



配电系统 综合评价理论与方法

王成山 罗凤章 著



科学出版社

配电系统综合评价 理论与方法

王成山 罗凤章 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

配电系统是电力系统的重要组成部分,其建设和发展近年来受到了广泛关注。配电系统的综合评价是配电系统精细化规划、建设、改造和运行的基础性工作。本书旨在对配电系统综合评价工作涉及的理论和方法进行系统总结,以期推动这一工作的科学化。本书第1章概述了配电系统评价工作的内容、要求及难点;第2~5章重点介绍了配电系统综合技术评价工作涉及的分析计算理论,包括配电系统潮流计算、短路计算、网损计算、接线模式识别、自动安全性校验、运行方式优化、供电能力分析、可靠性评估等;第6章阐述了配电系统经济评价工作中涉及的各类指标计算方法;第7章介绍了配电系统综合评价指标体系和系统化的评价方法;第8章介绍了配电系统计算机辅助综合评价系统应具备的功能及系统框架。

本书适合配电系统规划、建设、改造和运行等相关领域的科技工作者阅读,也可供高等院校电力系统及其自动化专业的教师、研究生和高年级本科生参考。

图书在版编目(CIP)数据

配电系统综合评价理论与方法/王成山,罗凤章著. —北京:科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-033868-6

I. 配… II. ①王… ②罗… III. 配电系统—综合评价 IV. TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 045861 号

责任编辑:姚庆爽/ 责任校对:朱光兰
责任印制:赵 博/ 封面设计:耕 者

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

*

2012年4月第一版 开本:B5(720×1000)

2012年4月第一次印刷 印张:17

字数:330 000

定价:68.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

电力系统由发电、输电、配电和用电等各部分系统组成。配电系统作为电力输送到用户的最后一环,与用户的联系最为紧密,对用户的影响也最为直接,是保证供电质量、提高电网运行效率、创新用户服务的关键环节。随着社会经济的发展,配电系统的建设、运行和管理已进入“精细化”阶段,作为智能电网发展的重要组成部分,配电系统获得了全社会的广泛关注。

配电系统是城市现代化建设的重要基础设施,建设和改造投资巨大。仅“十一五”期间,我国用于配电系统建设和改造的费用就高达上万亿元。随着改造后配电系统运行中暴露的问题越来越多,尤其是面对后续大量建设资金的持续投入,配电系统的管理和运行者不再满足于对一些基本数据的掌握,而是需要挖掘更深层次的配电系统相关信息,从经济性、安全性、供电可靠性、系统协调性、发展适应性等多方面掌握量化指标,以实现不同地区配电系统间的横向量化比较、系统改造建设前后的纵向量化分析,挖掘配电系统存在的技术瓶颈,确定已建成配电系统的供电能力、满足未来负荷需求增长的能力、城市核心地区的抗大面积停电能力,等等。总结配电系统建设改造过程中的经验教训,可为未来的配电系统规划和改造建设提供有针对性的依据,进而提高系统建设和运行的经济性以及供电可靠性。对配电系统实现科学、全面的量化分析和评价是全面提升配电系统建设、运行和管理水平的一项基础性工作。

针对复杂配电系统进行综合评价,面临着很多困难。配电系统结构复杂,设备数量庞大,建设改造更新频繁,评价所涉及的因素众多。简单依据设备规模、负载率等单方面指标的统计结果,依赖专家经验定性分析评价配电系统,已不能满足未来配电系统科学化管理的需要。对于实际大规模配电系统,既要从整体上得到技术评价结果,又要在关键点上得到细致的量化指标。如何科学地获取完整、系统、宏观与微观兼顾的量化评价结果,将是一项十分具有挑战性的工作。

面对我国配电系统建设改造科学发展的重大需求,本书从配电系统综合技术评价的指标体系、建模理论、评价方法、系统开发和工程应用等方面系统地介绍了配电系统综合评价的理论和方法,试图为全面、完整地认识配电系统奠定科学的理论基础。通过建立数学模型,综合分析配电系统运行情况,细化反映配电网技术和经济水平的评价指标体系,构建多目标、多层次、多属性的评价方法,以为复杂配电系统综合量化评价的科学化提供方法上的指导,进而为提高配电系统的建设、运行和管理水平,把握配电系统发展方向,提高配电系统的经济和社会效益起到积极

的推动作用。

本书所介绍的内容是作者所在研究组在配电系统研究领域近十年科研工作成果的总结,期间得到了国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目、国家高技术研究发展计划(863 计划)项目、国家自然科学基金项目等的支持。在近十年的研究过程中,项目组完成了上千项实际配电系统相关的研究工作,期间获得了来自实际生产部门许多专家的大力帮助。从实际工作出发,这些专家提出了许多需要解决的难点问题,正是与他们的合作促成了本书中许多理论成果的取得以及成果的实用化。本书相关研究成果获得了天津市科技进步一等奖和国家科技进步二等奖。在此,对曾经给予本研究组大力帮助的各实际生产部门的专家表示衷心的感谢。

在配电系统综合评价领域,作者所在的研究组培养了一批硕士和博士研究生,其中一些人毕业后留在了研究组继续开展相关工作,另一些人则离开学校走向了实际工作岗位,正是他们辛勤的创新性工作,深化了配电系统综合评价的基础理论,科学地发展了配电系统评价方法,开发了实用化的综合评价系统,并将研究成果在大量实际工程中加以验证。本书一些内容参考了研究组内这些老师和研究生的学术或学位论文,在这里对为本书作出贡献的葛少云、王守相、肖峻、刘洪等几位老师以及段刚、吴建中、谢莹华、王赛一、刘自发、唐晓莉、刘姝、王跃强、史常凯、高海霞、何丽薇、于波、崔艳妍、白慧、吕跃、王博、王哲等研究生表示衷心的感谢。同时特别感谢余贻鑫院士对本书相关研究工作的指导和支持。

在本书写作过程中,一直得到了科学出版社相关领导和编辑的鼓励和支持,他们为本书顺利出版做了大量细致而辛苦的工作。在此,作者对他们的辛勤劳动表示衷心的感谢。

本书的大部分内容提炼自实际工程问题。研究工作与生产实际紧密结合,有针对性地解决实际工程问题,一直是作者所在研究组科研工作追求的目标。作者希望本书能够达到抛砖引玉的效果,对广大配电系统工作者来说有一定的参考价值,能够为推动我国配电系统的技术进步有所贡献。本书写作过程历时 4 年,尽管作者把写好这本书视为一种责任,但也有很大的压力。在写作过程中虽然对体系的安排、素材的选取、文字的叙述试图精心构思和安排,但由于配电系统综合评价工作涉及面广泛,限于作者水平,本书内容中可能存在不妥之处,真诚地期待专家和读者批评指正。

作 者

2011 年 10 月于天津大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 现代配电系统	1
1.2 配电系统综合评价的目的及意义	2
1.3 配电系统综合评价的主要内容	3
1.4 配电系统综合评价工作的复杂性	6
参考文献	6
第 2 章 配电系统基本分析理论	8
2.1 配电系统潮流计算	8
2.2 配电系统短路计算	11
2.2.1 短路故障类型及特点	12
2.2.2 短路故障的分析方法	13
2.3 配电系统线损计算	17
2.3.1 线损电量基本计算方法	18
2.3.2 线损电量区间计算理论	23
2.4 配电系统网络接线模式自动识别	30
2.4.1 接线模式识别理论基础	30
2.4.2 配网接线模式识别方法	31
2.4.3 接线模式自动识别示例	34
2.5 配电系统自动安全校验	36
2.5.1 “N-1”安全准则	36
2.5.2 基于规则的配电系统“N-m”自动校验方法	36
2.5.3 配电系统自动“N-m”校验流程	39
2.5.4 自动“N-1”校验典型示例	40
参考文献	42
第 3 章 配电系统运行优化理论	45
3.1 引言	45
3.2 配电系统网络运行结构优化	46
3.2.1 问题的提出	46
3.2.2 问题的数学模型描述	46

3.2.3	问题求解方法	47
3.2.4	针对负荷组合序列的供电路径优化	48
3.2.5	基于最短路遗传算法的网络重构全局优化	54
3.2.6	算例分析	56
3.3	配电系统无功电源运行优化	56
3.3.1	问题的提出	56
3.3.2	无功优化数学模型	59
3.3.3	问题求解方法	60
3.3.4	算例分析	62
	参考文献	65
第4章	配电系统供电能力分析	68
4.1	概述	68
4.2	配电系统供电能力分析方法	69
4.2.1	计及“N-1”准则的供电能力基本概念	69
4.2.2	供电能力分析的最优化方法	74
4.2.3	供电能力分析的解析方法	90
4.3	供电能力相关评估指标	99
4.3.1	最大供电能力指标	99
4.3.2	供电能力适应性指标	100
4.4	案例分析	104
4.4.1	站内主变运行方式分析	104
4.4.2	中压配电系统典型接线模式分析	110
4.4.3	配电系统模块化供电规模分析	118
4.4.4	配电网络最优供电转移能力分析	122
4.4.5	配电系统典型组网方式分析	123
	参考文献	125
第5章	配电系统可靠性分析	128
5.1	概述	128
5.2	基于元件的可靠性分析理论	129
5.2.1	元件可靠性指标	129
5.2.2	元件状态及状态转移	130
5.2.3	元件的故障模式	132
5.2.4	串并联系统的可靠性	133
5.3	配电系统可靠性指标	134
5.3.1	负荷点可靠性指标	135

5.3.2 系统可靠性指标	135
5.4 复杂配电系统馈线分区及网络化简	137
5.4.1 馈线基本结构	138
5.4.2 故障过程	138
5.4.3 开关装置分类	139
5.4.4 馈线分区	140
5.4.5 区域网络图	142
5.5 配电系统故障影响分析	145
5.5.1 故障准则	145
5.5.2 故障影响矩阵	145
5.5.3 基于故障区域的分析算法	146
5.5.4 基于负荷区域的分析算法	148
5.5.5 基于区域网络的分析算法	149
5.5.6 自动开关的不可靠性	150
5.5.7 非破坏性故障的影响	152
5.5.8 三种区域分析法的比较	152
5.6 TLOC 准则下区域解析法可靠性评估	153
5.6.1 区域节点可靠性参数计算	153
5.6.2 基于区域解析法的系统可靠性指标计算方法	153
5.6.3 可靠性评估算例	155
5.7 PLOC 准则下的可靠性指标计算	164
5.7.1 区域节点可靠性参数计算	164
5.7.2 可靠性评估算例	165
5.8 配电系统可靠性评价	166
参考文献	168
第 6 章 配电系统经济性评价	172
6.1 概述	172
6.2 工程经济学评价原理与方法	173
6.2.1 现金流量模型	173
6.2.2 净现值(NPV)法	174
6.2.3 内部收益率(IRR)法	174
6.2.4 投资回收期(PP)法	175
6.2.5 敏感性分析	175
6.3 基于工程经济学的配电系统经济评价	176
6.3.1 新建项目经济性评价	176

6.3.2	改造项目经济性评价	179
6.3.3	规划方案经济性评价	181
6.4	计及不确定性的区间经济评价方法	183
6.4.1	生命期确定的区间经济评价	183
6.4.2	生命期不确定的区间经济评价	187
	参考文献	189
第7章	配电系统评价指标与评价方法	191
7.1	概述	191
7.2	综合评价的系统学方法	192
7.2.1	基本评价方法	194
7.2.2	评价指标体系	196
7.2.3	指标权重体系	200
7.2.4	指标评价标准体系	204
7.2.5	多指标评价结果的综合方法	205
7.3	配电系统评价指标体系	206
7.3.1	供电安全性	207
7.3.2	供电可靠性	212
7.3.3	经济性	213
7.3.4	适应性	216
7.3.5	协调性	218
7.4	配电系统综合评价实施方法	221
7.4.1	评价指标设置	222
7.4.2	评价实施	224
7.4.3	评价结果分析	225
7.5	配电系统综合评价案例分析	226
7.5.1	案例简介	226
7.5.2	评价指标体系配置	230
7.5.3	规划方案评价	235
	参考文献	240
第8章	配电系统计算机辅助评价系统	242
8.1	概述	242
8.2	系统总体框架设计	242
8.2.1	业务流及信息流分析	242
8.2.2	总体功能架构	245
8.2.3	接口设计	246

8.3 配电系统综合评价基础平台	247
8.3.1 平台功能结构	247
8.3.2 平台功能示例	248
8.3.3 数据校验与还原	251
8.4 辅助评价系统的高级应用功能	251
8.4.1 配电网综合评价子系统	252
8.4.2 配电网建设改造方案优化子系统	256
参考文献	259

第 1 章 绪 论

配电系统的综合评价是配电系统精细化规划、建设、改造和运行的基础性工作,是配电系统发展到精细化管理时代背景下的一个新的研究课题,具有强烈的实际工程需求。本章简述了配电系统及其典型特征,对配电系统综合评价的研究内容和复杂性进行了阐述。

1.1 现代配电系统

电力系统由发电、输电、配电系统三部分构成,其典型结构如图 1-1 所示^[1]。配电系统是电力系统中直接与用户相连并向用户分配电能的环节。

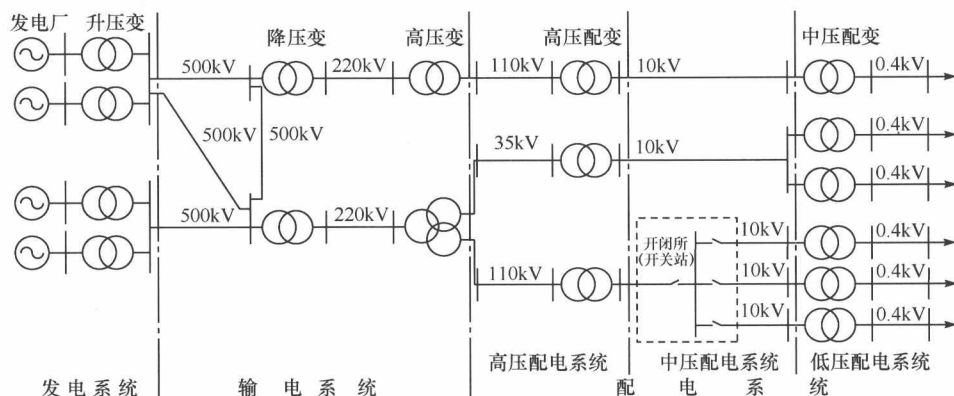


图 1-1 电力系统组成示意图

在我国,按电压等级可将配电系统划分为高压配电系统、中压配电系统和低压配电系统三部分^[2,3]。高压配电系统与输电系统直接相连,接收来自输电系统的电能,直接向大负荷供电或经中、低压配电系统向负荷供电。我国目前的高压配电系统一般指 35kV、66kV 或 110kV 配电系统,有些大型城市将 220kV 也作为高压配电系统电压等级,以适应城市用电规模的增长。高压配电系统的电源一般来自不同的 220kV 或 500kV 中心变电站(或枢纽变电站)。中压配电系统一般指 10kV 和 20kV 配电系统,通常将高压配电变电站的每一回中压出线称为一条馈线。低压配电系统一般指 0.4kV 配电系统。习惯上,配电系统有时也被简称为配电网或配网。

配电系统在网络规模、拓扑结构、支路参数、运行状态、负荷、电源以及各种配电装置的分布、信息的不确定性等很多方面,都具有不同于输电系统的典型特征^[1]。

(1) 从网络规模来看,配电系统具有规模庞大、数据繁杂等特点。对于一个中等规模城市的中压配电系统来说,其所包含的配电变压器数目就可能达到上万台,而馈线数则多达数千条。

(2) 从拓扑结构来看,输电网络一般采用多环路的环网式结构,而配电网多采用辐射型、环式或网格式等结构方式,正常情况下多为辐射状运行。

(3) 从支路参数来看,高压输电网络的支路电阻一般远小于电抗的数值,而配电网的支路电阻与电抗的比值较大,除地下电缆和较长的辐射型线路外,配电线路的对地并联导纳大多数情况下可以忽略不计。

(4) 从运行状态来看,输电系统通常处于三相对称运行状态,而配电系统往往运行在三相不平衡状态(配电系统三相电流及电压不平衡的程度是衡量配电系统供电质量的重要指标之一)且运行方式多变。同时,配电系统的状态变化比较频繁。

(5) 从网络元件及分布来看,配电线路分支多,负荷和电源以及各种配电装置(如开关、电容器等)沿馈线和馈线分支线不均匀分散分布。其中,分散式发电设备对配电系统的保护装置和安全稳定性将会产生很大的影响。

(6) 从信息的不确定性来看,由于配电系统直接面向广大用户,不可避免地受到用户端各种不确定性因素的影响,各种设备或人为因素造成的停电事故远远多于输电系统。同时,由于配电网的节点数目众多,因投资等方面的原因,现实中不可能在每个设备和每个负荷点上都进行实时量测,大量的数据需要人工补足,这样采集到的网络数据和运行数据将不完整也不精确,即包含很多不确定性的信息。

总之,配电系统规模庞大、结构复杂、不确定性信息较多,相比输电系统的性能评价,配电系统评价涉及的内容更为广泛和繁杂,需要更加强调海量数据的快速分析和诊断。

1.2 配电系统综合评价的目的及意义

科学的评价工作是指依据明确的目标,按照一定的标准,采用科学的方法,测量评价对象的功能、品质和属性,并对评价对象作出价值性的判断。它是人类社会一项经常性的、极为重要的认识活动。配电系统综合评价的目的就是对所研究的配电系统从宏观及微观角度作出科学的评判。

作为电力系统中直接与用户连接的一环,配电系统对用户供电可靠性的影响最为直接,据统计绝大多数用户停电故障是由配电系统故障引起的^[4~6]。在电力系统“发电—输电—配电”环节中,配电系统处于相当重要的位置,是城市与农村现代

化建设的重要基础设施,其性能优劣关系到国民经济各部门的发展。

近年来,随着国民经济的飞速增长,我国电力工业也随之高速发展。目前,我国的装机容量和发电量仅次于美国,居世界第2位,基本上进入大电网、大电厂、大机组、高电压输电、高度自动控制的新时代。但同发达国家相比,我国配电系统的水平还有待进一步提升,诸如可靠性、供电质量、线损率等技术指标与发达国家相比都还存在一定的差距^[7]。

配电系统投资巨大,发达国家配电系统投资占整个电力系统投资的50%以上^[8],在城市中配电系统投资通常可达到60%以上^[9]。与发电、输电系统相比,我国配电系统建设相对滞后,配电系统建设的差距还很大。近年来,我国配电系统投资已有大幅增加^[10]。1998~2000年国家投资了3000多亿元进行配电系统建设与改造,“十一五”期间的建设投资更是达到了上万亿,而今后配电系统的建设改造还将继续扩大和深化。

面对配电系统建设的巨大资金投入,采用科学手段对配电系统进行综合评价,有助于总结经验和挖掘已建成系统的发展潜力,为配电系统的可持续发展提供科学的参考依据。科学的综合评价是配电系统精细化规划、建设、改造和运行工作的基础,对于在资源日趋紧张环境下发现系统薄弱环节,通过优化建设大幅提升系统供电可靠性和供电质量,全面提高系统抗大面积停电能力,保障要害区域供电安全和社会稳定,具有重大意义。

此外,作为发、输电系统与用户间的纽带,配电系统也是下一代以数字化电网、分布式能源系统、信息化家电和蓄能式混合动力交通工具等为核心特征的智能电网的核心和关键。未来的配电系统将通过应用和融合先进的测量和传感技术、控制技术、计算机和网络技术、信息与通信技术等,集成各种具有高级应用功能的信息系统,利用智能化的开关设备、配电终端设备等,实现配电网在正常运行状态下可靠的监测、保护、控制和优化,并在非正常运行状态下具备自愈控制功能,最终为电力用户提供安全、可靠、优质、经济、环保的电力供应和其他附加服务^[11~13]。

通过对配电系统实施科学的综合评价,将有助于将传统的配电系统发展为智能化的配电系统,使配电系统具有更高的供电可靠性、更优质的电能质量、更好的兼容性、更强的互动能力、更高的电网资产利用率。

1.3 配电系统综合评价的主要内容

配电系统综合评价工作就是通过对历史的、现状的及规划的配电系统进行全面的量化评价,来判断所评价的配电系统是否满足相关各方面的要求并衡量其满足的具体程度,进而以技术评价结果指导配电系统的规划、建设、改造和运行。

配电系统综合评价工作主要涉及配电系统评价综合指标体系、综合评价策略、

各专项指标(如供电能力、经济性等)评价方法等,评价工作的综合框架如图 1-2 所示。

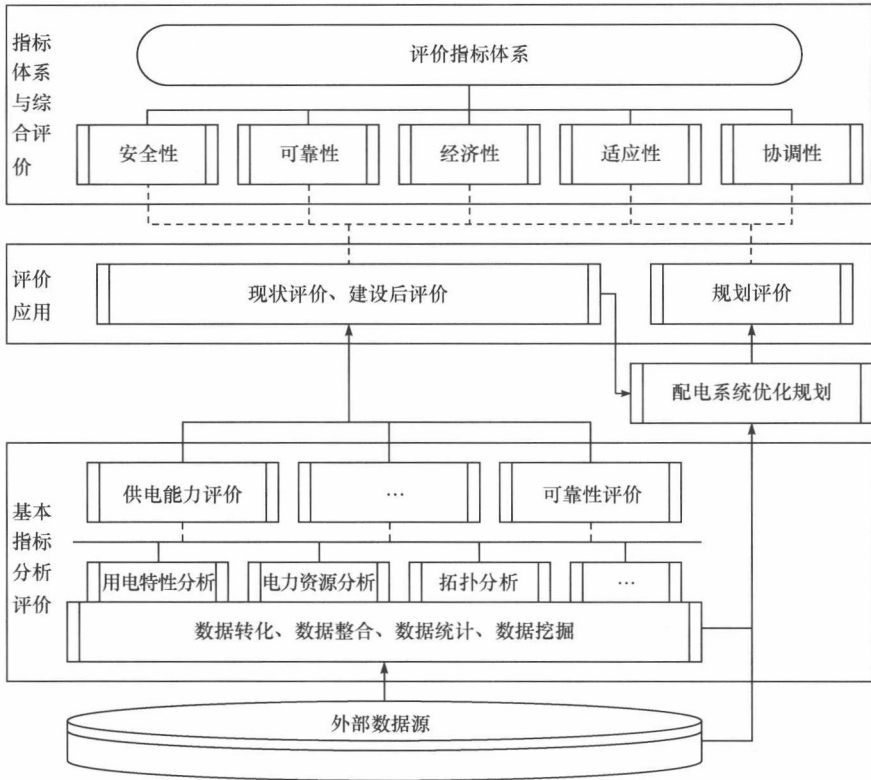


图 1-2 配电系统综合评价框架

评价指标(也称属性)、指标权重、指标判据和评价标准是评价的核心要素。评价指标就是指对评价对象需要度量的各个方面,每个评价指标都从不同侧面刻画评价对象所具有的某种特征。对配电系统而言,安全性、可靠性、经济性、发展适应性、供电协调性等是需要关注的典型评价指标。指标权重是对各评价指标间相对重要性的度量,权重的大小反映了该指标相对于其他指标重要性的高低;指标判据是满足评价值为“合格”的指标阈值;评价标准则是衡量评价对象某一评价指标尺度取值的规范。评价指标体系是上述评价要素的集中体现,是指由一系列相互联系的评价指标所构成的有机整体,能够综合反映被评价对象各个方面的情况。一套科学合理的评价指标体系是衡量配电系统现有水平和规划成效的基础,是保证配电系统建设和运行安全性、可靠性和经济性的重要判据。

配电系统综合评价工作的关键是如何建立完整的配电系统评价指标体系,使之能够适应不同地域、不同类型、不同发展阶段的配电系统,并给出具体的评价指

标计算方法。评价指标体系需根据配电系统所在地域的特点和实际负荷特性进行灵活选取和配置;在评价策略中需选择系统、科学化的评价方法,合理设定适合的指标权重体系、指标评价判据和评分标准体系,并对各项指标建立相应模型进行计算评价。

依据被评价配电系统所处的时间断面不同,可将一个配电系统划分为历史态、现状态以及规划态三种形态,配电系统综合评价工作将贯穿于这三种形态。对不同形态、不同配电系统实施综合评价,将有助于配电系统的科学化和可持续发展。例如:

(1) 对特定时间断面上的电网进行评价,能够衡量电网在供电安全性、供电可靠性及经济性等方面的满足程度,标记电网的薄弱环节和供电瓶颈,从而引导规划工程师修改规划方案以促使电网向理想目标发展。

(2) 基于历史态、现状态、规划态等多时间断面电网的量化评价结果,将多个配电系统的评价结果进行横向对比,可以衡量它们之间的差距,以促进配电系统向更加科学合理的方向发展,这有助于不同配电系统的建设和运行者相互学习、相互借鉴。

(3) 对特定时间区间内、一定时间间隔点上、快速发展中的配电系统进行持续性评价,有助于把握配电系统的发展趋势,衡量配电系统规划方案的实施效果,提高电网规划的针对性^[14~16]。

配电系统综合评价工作是对历史、现状及规划态配电系统的状态、方案及各阶段建设效果的总体描述和优劣判断,贯穿于配电系统发展过程中的各个环节,如图 1-3 所示。

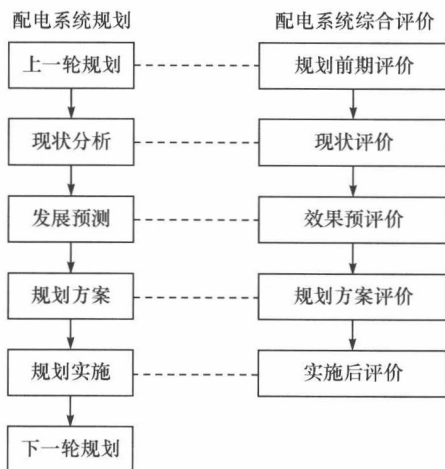


图 1-3 综合评价在配电系统发展过程中的应用

1.4 配电系统综合评价工作的复杂性

要解决配电系统的综合评价问题,面临着很多难题。配电系统结构复杂,设备数量庞大,改造更新频繁,评价所涉及的因素众多,既要从整体上得到技术评价结果,又要在关键点上得到细致的量化指标,难度很大。由于技术手段和工作量的原因,传统方法通常只能得到有关设备规模、设备负载率等单方面指标的统计结果,分析结论以定性分析为主,缺少定量的分析数据支持,很难得到一个对系统整体水平的评价,且可操作性差,不能给下一步的改造和建设提供充分科学的建设性意见。配电系统综合评价工作是一项数据量大、工作量大、技术要求高的复杂工作,如何依据实际配电系统中的常规数据,获取科学的评价指标,挖掘出有价值的信息,完成对被评价系统的诊断,需要具有一定智能化的计算机辅助综合评价系统做支撑,只有这样才能在保证评价理论和方法科学性的同时,使评价工作具备实际可操作性。

目前,依据管理工作的需要,配电系统的相关数据由多个信息系统参与管理和维护,如配电 GIS 系统、配电 SCADA 系统、负荷控制系统、客户服务系统、电力营销系统等。这些系统具有一定的相对独立性,分别按照不同的功能定位设计,数据共享程度低且存储分散。配电系统综合评价系统实际上是构筑于这些系统之上的配电高级应用系统,这就决定了这一评价系统必须具备数据整合、数据转换、数据挖掘等功能,必须有强大的数据平台做支撑。同时,考虑到评价工作的复杂性,还必须以科学的算法为基础,并配备有完善的图形支撑系统。开发适宜于大型复杂配电系统的综合评价系统是一项具有挑战性的工作。

总之,配电系统的综合评价工作是一件非常复杂的工作,需要强有力的分析决策工具做支持,需要从技术评价指标体系、建模理论、评价方法、软件开发等多方面研究配电系统的综合评价问题。

参 考 文 献

- [1] 王守相,王成山. 现代配电系统分析[M]. 北京:高等教育出版社,2007.
- [2] 中华人民共和国国家电网公司. 城市电力网规划设计导则(Q/GDW 156-2006)[S]. 北京:中国电力出版社,2006.
- [3] 中国南方电网有限责任公司. 中国南方电网城市配电网技术导则(Q/CSG 1 0012-2005)[S]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
- [4] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [5] 陈文高. 配电系统可靠性实用基础[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
- [6] Brown R E. Electric Power Distribution Reliability[M]. New York: Marcel Dekker, 2002.
- [7] 中国电力企业联合会. 2008 年全国电力工业统计快报[J]. 电业政策研究,2009,1:45-48.

- [8] 段钢. 全局优化算法与输配电系统规划、重构[D]. 天津:天津大学博士学位论文,1999.
- [9] Zhong J, Wang C S, Wang Y P. Chinese growing pains[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2007, 5(4):33-40.
- [10] 中国电力企业联合会. 电力行业 2010 年发展情况综述[Z]. <http://tj.cec.org.cn/nianduf-azhanbaogao/2011-06-27/58873.html>.
- [11] 王成山,王守相,郭力. 我国智能配电技术展望[J]. 南方电网技术,2010,4(1):18-22.
- [12] 王成山,李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化,2010,34(2):10-14,23.
- [13] 蔡声霞,王守相,王成山,等. 智能电网的经济学视角思考[J]. 电力系统自动化,2009,33(20):13-16,87.
- [14] 王成山,王赛一. 市场条件下电力系统规划工作的探讨[J]. 电力系统自动化,2005,29(9):82-86.
- [15] 吴建中,余贻鑫. 认知学方法及其在电力系统中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报,2006,18(3):1-6,13.
- [16] 余贻鑫,段刚. 城市电网规划的认知性质与方法[J]. 电力系统自动化,2001,25(2):27-31.