

落地
+ 优化

$$\begin{cases} \max f_1 = N_{t1} \\ \max f_2 = N_{r,t,j} \\ \min f_3 = \sum C_t \\ \text{s.t.} \end{cases}$$

简单
+ 系统

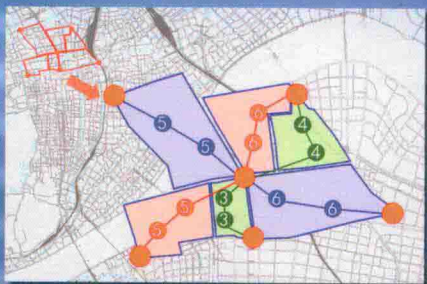
$$\min \left\{ \max_j \left\{ \frac{Y_{j,d} - Y_{m,j}}{Y_j - Y_{m,j}} \right\} \right\}$$

高中压配电网规划

——实用模型、方法、软件和应用

(上册)

王主丁 著



科学出版社

高中压配电网规划

——实用模型、方法、软件和应用

(上册)

王主丁 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书对高中压配电网规划的实用模型、方法、软件和应用进行了较为系统的介绍。全书共9章,涉及电力需求及分布预测、变电站布点及其容量规划、网架结构中的接线模式和组网形态、高中压网架结构协调规划,以及中压配电网网格化规划、应对不确定性的配电网柔性规划、中压架空线开关配置和中压馈线无功配置。本书内容兼具“系统、简单、优化、落地”的特点。

本书可供从事配电网规划及应用的科研工作者、工程技术人员、研究生和相关软件研发人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高中压配电网规划:实用模型、方法、软件和应用(上册)/王主丁著. —北京:科学出版社,2020.4

ISBN 978-7-03-064284-4

I. ①高… II. ①王… III. ①配电系统-电力系统规划 IV. ①TM715

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第005877号

责任编辑:刘宝莉/责任校对:郭瑞芝

责任印制:师艳茹/封面设计:陈敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2020年4月第一版 开本:720×1000 1/16

2020年4月第一次印刷 印张:21

字数:423 000

定价:150.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

电网规划是电力公司既基础又重要的工作之一，每年各市县电网规划中通常都涉及数以亿计的资金投入。在各地区电力公司输配电网总投资中，配电网投资通常占 60%左右。优化且可行的配电网规划方案可以在明显减小总费用(含运行费用)的同时，有效节约其中占比 80%左右的投资(相关)费用，即规划的节约是最大的节约，规划的效益是最大的效益。

随着电网规模的不断扩大和快速发展，针对整个区域的配电网规划难度越来越大。尽管实际规划工作中强调项目可行性并注重“问题导向、目标导向和效率效益导向”，但因项目量巨大往往仅落实了“问题导向”，导致可“落地”方案的全局合理性和长效性不佳；而现有数学规划方法和智能启发式方法尽管较为系统，但由于建模复杂、算法不成熟及难于人工干预等致使优化方案“落地难”，少有实际应用。因此，长期以来，配电网规划都缺乏操作简单且自成优化体系的实用方法(特别是中压配电网)。

本书众多的新颖模型和方法兼具“系统、简单、优化、实用”的特点，在保证规划方案全局最优或次优的基础上，实现了配电网规划规模的由大变小和相应方法的由繁变简，较好解决了实际工作中难以兼顾“优化”和“落地”的问题。相对于主要依靠笼统技术导则和主观经验进行规划的现状，本书方法系统、规范和严谨，不同水平的规划人员针对同一项目能够获得基本一致的全局规划优化方案。相对于数学规划方法和智能启发式方法，本书方法直观、简单、快速、稳定且便于人工干预，可融入相关技术原则，特别适合于工程应用。本书的模型和方法可由计算机编程实现，加上人工干预可得到较为理想的规划结果；然而，对于掌握了本书基本思路的规划人员，也可借助一般商业软件(如潮流计算)甚至仅依靠人工就能完成具体工作。

本书不是经典规划方法或类似规划技术导则的复述，也不是这些方法和技术导则的直接应用，而是在遵循“技术可行、经济最优”规划基本理念和相关技术导则基础上，侧重于实际配电网规划的合理简化模型、有效混合算法和工具软件的最新研发设计。本书是“简单的思想才有利于解决复杂问题”的理念在大规模配电网规划中的具体体现，如将供电网格/单元明确定义为尽量以两个变电站供电的站间主供和就近备供的大小适中的负荷区域。本书方法可大致归纳为以下三

种：一是论证过程、结论和应用都简单的方法，如站间供电网格/单元的直观识别；二是论证过程较复杂但结论和应用都较简单的方法，如站内或辐射型供电网格/单元划分结果的并行排列；三是借助编程实现复杂或烦琐规划过程的简化方法，如供电网格/单元的精细划分。

此外，工程人员面临的困难是如何将规划模型和方法应用于实际工作中，界面友好的软件无疑是解决这一困难的极佳工具和手段。本书也对相关软件及其应用进行了介绍，旨在鼓励读者自己开发软件或使用实用商业软件解决复杂实际工程问题。目前本书部分相关成果已内嵌入 CEES 供电网计算分析及辅助决策软件（以下简称 CEES 软件）的配电网规划模块中，在国内外配电网规划中得到了较广泛的推广和使用。

王主丁负责全书内容结构设计，以及各章撰写和统稿工作。参与撰写的人员如下：乐欢、朱凤娟和李涛参与了第 2 章的撰写，王玉瑾、霍凯龙和谭笑参与了第 3 章的撰写，冯霜、甘国晓和王敬宇参与了第 4 章的撰写，张漫和寿挺参与了第 5 章的撰写，张漫、陈哲、杨丰任、李强、李玮、王敬宇和李诗春参与了第 6 章的撰写，张漫、王敬宇和翟进乾参与了第 7 章的撰写，冯霜、张静、廖一茜和彭卉参与了第 8 章的撰写，胡晓阳、江洁、赵俊光和张程参与了第 9 章的撰写。本书承天津大学的葛少云教授和中国电力科学研究院的张祖平教授审阅，两位教授提出了不少宝贵意见。国家电网四川省电力公司自贡供电公司原总工吴启富和重庆星能电气有限公司技术总监王敬宇也评阅了本书，并提出了很多修改意见。

《高中压配电网规划——实用模型、方法、软件和应用》包含了高中压配电网实际规划中的主要内容，分为上下两册。本书为上册，下册还涉及高压配电网网格化规划、变电站无功配置、配电网常规计算、分布式电源接入最大承载力计算、供电能力计算、投资决策中的经济评价、项目排序、投资分配策略、规划辅助决策系统和一流配电网。

在本书撰写过程中得到了李文沅院士和张伯明教授的大力支持和指导，在此对李院士和张教授表示衷心感谢；特别感谢我的研究生及众多工程师，书中主要材料取自我与他们合作发表的论文；还要感谢书中所引用参考文献的作者；深切感谢远在洛杉矶的家人，是他们的大力支持，使我有足够的时间潜心研究和写作。

由于作者水平有限，书中可能存在不妥之处，敬请读者批评指正。

作者简介



王主丁，2000 年获得美国威斯康星大学电机工程博士学位。美国电气和电子工程师协会(IEEE)高级会员，重庆大学电气工程学院教授。曾任美国著名电力系统仿真程序开发商的高级工程师，后创办重庆星能电气有限公司。基于丰富的国内外学术研究和工作经历，提出配电网规划和计算分析的多种原创性模型和方法，形成了一整套配电网规划和评估的理论，在国际范围特别是在中国和美国的大量电力工程应用中逐步改进，其中多项技术达到国际先进或领先水平，较好地解决了实际工作中难以兼顾“落地”和“优化”的问题，并通过大量项目咨询应用于实际工程，在提升电网品质的同时，累计节省直接投资上百亿元，约占投资总额的 10%。

序 一

配电网直接连接用户，涉及的范围非常广大。配电网规划对电力公司的全系统可靠性和投资经济性举足轻重。长期以来，在电力公司的实践中，配电网规划以定性分析为主，然而，在计算机已经普及的情况下，正在逐渐转换为以定量计算为主的人机交互式规划。

该书正是在这个转换过程中应势而出。虽然在配电网规划方面国内外已发表和出版了大量文章和书籍，但大多数的理论成果与电力公司的实际规划运作之间存在较大距离，不容易“落地”应用。作者既是工作在电力软件及咨询行业的技术领导和工程师，又是大学教授。该书的主要内容基于作者给电力公司配电网各种规划项目提供的技术咨询报告，书中的模型、算法和实例基本上都是实际应用的成果。这是该书区别于其他同类书籍最显著的特点。由于作者长期的职业习惯，每当针对不同电力公司配电网规划中的新问题而开发出新的模型或算法时，作者都能将模型和算法嵌入其软件包，并适时地在理论上加以总结，发表文章。因此，该书的内容既适合配电网领域的工程技术人员和程序设计人员，也适合大学教师、本科生和研究生。

该书与作者的另一本书《高中压配电网可靠性评估——实用模型、方法、软件和应用》形成姊妹篇。可靠性是配电网规划中必要和主要的指标，而配电网规划除了可靠性以外，还必须保证其他技术指标和经济指标。可以将两本书互相参照阅读。与先前出版的那本姊妹篇著作一样，该书也是一本理论性和实用性并重的优秀学术专著，相信会得到读者的广泛认可。



中国工程院外籍院士、加拿大工程院院士

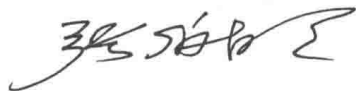
2019年7月于加拿大温哥华

序 二

配电网是电网中将发电系统和输电网与用户设施连接起来，向用户分配和供给电能的重要环节。随着我国电力系统的发展，近些年来，我国电网建设投资的重心已经有从主干输电网向配电网侧转移的趋势，配电网投资在总电网投资中的占比显著上升。而且，在目前新的电改背景下，“开源节流、精打细算”成为电力行业备受关注的问题，以避免由于单纯追求安全可靠造成的重复建设、过度建设以及其他的投资浪费。

该书以工程应用为目标，基于采用简单方法解决大规模复杂配电网规划问题的思路，理论和应用结合、模型与技术导则结合、数学方法和实际实施(数据、软件)结合，突破了现有方法难于兼具“系统、简单、优化、实用”的瓶颈；以效率效益为导向，重点阐述了作者通过理论和实际紧密结合而得到的新模型及其混合求解方法，以及由此归纳总结出的工程实用的规划原则、要点或规则，既能适应现有相关技术导则，又能适应未来电网的发展。其中比较典型的例子有：多台小容量主变站容优化组合方案，做强中压是供电安全可靠且经济的必要条件，供电网格和单元的明确定义以及基于全局统筹的优化划分，适应不确定性因素的中压环状型组网形态，经济评价中增供电量及其电价的合理分摊，每台主变与周边主变分别采用2组联络线的方式组网，无功和开关的快速优化配置，多约束情况下多个不同类型分布式电源最大承载力快速计算，以及基于“一环三分三自”的中压配电网一、二次协调规划等。

该书总结了王主丁教授团队历时十余年的研究和工程应用成果，其中大部分内容已在工程现场得到应用。该书的出版将为电力工业界同行、科技工作者、教师和研究生提供很好的参考。



IEEE Fellow

2019年8月于清华园

目 录

序一

序二

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 配电网规划方法	2
1.2.1 配电网规划方法发展阶段	2
1.2.2 优化方法概述	2
1.2.3 应用软件概述	3
1.2.4 方法及软件要求	4
1.3 本书特点和内容	4
参考文献	6
第 2 章 电力需求及其分布预测	7
2.1 引言	7
2.2 负荷总量预测方法	7
2.3 空间负荷预测实用方法	11
2.3.1 空间负荷预测基础	11
2.3.2 饱和度法	13
2.3.3 分类分区法	17
2.4 配电网规划中的负荷预测要点	19
2.5 应用算例	29
2.6 本章小结	32
参考文献	33
第 3 章 变电站布点及其容量规划	35
3.1 引言	35
3.2 基于负荷分布的变电站规划	35
3.2.1 数学优化模型	36
3.2.2 容载比确定	37

3.2.3	变电站年费用	38
3.2.4	线路年费用	43
3.2.5	模型求解算法	49
3.3	变电站规划的简化模型和方法	57
3.3.1	简化条件	57
3.3.2	变电站年费用简化	58
3.3.3	线路年费用简化	59
3.3.4	年总费用简化	60
3.3.5	简化模型求解	60
3.4	计及分布式电源的变电站规划	62
3.4.1	研究现状	63
3.4.2	简化思路	63
3.4.3	模型方法基础	63
3.4.4	计及分布式电源的变电站个数优化	68
3.4.5	计及分布式电源的变电站容量优化	75
3.5	应用算例	82
3.5.1	算例 3.1: 单阶段和多阶段规划	82
3.5.2	算例 3.2: 变电站简化规划	83
3.5.3	算例 3.3: 变电站置信个数和馈线置信条数	87
3.5.4	算例 3.4: 变电站置信容量	92
3.6	本章小结	97
	参考文献	100
第 4 章	网架结构中的接线模式和组网形态	102
4.1	引言	102
4.2	电网接线模式和组网形态调研	102
4.2.1	先进电网结构	103
4.2.2	国内电网结构	112
4.3	负荷双接入	125
4.4	架空线小分段	129
4.5	中压闭环运行	130
4.6	组网形态	133
4.7	本章小结	138
	参考文献	140
第 5 章	高中压网架结构协调规划	142
5.1	引言	142

5.2	高压和中压配电网“强、简、弱”定义	142
5.3	高中压网架结构协调方案优选模型	143
5.3.1	协调规划思路	144
5.3.2	典型协调方案	144
5.3.3	方案优选模型	144
5.3.4	费用估算	146
5.4	基于安全可靠和经济的典型方案优选	148
5.4.1	方案优选思路	148
5.4.2	典型案例	148
5.4.3	基础数据	149
5.4.4	供电安全性分析	150
5.4.5	可靠性计算分析	151
5.4.6	经济性计算分析	155
5.4.7	基于综合分析的方案优选	162
5.5	本章小结	162
	参考文献	163
第6章	中压配电网网格化规划	165
6.1	引言	165
6.2	总体思路	166
6.3	候选通道组网	167
6.4	供电网格组网	169
6.4.1	供电分区划分目的和原则	170
6.4.2	供电分区的分类	170
6.4.3	优化模型和求解思路	172
6.4.4	网格划分模型和方法	175
6.4.5	网格子供区细分模型和方法	180
6.4.6	子供区划分的局部优化调整	186
6.4.7	供电单元划分模型和方法	190
6.5	目标网架规划	193
6.5.1	宏观网格组网约束	193
6.5.2	分类建设标准	194
6.5.3	布线优化模型方法	197
6.6	过渡网架规划	199
6.7	电缆通道规划	201
6.8	馈线配变装接容量	205
6.9	网格化管理	207

6.10	应用算例	211
6.10.1	算例 6.1: 网格化规划方法比较	211
6.10.2	算例 6.2: 目标网架及其过渡	217
6.11	本章小结	220
	参考文献	222
第 7 章	应对不确定性的配电网柔性规划	224
7.1	引言	224
7.2	柔性规划基本概念	224
7.3	变电站柔性规划	225
7.3.1	预留站址个数优化	225
7.3.2	变电站容量及其过渡优化	227
7.3.3	变电站安全负载率优化	228
7.3.4	变电站供电范围优化调整	228
7.4	通道柔性规划	229
7.5	网架柔性规划	230
7.5.1	不同典型组网形态及其特点	230
7.5.2	典型组网形态优选模型	231
7.5.3	网架总费用估算	231
7.5.4	模型求解方法	234
7.6	网架柔性过渡措施	234
7.7	应用算例	236
7.7.1	站址预留方案的比选	236
7.7.2	候选通道组网	237
7.7.3	组网形态选择	238
7.8	本章小结	245
	参考文献	246
第 8 章	中压架空线开关配置	247
8.1	引言	247
8.2	基本概念	247
8.3	相同类型开关配置模型和算法	249
8.3.1	线路分段优化模型	250
8.3.2	单开关定位判据	251
8.3.3	三阶段解析算法	252
8.3.4	算例 8.1: 可靠性测试系统 RBTS 中节点 6 的变电站	254
8.3.5	算例 8.2: 实际馈线算例	256

8.3.6 小结	258
8.4 不同类型开关配置模型和算法	258
8.4.1 线路分段优化模型	258
8.4.2 线路分段可靠性评估模型	260
8.4.3 线路分段可靠性评估公式	260
8.4.4 三阶段解析算法	260
8.4.5 算例 8.3: 不同类型开关配置	261
8.4.6 小结	262
8.5 基于净收益的简化模型和算法	263
8.5.1 净收益目标函数	263
8.5.2 高可靠性分段原则	263
8.5.3 算例 8.4: 基于小分段的高可靠性分段原则	263
8.5.4 小结	265
8.6 基于可靠性指标的简化模型和算法	265
8.6.1 数学模型	266
8.6.2 优化算法	267
8.6.3 算例 8.5: 单条馈线和多条馈线系统算例	269
8.6.4 小结	273
8.7 本章小结	273
参考文献	274
第 9 章 中压馈线无功配置	275
9.1 引言	275
9.2 无功规划基础	276
9.3 无功补偿优化模型	283
9.4 优化模型求解基础	284
9.4.1 节点优化编号	284
9.4.2 节点电压最大允许偏移值	284
9.4.3 近似潮流计算	285
9.4.4 单节点优化补偿容量	286
9.5 三次优化解析算法	287
9.5.1 一次优化	287
9.5.2 二次优化	288
9.5.3 三次优化	289
9.5.4 算法总流程	289
9.5.5 其他问题处理	291
9.6 馈线总补偿容量近似估算	292

9.7 馈线无功规划算例.....	294
9.7.1 算例 9.1: 一般规模系统的测试.....	294
9.7.2 算例 9.2: 含分接头、分布式电源和环网的算例.....	295
9.7.3 算例 9.3: 馈线总容量近似估算.....	296
9.8 本章小结.....	297
参考文献.....	297
附录.....	299

第1章 绪 论

电力行业是关乎国计民生的重要行业，它的发展水平不仅影响国民经济的其他部门，还涉及大量的一次能源消耗、资金配置及可持续发展等一系列战略问题。在优化资源配置提升企业效益的背景下，协调好技术和经济之间的平衡是配电网规划的重要任务之一。

1.1 引 言

电力系统可分为发电系统、输电网系统和配电网系统三个子系统。配电网是指从输电网或发电厂接收电能，通过配电设施按电压逐级分配或就地分配给各类用户的电力网。配电网规划是为满足负荷增长的需要，针对配电网现状存在的问题，采用科学的方法进行配电网建设与改造的前期工作，是提高电力系统调度运行水平和经济社会效益的关键因素^[1~6]。按照电压等级的不同，配电网规划可以划分为高压配电网规划(110kV、66kV、35kV)、中压配电网规划(20kV、10kV)和低压配电网规划(0.4kV)。从时间跨度上，配电网规划可以分为近期、中期和长期三个阶段，近期规划为5年左右，中期规划为5~10年，长期规划为15年以上，规划年限应与国民经济和社会发展规划年限一致。

配电网规划主要内容包含配电网现状分析、电力需求预测、变电站规划、配电网规划和规划成效分析等，涉及因素很多：各种经济技术指标约束，如投资限额、可靠性和环境约束等；负荷增长、经济政策和设备寿命等不确定性；投资费用的非连续性和阶段性；运行费用和停电损失费用与线路功率等相关因素间的非线性关系等。这些因素都导致配电网规划成为一个多维和大规模的复杂寻优问题，具有不确定性、多目标性、非线性、动态性和离散性等特点。因此，长期以来，配电网规划缺乏操作简单且自成优化体系的方法(特别是中压配电网)。

目前，实际配电网规划中主要采用传统规划方法，即基于相关规划技术导则人工拟订方案，加上人工或计算机计算分析校验。该方法在近年来的大规模城乡电网规划建设中发挥了重要作用，到2017年底国家电网公司城乡供电可靠率分别为99.948%和99.784%^[7]，但从国内外一流电网主要指标对比来看(见表1.1)，这些指标正面临着挑战，因此配电网规划实用模型、方法和软件的研究及其应用具有重要的现实意义。

表 1.1 国内外一流电网主要指标

电网指标	世界一流电网			国内一流电网					
	巴黎	东京	新加坡	北京	上海	广州	深圳	天津	福州
供电可靠率/%	99.99715	99.99962	99.99994	99.975	99.981	99.966	99.973	99.966	99.977
用户年均停电时间 /[min/(户·年)]	15	2	0.31	131.4	102	180	144	180	120

注：世界一流电网为 2016 年指标，国内一流电网为 2017 年指标。

1.2 配电网规划方法

1.2.1 配电网规划方法发展阶段

配电网规划方法主要经历了三个发展阶段：传统规划、自动规划和计算机辅助决策。

(1) 传统规划主要基于相关规划技术导则^[5,6]，凭个人经验进行规划方案的制订和评价，但定性分析多于定量计算，容易陷入“头痛医头、脚痛医脚”的局部最优解，往往使不同水平的规划人员得到完全不同的规划方案。

(2) 自动规划是借助计算机对配电网规划问题进行建模求解的规划方法，目前处于研究阶段。与传统规划相比，自动规划大大减少了规划人员的计算工作量，强化了规划方案的全局统筹和唯一性，但自动规划不能独自胜任配电网规划的具体工作，在实际规划中应用较少。其主要原因有：建模难以考虑一些实际因素，特别是一些社会因素；对于大规模配电网规划计算量大；在不同地区推广应用中易受计算稳定或参数设置的影响，适应性不强；计算过程和结果不利于规划人员的理解、判断和调整；与相关技术导则结合度不够。

(3) 计算机辅助决策系统整合了规划所需的信息、模型及算法，将人的经验与自动规划相结合。目前，计算机辅助决策系统处于研究与应用阶段。

1.2.2 优化方法概述

计算机辅助决策系统是配电网规划方法发展的趋势，而自动规划优化是计算机辅助决策系统中的重要高级应用功能。自动规划优化方法一般包括数学规划方法^[8,9]、启发式方法^[8,9]和图论^[9,10]。

1. 数学规划方法

数学规划方法通过建立数学模型来解决配电网规划问题：首先将配电网规划问题转化为数学表达式，包含目标函数和约束条件，然后采用优化方法进行求解，

最终得到最优解。优化方法是在一切可能的方案中选择一个最好的方案，包括线性规划、非线性规划、整数规划、混合整数规划和动态规划。

数学规划方法和古典极值优化方法有本质上的不同，后者只能处理具有简单表达式和简单约束条件的情况，而现代数学规划问题中的目标函数和约束条件都很复杂，要求给出较为精确的数字解答，但在实际应用中仍存在这样或那样的问题，如模型简化带来的精度问题和计算耗时问题，以及针对不同计算实例可能存在的算法稳定性问题。

2. 启发式方法

启发式方法是相对于最优化算法提出的，它是一个基于直观或经验构造的算法，即在可接受的计算量(指计算时间和空间)下给出待解决优化问题每一个实例的一个可行解，该可行解与最优解的偏离程度一般不能被预测，而偏离程度很大的特殊情况也很难出现。

按照处理实际问题的智能化程度来分类，启发式规划方法可分为传统启发式方法与智能启发式方法。传统启发式方法是以对实际问题的直观分析为依托，一般情况下会设计出令人满意的规划方案。传统启发式方法十分灵活，所需计算时间不长，在配电网规划中受到专家的认可并被普遍应用。智能启发式方法是受自然界启发而获得的，正逐渐被应用于配电网规划这一研究领域。与数学规划方法相比，智能启发式方法能很好地处理优化问题中的离散变量，同时具有很好的全局寻优能力，但存在计算费时且不稳定的问题。比较有代表性的智能启发式方法有遗传算法、禁忌搜索算法、粒子群算法、模拟退火算法和蚁群算法。

3. 图论

图论以图为研究对象，是网络技术的基础。图论中的图是由若干给定的点及连接两点的线所构成的图形，这种图形通常用来描述某些事物之间的某种特定关系，用点代表事物，用连接两点的线表示相应两个事物间具有的关系。它将复杂庞大的工程系统和管理问题用图描述，可以解决很多工程设计和决策的最优化问题，如完成工程任务的时间最少、距离最短和费用最省等。

1.2.3 应用软件概述

配电网规划软件将现有的模型、算法和人工经验采用编程方式固化和传播，可将计算实例一次录入多次使用，是连接复杂信息理论和实际工程应用的桥梁和工具。

目前应用较为普遍的相关商业软件有 PSASP、PSS/ADEPT、DIgSILENT、ETAP 和 CEES 软件等，然而国内外目前仍没有一套普遍适用的配电网规划软件。