

DS-1

SAIDI

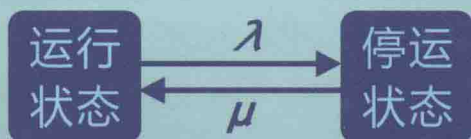
ENS

SAIFI

高中压配电网可靠性评估

——实用模型、方法、软件和应用

王主丁 著



科学出版社

高中压配电网可靠性评估

——实用模型、方法、软件和应用

王主丁 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统性地介绍了高中压配电网可靠性评估的实用模型、方法、软件和应用,共13章。第1~4章介绍了配电网可靠性评估基础、多重故障的影响分析和混合搜索方法。第5章和第6章介绍了中压配电网可靠性的快速评估方法(含容量电压约束、分布式电源和上级配电网的影响)以及近似估算模型和方法。第7~9章介绍了高压配电网故障范围混合搜索方法、考虑容量电压约束的可靠性快速评估方法和可靠性近似估算模型和方法(含二阶故障)。第10~13章介绍了配电网可靠性评估实用软件、可靠性参数收集和处理,以及可靠性评估在配电网规划、建设与改造等工程实际中的应用。

本书适用于配电网领域的科研工作者、工程技术人员和相关软件研发人员,也可供高等院校相关专业的教师和研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

高中压配电网可靠性评估:实用模型、方法、软件和应用 / 王主丁著.
—北京:科学出版社,2018.11

ISBN 978-7-03-059398-6

I. ①高… II. ①王… III. ①配电系统-系统可靠性-评估 IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 250962 号

责任编辑:孙伯元 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:师艳茹 / 封面设计:蓝正设计

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年11月第一版 开本:720×1000 1/16

2018年11月第一次印刷 印张:18 3/4

字数:357 000

定价:128.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



序

配电网直接与用户相连,是最早实施智能电网发展的环节。配电系统可靠性在电力系统可靠性中占据极其重要的地位。统计表明:电网中 80% 以上的失效或故障事件发生在配电网。因此,配电系统可靠性指标被世界上许多电力公司作为评定电力企业运营水平的关键性能指标。精确而快速地评估配电系统可靠性,对于有效指导配电系统规划、设计、建设、改造、运行、维修及管理,从根本上改善系统的供电可靠性,提高电网投资效益十分重要。

在配电网可靠性评估方面,已经有大量的文章和书籍发表。但是现有的方法和模型并不完善,在实用上还存在很多不足。该书围绕实用这个核心线索展开,形成显著特色。作者没有局限于介绍已有的方法,而是另辟蹊径,突出阐述了基于作者多年研究成果、针对不同问题的各种实用新模型和算法。这些思路为致力于评估方法的读者,特别是高校教授和研究生,提供了新颖的借鉴。该书也介绍了可靠性评估软件的设计要求、测试算例、实施流程和所需的数据分析。该书不只提供研究方法,还为希望编写软件的读者提供了崭新的视野。作者通过工程案例展示了可靠性评估在配电网规划设计和改造环节的应用,为工作在配电网领域的工程师提供了实际应用的样板。

该书能够有上述独特之处,与作者既是大学教授,又是长期工作在电力软件及咨询行业的技术管理人员和工程师有关。该书凝聚了王主丁教授团队十余年的研究和工程应用成果,主题突出、系统性高,理论和实际问题结合紧密,其中大部分技术在工程现场得到应用,是一本理论性和实用性并重的优秀学术专著。相信该书将为相关工业界同行、科技工作者、老师和学生提供很好的参考。

中国工程院外籍院士

加拿大工程院院士

李元

2018 年 9 月于加拿大温哥华

前 言

配电网是将发电系统或输电网与用户设施连接起来,向用户分配并供给电能的环节。在资源配置日趋优化,企业效益进一步提升且计算机日趋普及的今天,“开源节流、精打细算”成为电力行业非常关注的问题,仅通过对停电事件的统计进行供电可靠性评价分析已难以适应供电可靠性精准管理的需求,亟须由事后统计评价向事前预测评估转变。

本书是作者在配电网可靠性评估领域的多年研究和工程咨询的总结,包括模型和算法,以及相关软件的研发及其实际工程的应用。作者先后工作过的美国 SKM 公司和 OTI 公司,以及重庆星能电气有限公司、重庆大学、清华大学和美国威斯康星大学,为作者提供了良好的工作环境,特别是国内配电网高速发展的机遇,使得作者完成了不少相关论文和工程咨询报告,从而形成了本书的基础。与其他相关书籍相比,本书不是经典评估方法或类似评估导则的复述,也不是这些方法和导则的直接应用,而是在遵循可靠性评估基本原理和导则的基础上,侧重于实际配电网可靠性评估的合理简化模型、有效混合算法和软件工具的最新研发设计,目前部分成果已嵌入美国 ETAP(www.etap.com)和国内 CEES(www.ceesinc.com)商业软件的可靠性评估模块中,并在国内外配电网规划和运行中得到广泛的推广应用。

由于高中压配电网网络特点和典型参数不尽相同,其可靠性评估的模型简化和设计方法各具特色,不存在通用的配电网可靠性评估实用模型和算法。因此对于配电网可靠性评估领域的科研和工程技术人员,除了要对基本概念和方法正确理解外,还必须具体问题具体分析,分别从高压和中压配电网实际应用出发,以严谨的逻辑推理和创造性的技巧定制满足工程精度和实际要求的简化模型,并实施高效快速的求解,才能解决工程实践中的具体问题。

作者具有多年的配电网可靠性评估咨询和相关软件研发经验,深知许多已有的经典模型和方法(如传统的模拟法和解析法)往往不能满足实际运用中的各种条件,或者对于实际规模的系统不能得到快速稳定的评估效果。工程应用中的最佳方法应该既有理论深度又实用便捷,即理论上保证足够精度,使用上又便于理解和快速计算。在有些情况下(如系统规划初始阶段中的预估),适于手算的简单模型也能达到可接受精度的结果,受到工程技术人员青睐。因此,重点阐述由作者提出的理论和实用紧密结合的新模型与新算法成为本书追求的目标。另外,工程人员

面临的困难是,如何将优选的模型和算法应用于实际的配电网可靠性评估中。界面友好的软件无疑是解决这一困难的极佳工具和手段。本书也从软件设计和数据要求方面进行了探讨,旨在使读者能够自己开发软件或使用实用商业软件解决复杂的实际工程问题。

王主丁负责全书内容结构设计,负责除第 10、11 章外各章的撰写和统稿工作。参与部分撰写的研究生和工程师如下:重庆大学研究生赵华和谭笑参与了第 2 章的撰写,韦婷婷和咎贵龙参与了第 3 章的撰写,韦婷婷、咎贵龙和张漫参与了第 4 章和第 5 章的撰写,韦婷婷和张漫参与了第 6 章的撰写,咎贵龙和国网江苏省电力有限公司经济技术研究院韩俊高工参与了第 7 章的撰写,咎贵龙和国网郑州供电公司翟进乾高工参与了第 8 章的撰写,咎贵龙和张漫参与了第 9 章的撰写,国网重庆电力公司杨群英高工和国网重庆电科院的万凌云高工撰写了第 10 章和第 11 章,重庆星能电气有限公司庞祥瑞工程师和重庆师范大学王艳副教授参与了第 12 章的撰写,浙江大学甘国晓博士和国网河南省电力有限公司张永斌高工参与了第 13 章的撰写。重庆大学谢开贵教授审阅了全书,并对本书提出了不少宝贵意见。美国 ETAP 公司的 Haijun Liu (Sr. Principal Electrical Engineer) 也评阅了本书稿,并提出了很多修改意见。

作者在撰写本书的过程中得到李文沅院士的大力支持,在此对李院士表示衷心感谢;同时感谢作者的研究生,书中许多材料取自与他们合作的论文和研究成果;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,是他们做出了不少牺牲,使我有足够时间潜心研究和写作。

限于作者水平,书中难免存在不妥之处,敬请各界专家和读者批评指正。

王主丁

2018 年 8 月于重庆

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 配电网可靠性评估方法和软件	2
1.2.1 可靠性评估方法概述	2
1.2.2 可靠性评估软件概述	2
1.3 本书特点和内容	3
1.3.1 本书特点	3
1.3.2 本书内容	3
参考文献	5
第 2 章 配电网可靠性评估基础	7
2.1 引言	7
2.2 停电过程及时间描述	7
2.2.1 中压配电网	7
2.2.2 高压配电网	9
2.3 元件停运模型	9
2.4 电网特点和可靠性指标	11
2.4.1 输电网	11
2.4.2 中压配电网	13
2.4.3 高压配电网	16
2.5 节点优化编号	17
2.6 可靠性损失费用	18
2.6.1 计划停电费用	18
2.6.2 故障停电费用	19
2.7 可靠性评估步骤	20
2.8 配电网可靠性评估的基本方法	21
2.8.1 面向元件的方法	21

2.8.2 面向负荷点的方法	22
2.8.3 面向开关设备的方法	25
2.8.4 失负荷分析	25
2.8.5 含分布式电源网络评估	25
2.8.6 近似估算方法	25
2.8.7 多电压等级配电网评估	25
2.9 本章小结	26
参考文献	26
第3章 配电网可靠性评估中多重故障的影响分析	28
3.1 引言	28
3.2 中压配电网评估中多重故障的影响	28
3.2.1 串联系统平均故障率公式及其讨论	29
3.2.2 多重故障分类	30
3.2.3 年平均停电持续时间计算	31
3.2.4 典型数据计算分析	35
3.3 高压配电网评估中多重故障的影响	37
3.3.1 多重故障影响公式	37
3.3.2 典型数据计算分析	38
3.4 本章小结	40
参考文献	40
第4章 基于虚拟网络混合搜索方法的可靠性快速评估	42
4.1 引言	42
4.2 模型假设和相关定义	42
4.2.1 模型假设	42
4.2.2 影响范围和隔离范围	43
4.2.3 虚拟网络定义	43
4.2.4 节点分类	45
4.3 虚拟网络停运范围混合搜索方法	47
4.3.1 元件拓扑分类列表	47
4.3.2 影响范围搜索方法	48
4.3.3 隔离范围搜索方法	50
4.4 基于虚拟网络停运范围的可靠性评估	50
4.4.1 基于虚拟网络的分类节点集合推导	50
4.4.2 指标计算公式	51

4.4.3 算法流程	52
4.4.4 方法复杂度分析	53
4.5 两 RBTS 可靠性测试算例	53
4.5.1 算例 4.1:RBTS-BUS2	54
4.5.2 算例 4.2:RBTS-BUS4	56
4.6 本章小结	59
参考文献	59
第 5 章 复杂中压配电网可靠性快速评估	61
5.1 引言	61
5.2 考虑负荷转供约束的可靠性快速评估	62
5.2.1 方法基础	62
5.2.2 容量允许负荷转供率	65
5.2.3 电压允许负荷转供率	66
5.2.4 转供区域切负荷率	67
5.2.5 考虑转供约束的指标计算	68
5.2.6 算例 5.1:考虑负荷转供约束	68
5.3 考虑分布式电源影响的可靠性快速评估	70
5.3.1 方法基础	71
5.3.2 分布式电源出力恒定的切负荷率	72
5.3.3 分布式电源出力不确定的切负荷率	76
5.3.4 考虑分布式电源的指标计算	77
5.3.5 涉及分布式电源的三算例	78
5.4 考虑高压配电网影响的可靠性快速评估	81
5.4.1 方法基础	82
5.4.2 基于 2 参数等值电源的协调计算	83
5.4.3 基于 $4N+2M$ 参数等值电源的协调计算	84
5.4.4 两种等值电源的比较分析	87
5.4.5 算例 5.5:考虑高压配电网影响	88
5.5 考虑负荷变化的可靠性快速评估	93
5.6 本章小结	94
参考文献	95
第 6 章 中压配电网可靠性近似估算模型和方法	97
6.1 引言	97
6.2 总体思路	97

6.3 基本模型 I	98
6.3.1 计算条件	98
6.3.2 简化公式	101
6.3.3 基本模型 I 三算例	122
6.4 基本模型 II	131
6.4.1 计算条件	131
6.4.2 简化公式	131
6.4.3 算例 6.4:基本模型 II 算例	133
6.5 基本模型 III	134
6.6 扩展模型	135
6.6.1 设备容量约束和负荷变化的影响	135
6.6.2 双电源和带电作业的影响	138
6.6.3 考虑综合影响后的扩展模型	139
6.6.4 扩展模型三算例	139
6.7 本章小结	150
参考文献	151
第 7 章 高压配电网故障范围混合搜索方法	153
7.1 引言	153
7.2 算法基础	153
7.2.1 定义及假设	153
7.2.2 节点分类	154
7.2.3 指标计算公式	154
7.3 状态空间截断方法	155
7.3.1 基于网络结构的状态空间截断方法	155
7.3.2 基于停电时间的状态空间截断方法	158
7.4 基于一阶故障的二阶故障隔离范围推导	158
7.4.1 一阶故障隔离范围	158
7.4.2 连支异侧元件二阶故障隔离范围推导	159
7.4.3 连支同侧元件二阶故障隔离范围推导	159
7.5 算法流程	160
7.6 高压配电网快速评估两算例	161
7.6.1 算例 7.1:实际高压配电网	161
7.6.2 算例 7.2:RBTS-BUS4 高压配电网	162
7.7 本章小结	164

参考文献	164
第 8 章 考虑容量电压约束的高压配电网可靠性快速评估	166
8.1 引言	166
8.2 算法总体思路、策略和步骤	166
8.2.1 总体思路	167
8.2.2 算法策略	167
8.2.3 算法步骤	169
8.3 基于电流和电压的容量约束	170
8.3.1 计算公式	170
8.3.2 基于电压和电流的容量比较	171
8.4 切负荷最小网流规划模型及转换	172
8.4.1 切负荷最小网流规划模型	172
8.4.2 切负荷最小网流规划模型转换	173
8.5 模型求解	174
8.5.1 求解思路	174
8.5.2 最大流和容量约束详细校验	174
8.5.3 切负荷优化算法	174
8.6 考虑容量电压约束两算例	176
8.6.1 算例 8.1:某实际高压配电网	176
8.6.2 算例 8.2:RBTS-BUS4 高压配电网	176
8.7 本章小结	179
参考文献	179
第 9 章 高压配电网可靠性近似估算模型和方法	181
9.1 引言	181
9.2 估算总体思路	181
9.3 停电过程和模型假设	182
9.3.1 停电过程	182
9.3.2 模型假设	182
9.4 模型推导	183
9.4.1 一阶故障	183
9.4.2 二阶故障	186
9.5 典型接线可靠性简化公式汇总	188
9.6 近似评估三算例	189
9.6.1 算例 9.1:典型接线模式	189

9.6.2 算例 9.2:某实际高压配电网	192
9.6.3 算例 9.3:大规模高压配电网可靠性估算	193
9.7 本章小结	197
参考文献	197
第 10 章 配电网可靠性评估软件及应用	199
10.1 引言	199
10.2 可靠性评估软件	199
10.2.1 软件要求	199
10.2.2 测试算例	201
10.3 可靠性评估实施工作流程	204
10.3.1 评估前的准备工作	204
10.3.2 参数收集、处理及输入	205
10.3.3 可靠性计算分析	205
10.3.4 评估报告规范性	209
10.4 本章小结	209
参考文献	209
第 11 章 可靠性参数收集和处理	211
11.1 引言	211
11.2 基础数据	211
11.2.1 电网拓扑结构	211
11.2.2 配电线路、配电变压器基础数据	212
11.2.3 负荷点数据	213
11.2.4 其他数据	214
11.3 可靠性参数	215
11.3.1 可靠性参数收集统计的一般原则	215
11.3.2 可靠性参数具体收集统计方法	216
11.3.3 参数估计方法	219
11.3.4 可靠性参数校验	221
11.3.5 典型可靠性参数	222
11.4 本章小结	226
参考文献	227
第 12 章 可靠性评估在配电网规划设计中的应用	228
12.1 引言	228
12.2 应用流程	228

12.3 应用案例	230
12.3.1 配电网概况	230
12.3.2 参数收集及处理	231
12.3.3 现状电网可靠性评估分析	234
12.3.4 基于可靠性评估的中压配电网规划	241
12.3.5 案例小结	248
12.4 本章小结	249
参考文献	249
第 13 章 可靠性评估在配电网建设与改造中的应用	251
13.1 引言	251
13.2 应用流程	251
13.3 应用案例	252
13.3.1 配电网概况	253
13.3.2 参数收集	253
13.3.3 计算结果及分析	255
13.3.4 薄弱环节分析	259
13.3.5 改善措施及其效果	262
13.3.6 案例小结	265
13.4 本章小结	266
参考文献	266
附录 A 点估计法	268
A.1 基本思路	268
A.2 两点估计法	269
A.3 三点估计法	269
参考文献	270
附录 B 网流模型基础	271
B.1 基本概念	271
B.2 最大流问题	272
B.3 最小费用流问题	273
B.4 最小费用最大流问题	273
参考文献	273
附录 C CEES 软件简介	274
C.1 概述	274
C.2 CEES 可靠性详细评估	274

C.3 CEES 可靠性近似估算	275
C.4 CEES 软件的直观认识	275
C.5 CEES 可靠性计算模块	277
C.6 小结	283
参考文献	283

第 1 章 绪 论

配电系统用户供电可靠性是衡量配电网对用户持续供电能力的一个主要指标,也是供电企业的一项重要技术经济指标,体现了配电网技术、装备水平和企业管理水平。配电网可靠性评估是指对配电网设备和网络结构的性能或各种性能改进措施效果是否满足规定供电可靠性要求进行的分析、预计和认定等一系列工作。

1.1 研究背景和意义

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我国其他行业,而且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的战略问题。在优化资源配置、提升企业效益的背景下,为避免由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,“开源节流、精打细算”成为电力行业非常关注的问题。

依据电压等级的高低,电力系统可分为发电系统、输电网和配电网三个子系统。配电网是电力系统的重要组成部分,主要作用是分配电能。在我国的配电网中,高压配电网电压等级为 35~110kV,中压配电网电压等级为 6~20kV,低压配电网电压等级为 400V/380V/220V。高压配电网从上一级电网获取电能,降压后向下一级中低压配电网提供电能,或者直接向高压用户供电。

配电网承担着将电能从电源或输电网传输到不同电压等级用户的重要任务,直接与用户相连,对供电可靠性影响较大。据电力公司的统计,80%的用户非计划停电是由配电网故障引起的^[1,2]。配电网可靠性的准确快速评估是减少故障损失的基础,有着十分重要的意义。

从 20 世纪 80 年代初由水利电力部制定并颁发《配电系统供电可靠性统计方法(试行)》开始,我国开展了 30 多年的供电可靠性统计与评价工作。近年来,随着我国经济社会的发展,用户对供电可靠性的要求越来越高,仅根据可靠性的历史统计结果进行分析与评估已难以适应高供电可靠性的需求,供电可靠性管理亟须由事后统计评价向事前预测评估转变^[3~7],以有效指导供电系统规划、设计、建设、改造、运行及管理,提高配电网投资效益。目前国内外越来越多的供电企业正在开展或计划开展供电可靠性评估的工作。

1.2 配电网可靠性评估方法和软件

1.2.1 可靠性评估方法概述

工程上常用的配电网可靠性评估方法总体上可分为模拟法和解析法两类^[8~14]。模拟法采用抽样的方法进行状态选择,随后用统计的方法计算可靠性指标。模拟法中的典型方法为蒙特卡罗模拟法,该方法可计算相关事件对系统的影响,而且系统规模对计算复杂性的影响较小,适合于求解复杂系统的可靠性;但对于可靠性高的系统,计算精度与计算时间之间存在较大矛盾,要保证高计算精度需要消耗大量时间。解析法采用故障枚举法进行状态选择,并用解析的方法计算可靠性指标。解析法模型准确、原理简单,便于针对不同元件性能对配电网可靠性的影响进行分析,在配电系统可靠性评估中应用更加广泛。

解析法可分为状态空间法、网络法、系统状态枚举法和简化模型近似估算法四类。状态空间法通过建立状态空间图,求解马尔可夫状态方程得到可靠性指标,它在理论上可以精确计算各状态的频率和持续时间,但计算烦琐,不适用于大系统。网络法以配电系统拓扑结构为基础,包括故障模式后果分析法、最小路法、最小割集法、故障扩散法和网络等值法等。系统状态枚举法直接枚举系统状态,忽略状态之间的转移,比起状态空间法可节省大量计算,但不能精确计算频率和持续时间指标。简化模型近似估算法针对高中压典型接线模式,经过适当的模型简化获得可靠性指标的近似解析表达式,需要的数据量少,适合大规模配电网可靠性指标快速估算。

解析法基于元件可靠性模型,本质上都是通过对系统故障进行枚举实现的,但由于系统的故障状态数随着系统元件数量的增加成正比增长,故当系统规模较大时,系统的故障状态会很多,一般方法计算量相当大,计算速度仍有较大的提升空间,这正是本书关注的重点和要解决的问题。计算速度和适应性对于实用模型和方法至关重要,这是因为:①在配电网可靠性评估过程中,可能对多个方案进行比较分析,或是需要对某个方案的若干参数进行频繁调整后再计算,这就要求可靠性评估方法具有很高的计算速度,以保证计算的流畅性和实用性;②实际配电网中往往有成百上千条线路,如果一条线路可靠性评估所需的计算量大,那么评估所有的线路所花费的时间会是巨大的,往往让人无法忍受;③每一系统都具有不同于其他系统的特点,这要求模型方法具有很高的适应性,以保证计算的准确、快速和稳定。

1.2.2 可靠性评估软件概述

配电网可靠性评估软件是将相应的模型、算法和人工经验采用编程方式固化

和传播,可对计算实例一次录入多次使用,是连接复杂理论和实际工程应用的桥梁和工具。商业软件一般都具有较好的用户界面、计算精度、计算效率和适应性,随着配电网规模和复杂性的日益增加,各种数据接口日趋完善,商业软件应用必将越来越广泛。

值得一提的是,为了实现配电网可靠性评估常态化和“所见即所得”的图形化交互操作需求,商业软件方便、灵活的界面及功能设计也是至关重要的,开发人员不仅需要熟悉界面设计的主要功能,也需要对相关业务知识有深入了解。

目前应用较为普遍的相关商业软件有 PSASP、PSS/ADEPT、DIgSILENT、ETAP 和 CEES^[15~19]等,然而国内外目前仍没有一套普遍适用的可靠性评估软件。作为本书使用的示范软件,CEES(参见附录 C)是国内外优秀商业软件理念与国内实际需求的结晶,兼有国内外同类产品的诸多优点。本书通过将 CEES 软件应用于配电网算例的可靠性评估,以呈现实用软件在计算过程及其工程应用方面的特点。

1.3 本书特点和内容

1.3.1 本书特点

本书侧重于配电网可靠性评估的实用模型、有效混合算法和软件应用,主要特点如下所述。

(1)对于实际规模的配电网,其可靠性评估模型本质上属于大规模复杂电网评估问题,现有的许多算法(如蒙特卡罗模拟法、最小路法或最小割集法)存在计算速度慢的问题。本书提出的方法充分利用配电网特点,通过模型和算法的巧妙构思,在满足工程计算精度的同时保证可靠性评估效率和计算稳定性。

(2)对于实际的配电网可靠性评估,应该考虑的因素非常多,但由于许多因素难以完全通过数学表达式体现在现有的常规评估模型中,因此需要结合配电网特点开发新的模型和算法,或者进行合理的简化,包括在一些以预估为目的的情况下,推导方便工程师进行直观快速估算的可靠性指标简化计算公式。

(3)本书的另一个特点是努力搭建可靠性评估模型和方法与实际工程应用之间的桥梁,用固化在软件中的实用模型和方法,快速准确地提供实用而有价值的计算结果,同时为可靠性评估方法在配电网规划设计和运行改造等各生产环节的应用提供一些参考范例。

1.3.2 本书内容

基于有关配电网可靠性评估的研究成果,本书重点从实用模型、有效混合算法