



国际电气工程先进技术译丛

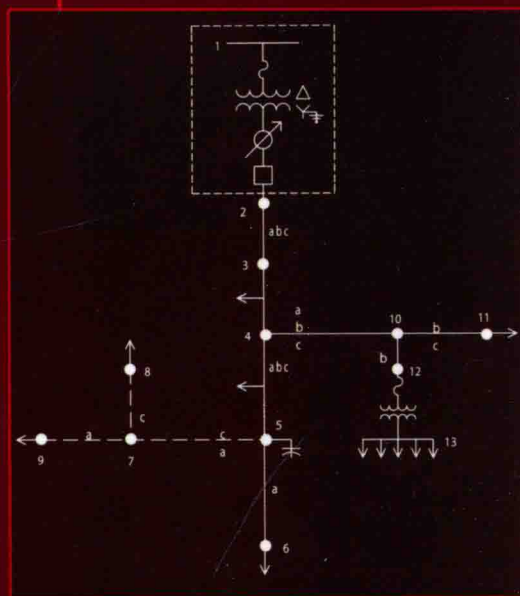


CRC Press
Taylor & Francis Group

配电系统 建模与分析(原书第3版)

**Distribution System Modeling and Analysis
(Third Edition)**

[美] (威廉 H. 科斯汀) William H. Kersting 著
王承民 王冰 衣涛 张庚午 王海冰 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

配电系统建模与分析 (原书第3版)

Distribution System
Modeling and Analysis

[美] 威廉 H. 科斯汀 著
(William H. Kersting)

王承民 王 冰 衣 涛 张庚午 王海冰 译



机械工业出版社

Distribution System Modeling and Analysis (3rd Edition) /by William H. Kersting/ISBN: 978 - 1 - 4398 - 5622 - 2

Copyright © 2012 by CRC Press.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, Part of Taylor Francis Group LLC; All rights reserved.

本书中文简体翻译版授权机械工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售, 未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记图字: 01 - 2013 - 1413 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

配电系统建模与分析: 原书第 3 版/ (美) 科斯汀 (Kersting, W. H.) 著; 王承民等译. -北京: 机械工业出版社, 2015. 3

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Distribution system modeling and analysis

ISBN 978-7-111-49494-2

I. ①配… II. ①科…②王… III. ①配电系统-系统建模
②配电系统-系统分析 IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 042823 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 赵玲丽 责任编辑: 赵玲丽

封面设计: 马精明 责任校对: 陈延翔

责任印制: 李 洋

北京振兴源印务有限公司印刷

2015 年 7 月第 1 版 · 第 1 次印刷

169mm×239mm · 20.25 印张 · 453 千字

0001—2500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-49494-2

定价: 80.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

本书（第3版）反映了配电系统建模和分析领域的最新进展，所描述的方法能够确保在配电系统计算建模时得到尽可能准确的结果。本书采取了与前两版相同的简化方式，清楚地阐释了配电系统模型后面的数学原理，同时讨论了“智能电网”的概念及其益处。

本书增加了前两版没有的重要内容。在前两个版本中，建立了所有元件的模型，但是很少关注如何将这些模型应用到计算机程序中，以进行配电系统规划和实时分析。本书包括了大量的元件模型和一些实例，来演示如何应用和设置计算机程序，帮助工程人员进行配电系统规划和运行。

同时，本书增加了一些近似方法，帮助读者解读计算机程序反馈的结果，辨别出与实际不符的情况。本书另一个改进是提前介绍了（第4章）改进梯形迭代技术，该方法被应用在大多数配电网分析程序中，作者解释了使用该方法的必要性，详述了改进梯形迭代技术为什么是最强有力的方法，以及如何运用该方法。

正如读者所期待的那样，本书在每个主题的后面都有详尽的总结，提供了一些习题、参考文献和作业，帮助读者应用 Mathcad 和 Windmil 软件将所学到的知识运用到实践中。本书作为电气工程专业学生和工程技术人员非常重要的工具，探索了配电系统建模、仿真和分析领域的前沿进展，确保电能安全可靠地持续配送。

译者序

建设坚强的智能电网是 21 世纪电力工业发展的必然要求。在智能电网的大背景下，配电系统也正在受到越来越多学者们的关注。这是因为智能电网的许多关键技术（如分布式电源、需求侧响应等），都与配电系统有着直接而紧密的联系。因此，从拓扑结构、支路参数和运行状态等方面，详细阐述配电系统的建模与分析方法，并且探讨智能电网的发展对配电系统分析方法的影响，都有着十分重要的意义。

与输电系统相比，配电系统有着其自身独有的特点，这就要求必须有一套适用于配电系统的分析方法和理论体系。而本书即是以此为出发点来编写的。本书首先对配电系统进行了概括性的介绍，以期使读者有一个整体上的认识。其次，阐述了配电系统的主要组成部分（负荷、架空线路、地下电缆）的特性，并介绍了配电系统的近似分析方法。本书的核心部分则是阐述配电线路、三相配电变压器、负荷、配电馈线与带中心抽头的配电变压器的数学模型及其分析方法。

目前，国内全面系统地介绍配电系统的有关理论、模型和分析方法的书籍还相对较少。而由 William H. Kersting 教授所著的这本《Distribution System Modeling and Analysis》则是该领域的经典著作，尤其是本书第 3 版反映了配电系统领域的发展动态和最新研究成果。因此，我们认为有必要将其翻译成中文。全书的翻译工作由上海交通大学王承民、王冰、衣涛、张庚午、王海冰完成。

本书的公式表达、图形及文字符号均遵照原书，未按我国标准进行修改。

由于时间和水平所限，书中难免存在错误和纰漏，恳请各位专家、读者批评指正！

译者

原 书 前 言

自从本书第1版出版之后，电力工业特别是配电系统发生了很多变化。“智能电网”一词不断出现在科技文献中，那么这意味着什么？这个问题有很多答案，对于这些答案，关键是尽可能准确地模拟系统，而本书侧重于对配电系统的建模。在本书之前的版本中，对所有元件进行了建模，但是很少考虑将模型应用到计算机中进行配电网规划和实时分析。本书建立了前两版中所没有考虑的元件的其他模型。另外一个大的改进是通过一些例子说明计算机程序能够帮助工程人员对现在和未来配电系统进行规划和运行。特别是，从第4章开始介绍利用 Mathcad^[1]编写的一些简单程序。纵观全书，因为建立了新的元件模型，所以会通过例子说明 Mathcad 程序是如何简化分析的。同时，也鼓励学生或是工程人员编写自己的程序。尽管我偏向于使用 Mathcad，但并不意味着不能使用其他编程语言。在我退休前，我都会要求学生提交所有用 Mathcad 做的家庭作业和试卷。

由于建立的元件模型越来越多，测试工作变得越来越复杂，很明显需要更加成熟的程序。第3版最大的补充是采用了 Milsoft Utility Solutions 公司的配电分析程序“Windmil”。Milsoft 正在开发 Windmil 的学生版本，并附带用户手册。用户手册包括如何使用程序的说明，本书的很多例题也包含在用户手册中。从第4章开始，家庭作业的后面都布置了 Windmil 作业。当完成每章的作业后，会逐渐形成一个包含所有主要元件的简单系统。在第10章，给出了一个小型配电系统的数据，学生或是工程人员可以用 Windmil 构建系统进行研究，并且可以对系统作出调整，使其符合运行导则。Windmil 的学生版本和用户手册可以从 Milsoft 的网址主页下载：Milsoft Utility Solution, Inc.

P. O. Box 7526

Abilene, TX79608

E-mail: support@milsoft.com

Homepage: www.milsoft.com

目前有种趋势：部分学生或是工程人员对计算机程序的结果深信不疑。尽管计算机程序是很好的工具，用户还是有责任认真研究计算结果，确认结果是否合理。这是本书所强调的一个重点。为了对计算结果满意，用户需要有大致正确的答案。这就需要对配电系统的主要元件（第1章）有很好的理解。第2章侧重于一个重要的问题，系统的负荷是什么？本章定义了和负荷相关的常用术语。在过去，对负荷了解很少，并且需要做出很多假设。随着智能电网的到来，大量的实时数据可以对某一特定的研究定义负荷。即使拥有更好的负荷数据，仍需确认计算结果是否合

理。第3章提出了一些近似方法以得到解的大致范围，可能看上去过时了，用处不大。我也曾试图去掉第3章，然而，我仍坚信对应该计算出的结果有一种预判对于学生或是工程人员至关重要。我经常想到过去，当计算尺对于学生或是工程人员还是主要的计算工具时。因为用计算尺不可能包含小数点，所以需要知道一个近似解，同理可以用来解释计算机程序所得到的结果。

配电系统的主要目的是向每个电压在 ANSI 标准范围内的用户提供安全、可靠的电能。规划的主要目标是模拟现在和未来不同情形下的配电系统，确保所有的用户电压在可接受的范围内。因为电压降与系统元件的阻抗密切相关，所以要求它们尽可能准确。特别是，架空和地下配电线路的阻抗必须计算得尽可能准确，第4章和第5章着重强调了这个问题。第6章利用前面章节计算出的阻抗和导纳对架空线路和地下线路进行建模。

第7章侧重于电压调整这个重要概念。当负荷随时间变动时，如何维持每个用户的电压在标准范围内？分级调压器是可以选择的手段之一。本章概述了分级调压器的相关理论并建立了各种连接方式下的模型。

第8章是本书比较重要的一章。本章建立了目前使用的大多数三相变压器连接方式的模型。同样，这些模型对准确模拟变压器实际运行工况至关重要。第11章着重描述为大多数用户提供 120/240V 电压的中间抽头变压器的模型。

第9章对配电系统中各种类型的负荷进行建模。本章引入了一个新的术语来定义各种静态负荷模型：ZIP。配电系统中大多数静态负荷模型可以被模拟为恒阻抗模型 (Z)、恒电流模型 (I) 或恒功率模型 (P)，或是三种模型的组合。对于星形和三角形联结的负荷，建立了对应的负荷模型。本章建立的一个非常重要的模型是感应电机模型。感应电动机是电力系统中的重负荷机器，同样需要尽可能精确地建模。感应发电机逐渐成为主要的分布式电源。第9章说明感应电机可以被模拟成电动机或是发电机。

最后，本书所有论点汇集在第10章。本章推导了用在大多数配电系统分析程序中的改进梯形迭代技术。在最初的两版中，改进梯形迭代技术直到第10章才介绍。而在第3版中，第4章强调了迭代技术的必要性，简单地解释了梯形迭代技术并将其应用到了后续的所有章节中。第10章详细地介绍了这种方法是如何以及为什么是配电系统分析中一种强有力的迭代技术。如前所述，第10、11章最后的 Windmil 家庭作业可以使学生或工程人员建立、研究并最终确定一个小型配电系统的运行特性。

对于 MATLAB 和 Simulink 的产品信息，请联系：

The MathWorks, Inc.

3 Apple Hill Drive

Natick, MA, 01760 - 2098 USA

Tel: 508 - 647 - 7000

VI 配电系统建模与分析 (原书第3版)

Fax: 508 - 647 - 7001

E - mail: info@mathworks.com

Web: www.mathworks.com

对于 Mathcad 产品信息和学生版本的下载, 请联系:

PTC Corporate Headquarters

140 Kendrick Street

Needham, MA 02494

Tel: 781 - 370 - 5000

Fax: 781 - 370 - 6000

Web: www.ptc.com

参 考 文 献

- [1] PTC Corporate Headquarters, 140 Kendrick Street, Needham, MA 02494.
Homepage: www.ptc.com/products/mathcad/
- [2] Milsoft Utility Solutions, Inc., P.O. Box 7526, Abilene, TX 79608. E-mail:
support@milsoft.com Homepage: www.milsoft.com

致 谢

我非常感谢很多学生和工程人员通过邮件和我联系，提出第2版中的相关内容的问題。能够和他们共同努力并帮助他们更好地理解书中的一些模型和应用是我的荣幸。因为我现在已经退休，能够有机会和很多从事配电系统研究的研究生合作是我莫大的荣幸。我希望学生和工程人员能够继续和我保持联系，邮箱是 bjkersting@zianet.com。

特别感谢 Milsoft Utility Solution, Inc. 的 CEO Wayner Carr，能够允许我将 Windmil 作为第3版的新的部分。同样感谢 Milsoft 的很多工程支持人员帮助我提出 Windmil 任务。

一如既往，我要感谢我的妻子 Joanne，尽管我花了大量的时间来修订本书，仍一直支持我。

作者

William H. Kersting 在位于拉斯克鲁塞斯的新墨西哥州立大学（New Mexico State University, NMSU）获得电气工程学士学位，在伊利诺理工大学获得电气工程硕士学位。William H. Kersting 于 1962 年在新墨西哥州立大学参加工作，担任电气工程系教授和电力企业管理协会的主任，直到 2002 年退休。他现在是 Milsoft Utility Solutions 的顾问。同时，也是新墨西哥州拉斯克鲁塞斯 WH 电力咨询公司的股东。

Kersting 教授是电气与电子工程师协会（美）（IEEE）的终生会员。他于 1979 年获得爱迪生电气学会的电气工程教育奖，并由于教学成绩突出于 1977 年获得新墨西哥州立大学的 Westhafter 奖。在加入新墨西哥州立大学之前，他是 EL Paso 电力公司的配电工程师。Kersting 教授一直是 IEEE 电气工程教育协会和配电系统分析协会的积极成员。

目 录

译者序
原书前言
致谢
作者

第1章 配电系统简介	1
1.1 配电系统	1
1.2 配电变电站	1
1.3 辐射状馈线	4
1.4 配电馈线分布图	5
1.5 配电馈线电气特性	7
1.6 小结	8
第2章 负荷特性	9
2.1 定义	9
2.2 单个用户负荷	10
2.2.1 需求	10
2.2.2 最大需求	10
2.2.3 平均需求	10
2.2.4 负载系数	11
2.3 配电变压器负载	12
2.3.1 实际需求	13
2.3.2 最大实际需求	13
2.3.3 负荷持续时间曲线	13
2.3.4 最大非同时需求	14
2.3.5 差异系数	14
2.3.6 需求率	16
2.3.7 利用率	16
2.3.8 负荷差异	16
2.4 馈线负荷	16
2.4.1 负荷分配	16

2.4.1.1	差异系数的应用	16
2.4.1.2	负荷调查	17
2.4.1.3	变压器负荷管理	20
2.4.1.4	测量馈线的最大需求	20
2.4.1.5	方法的选择	21
2.4.2	利用分配的负荷计算电压降	21
2.4.2.1	应用差异系数	21
2.4.2.2	根据变压器额定功率分配负荷	24
2.5	小结	25
	习题	25
第3章	近似分析方法	30
3.1	电压降	30
3.2	线路阻抗	31
3.3	K系数法	32
3.3.1	K_{drop} 系数法	32
3.3.2	K_{rise} 系数法	34
3.4	负荷的均匀分布	35
3.4.1	电压降	35
3.4.2	线路损耗	37
3.4.3	严格的集中负荷模型	38
3.5	集中负荷的几何分布	40
3.5.1	矩形	40
3.5.2	三角形	43
3.5.3	梯形	46
3.6	小结	50
	习题	50
	参考文献	54
第4章	架空和地下线路的阻抗	55
4.1	架空线路的阻抗	55
4.1.1	相位变换的三相线路	55
4.1.2	相位不变换的配电线路	56
4.1.3	Carson公式	57
4.1.4	修正的Carson公式	59
4.1.5	架空线路的初始阻抗矩阵	60

4.1.6 架空线路的相阻抗矩阵	61
4.1.7 序阻抗	63
4.1.8 并列架空输电线路	68
4.2 地下线路阻抗	70
4.2.1 中性线同轴电缆	71
4.2.2 屏蔽电缆	75
4.2.3 并列地下配电线路	78
4.3 小结	80
习题	81
Windmil 作业	83
参考文献	84
第5章 架空和地下线路的导纳	85
5.1 一般电压降方程	85
5.2 架空线路	86
5.3 中性线同轴地下电缆	91
5.4 地下屏蔽电缆	94
5.5 序导纳	95
5.6 地下线路的导纳	96
5.7 小结	97
习题	97
Windmil 作业	98
参考文献	98
第6章 配电系统线路模型	99
6.1 线路的精确模型	99
6.2 线路的改进模型	104
6.2.1 三线制 Δ 形联结线路	105
6.2.2 中性线电流和接地电流的计算	106
6.3 线路的近似模型	108
6.4 改进梯形迭代法	112
6.5 并列线路的一般矩阵	113
6.5.1 物理上并列的线路	116
6.5.2 电气上并列的线路	120
6.6 小结	123
习题	124

Windmil 作业	128
参考文献	128
第7章 电压控制	129
7.1 标准电压等级	129
7.2 两绕组变压器理论	130
7.3 两绕组自耦变压器	133
7.3.1 自耦变压器的额定值	136
7.3.2 阻抗标幺值	138
7.4 分级式调压器	140
7.4.1 单相分级式调压器	142
7.4.1.1 类型 A 的分级式调压器	142
7.4.1.2 类型 B 的分级式调压器	143
7.4.1.3 常量	145
7.4.1.4 线路压降补偿器	146
7.4.2 三相分级式调压器	150
7.4.2.1 星形联结的调压器	151
7.4.2.2 闭合三角形联结的调压器	157
7.4.2.3 开环三角形联结的调压器	159
7.5 小结	168
习题	168
Windmil 作业	172
参考文献	172
第8章 三相变压器模型	173
8.1 引言	173
8.2 一般常量矩阵	174
8.3 $\Delta - Y$ (Y 侧接地) 降压型接线	174
8.3.1 电压	174
8.3.2 电流	178
8.4 $\Delta - Y$ (Y 侧接地) 升压型接线	185
8.5 $Y - \Delta$ (Y 侧不接地) 降压型接线	187
8.6 $Y - \Delta$ (Y 侧不接地) 升压型接线	196
8.7 $Y - \Delta$ (Y 侧接地) 降压型接线	197
8.8 开 Y - 开 Δ 接线	201
8.9 $Y - Y$ (Y 侧均接地) 接线	205

8.10	$\Delta - \Delta$ 接线	207
8.11	开 Δ - 开 Δ 接线	215
8.12	戴维南等效电路	218
8.13	小结	220
	习题	221
	Windmil 作业	224
第 9 章	负荷模型	225
9.1	Y 型联结的负荷	225
9.1.1	恒有功和无功负荷	225
9.1.2	恒阻抗负荷	226
9.1.3	恒电流模型	226
9.1.4	组合负荷模型	226
9.2	Δ 型联结的负荷	228
9.2.1	恒有功和无功负荷	228
9.2.2	恒阻抗负荷	229
9.2.3	恒电流模型	229
9.2.4	组合负荷模型	229
9.2.5	注入 Δ 型联结负荷的线电流	230
9.3	两相和单相负荷	230
9.4	并联电容器	230
9.4.1	Y 型联结的电容器组	230
9.4.2	Δ 型联结的电容器组	230
9.5	三相感应电机	231
9.5.1	感应电机模型	231
9.5.2	T 形等效电路	235
9.5.3	转差率的计算	239
9.5.4	感应发电机	241
9.6	小结	242
	习题	242
	Windmil 作业	244
	参考文献	244
第 10 章	配电馈线分析	245
10.1	潮流分析	245
10.1.1	梯形迭代技术	245

XIV 配电系统建模与分析 (原书第3版)

10.1.1.1 线性网络	245
10.1.1.2 非线性网络	246
10.1.2 一般馈线	248
10.1.3 不平衡三相配电馈线	249
10.1.4 改进梯形迭代技术的应用	250
10.1.5 综合分析	251
10.1.6 负荷分配	256
10.1.7 潮流分析总结	257
10.2 短路分析	257
10.2.1 一般原理	257
10.2.2 短路故障	260
10.3 小结	264
习题	264
Windmil 作业	266
参考文献	270
第 11 章 中间抽头变压器及二次侧线路	271
11.1 中间抽头的单相变压器模型	271
11.1.1 矩阵方程	272
11.1.2 通过二次侧三线制线路为负荷供电的中间抽头变压器	276
11.2 中间抽头的 Y- Δ (Y 侧不接地) 联结变压器	280
11.2.1 回代过程方程	280
11.2.2 前推过程方程	283
11.3 超前开 Y-开 Δ 型变压器接线	289
11.4 滞后开 Y-开 Δ 型变压器接线	291
11.5 四线制二次侧线路	293
11.6 综合分析	296
11.7 小结	302
习题	302
Windmil 作业	303
参考文献	304
附录	305
附录 A 导线数据	305
附录 B 地下电缆数据	308

第 1 章 配电系统简介

一个电力系统的主要组成部分如图 1.1 所示。

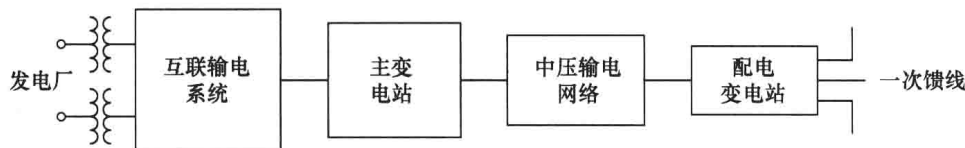


图 1.1 电力系统的主要组成部分

传统观念认为，配电系统是所有这些组成部分中最不起眼的一部分。在 20 世纪的后半段，发输电系统的设计与运行给工程师和科研人员带来了许多挑战。发电厂变得越来越大，输电线路纵横交错并形成了大型互联网络，大型互联电网的运行需要用到新的分析与控制技术。与此同时，针对将电能输送给终端用户的配电系统却仍然缺乏必要的分析。所导致的直接结果是，配电系统往往被过度设计。

随着时代的发展，使配电系统运行在其最大能力状态变得越来越重要。一些需要回答的问题包括：

- 1) 什么是配电系统的最大传输能力？
- 2) 如何确定最大传输能力？
- 3) 必须满足的运行约束有哪些？
- 4) 采取哪些措施来使得配电系统运行在这些约束之内？
- 5) 采取哪些措施来使得配电系统运行得更加高效？

只要准确地建立配电系统的模型，所有的这些问题都能够得到解答。本章的目的即是对一个配电系统所有的主要元件进行准确建模。一旦这些模型被建立起来，配电系统在稳态和短路状态下的分析技术也就自然确定了。

1.1 配电系统

典型的配电系统起始于由一条或几条中压输电线路供电的配电变电站。在某些情况下（例如，当没有中压输电系统时），配电变电站是直接由一条高压输电线路供电的。对于不同的电力企业，情况也是不同的。每一个配电变电站都有一条或几条馈线。除了一些特殊情况，这些馈线都是辐射状的，即只有一条途径使得功率从配电变电站流向用户。

1.2 配电变电站

一个非常简单的配电变电站的单线图如图 1.2 所示。