



Theory and Applications of Resilient Power Systems
and Associated Restoration Strategies

弹性电力系统及其 恢复策略研究的 理论与实践

甘霖 刘育权 文福拴 等 著



科学出版社

弹性电力系统及其恢复策略研究的 理论与实践

**Theory and Applications of Resilient Power Systems
and Associated Restoration Strategies**

甘霖 刘育权 文福拴 等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

随着电力工业的持续发展,跨大区(甚至跨国家)联网趋于紧密,新能源并网发电及电动汽车应用的规模不断增大,电力市场化改革逐步深化,电力系统运行环境更加复杂。极端气候和自然灾害时有发生,电力系统规划和运行的外部环境趋于恶化,电力系统发生大规模停电事故的威胁依然存在。在此背景下,如何建设能够应对系统运行环境更加复杂、极端气候和自然灾害发生更加频繁情形的弹性电力系统,就成为受到广泛关注的重要研究领域。本书系统介绍了弹性电力系统及其恢复策略研究的理论与实践,主要内容包括弹性电力系统理论、国内外典型停电案例及启示、弹性电力系统的建设实践、新技术和新形势下的弹性电力系统建设展望等。

本书适于从事电力系统规划和运行相关工作的管理、科研和工程技术人员使用,也可作为高等院校电力系统相关专业教师和学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

弹性电力系统及其恢复策略研究的理论与实践=Theory and Applications of Resilient Power Systems and Associated Restoration Strategies/甘霖等著. —北京:科学出版社,2016.11

ISBN 978-7-03-050678-8

I. ①弹… II. ①甘… III. ①电力系统-系统恢复-研究 IV. ①TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 271378 号

责任编辑:范运年 / 责任校对:桂伟利

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:耕者工作室

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>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年11月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017年1月第二次印刷 印张:22 1/2

字数:441 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

参与编著人员

熊 文	王 珂	赵宏伟	孙 磊	王 芃	刘伟佳
张 岩	吴国沛	吴 琼	陈盛燃	陈 健	张志文
邱朝明	莫文雄	谭子健	罗 浠	张 珏	刘伟明
陈丽萍	黎 颖	刘 晶	张 静	吴嘉欣	彭和平
栾 乐	阳 曾	华煌圣	叶 萌	周荣生	

前 言

在过去的 10 多年间,电力工业发生了一些比较深刻的变化,跨大区(甚至跨国)联网、新能源开发与并网发电以及大量电动汽车的广泛应用等,使得电力系统的装机组成、结构及协调控制更加庞杂,系统运行的安全性、稳定性与经济性等问题愈加突出。在上述背景下,以容纳高渗透率间歇性可再生能源发电、电动汽车广泛应用为主要特征的智能电网建设已经成为现代电力系统的主要发展方向。

智能电网以安全可靠、经济高效、节能环保为运行目标,具有自愈、坚强、兼容、优化、开放、支持电力市场等特征,有望解决当前电力系统发展遇到的一些重要问题。考虑到由于温室气体排放引起全球气候变暖进而导致极端气候和自然灾害增多、通过二次系统或采用虚假数据对实际电力系统人为攻击事件不时发生、近年来在国际某些区域和国内一些地区凸显的社会不稳定因素所引发的恐怖袭击、电力系统中间歇性可再生能源发电的渗透率趋于提高、电动汽车有望规模化发展等,电力系统规划和运行所面对的不确定性因素增多、不确定程度加大,发生大规模停电事故的可能性依然存在。在这些因素的共同推动下,电力系统朝着智能电网环境下的弹性电力系统(Resilient Power System)方向发展。弹性电力系统可以充分利用基于电力电子的柔性电力装备及现代先进通信与控制技术等,有效增强抗击重大自然灾害、人为攻击和恐怖袭击等大扰动事件,提高整个电力系统规划和运行的弹性水平,确保电力系统安全稳定运行。

弹性电力系统的建设,有赖于合理的电力网架结构和电源结构、完善的系统运行和控制策略、准确的故障诊断和定位方法、有效的停电事故应急处理和系统恢复机制等。在弹性电力系统中,需要考虑电力系统发展目标的多元化,以适应可再生能源接入、社会经济发展及极端自然条件和极端事件等因素对电力系统规划的新要求,增强系统抵御强干扰的能力。在系统运行方面,弹性电力系统强调在系统面临无法避免的大扰动时,能有效利用各种资源灵活应对相关运行风险,维持满足要求的系统运行性能。在系统发生故障的情况下,弹性电力系统综合利用多源异构警报信息,提高故障诊断准确性,减少故障处理时间;充分利用智能测量与通信系统、分布式电源、储能装置、电动汽车等可调度资源与需求侧管理等,提高系统恢复能力,减少停电时间和停电损失。

从国内外已开展的弹性电力系统相关研发内容与工程应用试点情况看,在设备监控智能化与数字化、广域复杂电网信息智能同步采集处理、信息通信标准化规

范化、复杂系统运行控制及协调优化调度等方面已取得了较多成果。然而,在如何充分利用现代先进通信与控制技术以有效增强广域复杂电力系统抗击重大自然灾害、人为攻击和恐怖袭击等引发的多重或多点连锁大扰动的能力,提高系统自适应和故障自愈能力等方面,目前尚没有比较系统的研究报道。有鉴于此,本书比较系统地论述弹性电力系统及其恢复策略研究的理论与实践。首先从弹性电力系统的概念出发,简要阐述其内涵、外延及主要研究内容,之后逐步介绍弹性电力系统理论、方法与应用。本书的章节安排如下:

第一章首先从弹性电力系统环境下的系统规划、稳定控制、故障诊断和系统恢复四个方面,分别论述了研究现状、相关理论与应用,最后构建了电力系统的弹性评价指标体系。

第二章对国内外多起停电案例做了介绍和分析,并总结了这些停电事故的启示。

第三章介绍了广州电网的发展历程,从电网规划建设、调度运行控制、设备及生产管理、客户服务管理、应急保障等方面,比较系统地介绍了弹性电力系统在广州城市电网的建设实践,并对2015年10月4日台风“彩虹”造成的广州500kV广南站全停抢修复电案例做了比较详细的介绍和分析。

第四章首先介绍了能源互联网、信息物理融合系统、电力市场改革、大数据技术的一些概念、研究框架及关键技术,之后从系统规划、调度运行、故障诊断、系统恢复这四个重要技术领域对新技术和新形势下的弹性电力系统建设进行了展望。

本书的研究工作得到了国家重点研发计划“工业园区多元用户互动的配用电系统关键技术研究及示范”(项目编号:2016YFB0901300)、国家高技术研究发展计划(863计划)“配电网信息物理系统关键技术研究及示范”(项目编号:2015AA050202)和广州供电局“基于主配网协同的特大型城市电网风险防控与分析决策核心技术研究”(项目编号:K-GD2012-027)的资助。

弹性电力系统及其恢复策略的理论研究与实践建设尚处于快速发展之中,本书难免以偏概全。由于作者水平有限,书中难免存在错误和不当之处,敬请读者批评指正。



2016年9月

目 录

前言

第一章 弹性电力系统理论研究	1
第一节 弹性电力系统概述	1
第二节 弹性电力系统环境下的系统规划	3
一、研究背景	3
二、国内外电网规划方法研究现状	4
三、考虑风电场的多目标电力系统规划方法	9
四、计及未来电动汽车负荷不确定性的配电系统多场景灵活规划策略	20
五、计及风险约束的多阶段输电系统规划方法	35
第三节 弹性电力系统环境下的稳定控制	44
一、研究背景	44
二、国内外电网稳定控制研究现状	45
三、自然灾害条件下的电网稳定风险评估	52
四、自然灾害条件下的电网稳定控制	61
五、自适应外部环境的电网安全稳定控制措施集的在线动态调整	70
第四节 弹性电力系统环境下的故障诊断	78
一、研究背景	78
二、国内外电网故障诊断方法研究现状	80
三、计及保护和断路器误动与拒动的电力系统故障诊断的解析模型	84
四、含分布式电源的配电系统故障区段定位模型	100
五、多代理系统框架下的主动配电系统故障诊断	109
第五节 弹性电力系统环境下的系统恢复	120
一、研究背景	120
二、国内外系统恢复方法研究现状	122
三、考虑风电场作为辅助黑启动电源的恢复策略	126
四、电力系统网络重构的多目标双层优化模型	134
五、电力系统恢复过程中的负荷恢复决策	145
六、含间歇性电源、储能和电动汽车的配电孤岛短时供电恢复策略	162
七、考虑电动汽车支持的电力系统恢复多目标最优策略	179
第六节 电网弹性评价指标体系	194

参考文献	197
第二章 国内外典型停电案例及启示	204
第一节 国外典型停电案例	204
一、美加电网 2003 年停电案例	204
二、欧洲电网 2006 年停电案例	208
三、巴西电网 2009 年停电案例	210
四、印度电网 2012 年停电案例	214
五、乌克兰电网 2015 年停电案例	218
第二节 国内典型停电案例	220
一、海南电网 2005 年停电案例	220
二、南方部分电网 2008 年停电案例	224
第三节 广州电网 1990 年停电案例	227
一、事故经过	227
二、事故后果	229
三、事故原因	229
四、应对策略	230
第四节 电力系统停电启示	230
参考文献	232
第三章 弹性电力系统在广州的建设实践	233
第一节 广州城市电网简介	233
一、广州城市电网发展历程	233
二、广州城市电网大事记	233
第二节 广州城市电网管控体系建设的探索	235
一、电网规划建设	235
二、调度运行控制	243
三、设备及生产管理	268
四、客户服务管理	278
五、应急保障	283
第三节 2015 年广州 500kV 广南站 10.4 全停抢修复电案例	290
一、事故经过	290
二、事故后果	293
三、事故原因	294
四、抢修复电工作开展情况	294
五、经验总结	295
六、反思及对策	301

参考文献	302
第四章 弹性电力系统的发展展望	304
第一节 能源互联网	304
一、研究背景	304
二、能源互联网的基本概念	305
三、能源互联网的架构及组成	306
四、能源互联网研究的关键技术	307
第二节 信息物理融合系统	315
一、研究背景	315
二、CPS 概述	317
三、电力 CPS 的体系结构	319
四、实现电力 CPS 的关键技术	320
第三节 电力市场改革	322
一、研究背景	322
二、电力市场环境概述	323
三、电力市场设计研究框架	325
四、电力市场运营关键技术	327
第四节 大数据技术发展	330
一、研究背景	330
二、大数据概述	331
三、大数据技术的理论研究体系	334
四、大数据应用的关键技术领域	337
第五节 新技术和新形势下的弹性电力系统建设	339
一、对系统规划的影响及相关研究方法	340
二、对调度运行的影响及相关研究方法	342
三、对故障诊断的影响及相关研究方法	343
四、对系统恢复的影响及相关研究方法	345
参考文献	346

第一章 弹性电力系统理论研究

第一节 弹性电力系统概述

进入 21 世纪以来,很多国家在不同层面上加快了电力工业的发展步伐,跨大区(甚至跨国)联网、新能源开发与并网发电以及大量电动汽车的广泛应用等,使得电力系统的装机组成、结构及协调控制更加庞杂,系统运行的安全性、稳定性与经济性等问题更加突出。同时,极端气候和自然灾害,以及人为和社会的不稳定因素更进一步加剧了电力系统发展的不确定性,电力系统仍受到大规模停电事故的威胁。电力系统是负责电能的产生和传输的基础工程设施,是交通、通信、供水、供暖等其他基础生产和生活设施正常运转的基础。大规模的停电事故,不仅会造成巨大的经济损失,还可能造成政治、社会影响乃至人身伤亡。在此背景下,国内外很多电力企业、公司、研究机构和高校对未来电力系统的发展模式开展了一系列研究与实践,并提出了建设弹性电力系统(resilient power system)的理念。

弹性电力系统具有自愈、坚强、兼容、优化、开放、支持电力市场等特征,能够有效解决当前电力系统发展遇到的一些重要问题。从国内外已开展的弹性电力系统相关研发内容与工程应用试点情况看,在设备监控智能化与数字化、广域复杂电网信息智能同步采集处理、信息通信标准化规范化、复杂系统运行稳定控制及协调优化调度等方面已有一些有价值的应用研究。如何充分利用现代先进通信、控制技术,以期有效增强广域复杂电力系统抗击重大自然灾害等引发的多重或多点连锁大扰动的能力,提高系统自适应和故障自愈能力(亦即提高电力系统的强弹性),确保电力系统安全稳定运行,现在尚缺乏系统与深入的研究探索。基于此,本书从弹性电力系统的概念出发,简要阐述其内涵、外延及主要研究内容,力求为弹性电力系统的建设提供研究基础和借鉴。

所谓弹性电力系统,是指同时具备自适应灵活控制和强抗冲击能力的电力系统,该系统无论在正常运行或短路故障等大扰动情况下,都能够确保安全稳定运行。当系统遭遇扰动事件前有能力针对其做出相应的准备与预防;在系统遭遇扰动事件过程中有能力充分地抵御、吸收、响应以及适应;系统遭遇扰动事件后有能力快速恢复到事先设定的期望正常状态。弹性电力系统具有如下要素。

(1) 合理的电力系统网架结构和电源结构。通过优化拓扑结构,实现系统经济、安全、稳定运行,同时提高电力系统的冗余性和有源性,进而改善其在各类事故

中的鲁棒性和迅速性。

(2) 完善可靠的设备。包括直接参与生产、变换、传输、分配和消耗电能的一次设备,以及对一次设备运行状态进行测量、监视、控制和调节的二次设备等。通过配备先进的一、二次设备,能够实时监测电网的各种运行状态并快速做出自适应响应,实现协同控制。

(3) 配备相应的技术支持系统,主要包括分析决策系统、稳定控制系统、大规模通信网络、大规模传感器网络、监控系统等。

(4) 配套的管理体系及工作机制,主要包括电网规划建设、调度运行控制、设备及生产管理、客户服务管理、应急保障体系等。

具有上述特点的弹性电力系统,能够实现对电网运行状态的实时监测与柔性控制,能够承受各种随机扰动并自动进行优化处理,特别是对于多重或连续故障等大扰动冲击,能够自适应地采取优化控制策略或措施,并使系统快速恢复到正常运行状态,即具有坚强抵御大扰动冲击、自适应寻优控制和故障自愈的能力,从而确保电网安全稳定并运行于最佳状态。弹性电力系统能够更好地处理小概率-高损失极端事件,在灾害破坏无法避免的情况下,能及时将事件影响范围最小化,还能灵活适应环境变化并有能力快速恢复电力系统的供电能力。另一方面,弹性电力系统具有更高的灵活性、安全性、更高的电能质量、自愈能力,尤其是分布式电源、微电网、主动配电网等技术赋予了电力系统更多灵活有效的故障应对策略,使得弹性电网应对各类事故能力的主动提升成为可能。因此,弹性电力系统才称得上是“坚强”的电力系统,也是构建坚强智能电网的基础。

目前对弹性电力系统的研究才刚刚起步。如何选取合理的电网弹性评估指标,获得提高电网的抗冲击能力、自适应寻优控制和故障自愈的能力等具体措施,以及制订整体解决方案,还需进行深入的研究。

弹性电力系统的建设,依赖于合理的电网网架结构和电源结构、完善的设备、完善的电网运行和控制技术支持系统以及有效的停电事故应急处理和恢复机制。在弹性电力系统中,将电力系统的发展目标多元化,以适应可再生能源接入、社会经济发展和极端自然条件等因素对电力系统规划的新要求,增强系统的抵御能力。同时,强调在面临无法避免的故障时,系统能有效利用各种资源灵活应对风险,适应变化的环境,维持尽可能高的运行能力,并能迅速、高效恢复系统性能。发挥智能通信测量系统在增强弹性电网恢复力中的作用,综合利用多源异构警报信息,提高输电系统和配电系统的故障诊断准确性,减少故障处理时间,降低故障造成的损失。发生事故后,应利用智能电网技术、分布式能源、用户侧装置、微电网、电动汽车等可调度的资源提高电力系统的恢复能力。

本章从弹性电力系统环境下的系统规划、稳定控制、故障诊断和系统恢复四个方面,分别介绍弹性电力系统的研究现状、理论和应用。在本章最后给出了电网弹

性评价指标体系,为未来弹性电力系统的建设提供参考。

第二节 弹性电力系统环境下的系统规划

一、研究背景

随着全球经济、环境和社会发展的不确定性的增加,电力系统发展所面临的不确定性也日益突出。极端气候和自然灾害,以及人为和社会的不稳定因素更进一步加剧了电力系统发展的不确定性,成为影响和制约电力系统发展的重大问题。应对大规模频繁扰动、大型灾害和事故以及各种不确定性是弹性电力系统环境下电力系统规划的重要任务之一。因此,需要不断寻找新的规划方法来满足弹性电力系统在规划领域的更高要求。

电力系统规划的方法种类繁多,按优化目标数目可以分为单目标电网规划和多目标电网规划;按照各种规划影响因素的可变性则可以分为确定性电网规划和不确定性电网规划;按照规划时段可以分为单阶段电网规划和多阶段电网规划。结合弹性电力系统规划所面临和要解决的问题可知,弹性电力系统规划必然是多目标的、不确定(多场景)的、多阶段的。

由自然灾害和操作失误引发的电网故障,会影响电力系统对用户供电的可靠性。随着环境保护力度的升级,现代电力系统对可再生能源接入比例和碳排放量控制等方面也提出了新的要求。此外,新型电子元件、电气化铁路等的广泛应用给电力系统带来较大的谐波干扰,而日渐普及的精密仪器又在提升社会生产对于电能质量的要求。在这样的新形势下,电力系统的发展目标必定是多元的,必须制订可以满足各类需求的多目标规划方法。

随着风电、太阳能等可再生间歇性能源的接入,电力系统所面临的扰动和波动都更为复杂和棘手。近年来极端气候、特大自然灾害频发,更进一步考验了电力系统这一国民基础设施的可靠性。此外,电动汽车、可中断负荷、需求侧主动响应等在增加系统活力的同时增加了系统的不确定性。应对电力系统所面临的日益增加的不确定性威胁,可以通过多情景规划这一规划方法进行有效应对。通过对不同场景的有效模拟,寻求可以避免系统危害的方法,有效利用相关资源提升系统的可持续性和效率。

当前各国经济形势波动较为剧烈和频繁,各行业的电力需求也面临较大的波动,电力系统的发展前景并不明朗。与此同时,电力系统发展建设周期较长,较长的前置时间导致其无法通过短期新建项目弥补出现的能源缺口,也无法有效避免新建设备由于需求陡降而闲置。因此,只有在规划中结合新形势新情况,通过适时修正电力发展规范方法,分阶段、分步骤开展电力系统建设和投资,才可以尽可能

减少不必要的损失。电力工业市场化改革在世界范围内的逐步推广,为系统规划带来了更多的不确定性因素。在不确定性环境下所做出的规划决策不可避免地会带有一定的风险。为此,需要寻找能够计及不确定性因素影响的系统灵活规划方法,考虑相应的风险约束,合理处理规划期内的系统安全和经济风险。

弹性电力系统具备应对外部动荡、外部自然灾害和社会变化的能力,不仅可以有效结合多元结构和新兴经济发展需求,还能在空间及基础设施建设中留有余地和裕度。弹性电力系统的有效建成,将显著提升系统面临各类扰动、灾害和不确定性的能力,切实保障电力系统供电安全和稳定。

综上所述,从输电系统规划层面来看,随着风电等可再生间歇性能源的持续接入,其不确定性会对系统规划带来相应的挑战,系统规划所涉及的优化目标会呈现多目标趋势;从配电系统规划层面来看,电动汽车广泛接入之后,所制订的规划方案应具备一定的灵活性,以适应未来其他可能出现的场景;此外,面对电力工业市场化改革,系统规划决策更需考虑相关的不确定因素,满足经济性和安全性要求。如何在计及各种不确定性因素的基础上进行系统规划决策,是弹性电力系统的重要研究课题之一。本节内容安排如下。

(1) 第二小节给出了国内外电网规划方法研究现状。

(2) 风电出力具有随机性、间歇性,大规模风电并入系统无疑会给系统规划带来风险,如何在考虑规划方案投资经济性的同时增强风险规避能力,值得在弹性电力系统规划中进行探讨。为此,第三小节中提出了考虑风电场的多目标电力系统规划方法(郑静等,2011)。

(3) 在弹性电力系统环境下,系统规划所面临的未来场景大大增加;与此同时,电动汽车的接入给配电系统规划带来了新的难点。第四小节在考虑了负荷水平、电动汽车保有量、充电策略等不确定因素的基础上,提出了计及适应成本的配电系统灵活规划策略(Yao et al.,2016)。该规划策略能以较少的投资运行成本增量适应未来可能出现的不同场景,以提高系统规划的经济性。

(4) 电力工业市场化改革带来未来电源建设和负荷增长的不确定性。弹性电网环境下,需要对不确定性因素进行相应的描述。因此,第五小节提出了计及风险约束的多阶段输电系统规划方法(杨宁等,2005),该方法在对不确定性因素进行模拟的基础上,利用机会约束规划来处理安全和经济风险,可根据可以承受的风险程度的不同和实际需要,为系统规划决策提供指导。

二、国内外电网规划方法研究现状

电网规划是电力系统规划的重要组成部分,是在规划期间的电源规划、负荷增长都已确定的基础上,根据现有的电网系统结构,新建或扩建线路以满足电力系统安全、可靠和经济运行,目标是确定何时、何地、架设何种类型的线路或者变电站以

满足未来年负荷增长和电源发展的要求。电网规划在数学上属于一个复杂得多决策变量、多约束条件优化问题,而且具有离散性、非线性、多目标性、动态性、不确定性等特点,其规划结果直接影响到电力投资的大小和电力系统运行的安全稳定性。合理地进行电网规划不仅可以获得巨大的经济效益,也可以获得巨大的社会效益。基于本书的研究重点,这里从多目标规划方法、不确定性规划方法及多阶段电网规划方法三个方面展开介绍。

(一) 多目标规划方法

多目标电网规划是在某些约束条件下,同时考虑两个及两个以上目标(指标)的规划问题。在大多数情况下各目标可能是相互冲突的,需要权衡和折中处理。多目标规划的求解思路通常是将多目标转化为单目标进行求解,主要有以下一些方法。

1. 加权系数法

根据各个目标在问题中的重要程度,分别设置各目标的权重系数,然后把这些带有系数的目标相加来构造评价函数,将多目标转化为单一目标进行优化求解。该方法在多目标优化中应用较为广泛。曾鸣等(2011)在输电规划模型中引入了需求侧响应机制,该模型同时考虑了线路投资成本及需求侧响应成本。周金辉等(2011)针对大规模风电接入下的输电网扩展规划问题,在目标函数中不仅考虑了线路、设备投资成本,还考虑了在不满足安全约束场景下所需采取的安全控制措施成本。王辉等(2013)在电动汽车充电站最优规划中,考虑了充电站规划建设对交通流量、配电系统网络损耗及节点电压偏移的影响。杨宁等(2004)针对电力市场环境下的输电系统规划问题,考虑了规划方案的经济性及安全性。

2. 模糊评价法

模糊评价法求解多目标规划问题的实质是利用隶属度函数,求取各目标函数的模糊满意度,通过模糊满意度对多个规划目标进行评价。在含风电场的输电系统多目标规划模型中,可考虑以输电投资成本、阻塞成本以及可靠性成本最小为目标,用模糊评价法评价方案的优劣(Moeini-Aghaie et al., 2012)。聂宏展等(2009)将模糊综合评价方法运用到输电网规划方案评价之中,通过引入熵权法确定各指标权重取值,所得到的评价结果清晰直观。刘子俊等(2008)采用模糊推理函数以及“钟形”隶属度函数,对配电网网架规划方案进行评价。

3. 分层优化法

分层最优化的基本思想是在模型的可行域上对第一优先层次的目标函数进行优化求解,然后在第一优先层次的最优解集的基础上对第二优先层次的目标函数进行优化求解,如此继续,直到最后一层。该模型可处理多个决策问题,且使其处于一定的决策等级结构中,各决策问题拥有自己的决策变量、目标及约束条件,上

下层相互反馈、相互影响。近年来分层优化方法在电网规划中已有不少应用。范宏等(2008)建立考虑经济性和可靠性的输电系统二层线性规划模型,能有效处理经济性目标和可靠性目标的矛盾。方陈等(2014)提出了一种配电网网架双层规划模型,该模型在主动管理模式的基础上,考虑了分布式发电对配电网的影响。

4. Pareto 多目标优化方法

基于 Pareto 的多目标优化方法不依赖于单目标优化方法,根据 Pareto 多目标最优理论,利用向量优化方法进行多目标寻优,可以有效避免加权系数法等间接求解方法在多目标量纲和数量级处理上的困难。黄映等(2010)建立综合考虑经济性、环境影响因素以及电网脆弱性的多目标输电网扩展规划模型,采用 Pareto 多目标优化方法进行全局寻优。姚伟锋等(2015)构建了以投资成本和系统网损之和最小、快速充电站截获的交通流量最大为目标的配电系统与电动汽车充电网络协调规划的多目标优化模型,采用非支配排序遗传算法-II 进行了求解。

(二) 不确定性规划方法

不确定性规划方法可以有效地处理随机因素和模糊因素。计及不确定性因素影响的电网规划研究已取得了一些初步的研究成果。按照对不确定性信息的处理方法不同,不确定性规划方法可以分为两大类:第一类为多场景分析方法;第二类为基于不确定性信息数学建模的电网规划方法,如模糊理论、灰色理论、盲数规划和随机理论等。

1. 多场景分析方法

多场景分析方法首先对未来环境中的各种不确定性因素进行分析,得到它们一系列的可能取值,再将各种可能取值分别组合为一个个场景。通过计算,寻找出一个具有最好适应性的规划方案,作为综合最优方案。多场景技术的实质就是将难以用数学模型表示的不确定性因素问题转变为多个确定性场景的问题,从而避免了建立复杂的电网规划模型,降低建模和求解的难度。多场景分析方法的难点在于如何合理地分析、预测出各种场景,以及如何判断规划方案的综合最优性。此外,多场景分析法的求解结果缺乏理论上的适应性,当不确定性因素过多、变量或场景过多时有可能造成求解上的困难。袁越等(2009)应用多场景概率的方法考虑风电出力和负荷变化等不确定性因素,考虑未来可能出现场景的重要程度,获得基于决策者偏好的含大型风电场的输电系统柔性规划方案。杨文字等(2005)在获取各个场景的配电网规划方案后,通过考虑规划方案的风险度,寻找鲁棒性最优的规划方案。付蓉等(2005)在电力市场环境下的输电系统规划中,运用多场景下的综合性系统阻塞指标对规划方案进行评估。

2. 模糊理论

模糊理论是用于处理各种主观因素较重和数据资料不完整等造成的不确定性

因素最有效的方法之一,特别是对于语言规则等定性资料的处理是模糊理论的一大优势。模糊规划的最后目标不是某一指标最优,而是最大综合满意度。模糊理论已被广泛应用于电网规划中处理不确定性因素。谢敏等(2005)提出的输电系统规划模型中,引入模糊理论来描述和处理阻塞管理和规划过程中的不确定性因素,并采用极大熵方法进行快速求解。

3. 灰色理论

灰色理论的核心是灰色动态建模(grey dynamic model,GDM),其思想是直接基于时间变化的一组数据转化为用微分方程来表示,建立基于系统发展变化的动态模型,对未来数据进行预测。赵国波等(2009)采用基于灰色理论的遗传算法求解输电系统规划问题,考虑输电系统规划期内电源建设和负荷增长的灰色性、随机性特点,得到了不同置信水平的最优输电系统规划方案。目前灰色理论在电网规划中已经得到了初步应用,但是由于灰色信息白化处理方法尚未完善,还有待进一步改进和完善。

4. 盲数理论

盲数理论能够描绘和处理多种不确定性信息,可以处理同时具有随机性、灰性和模糊性等两种及以上不确定性的信息,较为细致而全面地反映实际情况,近年来已逐步被应用到电网规划中。用包含随机性和灰性的盲数模型可描述节点功率,用盲数表示系统潮流,从而求解输电系统最优灵活规划方案(Cheng et al.,2004)。

由于盲数运算随运算维数呈指数增长,虽然引入许多简化措施,但运算量仍然制约着盲数的应用,而且在简化的同时也删除了许多有用信息,降低了运算精度。此外,如何应用盲信息处理电力系统中的多种不确定性信息,有待进一步研究。

5. 随机理论

随机规划方法是电力系统规划中对不确定性因素进行考虑和处理最早的方法之一,它引入了随机变量,使用概率理论来描述和处理随机环境中的不确定性因素,这使得随机规划比确定性数学规划更适合于实际问题。概率潮流能够给出线路过负荷概率、节点电压越限概率和系统失去静态稳定的概率等指标,为随机规划提供数据(Schellenberg et al.,2005;Su,2005),近年来得到了广泛研究。概率潮流可应用于输电系统规划,并采用机会约束规划求解规划问题,能较好地描述电力系统中的不确定性因素(Yu et al.,2009)。吴万禄等(2014)在分布式电源与充电站的配电网协调规划中考虑了可再生能源出力和负荷的随机波动性,采用随机潮流计算支路功率的概率分布,并运用改进遗传算法进行求解。随机理论对不确定性信息的随机特征有较强的描述能力,在电力规划中的应用具有较好的前景。

(三) 多阶段规划方法

多阶段电网规划除了要考虑相关规划方案的可行性,还要考虑各方案之间的

相互衔接。多阶段电网规划是一个带有大量等式和不等式约束的非线性离散组合优化问题,计算量和求解难度相对于单阶段大为增加。求解方法一般分为数学优化和启发式优化两类(麻常辉等,2006)。

1. 数学优化方法

数学优化方法是將电力系统优化规划问题转化为一般的数学优化模型,如线性规划法(Gonen et al., 1987)、Benders 分解法(张洪明等, 1999)、分支定界法(Bahienne et al., 2001)。这类方法理论上可以保证解的最优性,但通常计算量过大,对模型的数学特性要求较高,实际应用中有许多困难:电网规划中要考虑很多因素,决策变量阶数很高,建立模型十分复杂困难,通常不具备数学优化方法所要求的数学特性,在实际应用中难以建立优化模型,也很难求解。

2. 启发式优化方法

传统启发式方法的基本思想是建立决策变量和某种有效性指标之间的灵敏度关系,在初始网络(冗余网络)中逐条加入(删除)候选线路,组成输电系统网络,如逐步扩展法和逐步倒推法。现代启发式方法是模拟自然界中一些“优化”现象而研究出的一类比较新的优化求解算法,适用于求解组合优化问题以及目标函数或某些约束条件不可微的非线性优化问题。此类算法求解组合优化问题可以得到一组比较好的解,适合于处理输电系统规划问题,在电力系统优化研究领域取得了广泛的应用,形成了多种各具特色的优化算法,如遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法、Tabu 搜索法、蚁群算法等。

(1) 遗传算法。

遗传算法(genetic algorithm)是模拟“优胜劣汰”生物进化的一种自适应随机搜索优化算法,它通过随机或启发式算法产生一组候选规划方案作为祖先,通过二进制或者实数编码技术将规划方案转变为一组染色体,通过复制、交换、变异等措施逐步完成进化,采用适应度函数来评价方案的优劣程度,并以此来控制搜索方向,最终收敛到最优解。与传统方法相比,遗传算法具有多路径搜索、隐并行性、随机操作等特点,因而在电网规划中得到了广泛的应用(毛玉宾等, 1998; Escobar et al., 2004)。

(2) 模拟退火算法。

模拟退火法是由 Kirkpatrick 等于 1982 年将热力学的退火思想引入组合优化领域,提出一种求解大规模组合优化问题。模拟退火法可以有效地防止陷入局部最优,但该方法属于单点寻优,对求解存在多个最优解的问题有一定的困难,通常将模拟退火方法与其他方法结合使用,以发挥各自的优势(陈章潮等, 1999; Da Silva et al., 2000)。

(3) 粒子群算法。

粒子群算法源自鸟群捕食行为的研究,是一种通用的启发式搜索方法。粒子