

复杂配电网简化分析与优化

刘健 毕鹏翔 董海鹏 著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

819

11/7/21

172a2

全国优秀博士学位论文作者基金资助项目

复杂配电网简化分析与优化

刘健 毕鹏翔 董海鹏 著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

随着城市配电网的网格化程度的提高, 凭借人的经验已经不能很好地管理现代配电网。配电网不仅节点众多, 而且严重缺乏量测点, 因此采用传统的分析和优化方法, 会面临计算量和占用存储空间大、速度慢、收敛困难、“组合爆炸”等实际困难。本书针对配电网的特点, 建立了一整套简化建模、简化分析和优化方法, 充分利用现实中可以获得的有限量测数据反映配电网的主要运行指标, 并发展了快速的全局优化方法实现网络优化、安全运行和经济运行等功能, 从而实现了用人工智能代替人的经验更科学地管理现代配电网。本书内容涉及绪论、配电网的耗散网络模型、配电网的变结构网络模型、广义耗散网络——等效负荷模型、等效负荷密度模型、配电网简化模型数据结构的优化、基于负荷的简化分析、配电网潮流计算、配电网不良数据辨识、配电网故障和异常区域判断与隔离、配电网重构的研究进展、配电网重构的改进支路交换法、随机初值的启发式优化方法、基于改进遗传算法的网络重构等 14 章。

本书对于指导我国城乡电网建设和改造, 尤其是配电自动化的健康发展具有一定的参考价值。本书适合于从事城乡电网规划、建设、改造以及配电自动化系统研究、开发、制造和应用部门的技术人员和管理干部阅读, 也可作为大专院校电力系统自动化和供用电技术专业的教师、研究生和高年级学生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

复杂配电网简化分析与优化/刘健等著. - 北京: 中国电力出版社, 2002

ISBN 7-5083-1134-5

I. 复… II. 刘… III. ①配电系统-电力系统结构-结构分析②配电系统-电力系统结构-最佳化 IV. TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 042220 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2002 年 10 月第一版 2002 年 10 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 9.375 印张 245 千字

印数 0001—3000 册 定价 20.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

序

随着城乡电网建设与改造的进行，城市配电网的网格化程度越来越高，运行方式越来越灵活，像过去那样凭借人的经验已经不能很好地管理现代配电网。配电网不仅节点多，而且量测点严重缺乏，因此采用传统的分析和优化方法，会面临计算量和占用存储空间大、速度慢、收敛困难、“组合爆炸”等实际困难。

近年来，我和我的助手及学生们针对配电网的特点，建立了一整套简化模型化方法（即变结构耗散网络理论），对复杂配电网进行简化分析，充分利用现实中可以获得的有限量测数据反映配电网的主要运行指标，并发展了快速的全局优化方法实现网络优化、安全运行和经济运行等功能，从而实现了用人工智能代替人的经验更科学地管理现代配电网。

本打算将复杂配电网简化分析与优化理论进一步完善后出一部精品，可是看到国内配电自动化领域正在快速地发展，但是在以智能配电为宗旨的高级应用方面，距离实用化还存在较大差距，在加上随着我们一些学术论文的发表，引起了同行学者广泛的讨论，在我赴各地讲学过程中，也有大量同行索取这方面的资料。鉴于以上情况，我便责无旁贷地感觉到有必要立即将6年来在复杂配电网简化分析与优化方面的研究成果汇总出版。但是这毕竟是一个年轻和发展中的体系，其中难免有不妥之处，欢迎读者指正，我们将在再版时加以完善。

这部著作凝聚了我和我的博士研究生、硕士研究生、部分工程硕士生和课题组成员的30余篇学术论文，因此在此我要感谢

为变结构耗散网络理论添砖加瓦并转化为产品的同事们和信赖这套理论的用户们。

刘 健
2002 年于西安

目 录

序

第1章 绪论	1
1.1 配电网简化建模与分析的意义	1
1.2 配电网分析和优化的研究现状	2
1.3 变结构耗散网络理论体系	6

第一篇 复杂配电网简化建模

第2章 配电网的耗散网络模型	9
2.1 配电网的简化处理	10
2.2 配电网的无向图描述	11
2.3 配电网的有向图描述模型	12
2.4 配电网的负荷矩阵	13
2.5 耗散网络模型的参数提取	17
2.6 配电网的最小配电区域	17
2.7 小结	22
第3章 配电网的变结构网络模型	24
3.1 固定结构网络和变结构网络	24
3.2 基形变换	24
3.3 连通系的分解	28
3.4 搜寻和连通系的某个源点连通的末梢点	33
3.5 搜寻和连通系的末梢点连通的源点	35
3.6 配电网的分层模型	37
3.7 配电网中的环及其分解	39

3.8 小结	44
第4章 广义耗散网络——等效负荷模型	45
4.1 等效负荷的研究基础	45
4.2 等效负荷模型 (ELM) 的建立	49
4.3 具有分支的馈线的等效负荷模型	52
4.4 实例计算结果	56
4.5 小结	67
第5章 等效负荷密度模型	68
5.1 基本原理	68
5.2 离散等效负荷密度模型	77
5.3 计算实例及分析	80
5.4 小结	88
第6章 配电网简化模型数据结构的优化	89
6.1 采用等长邻接表描述配电网的变结构耗散 网络模型	90
6.2 含有母线的配电网的变结构耗散网络模型	100
6.3 等效负荷模型的变结构耗散网络数据结构	103
6.4 小结	106

第二篇 复杂配电网分析

第7章 基本耗散网络分析	108
7.1 基本耗散网络的主要参数	108
7.2 点弧变换	110
7.3 弧点变换	113
7.4 小结	118
第8章 配电网潮流计算	119
8.1 配电网潮流计算的数学模型	119
8.2 配电网潮流计算方法	121
8.3 支路电流法收敛性分析	128

8.4	配电网潮流计算所需迭代次数的初步研究	132
8.5	配电网电压稳定性研究	137
8.6	小结	145
第9章	配电网不良数据辨识	147
9.1	不良数据辨识和网络结线分析	147
9.2	采用数据可信度法提高配电自动化数据 一致性	151

第三篇 复杂配电网优化（网络重构）

第10章	配电网故障和异常区域判断与隔离	158
10.1	基于网基的故障区域判断方法	158
10.2	基于网形的故障区域判断方法	162
10.3	仿重合器方式故障区域判断	166
10.4	基于分层模型的单相接地区域判断	167
10.5	配电开闭所自动化和馈线自动化协调配合 的故障判断和隔离	169
10.6	基本重合分段器的故障处理的可靠性的进 一步增强	173
10.7	故障隔离后健全区域优化恢复供电	177
10.8	小结	182
第11章	配电网网络重构的研究进展	183
11.1	配电网网络重构的意义	183
11.2	配电网网络重构的数学模型	185
11.3	采用数学优化技术的配电网网络重构算法	187
11.4	最优流模式算法	187
11.5	支路交换算法	189
11.6	基于人工智能的网络重构算法	191
11.7	其他配电网网络重构算法	197
11.8	小结	198

第 12 章	配电网网络重构的改进支路交换法	200
12.1	基本原理	200
12.2	算法的关键步骤	203
12.3	算法机理分析	207
12.4	改进支路交换法的优点	210
12.5	计算实例及分析	211
12.6	小结	214
第 13 章	随机初值的启发式优化方法	215
13.1	以联络开关为核心的启发式网络重构	215
13.2	以降低线损为目标启发式网络重构	218
13.3	动态网络优化及其启动条件	222
13.4	随机初值的配电网网络优化	225
13.5	小结	228
第 14 章	基于改进遗传算法的配电网网络重构	229
14.1	以降低线损为目标的目标函数	229
14.2	染色体编码	230
14.3	初始种群生成	233
14.4	适应度函数和选择操作	234
14.5	复制、交叉和变异	235
14.6	基于环路分解的快速遗传算法	241
14.7	小结	244
附录 A	配电网网络优化的若干实例	246
附录 B	几个典型配电网网络数据	273
参考文献		278

第 1 章 绪 论

1.1 配电网简化建模与分析的意义

近年来,随着通信手段和计算机技术的发展,配电自动化的水平已经取得了长足的进展,但是目前的配电自动化产品基本上停留在 SCADA(数据采集与安全监控)水平,虽然花费不少代价在户外柱上断路器处安装馈线终端单元(FTU),并建设了密集的由 FTU 到配电自动化中心的通信网络,获得了大量反映配电网运行状况的实时数据,但是多数配电自动化 SCADA 系统仅仅将这些宝贵的数据以可视化的形式展示出来,并没有对这些数据进行处理,更没有运用人工智能的手段较好地为电力生产服务。

实际上多供电途径的网格状配电网的运行方式非常灵活,因此仅凭借值班员的经验调度和管理配电网越来越困难,迫切需要发展智能配电软件协助操作员甚至代替操作员更科学、更及时地作出最佳的调度决策,从而确保配电网安全运行,降低运行费用和提高经济效益,更好地提高供电可靠性,最大限度地发掘配电网的潜力,也可以使配电自动化系统的效益更好地体现出来,并促进该行业长期稳定持续地发展^[1]。

大规模网络的求解,总面临着计算量和占用存储空间大、速度慢、收敛困难、“组合爆炸”等实际困难。复杂配电网不仅规模巨大,而且严重缺乏量测数据,因此求解更加困难。虽然电力系统建模和分析技术已经很成熟,比如可以采用集中参数模型建立电源点、传输线和变压器的等值电路,从而获得描述电力系统的导纳矩阵,采用 N-R 法、P-Q 分解法和 B-X 法等迭代方法

就可以得出电力系统的潮流。上述模型化方法在用来描述配电网时却不十分方便，主要存在下列问题：首先配电网的线路分支点和配电变压器接入点都应看作是节点，因此配电网的节点较输电网的节点要多得多，导致导纳矩阵非常庞大，占用存储空间和处理工作量也非常大。其次配电网量测点少，通常配电线路上的柱上断路器的量测是可以满足的，但是由于受到建设费用的限制，一般只有少数重要的配电变压器得到量测。因此，针对配电网的特点，建立简化建模方法，对复杂配电网进行简化分析，充分利用现实中可以获得的有限量测数据反映配电网的主要运行指标，是解决上述问题的有效途径^[1]。

1.2 配电网分析和优化的研究现状

近年来，配电网分析和优化已经成为研究热点之一，主要研究内容有：配电网潮流计算、不良数据辨识和状态估计、网络重构和优化等。

1.2.1 配电网分析的研究

潮流计算是电力系统分析的基础，配电网潮流计算的研究一直得到学者们的重视。Tsai-Hsiang Chen 等将基于 ZBus 的高斯迭代方法用于配电网潮流计算中^[2]，该方法收敛性好，但 Z 矩阵是满阵，占用内存多。文献 [3~7] 等将快速分解算法用于配电网潮流计算中。其中，Hsiao-Dong Chiang^[6] 和 A.Monticelli^[7] 还分别对快速分解算法的收敛性进行了研究，Monticelli 的研究表明，由于在快速分解算法迭代公式推导过程中无需线路电阻与电抗之比小于 1 的条件，因此在线路电阻大于电抗时该方法仍能收敛。Mesut E.Baran 等采用支路法将支路功率和节点电压作为状态变量，使潮流方程中只有代数运算，使得配电网潮流方程具有一种简化的形式^[8]。G.X.Luo 等提出了以支路功率为迭代变量的前推回代方法^[9]。S.Ghosh 等和 D.Das 等分别给出与文献 [8] 的方法

类似的配电网潮流算法^{[10][11]}。P.Aravindhababu 等提出一种可以将负荷表示为恒功率、恒阻抗、恒导纳、恒电流或四者组合的支路法^[12]。E.Bompard 等研究了支路电流法在不同负荷条件下的收敛特性,研究表明支路电流法的收敛特性与负荷的功率因数和线路电阻与电抗之比无关^[13]。孙宏宾等的研究则论证了前推回代法用于恒功率负荷的辐射状配网潮流计算中具有与严格的牛顿法相似的收敛速度^[14]。D.Shirmohammadi 等提出一种母线法,将节点注入电流作为状态量,利用 Kirchhoff 电压定理求得母线上的电压分布^[15]。S.K.Goswami 等也采用了与文献 [15] 相同的母线法,但在解线性方程时给出了一种改进的分解方式,从而提高了收敛性^[16]。张学松等在考虑配电网分支特点的基础上,将“三带宽法”运用于配电网潮流计算中,取得了良好的效果^[17],不足是用于复杂配网需要将其划分为若干子潮流问题。Samuel.Mok 等则提出一种将配电网简化为梯形网络,然后用由 Kirchhoff 定理得到的迭代公式求解潮流的方法^[18]。

考虑到配电系统中量测点严重不足,有学者提出了区间潮流算法及模糊潮流算法,使潮流计算结果在一定的范围以内更符合实际情况,但是模糊潮流计算时间长,其计算时间一般为前推回代法的 8 倍^{[19][20][21]}。杨明皓等则提出一种配电网潮流计算的功率分布系数法,对实测配变支路按准确度加权的实测功率进行分配,而对非量测变压器支路则按功率分布系数进行功率分配计算^[22]。

配电网不良数据辨识和状态估计的主要方法有:C.N.Lu 等把量测变换成复电流或复电压量测,实现了量测雅可比阵的常数化^[23],但该方法的方法方程相间有耦合,P 和 Q 之间也有耦合,计算量大。卫志农等提出了一种基于改进牛顿法的极坐标形式的三相配网状态估计算法,该方法利用辐射配网的特点,能够适用于线路电阻与电抗之比变化较大时的情况,且计及了三相不平衡,适用于由功率的实时量测和伪量测建立起来的基本可观的系统^[24]。Mesut E. Baran 等提出基于支路电流的配电状态估计算法,

该方法以支路电流为状态变量，通过量测变换将各种量测量变换成等值的复电流量测，使法方程三相解耦，使信息矩阵与支路阻抗无关^[25]，但存在以下缺点：要求 P 和 Q 量测成对出现，这在实际配电系统中有时较难满足；要求 PQ 对的量测权系数相同，而实际电网中无功量测精度远低于有功测量精度；量测变换后等值复电流量测在迭代过程中变化大，影响了算法的收敛性。孙宏斌等提出了基于支路功率的配电系统状态估计方法，该方法克服了基于支路电流的配电状态估计算法的不足，提高了配电系统状态估计的计算效率^[26]。

1.2.2 配电网络重构

如图 1-1 所示，配电网的运行状态可以分为正常运行、故障前、故障和故障恢复四个状态^[27]。配电网络重构包括配电系统正常运行时的网络重构与故障情况下的网络重构。配电网络正常运行时通过改变联络开关和分段开关的分/合状态来改变网络拓扑，从而改变网络中的功率流，以达到降低网损、平衡负荷和提高供电电压质量的目的。故障时的配电网络重构主要为了快速恢复非故障区域供电，一般称为故障恢复。配电网络重构可以有效提高供电可靠性、降低网损、均衡负荷和改善供电电压质量，是现代配电网自动化的重要功能之一。

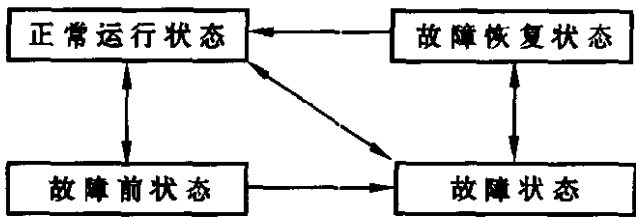


图 1-1 配电系统的运行状态

运行在正常状态时的配电网络重构的目标一般为网损最小、负荷均衡化或提高供电电压质量等。文献 [28 ~ 34] 等将数学优化理论应用于配电网络重构中，虽然利用数学优化理论可以得到不依赖于配网初始结构的全局最优解，但存在严重的“维数灾”

问题,计算时间较长。为此,人们在配电网重构中采用了各种近似技术和启发式算法,如支路交换方法^[35~47]和最优流模式法^[48~60],大大提高了优化效率,但还是不能保证总能得到全局最优解。还提出了一些随机优化方法,如模拟退火法^[61~65]、遗传算法^[66~69]等被认为是寻求全局最优解或近似最优解的一种有效手段,近年来得到了较大的发展。另外还有人提出了基于神经网络的配电网重构方法^[70~72]和基于专家系统的配电网重构方法^[73~74]。

配电网中发生故障以后,故障恢复系统要根据有关信息对配电网中发生的故障进行实时的分析和判断,提出正确有效的健全区域停电恢复策略,帮助调度员准确确定故障位置,隔离故障区域,快速恢复非故障区域供电。由于要综合考虑开关操作次数、馈线裕度、负荷恢复量、网络约束、用户优先等级等因素,因此配电网故障恢复是一个多目标、多时段、多组合、多约束的非线性优化问题。该问题的复杂性决定了难以用单纯的数学方法得到完满的解决^[75]。目前求解此类问题的主要思路是应用人工智能与数值计算相结合的方法,典型的方法有:应用启发式搜索方法寻找可能的恢复方案,并经数值计算确定可行的或优选的恢复方案^[76~79];应用模糊数学原理进行模糊规划或模糊评价,确定恢复方案^[80~82];应用遗传算法并建立评价函数,寻求该评价函数下的最优解等^[83~84];应用专家系统技术,构建规则库并进行推理^[85~87];利用模拟退火算法^[61]。

1.2.3 配电网的简化建模和分析

上述研究对配电自动化的发展起到了重要的推动作用,但是面临着计算量和占用存储空间大、速度慢、收敛困难、“组合爆炸”等实际困难。复杂配电网不仅规模巨大,而且严重缺乏量测数据,因此求解更加困难^[88],这迫使人们进行配电网的简化建模和简化分析的研究。

文献[89~91]等提出了一系列面向对象的配电元件模型并

描述了可用于程序设计的数据结构，但是上述方法仍都需要依赖馈线上的所有配电变压器的量测数据。N.D.R.Sarma 等提出了一种便于配电网重构分析的配电网简化方法，即将故障区域隔离后的各个连通系分别当作一个节点，而保留新节点之间的馈线^[92]，这个方法可以有效简化配电网，降低配电网节点规模。文献 [93~95] 等提出了利用主变电站出线负荷以及用户负荷类型、季节、日期、时段及负荷曲线等规律来确定负荷数据的方法，但是上述方法仅能根据统计的用户负荷分布情况获得极为粗糙的结果。文献 [96] 通过配电变压器的额定功率来摊分馈线出口负荷的方法来确定各个负荷的数据，结果也非常粗糙。

T.P.Wanger 等提出将负荷沿馈线按均匀分布来处理的配电网简化和分析方法^[30]，该方法可以简化配电网，但是按均匀分布处理沿馈线的负荷与实际相差较大。N.Vempati 等提出保证馈线两端电压降落相等的等效电压降落模型和保证线损相等的等效线损模型，从而将量测点之间的馈线和负荷表示为只接有一个等效负荷（馈线上的负荷总和）的一条馈线（馈线长度按其模型求出的等效长度）^[97]；文献 [98] 将等效电压降落模型和等效线损模型综合在一起，提出了双向的混合等效模型。等效电压降落模型、等效线损模型和双向的混合等效模型虽然可以有效简化配电网，同时具有较高的精度，但是它们仍需要依赖各配变的量测值，因而仍无法解决配电网中严重缺乏量测的问题。

1.3 变结构耗散网络理论体系

1998 年，作者提出了对复杂配电网进行简化建模、简化分析和优化的理论体系，即变结构耗散网络理论^[144]：将配电网的馈线开关当作节点，将馈线当作弧。定义了描述配电网潜在连接关系的网基结构矩阵和描述配电网当前连接关系的弧结构矩阵，并讨论了根据配电网潜在连接关系和馈线开关的位置推算出配电网当前连接关系的方法。定义了负荷矩阵，并讨论了根据节点的

负荷推算出馈线供出的负荷的方法, 以及根据馈线供出的负荷推算出节点的负荷的方法。在建立的模型基础上, 提出了判断和隔离故障区域的过热弧搜寻法, 讨论了配电网负荷均衡化、健全区域最优恢复和配电调度仿真等问题的处理方法。

作者在发表的一系列文献中进一步发展了变结构耗散网络理论体系: 在文献 [121]、[136] 和 [150] 中进一步使变结构耗散网络理论系统化; 文献 [145] 提出采用等长邻接表优化配电网的数据结构的方法; 在文献 [142] 中进一步提出了在严重缺乏量测数据的情形下的配电网不良数据辨识和结线分析的方法; 在文献 [1]、[115]、[116] 和 [147] 中进一步完善了基于变结构耗散网络理论的配电网故障区域判断和健全区域优化恢复方法; 在文献 [146] 中提出配电网的层和间距的概念, 论述了配电网的分层算法, 在分层模型基础上讨论了仿重合器方式的配电网故障区域判断算法, 还讨论了配电网单相接地区域的自动查找算法; 在文献 [148]、[149] 和 [151] 中提出一种采用等效负荷反映馈线上的负荷及其分布情况的配电网的简化分析方法, 这种方法只需对变电站的出线开关、馈线的分段开关和联络开关进行量测, 而不必量测馈线上的配电变压器; 在文献 [152] 和 [153] 中提出采用等效负荷模型简化配电网分析的方法, 提出了六种基本负荷分布, 求解馈线两端的电压方程和馈线沿线损耗方程, 分别获得各种分布的特征值和相似系数, 并计算出包含了六种负荷分布特征的综合特征值, 从而不需要量测馈线沿线的各个负荷, 得出馈线电压降落和沿线线损, 在此基础上进一步发展了离散负荷密度模型; 在文献 [109] 中研究了计算配电网潮流的支路电流法的收敛性; 在文献 [154] 中提出一种配电网重构的改进支路交换法; 在文献 [155] 中提出了基于环路分解的改进遗传算法, 该算法能够通过基于环路的染色体编码方法和定义的环路的特征值, 并在初始种群生成、交叉和变异过程中避免不可行解, 从而有效地提高搜索效率; 在文献 [127] 中论述了一种基于变结构耗散网络模型的以提高供电电压质量为目的的配电

网络重构方法。

本书在以上研究成果基础上，进一步补充了最新的研究成就，对基于变结构耗散网络理论的复杂配电网简化建模、简化分析和优化方法进行了系统论述。本书分为复杂配电网简化建模、复杂配电网简化分析和复杂配电网优化三篇，全书的结构安排如下：

