压级

高电压级用于从电厂到用户的电能的长途传送，桥接距离为几十到几百英里。高电压级网络通常无一例外地由三相电流架空线构成。相对于其他多相系统，三相系统拥有最有利的线路数量以及最低的投资费用。通过以下方法可以建立一个对称的三相系统：

- 采用三个相同振幅的电压以 120° 的相位差分别接入。
- 对称搭建线路。可以通过对三条线路使用同样的材料、使用同样的线路几何并且尽可能使三条线路在距地面相等的距离上排列成等边三角形来实现。但是根据电线杆的位置及其建设,出于经济的考虑,这种实施方法通常遭到反对,人们通常选择不对称结构——例如使用等腰三角形,大约每隔 20 个电线杆交换一次线路以达到平衡。
- 争取对等分配实际负载和无功负载。

若满足当前对称条件,则在计算三相系统时,仅考虑一个单相替换系统就足够了。

从物理的角度来看,在经由高电压线路高频信号传输与 50 或 60Hz 交流频率的电能传输之间没有根本的不同。如果我们把单相替换系统简化成为在自用空间上由两个平行的导线组成的一条传输线路,那么在这对线路上的电流和电压会产生横向电磁场,这就是所传送的电能的载波。当线路距离远小于传输信号的波长时,该域电能主要集中在对之间,实际上并没有电磁波辐射。虽然电能传输和高频信号传输具有相同的物理过程,但是不同频率时线路对高频信号传输的特性却大不相同。特别是随着频率的增高线路传输高频信号的损耗也随之增加。

与 50Hz 或 60Hz 交流频率相对应的高压架空线波长是大约 6000km 或 5000km。这就是为什么我们需要考虑在扩展网络中的波传播影响,也就是说,我们不能假设直流的情况。在西欧最长的高压线可以超过大约 500km。

原则上高压网络被设计成在长距离时,都是以最小的电能损耗进行最优化的电能传输。电能传输中的损耗主要包括线路材料阻抗导致的热损耗和漏电损耗,例如由绝缘体泄漏电流导致的损耗。虽然标称电压的升高会降低电能损耗,但是漏电损耗却相应升高,因此必需寻求一个折衷的最佳标称电压。线路交叉点的适当分布以及合适的材料选择都有助于降低电能损耗。产生热损耗的电阻在输电频率为 50 或 60 Hz 时不能确定,与直流时一样。因为趋肤效应^[T1, T2]使线路交叉点的电流分布不再是常量,由于电流趋向导线表面,因此有效电阻比在直流情况下的电阻要大。

$$R_{\text{eff}} = \frac{P_v}{I^2} \quad (2-1)$$

式 (2-1) 是一个用在电力技术方面有点不常见的定义,该式中导线的有效电阻 R_{eff} 等于纵向消耗的有效功率 P_v 与横向电流有效值的平方 I^2 之比。

漏电损耗依赖于绝缘体的质量和设计。在通常运行情况下,漏电损耗比热损耗小几个数量等级,且受到强烈气候波动的影响。漏电损耗可以非常粗略的计算。

在高压级还有额外的电晕损耗,它源于在周围环境空气中,由于高电场强度产生的放电活动。当电场强度超过大约 15 kV/cm 的时候,在干燥空气中就会产生放电现象;在潮湿的空气或者雾气中,较低电场强度就会产生放电。承载高压电的线路越细,产生放电效应就越剧烈,因为在细的线路表面会产生非常高的边缘场强。在高压线路和电力线

载波传输 (CTP) (见第 3 章) 环境中, 电晕放电不仅导致电能损耗, 而且还是强烈高频干扰源, 它会影响长波和中波波段的无线电接收。

适当的高压线的几何排列方式有助于大大降低电晕效应和相关的干扰, 而不必将导线横截面增加到既不实用又不经济的程度。以四线方式排列, 其中每线置于正方形的每个顶角, 是在全世界范围内采用的一种限制电晕效应的非常成功的办法。假设电线的半径为 1cm, 正方形的边长为 40cm, 考虑到电晕效应, 总的来说可以获得 22cm 的有效替代导线半径 (例子见第 8 章^[T1, T2])。

当 CTP 处于较高频率时, 由于趋肤效应和频率的原因, 线路的电阻比直流情况下要大很多, 这是因为线路表面深度 a 是随着频率增加而减少的。对高压线路中经常采用的铝线, 其表面深度可采用式 (2-2) 计算

$$\frac{a}{\text{cm}} \approx 8.768 \cdot \frac{1}{\sqrt{f/\text{Hz}}} \quad (2-2)$$

对于半径约为 1cm 的导线 (标准的 380kV 四根导线的线路排列方式), 5000km 长的两线系统在 50Hz 时的有效电阻 $R_{50\text{eff}} \approx 30\Omega$ ^[T1]。对于同样的线路, 在使用频率为 500kHz 时, 有效电阻为 $R_{500k} \approx 1023\Omega$ 。这个例子清楚地说明, 与在供电频率 (即 50Hz 或 60Hz) 下的传输相比, 高频信号传输会产生较大的衰减。此外, 用于电力传输的高压线配置与用于数据传输的线路有所不同。电力传输在三相系统的三根导线上总是均衡负载, 而数据通信一般仅使用两根导线。这就是说, 对于研究电力传输和数据通信的电波传播过程会有不同的结论。

2.1.1.1 高压架空线的电能传输

这一部分首先研究在 50Hz 或 60Hz 时电力传输的电波传输过程, 再以此为基础, 在以下的内容中引入高频线路的电能传输特性。

高压架空线可以用单相模型来表示, 象两根导线一样, 主要的“线路常量”有 R' (单位长度电阻), G' (单位长度漏电导), L' (单位长度电感) 和 C' (单位长度电容)。需要说明的是, L' 、 C' 和 R' 的值与频率有关。为了更好地理解, 我们采用一个四根导线为干线的 380kV 线路的例子, 线路按正方形排列, 边长为 $s = 40\text{mm}$, 其中每根导线线芯为钢线, 外层环包有大量的铝导线。图 2-2 表示出一个典型的导线横截面。这是一个非常灵活的绳型结构。铝/钢标准横截面比为 $240\text{mm}^2/40\text{mm}^2$, 整个导线直径约为 2cm。钢芯增加了导线的电阻。要说明的是, 钢芯对于电流的传送并不重要, 因为它的电阻约为铝的 25 倍。单根铝导线以两层碟型围绕着钢芯, 这两层以相反的方向绞在钢芯上以保证其机械稳定性。

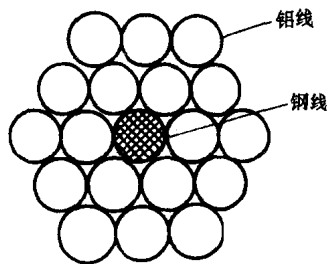


图 2-2 一种典型高压导线的横截面

这种绞线方式使导线长度延长较小, 会使阻抗增加 1% ~ 2%, 这依赖于导线类

线^[T1]。对于如图 2-2 所示的导线结构, 很难计算出在供电频率下趋肤效应的内在情况。这就是为什么高压线制造商仅在表格中列出 50Hz 或 60Hz 时单位长度有效电阻 R'_{eff} 的测量值。第 8 章 [T4] 给出上例中 380kV 导线的 $R'_{\text{eff}} \approx 0.03\Omega/\text{km}$ 。由于趋肤效应, 电阻的典型值会增加 2% ~ 4%^[T2]。除趋肤效应外, 线路温度上升也会使电阻值增加。

目前几乎没有什么方法可以计算出主要的线路常量, G' 。实际三相电架空配置中的 G' 的测量值在表格中给出。例如, 上例中的 380kV 线路的 G' 值为 $G' \approx 3.5 \times 10^{-8}\text{S}/\text{km}$ 。

在简化的情况下, 线路常量中的单位长度电感 L' 在一定程度上可以计算的足够准确。在一个由实心金属导线(如铝线)构成的两导线线路中, 假设导线半径为 r 并且线路距离 $d \gg r$, 则可以得到

$$L' = \frac{\mu_0}{\pi} \times \frac{d}{r \cdot e^{-1/4}} \quad (2-3)$$

式(2-3)中的分母中的自然对数 $e^{-1/4}$ 考虑了导线的内部电感^[T2]。对于上述的 380kV 三相电流架空线来说, 由于以下因素, 使得对单相替换模型的单位长度电感 L' 的计算更加困难:

- 导线不是实心的, 而是标准的(有钢芯)。
- 单相导抗由四根单独的导线产生, 每根导线传导 1/4 的外部导线电流。
- 三相导抗以等边三角形的三边的方式排列并且感性耦合。

地面、线杆和其他传导结构, 例如监测线的影响从一开始就可以忽略, 尽管如此, 仍需要计算出单相等效电路的结果, 即

$$L' = 0.813\text{mH}/\text{km} \quad (2-4)$$

对称 380kV 三相电流架空线路的单位电感的计算则相对复杂^[D3]。与单位长度电感 L' 相似, 单位长度电容 C' 通过一定的简化可以确定至可接受的结果。经过同等的扩展计算, 可以得到一个典型的对称 380kV 三相交流架空输电线路的单相等效电路的公式^[D3]

$$C' \approx 13.89 \frac{\text{nF}}{\text{km}} \quad (2-5)$$

这样就可以计算出对于上例中 380kV 三相交流架空线路在初始工作频率为 50Hz 时的特性阻抗 Z_L 和传播常数 γ , 如式(2-6)和式(2-7)所示

$$Z_L = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \approx 242.77\Omega \times e^{-j3.12^\circ} \quad (2-6)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R' + j\omega L') \times (G' + j\omega C')} \approx 1.059 \times 10^{-3} \times e^{j86.42^\circ} (\text{km})^{-1} \quad (2-7)$$

式(2-7)中的 α 和 β 分别称为衰减常数和相位常数。在式(2-8)成立时, 线路被认为是轻度损耗

$$R' \ll j\omega L' \quad G' \ll j\omega C' \quad (2-8)$$

在这种情况下, 特性阻抗可用 L' 和 C' 来很好地近似计算, 并得到实数值。由式(2-4)和式(2-5)可以得出

$$Z_L = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \approx 241.9\Omega \quad (2-9)$$

考虑到当 $x \ll 1$ 时, 可从式(2-7)算出衰减常数 α 和相位常数 β , 即

$$\begin{aligned} \sqrt{1+x} &\approx 1 + x/2 \\ \alpha &\approx \frac{R'}{2Z_L} + \frac{G'Z_L}{2} \quad \beta \approx \omega \sqrt{L'C'} \end{aligned} \quad (2-10)$$

将式(2-10)用于上例中的 380kV 线路, 可以得到

$$\begin{aligned} \alpha &\approx (6.2 \times 10^{-5} + 4.233 \times 10^{-6})/\text{km} = 6.62 \times 10^{-5}/\text{km} \\ \beta &\approx (1.047 \times 10^{-3}) \times 1.01/\text{km} = 1.055 \times 10^{-3}/\text{km} = 6^\circ/100\text{km} \end{aligned} \quad (2-11)$$

比较式(2-6)和式(2-9)可知, 特性阻抗 Z_L 可以从 L'/C' 的关系简单地计算出一个非常近似的实数值。从式(2-11)可以看出, 单位长度漏导抗 G' 仅有 6.4% 计入衰减常数 α 。这样, 对于 α 的粗略计算只考虑单位长度阻抗 R' 就足够了。

这些确定的线路常量使在高压线路上的电流 $I(l)$ 和电压 $U(l)$ 的复杂的有效值计算过程可用数学方式来描述, $I(l)$ 和 $U(l)$ 是线路终端电流 I_E 和电压 U_E 的复杂的有效值, 也是从线路终端开始计算的位置坐标 l 的函数。如式(2-12)和式(2-13)所示

$$U(l) = U_E \cosh(\gamma l) + I_E Z_L \sinh(\gamma l) \quad (2-12)$$

$$I(l) = \frac{U_E}{Z_L} \sinh(\gamma l) + I_E \cosh(\gamma l) \quad (2-13)$$

在 50Hz 或 60Hz 交流频率的电能传输的情况下, 式(2-12)和式(2-13)可用于准确确定线路状况。这是必要的, 因为例如在操作高压线路时, 必须要避免过电压的情况。当一根长线路空载或轻载运行时, 其起始端标称电压为 U_N , 而线路终端的电压高于 U_N 。这对绝缘子、变压器和开关设备是十分危险的, 因此应通过适当的补偿测量快速可靠地防止这种情况发生^[T4]。

如果在高压线路终端以其线路特性阻抗 Z_L 终结, 就得到一种非常特殊的负载情况, 这种情况即是所谓的自然功率, 如式(2-14)所示

$$S_{\text{nat}} = \frac{U_N^2}{Z_L^*} \approx P_{\text{nat}} = \frac{U_N^2}{Z_L} \quad (2-14)$$

这说明在自然功率情况下不会再发生过压情况, 因为线路运行没有反射。从发电机至用户端的有效值 $U(l)$ 会沿着线路以 $e^{\alpha l}$ 减小。式(2-12)变成

$$U(l) = U_E \times e^{\alpha l} \times e^{j\beta l} \quad (2-15)$$

S_{nat} 是次要的特性线路值。对上例中 380kV 三相电流架空线路, 可以得出

$$S_{\text{nat}} = 594.8 \times e^{-j3.12^\circ} \text{MVA} \approx P_{\text{nat}} = 596.86 \text{MW} \quad (2-16)$$

实际中, 由于负载的变化, 很难长久地按照 S_{nat} 的值操纵高压线路, 线路操作人员只能控制在有限的范围内, 这个参数就决定了线路运行情况。一条线路按照 S_{nat} 来操作是有利的, 因为在这种情况下没有会带来不利影响的感应功率。通常在忽略当前负荷的情况下, 对线路的感应功率的补偿总是能令人满意^[T4]。对于自然功率 S_{nat} , 应当说明的是它不是线路的限定功率。例如有相对较低的标称电压以及小特性阻抗的线路 (如同轴电缆) 由于线路的热损, 将不能达到 S_{nat} 的值; 相反, 高压架空线路能传输的功率还高于 S_{nat} 值。

基于以上考虑, 我们应非常仔细以免得出错误的结论。也就是说, 事实上在线路终端进行适配后, 对于电能传输和数据传输可以获得同等条件, 这时的能量损耗为 50%。以自然功率 S_{nat} 运行的高压线路应按照其特性阻抗在线路终端终结。在其输入端, 发电机不会装备大小等于其特性阻抗的内部电阻, 但发电机的内部电阻要尽可能小。

如果试图要大致描述高压线路的运行条件, 可以采用无损线路模型进行计算, 例如使 $R' = 0$ 且 $G' = 0$, 这样式 (2-12) 和式 (2-13) 可简化为

$$U(l) = U_E \times \cos(\beta \times l) + jI_E \times \sin(\beta \times l) \quad (2-17)$$

$$I(l) = I_E \times \cos(\beta \times l) + j \frac{U_E}{Z_L} \times \sin(\beta \times l) \quad (2-18)$$

由于衰减导致的振幅减小可采用参数 $e^{\alpha l}$ 分别考虑。以上的简化情况也可用于 CTP 系统的设计 (见第 3 章)。

2.1.1.2 高压架空线路用于 HF 信号传输

对于高压电网, 一般会进行特定的测量以确保高频信号的衰减尽可能低。在起点、终点和汇合点处, 会使用电感形式的载频阻波滤波器, 感抗值为 $0.5 \sim 2\text{mH}$, 一般配置柱状空心线圈。(如图 2-3 所示)。需要说明的是, 通常电力线载波传输 (CTP) 频率是在 500kHz 以下的, 这会产生相对较大的感抗值, 这在以后的章节会详细描述。为了适配线路的特性阻抗, 会使用专门的输入输出耦合单元。在高频信号传输上, 我们不是在讨论一个对称三相电流系统, 而是一个两线系统的近似情况。大地和邻线、线杆以及监控线的影响在线路常量的计算中一般忽略不计。这里给出的线路常量 L' 值和 C' 值与式 (2-4) 和式 (2-5) 中的有所不同。单位长度电阻 R' 由于趋肤效应会根据频率的不同戏剧性地增加; 只在 50Hz 或 60Hz

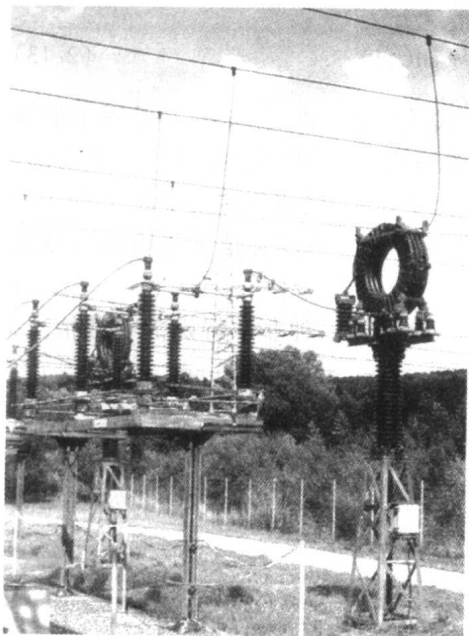


图 2-3 带载频锁定器的高压开关站