

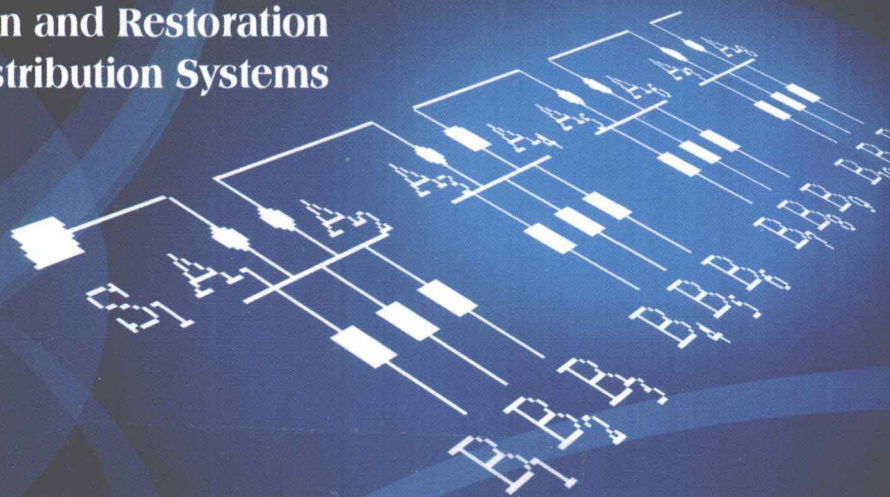


国家电网公司
电力科技著作出版项目

配电网故障定位 与供电恢复

刘 健 董新洲 陈星莺 等著

Fault Location and Restoration
for Distribution Systems



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

配电网故障定位 与供电恢复

刘 健 董新洲 陈星莺 徐石明 著
同向前 张小庆 施慎行 廖迎晨

Fault Location and Restoration
for Distribution Systems



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

前言

配电自动化是智能电网的重要组成部分，智能电网的建设，尤其是分布式电源/储能系统/微电网分散接入配电网，以及配电网高可靠性、高效运行的强烈需求，给配电自动化带来了新的挑战和发展契机。配电网故障处理是配电自动化的核心内容，对于提高供电可靠性、增强供电能力和实现电网的高效经济运行具有重要意义。

配电网故障处理包括故障定位、故障隔离和健全区域恢复供电，其理论方法已经有大量文献报道，但是在工程实施中仍需要解决许多实际问题。本书总结了作者团队在配电自动化领域十余年的研究成果，系统地论述了配电网故障定位、隔离和供电恢复的方法。

20 世纪末，我国曾经掀起了一轮配电自动化建设高潮，但大部分系统都没有发挥其应有的作用，其主要原因除了技术方面的限制，及配电网架不合理、设备不够可靠、缺乏应用主体、运行维护不到位等突出因素外，配电网故障处理方法等技术手段的不成熟也是一个重要原因。

作者团队从 20 世纪 90 年代起一直致力于配电网及其自动化领域研究，经历了上一轮配电自动化过程，深感作为科技工作者的责任之重大，在总结经验教训的基础上，结合国外先进经验和我国生产实际，对配电网故障处理进行了长期研究，本书就是这些研究成果的总结，希望能够为智能电网的建设贡献微薄之力。

本书绪论、第 2 章、第 3 章、第 4 章、第 6 章、第 12 章和第 13 章由陕西电力科学研究院刘健教授著写，第 11 章由清华大学董新洲教授和施慎行博士共同著写，第 7 章由河海大学陈星莺教授和廖迎晨老师共同著写，第 1 章和第 9 章由刘健教授和中国电力科学研究院徐石明教授共同著写，第 10 章由西安理工大学同向前教授著写，第 5 章和第 8 章由刘健教授和陕西电力科学研究院张小庆高级工程师共同著写。

感谢国家电网公司科技（智网）部、运维检修部以及各省电力公司、相关科研单位、高等学校和制造企业对本书相关工作的大力支持和帮助，感谢中国电力科学研究院盛万兴教授、赵江河教授、范明天教授、苏剑高级工程师、梁英高级工程师，国网电力科学研究院沈兵兵教授、白义传教授、沈浩东教授、顾欣欣教授、李澍森教授、吴琳高级工程师，清华大学曾嵘教授、吴文传副教授、王宾副研究员，上海交通大学刘东教授，河海大学卫志农教授，西安交通大学张保会教授、索南加乐教授、杜正春教授、张伏生教授，华北电力大学张建华教授、黄伟教授，西南交通大学何正友教授，西安理工大学姚李孝教授，山

东科汇电气股份有限公司徐丙垠教授，珠海许继电气有限公司陈勇高级工程师，积成电子股份有限公司王良研究员、周文俊高级工程师，东方电子集团有限公司丁振华高级工程师、岳振东高级工程师，四方华能电网控制系统有限公司秦利军教授等同行学者与作者团队的交流、讨论和无私教诲。

陕西电力科学研究院张志华硕士仔细校核了本书全部稿件，发现并修改了多处笔误，还绘制了大量插图，在此一并表示感谢！

由于作者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，希望读者批评指正。

作 者

2012 年春

符 号 表

1. 矩阵（数组）类符号说明

D: 网架邻接表

B: 母线数据结构

E: 关联矩阵

A: 最小配电区域数据结构

F: 馈线数据结构

C: 连接系数数据结构

C': 广义连接系数数据结构

MT: 模式化组类型数组

GT: 有意识孤岛数据结构

VT: 节点类型数组

VS: 节点状态数组

LVT: 节点额定容量数组

LV: 节点负荷电流数组

PV: 节点有功功率数组

QV: 节点无功功率数组

ET: 边类型数组

G: 故障信息矩阵

PR: 证据信息矩阵

2. 变量类符号说明

S: 视在功率

P_i : 有功功率、概率

Q: 无功功率

I_i : 电流

U_i : 电压

R: 电阻

X: 电抗

L: 电感

C: 电容

$\Delta(i, j, \dots, k)$: 由开关 $i, j, \dots, k$ 围成的配电区域

$dis(i, j)$: 从开关节点 i 到开关节点 j 的间距

$H[i]$: 节点的层号

x : 分段开关的 X -时限值

x_L : 联络开关的 X_L -时限值

t_1 : 合闸速断方式下分段开关一侧带电后合闸延时时间

t_y : 合闸速断方式下分段开关或联络开关闭锁其速断保护所需稳定时间

t_{Π} : 合闸速断方式下联络开关一侧失电后合闸延时时间

t_{ϕ} : 合闸速断方式下联络开关相邻的馈线段发生永久故障后，故障段源端的分段开关闭锁在分闸状态所需的最大延时时间

$\Delta t_{\parallel}(A, B)$: 两相邻联络开关 A 和 B 的合闸间隔时间

Δ_i : 第 i 个配电区域

$P(\Delta_j | G)$: 故障信息矩阵 G 下，配电区域 Δ_j 发生 m 相短路故障的概率

$P(PR | \Delta_j)$: 配电区域 Δ_j 发生故障时符合证据信息矩阵 PR 的概率

$P(\Delta_i | PR)$: 证据信息矩阵 PR 下，故障就发生在配电区域 Δ_i 的概率

Δt_{jc} : 保护动作时间级差

λ : 失电负荷权重系数、甩负荷方案特征值、风机的叶尖速比

AIHC: 用户平均停电时间

$\zeta_{\max}$: 配电网的线路最大利用率

$l_{\max, i}$: 第 i 条馈线的极限容量

$\alpha(t)$: 配电网馈线的实时利用率

$\gamma(t)$: 配电网备用容量的实时缺额率

$\bar{\alpha}$: 配电网馈线的平均利用率
 $\bar{\gamma}$: 配电网备用容量的平均缺额率
 μ : $N-1$ 准则满足时间比率
 ϵ : $N-1$ 准则满足程度
 $F(\tau\%)$: 满足 $N-1$ 准则的风险度
 $\tau_c\%$: 满足 $N-1$ 准则的临界负荷调整比例
 χ_j : 节点 j 的状态系数
 η : 甩负荷策略参数
 $\Delta l_{\min}$: 线路或连接系最小甩负荷量

W : 电容储存的能量
 γ_A : 电容器的能量利用率
 η_C : 开关变换器的转换效率

3. 图形类符号说明

: 合闸电源开关
: 分闸电源开关
: 合闸断路器
: 分闸断路器
: 合闸负荷开关
: 分闸负荷开关

目 录

前言

符号表

绪论	1
第 1 章 面向故障处理的配电网建模	9
1.1 变结构耗散网络模型	9
1.2 模式化接线方式	16
1.3 配电网的分层模型	21
1.4 配电网拓扑建模	23
1.5 本章小结	23
第 2 章 重合器与电压—时间型分段器配合的故障处理	24
2.1 基本原理	24
2.2 系统整定	27
2.3 本章小结	34
第 3 章 合闸速断配合的故障处理	35
3.1 基本原理	35
3.2 存在问题及改进方法	37
3.3 系统整定	38
3.4 本章小结	40
第 4 章 基于 GOOSE 的邻域交互快速自愈式故障处理	42
4.1 基本原理	42
4.2 瞬时性故障快速恢复供电与提高可靠性的关键技术	46
4.3 本章小结	50
第 5 章 基于集中智能的配电网故障定位与隔离	52
5.1 集中智能故障定位基本原理	52
5.2 集中智能型配电自动化系统的故障隔离	57
5.3 非健全信息下的容错故障处理	59
5.4 本章小结	72
第 6 章 继电保护与配电自动化协调配合	73
6.1 配电网的多级保护配合	73
6.2 多级级差保护与集中智能故障处理的协调配合	76

6.3	多级级差保护与电压—时间型馈线自动化的配合	80
6.4	多级级差保护与合闸速断型配电自动化的配合	81
6.5	多级级差保护与邻域交互快速自愈式配电自动化的配合	82
6.6	本章小结	84
第7章	故障隔离后健全区域供电恢复的优化	85
7.1	健全失电区域的供电恢复数学模型	85
7.2	基于启发式搜索的配电网健全区域供电恢复优化	87
7.3	基于 NSGA- II 的配电网健全区域供电恢复优化	100
7.4	基于多目标粒子群算法的配电网健全区域供电恢复优化	112
7.5	基于变结构耗散网络模型的供电恢复优化	119
7.6	本章小结	122
第8章	配电网的模式化故障处理	123
8.1	多分段多联络接线和多供—备接线配电网的最大利用率	123
8.2	多分段多联络接线配电网的模式化故障处理	124
8.3	多供—备配电网的模式化故障处理	126
8.4	互为备用配电网的模式化故障处理	128
8.5	4×6 接线配电网的模式化故障处理	129
8.6	双射网、对射网以及双环网的模式化故障处理	130
8.7	配电网架的安全评估和设备利用率分析	132
8.8	本章小结	142
第9章	配电网大面积断电故障处理	143
9.1	基本原理	143
9.2	以甩负荷量最小为目标的配电网网络重构数学优化方法	144
9.3	以甩负荷量最小为目标的改进禁忌搜索配电网网络重构方法	150
9.4	开关操作顺序的生成	155
9.5	本章小结	159
第10章	分布式电源的故障电流特性及影响	161
10.1	分布式电源	161
10.2	分布式电源接入配电网的作用与影响	172
10.3	分布式电源的故障电流特性	175
10.4	含分布式电源的配电网短路电流计算	182
10.5	分布式电源的异常处理与技术要求	186
10.6	本章小结	191
第11章	单相接地故障的处理方法与技术	192
11.1	接地故障种类及保护策略	192
11.2	中性点经小电阻接地系统的高阻接地故障检测	194
11.3	中性点不接地系统的接地保护	198
11.4	中性点经消弧线圈接地系统的接地保护	203

11.5	中性点非有效接地系统的单相接地选线技术	206
11.6	中性点非有效接地系统预防性接地保护技术	212
11.7	中性点非有效接地系统单相接地测距技术	213
11.8	本章小结	217
第 12 章	电容储能的自动化终端备用电源	218
12.1	超级电容器储能的优越性	218
12.2	超级电容器储能的备用电源设计	219
12.3	本章小结	225
第 13 章	配电网故障处理的应用	226
13.1	配电自动化系统的基本设计原则	226
13.2	配电网故障处理流程	228
13.3	本章小结	230
参考文献		231

绪 论

配电自动化是智能电网的重要组成部分，而配电网故障处理是配电自动化的核心内容，对于提高供电可靠性、增强供电能力和实现电网的高效经济运行具有重要意义^{[1][2]}。

配电网故障处理包括故障定位、故障隔离和健全区域恢复供电，其理论方法已经有大量文献报道，但是在工程实施中仍需要解决许多实际问题。本书总结了作者团队在配电网自动化领域十余年的研究成果，系统地论述配电网故障定位、故障隔离和供电恢复的方法。

0.1 面向故障处理的配电网建模

针对配电自动化系统大量缺乏负荷的量测数据这一问题，作者提出了基于图论的配电网简化建模方法，即配电网的变结构耗散网络模型^[3]，并对该模型进行了完善^[4~6]，给出了数据结构^[7]。但是，随着认识的逐渐深入，尤其是为了应对分布式电源分散接入配电网的趋势和发挥模式化接线配电网的优势，以及为了便于进行故障处理和自动化系统的整定，还需要对配电网的模型和数据结构进行更深入的研究。为此，本书第1章在对配电网的变结构耗散网络模型进行论述的基础上，进一步定义了最小配电区域、馈线、连接系、模式化接线组、有意识孤岛5种结构单元，并给出了所建立的变结构耗散网络模型的数据描述结构；论述了辐射状接线、手拉手接线、多分段多联络接线、多供1备接线、单射网接线、双射网接线、对射网接线、单环网接线、双环网接线、4×6接线的构成，并给出了各自的模板和描述结构；建立了配电网的节点分层模型和区域分层模型。上述模型和结构是配电网故障定位、隔离和供电恢复策略的基础。

0.2 就地型故障处理

按照故障处理方式的不同，配电自动化系统的故障处理模式可以分为就地型、集中型和混合型三类。就地型故障处理模式不需要配电自动化主站参与就能完成故障处理，分为重合器方式和智能分布式两类。

1. 重合器方式

重合器方式不需要建设通信网，仅仅依靠自动化开关的相互配合就能完成故障处理。

重合器与电压—时间型分段器配合的故障处理方式是重合器方式中的典型代表之一^[8~10]，应用该系统的关键在于重合器和电压—时间型分段器参数的恰当整定，若整定不当，不仅会扩大故障隔离范围，也会延长健全区域恢复供电的时间。文献[11]给出了重合器和电压—时间型分段器参数的一种整定方法，但是仍不够完善。作者在文献[12]中建议了一种基于配电网分层模型的重合器和电压—时间型分段器参数整定方法，解决了辐射状配电网、“手拉手”环状配电网和简单多分段多连接配电网的参数整定问题。本书第2章在对重合器与电压—时间型分段器配合故障处理模式的基本原理进行论述的基础上，系统论述了重合器和电压—时间型分段器参数的整定方法。

作者提出的合闸速断配合的故障处理是重合器方式的另一种典型模式^[13]，仅需一次重合即可隔离故障区域。但是，文献[13]提出的方法具有瞬时故障处理时间长和因过负荷而扩大故障范围的不足，文献[14]中提出了将配电线路电源开关保护改为两次重合闸，分段开关增加失压延时分闸功能，有效提高了瞬时故障处理速度；还提出通过分段开关和联络开关分别增加失压闭锁功能，避免了因过负荷而扩大故障范围的现象。应用合闸速断配合的故障处理的关键也在于参数的恰当整定，文献[14]将合闸速断配合故障处理的参数整定转化为线性规划问题求解，解决了合闸速断配合的故障处理系统参数整定问题。本书第3章将详细介绍合闸速断配合故障处理方法及其改进方法，并论述合闸速断配合故障处理的参数整定方法。

还有一些重合器方式故障处理方法，如重合器与重合器配合方式、重合器与过流脉冲计数型分段器配合方式等，在本书中未涉及，感兴趣的读者可参阅文献[1]、[8]和[11]。

2. 智能分布式

智能分布式故障处理需要建设通信网，依靠各个配电开关处的智能终端相互通信和配合实现故障定位、故障隔离和恢复供电。

由于城市配电网供电半径较短、导线截面较大以及保护互感器的精度等原因，难以根据短路电流差异实现故障的选择性切除；另外，由于分段较多，也难以设置大量的延时时限级差实现故障的选择性切除。此外，尤其是采用断路器的级联开关站或户外箱式环网柜，由于层次较多，即使采用微机保护，故障时保护配合的选择性也很差，往往会发生越级跳闸而扩大故障影响范围。随着智能变电站技术的发展，基于GOOSE（面向通用对象的变电站事件）的高速网络通信方式逐渐成熟，为实现具有迅速切除故障并不造成非故障区域停电功能的快速自愈式分布智能馈线自动化系统提供了手段。作者提出的基于GOOSE的邻域交互快速保护配合故障处理方式有效解决了上述问题^[15]，它是智能分布式故障处理的典型方法之一。文献[16]进一步完善了邻域交互快速保护配合故障处理方法，解决了瞬时性故障与永久性故障判别问题，并能在通信通道障碍的情况下使系统仍能有效地进行故障恢复。文献[16]还提出了一种开关拒分处理措施，可以有效减少开关拒动对供电恢复造成的不利影响。本书第4章将详细论述邻域交互快速保护配合故障处理方法。

“面保护”也是一类智能分布式故障处理方法。“面保护”指继电保护除了利用自身采

集的信息外,还需利用系统中通过通信方式采集的其他信息,作出故障判断和动作出口,以保证自身设备或局部系统的运行。“面保护”在本书中未涉及,感兴趣的读者可参阅文献 [17~20]。

0.3 基于集中智能的配电网故障定位

集中智能故障处理模式基于配电自动化主站、终端和通信网络构成的配电自动化系统,由配电自动化主站根据所采集到的故障信息实现故障定位,近年来科研人员在这方面已经取得了大量的研究成果。

文献 [21] 提出了一种配电网故障区段判断的统一矩阵算法,文献 [22、23] 对其进行了改进,但是都需要进行矩阵相乘。文献 [24] 提出了一种基于有向图的配电网故障区域判断方法,避免了矩阵相乘和规格化处理。文献 [25] 提出了一种基于分层拓扑模型的配电网故障定位算法,文献 [26] 提出了一种基于树型结构的配电网故障恢复算法,文献 [27] 提出一种适用于多电源复杂配电网故障定位的新算法,文献 [28] 提出了一种基于模式识别理论的配电网故障定位算法,文献 [29] 提出了一种适用于多电源复杂配电网故障定位的新算法,文献 [30] 探讨了基于多代理技术的配电网故障处理方法,文献 [31] 提出基于信息融合技术的电网故障诊断方法。

上述研究成果在配电自动化系统中发挥了积极的作用,但是由于配电设备、配电终端和通信网络都是工作在户外恶劣环境下,容易发生漏报或错报故障信息现象,因此要实现可靠的故障定位,还必须研究在非健全信息下的容错故障的定位问题。

在非健全信息容错故障诊断方面,文献 [32~35] 研究了基于遗传算法的配电网故障定位方法,具有一定的容错能力,文献 [36] 提出了一种在故障信息不足时基于电流连续性判据的配电网故障定位方法,文献 [37] 提出了一种基于粗糙集的配电网故障定位方法,文献 [38] 提出了一种基于粗糙集 (RS) 和神经网络 (NN) 的配电网故障定位方法,文献 [39] 研究了模糊推理系统在配电故障恢复中的应用,文献 [40] 研究了利用故障投诉信息并基于主观贝叶斯法的配电网故障不精确定位方法,文献 [41~44] 研究了基于贝叶斯法的配电自动化系统故障定位方法,文献 [45] 提出了一种改进的配电网故障定位与恢复方法,针对开关拒动的情况对恢复策略进行了一些改进。

对于分布式电源分散接入配电网的情形,因分布式电源的容量一般较小,所以故障所在区域的分布式电源侧端点经历的故障电流较小,而且经逆变器并网的分布式电源的故障电流会很快被电力电子器件切除,往往造成波形畸变使故障功率方向判断难度增大。作者在文献 [3、6] 中提出的过热区域搜索法是解决上述问题的一种方法。

本书第 5 章将结合作者团队的科研工作详细论述配电自动化系统故障定位方法。

0.4 配电网故障处理

在配电网发生故障后,总会有一台开关迅速跳闸切除故障电流,随后配电自动化主站根据故障定位结果下达遥控命令将故障隔离在最小范围。

一些供电企业选择采用断路器作为馈线开关,期望在故障发生时,故障点上游离故障区域最近的断路器能够立即跳闸遮断故障电流,从而尽量避免整条线路受到故障的影响^[46]。但是在实际情况当中,故障发生后往往由于各级开关保护配合问题造成越级跳闸和多级跳闸等现象^[47],而且给永久性故障和瞬时性故障的判别也带来困难。

为了避免上述现象,一些供电企业干脆采用负荷开关作为馈线开关^[48],这样虽然解决了多级跳闸问题并为永久性故障和瞬时性故障判别提供了方便,但是无论馈线任何位置发生故障都会引起全线短暂停电,因此存在用户停电频率高的问题。

随着馈线主干线电缆化和绝缘化比例的提高,主干线发生故障的机会显著减少,故障大多发生在用户支线。因此,一些供电企业在用户支线入口处配置了具有过流跳闸和单相接地跳闸功能的“看门狗”开关^[49],目的在于实现用户侧故障的自动隔离,防止用户侧事故波及到配电线路馈线主干线,并确立事故责任分界点。

中压配电网各个开关之间继电保护与配电自动化系统的协调配合是解决上述实际问题的关键,文献[50~55]对此问题进行了探讨,本书第6章将结合作者团队的科研工作探索继电保护协调配合的配电网故障处理问题。

0.5 配电网供电恢复

在配电网故障隔离后,可以恢复受故障影响的健全区域供电,但是需要研究供电恢复方案。在这方面也有许多研究。

文献[56、57]采用数学优化方法确定供电恢复策略,这类方法的优点是当目标函数存在最优解时,利用优化理论可以得到不依赖于配电网初始结构的全局最优解。但在实际应用中,由于问题的维数过大,计算时间较长,易产生“组合爆炸”问题。

文献[58~60]采用启发式方法,以一定的规则指标来限定搜索的方向,以一定的准则评价可行的供电恢复方案。文献[58]提出了联络开关的备用容量、联络开关与发生电压越界的母线之间的电气距离、分段开关的可转移负荷量三个指标,并根据这三个指标建立搜寻供电路径的启发规则,认为发生支路电流越限比发生节点电压越限情况严重,同时考虑负荷的优先等级,将整个恢复过程分为自馈线恢复、一级支持馈线恢复(整区恢复、分区恢复)、转移负荷和切负荷。文献[59]将直接负荷控制引入配网供电恢复问题,并采用启发规则搜索最优恢复路径。文献[60]在搜索问题中加入了最大范围的多用户孤岛运行和在配电网末端形成孤岛的启发规则,利用具有层次特性的“根树”对分布式发电孤岛划分问题建模,确定多用户孤岛的最大供电范围。由于启发式方法将经验转化为相应的搜索规则,有效地缩小了解空间,能迅速得到供电恢复方案,比较适合在线计算。

文献[61~70]采用人工智能算法求解配电网供电恢复方案。文献[61]提出一种用于配电网故障后恢复供电的综合智能专家系统。文献[62]将专家系统与有色Petri网络模型相结合,建立符合操作规程的供电恢复推理机制。文献[63]使用基于模糊集的优化算法来优化开关组合方案,该算法针对馈线故障进行供电恢复研究,重点强调馈线间的负荷平衡。文献[64]采用禁忌搜索算法求解,综合考虑开关操作

次数最少和网损最小的故障恢复重构的混合整数规划模型。文献 [65] 采用并行遗传算法进行供电恢复问题求解, 最终得到能够恢复对大多数用户供电的方案。文献 [66] 用遗传算法求解, 综合考虑分布式电源和冷负载启动的配电网供电恢复问题。文献 [67] 将一种新型的非支配排序的多目标遗传算法 (NSGA-II) 用于配电网的多目标供电恢复问题, 该算法以 Pareto 非支配解的概念为基础, 通过非支配排序、精英策略选择, 保证了最优解集的最优性能, 同时在恢复方案评价过程中无须权重系数, 即将多目标转换成单目标, 从而最大限度地保持了各个优化目标之间的独立性。文献 [68] 采用离散粒子群优化算法处理输电网的负荷恢复问题。文献 [69] 提出了用具有局部决策功能的网络细胞表示含分布式电源 (DG) 的孤岛网络, 将含 DG 的配电网供电恢复分为三个阶段。第一阶段按照尽可能地利用 DG 的容量恢复供电这个原则形成网络细胞; 第二阶段在满足多孤岛并列运行约束条件的前提下网络细胞膨胀; 第三阶段与上级网络同步运行。文献 [70] 采用深度编码技术对配网进行拓扑, 然后采用进化算法求解, 得到供电恢复方案。

本书第 7 章将介绍配电网供电恢复的启发式搜索方法、非支配排序遗传算法 (NSGA-II)、多目标粒子群优化算法 (MOPSO), 以及量测数据缺乏时基于变结构耗散网络模型的供电恢复策略。

近年来, 随着各地配电网改造的深入以及配电网模式化接线的推广, 配电网的网架结构趋于规范化、合理化^[73~78], 国内外研究表明, 多分段多联络、多供一备、互为备用和 4×6 等模式化接线方式有助于提高配电设备利用率; 双射网、对射网和双环网等模式化接线方式有助于进一步缩短供电恢复的时间, 从而提高用户的供电可靠性。上述模式化接线网架的优点都必须在故障处理过程中采取相应的模式化处理措施才能得到发挥, 而不是仅仅网架结构符合模式化接线要求就行了。目前在这个方面设计、运行和管理人员的认识还不够充分, 有必要对配电网故障处理与模式化接线的配合问题进行更深入的研究。

作者团队对配电网模式化故障处理方法进行了研究^[79,80], 本书第 8 章将系统论述配电网模式化故障处理方法。

已有的应用配电自动化技术实现故障隔离与供电恢复以及基于模式化接线配电网的模式化故障处理方法的研究成果, 大部分是针对配电网发生馈线故障这类小扰动的情形^[81~84]。但是有时会发生造成一条甚至多条 10kV 母线失压等影响较大的事故, 如自然灾害造成输电线路倒塔、外力破坏或输电线路故障、主变压器或 10kV 母线检修等, 会造成配电网大范围长时间停电。

近年来欧美发生的多次电网大停电事故, 给电力工作者敲响了警钟^[85,86]。尽管造成 10kV 母线失压故障发生的概率较小, 但其造成大面积停电的危害极大。随着电网的建设与改造, 配电网的电源点、网架结构以及分段和联络趋于合理, 使得通过中压配电网大规模地转移负荷成为可能, 配电网自动化系统的实施, 使得大批量的开关能够在很短的时间内操作完毕。

作者团队在文献 [87] 中研究了紧急状态下配电网大面积断电快速恢复的算法, 以甩负荷最少为目标, 将受影响的负荷最大限度地转移到健全电源点上。文献 [88] 采用改进

二进制粒子群算法、文献 [89] 采用 CSP 算法求解配电网大面积断电恢复问题。作者在文献 [90] 中建议了一种基于改进禁忌搜索 (Tabu) 算法的配电网大面积断电供电恢复方法, 并建议了一种网络重构过程中的开关操作顺序生成方法。

本书第 9 章将结合作者团队的科研工作系统论述配电网大面积断电快速恢复的算法和开关操作顺序生成方法。

0.6 分布式电源的故障电流特性与影响

分布式电源 (DG) 作为传统集中式电源的补充, 有利于提高配电网的可靠性、经济性、抗灾性和智能化水平。但是, DG 的引入给传统配电网设计、运行和保护带来了新的问题。文献 [91] 全面论述了 DG 对配电网的影响, 针对这些影响, 文献 [92] 对 DG 的并网特性提出了基本技术要求。

DG 向配电网提供一定的短路电流, 从而深远地影响了配电网的故障处理。DG 的短路电流特性与其并网接口类型有关, 电机类型 DG 的短路电流特性取决于发电机的种类和参数, 而变流器类型 DG 的短路电流特性主要取决于变流器的控制策略和控制参数。文献 [93、94] 详细论述了同步发电机的短路特性和短路电流计算方法, 文献 [95、96] 分析了鼠笼异步发电机和双馈异步发电机的短路电流特性。

作者团队近年来一直从事并网变换器与电能质量的研究。文献 [97] 研究了 DG 常用的电压源变换器与电网之间连接电抗的取值问题, 文献 [98] 研究了光伏并网变换器的孤岛保护问题, 文献 [99] 提出了一种基于三相不平衡功率的三相电压不平衡度的计算方法, 可用于评价 DG 引起的电网电压不平衡程度。

本书第 10 章在介绍 DG 及其对配电网影响的基础上, 着重分析了 DG 在配电网短路时的故障电流特性, 论述了 DG 对配电网短路电流贡献的计算方法, 并从不同方面讨论了 DG 的技术要求。

0.7 单相接地故障处理

单相接地故障是配电网的主要故障形式之一。中性点接地方式不同, 接地故障所表现出的故障特征和后果、危害完全不同, 相应的处理策略也不相同。

中性点有效接地系统单相接地故障时, 零序过电流保护可有效动作。文献 [100~102] 论述了中性点有效接地系统高阻接地故障、零序反时限过电流保护和基于三次谐波电流幅值及相位的接地保护。

中性点不接地系统发生单相接地故障时零序电流小, 只要求保护有选择性地发出接地告警信号, 一般情况下不需要跳闸。为了减小单相接地故障发生后的接地电容电流, 中性点会加装消弧线圈。这也使得单相接地故障的危害进一步减轻, 但使得有选择性的接地保护构成更加困难。

针对中性点非有效接地系统单相接地保护难题, 文献 [103] 进行了基于同一母线上所有出线零序电流的单相接地选线研究, 提出了基于群体比幅比相原理的单相接地选线方法。

文献 [104~106] 在故障分量网络中分析了单相接地故障电流行波, 证明了单相接地初始行波与中性点接地方式无关, 为解决中性点非有效接地系统单相接地选线问题提供了新的思路, 并提出了利用行波信息的单相接地选线技术。

基于电流行波的中性点非有效接地系统单相接地选线技术已经在现场应用, 并记录了永久性故障形成过程中的行波故障信息。这些反映故障形成过程的行波信息的获取为研究预防性保护提供了可能。基于行波的单相接地故障预防构想, 利用永久性故障发生前检测到的故障先兆实现故障预防, 减少事故发生, 把事故消灭在萌芽状态。

单相接地故障发生后, 准确的故障测距能够帮助维修人员迅速赶赴现场排除故障, 恢复正常供电, 不仅大大提高了供电可靠性, 也大幅度减少了巡线工作量, 提高了工作效率。文献 [107] 在单相接地故障初始行波分析的基础上, 提出了基于零模和线模初始行波时间差的单相接地测距方法, 为配电网单相接地测距提供了可能。

本书第 11 章在介绍单相接地故障种类及保护策略的基础上, 着重分析了中性点经小电阻接地系统的高阻接地故障特征和中性点非有效接地系统的单相接地故障特征, 论述了高阻接地故障检测方法、单相接地选线方法和单相接地保护方法, 提出了基于行波的预防性接地保护技术和单相接地测距技术。

0.8 配电自动化终端备用电源

在电力系统监测、监控和自动化系统中, 开关电源是智能终端设备的关键部件之一, 其输入一般来自电压互感器二次侧或配电变压器二次侧。但是在故障或其他各种原因导致输入电源失去的情况下, 这些智能终端设备还必须维持工作一段时间, 否则就不能完成故障检测、处理和继电保护功能以及信息记录和上报功能, 因此需要采取储能措施。

在变电站内的智能终端设备, 可以采用蓄电池储能构成备用电源系统, 但是安装在户外环网柜、柱上开关、配电变压器等的智能终端设备, 需要在恶劣的环境下工作, 采用蓄电池对于设备可靠性或维护方便性而言都不理想。

20 世纪末, 我国曾经掀起了一轮配电自动化建设高潮, 但大部分系统都没有发挥其应有的作用, 主要原因之一就是这些系统都采用蓄电池作为储能部件, 在运行一段时间后蓄电池陆续损坏失效, 严重影响了故障处理功能的实现。

实际上对于绝大多数户外智能终端设备, 在失去电源时仅需要维持短暂的工作时间即可, 例如, 对于馈线终端单元 (Feeder terminal unit, FTU), 只需在失电时上报故障信息和开关状态, 必要时分断该开关即可; 对于环网柜监控终端, 只需在失电时上报故障信息和开关状态, 并接收来自配电自动化主站的命令对相应的开关进行必要的操作即可。

随着科学技术的发展, 超级电容器和大容量电解电容器技术已经日趋成熟。与蓄电池相比, 电容器具有充电速度快且管理方便、寿命长、体积小、重量轻等诸多优点, 是一种很有发展前景的电力储能设备并且已经成功地应用在电力系统中^[108, 109]。

从户外智能终端设备在失电后需要一段短暂时间且平均功率较小的维持电源供电的需求看, 采用超级电容器和大容量电解电容器作为储能手段是完全可行的^[114], 一些城市已经在配电自动化系统中尝试采用超级电容作为备用电源储能手段, 并在实践中检验

了其可行性。

作者团队在文献 [111、112] 中论述了适用于配电自动化系统的电容储能备用开关电源分析和设计方法，本书第 12 章将论述上述内容。

本书第 13 章给出配电自动化系统的基本设计原则和配电网故障处理流程。