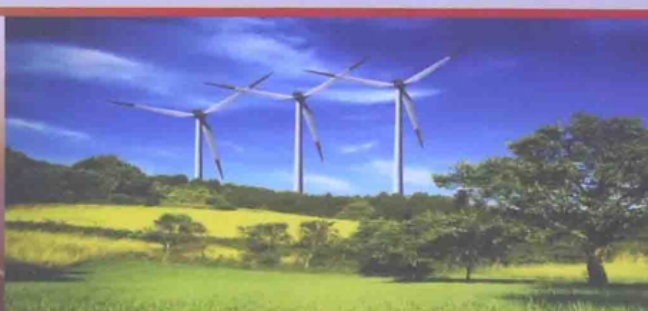


房 芳 牛东晓 邢 棉 编著

ZHONGGUO FENGHUODIAN LIANHEYUNYING XIAOYI PINGJIA YANJIU



中国风火电联合运营效益评价研究

ZHONGGUO FENGHUODIAN LIANHEYUNYING XIAOYI PINGJIA YANJIU



煤炭工业出版社

中国风火电联合运营效益 评价研究

房 芳 牛东晓 邢 棉 编著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

中国风火电联合运营效益评价研究 / 房芳, 牛东晓, 邢棉编著. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2014

ISBN 978 - 7 - 5020 - 4600 - 2

I. ①中… II. ①房… ②牛… ③邢… III. ①风力发电—运营管理—效益评价—研究—中国 ②火力发电—运营管理—效益评价—研究—中国 IV. ①F426. 61

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 166601 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
网址: [www. cciph. com. cn](http://www.cciph.com.cn)
北京市郑庄宏伟印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*
开本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 9
字数 214 千字

2014 年 10 月第 1 版 2014 年 10 月第 1 次印刷
社内编号 7455 定价 30.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

内 容 提 要

本书对基于绿色经济的风火电联合运营的含义和基本思路进行了阐述，并对其影响因素和运营特征进行了分析，建立了基于风电集群效益和预测误差修正的完全成本约束电网消纳能力计算模型。在此基础上，建立了基于绿色经济的多目标成本约束的风火电联合运营规划模型。此外，本书还建立了包含传统经济效益、社会效益、环境效益、安全效益和绿色经济效益的风火电联合运营综合效益评价指标体系；改进了模糊综合评价模型，采用 AHP 和 CRITIC 相结合的组合权重确定方法，在分析权重时，分别考虑了负荷高峰和负荷低谷的情况。最后，本书对某省风火电联合运营进行了实证分析，在实证分析的基础上，提出了提高我国风火电联合运营综合效益的对策建议。

本书适合于电力技术经济研究人员、电力系统科技人员、相关专业教师和研究生使用。

前 言

绿色发展战略是我国在金融危机后,面临资源短缺和环境污染的双重压力,确立的基本发展战略,电力系统也随之确立了构建和谐电力系统的发展规划。火力发电是我国电源结构的主体,风力发电是我国最有发展潜力的清洁电源,风火电联合运营是我国现阶段常见的传统能源和清洁电源联合运营的模式。风火电联合运营的推广,有利于促进经济与环境的协调发展。

本书对基于绿色经济的风火电联合运营规划及效益评价进行了研究,主要分为四个部分。

第一部分,首先,进行了论文基础研究,对绿色经济的含义进行了论述,并介绍了研究的相关理论,为后续研究奠定了理论基础。其次,对我国的发电能源、电源结构、风力发电、火力发电现状、风火电联合运营现状进行了系统分析,提出了我国电源结构、新能源发展、风火电联合运营亟待解决的问题,奠定了后续研究的现实基础。

第二部分,对风火电联合运营规划的含义、准则、基本思路进行了阐述,对传统风火电联合运营模式的特征和优劣势进行了分析,提出了基于绿色经济的风火电联合运营规划模式,并对其影响因素和运营特征进行了分析;在对风电消纳影响因素分析的基础上,提出了基于风电集群效益和预测误差修正的完全成本约束电网消纳能力计算模型,对负荷高峰期和负荷低谷期电网的风电消纳能力进行了计算;在此基础上,建立了基于绿色经济的多目标成本约束的风火电联合运营规划模型。

第三部分,建立了基于绿色经济的风火电联合运营综合效益评价体系。在传统综合效益评价体系的基础上,设计了新评价指标,建立了包含传统经济效益、社会效益、环境效益、安全效益和绿色经济效益的评价指标体系。改进了模糊综合评价模型,采用 AHP 和 CRITIC 相结合的权重确定方法,在分析权重的同时,考虑了负荷高峰和负荷低谷的情况;改进了突变级数综合评价模型。采用余弦模型计算组合权重,构建了基于情景组合权重的模糊综合评价和改进的突变级数评价的组合评价模型,用以对基于绿色经济的风火电联合运营综合效益进行评价。

第四部分，对本书建立的规划模型和评价方法进行了实证分析，对某省2011年的风火电联合运营进行了规划，将规划结果与实际运营数据进行了对比分析；并以规划结果与实际运营数据为基础，对风火电联合运营综合效益进行了评价，将评价结果进行了对比分析。在实证分析的基础上，提出了提高我国风火电联合运营综合效益的对策建议。

本书的完成承蒙“智能电网中适应不稳定大规模清洁能源发电的联合智能调度管理理论研究”国家自然科学基金资助(71071052)，特此感谢！

研究期间，本书得到了相关单位以及地方政府有关人员的支持，在此表示感谢！本书的完成得到了华北电力大学老师和学生的大力帮助，宋晓华、李金超、王永利、刘达、王建军、刘金鹏、路妍、李莹莹、梅林、刘春香、范磊磊、劳咏昶、吴巧玲、宋嫒琳、朱琳等在实际调查、建模分析、文字修改及校对等方面做了大量工作，在此一并表示感谢！

本书的规划模型、评价方法和实证研究，对我国传统电源和清洁能源联合运营的发展具有理论与实践的参考和借鉴意义。由于时间仓促，加之水平有限，书中难免存在疏漏之处，对于书中的不妥之处，敬请批评指正。

房 芳

2014年7月

目次

1	绪论	1
1.1	研究背景	1
1.2	国内外研究综述	3
2	研究理论基础	9
2.1	绿色经济基本理论	9
2.2	风电消纳理论	11
2.3	联合运营规划理论	13
2.4	效益评价理论	17
3	我国风火电联合运营现状研究	19
3.1	我国发电能源现状分析	19
3.2	我国电源发展现状分析	24
3.3	新能源法规政策对我国电源结构的影响	28
3.4	风电与火电及风火电联合运营现状分析	31
4	风火电联合运营规划研究	41
4.1	风火电联合运营规划概述	41
4.2	风火电联合运营模式分析	43
4.3	基于绿色经济的我国风火电联合运营规划模式研究	45
4.4	基于绿色经济的风火电联合运营规划模型研究	48
5	基于绿色经济的风火电联合运营综合效益评价体系研究	59
5.1	基于绿色经济的风火电联合运营综合效益评价概述	59
5.2	基于绿色经济的风火电联合运营综合效益评价指标体系构建	60
5.3	基于情景组合权重的模糊综合评价模型	73
5.4	改进的突变级数评价模型	82
5.5	组合评价模型	85
6	我国风火电联合运营实证研究	88
6.1	数据收集及预处理	88
6.2	基于绿色经济的某省风火电联合运营实证分析	91

4 ► 中国风火电联合运营效益评价研究

6.3 提高风火电联合运营综合效益的对策建议 126

7 结论与展望 130

7.1 结论 130

7.2 展望 131

参考文献..... 132

1 绪 论

1.1 研究背景

能源资源的充分供应是国家社会经济稳定快速发展的保证。随着 20 世纪 80 年代中国经济的飞速发展，对于煤炭、石油等传统化石能源的需求日益增多，尤其是进入 21 世纪以后，国内过度开采的传统化石能源已经不能满足工业化发展的需要，供需矛盾不断加剧，每年需要依赖大量进口来维持基本的平衡。

世界能源署发布的《世界能源展望(2009)》(World Energy Outlook 2009)对未来二十余年的中国能源市场需求形势进行了预测。可以看出，中国对于传统化石能源的未来需求依旧很高，但同时对于风能在内的其他可再生能源需求增长率最快，具体情况见表 1-1。

传统化石能源的开采大量消耗十分紧缺的化石资源、土地资源和水资源等，同时，不规范的开采造成水土流失、土地荒芜等生态问题；更为严重的是，一次能源的燃烧使用过程中排放出大量的二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物、烟尘等污染物，造成空气环境严重恶化。相关研究表明，我国环境污染带来的经济和生态破坏损失大致相当于当年 GDP 的 7% ~ 20%。这种不可持续的能源发展模式亟须得到改善，需要大力发展非化石能源，转变能源结构，努力实现能源资源永续利用和经济社会可持续发展，节能减排任重而道远。

表 1-1 中国一次能源需求 百万吨标准油

能源品种	2000 年	2015 年	2030 年	2000—2030 年平均增长率/%
煤炭	880	1869	2399	3.4
石油	264	543	808	3.8
天然气	31	109	199	6.4
核电	10	32	67	6.6
水电	28	62	86	3.8
生物质	220	225	227	0.0
其他可再生能源	2	12	33	9.9

资料来源：《世界能源展望 2008：中国选粹》。

电力行业是消耗一次能源的重点领域，也是我国节能减排的重点领域。2010 年全国发电装机容量构成中，煤炭为主的火电占总容量的 73.4%，当年电力工业消耗了全国 55.1% 的煤炭资源，在能源转换过程中排放的二氧化碳占全国排放总量的 50%，排放的

二氧化硫占全国排放总量的 42.5%^[1]。2011 年,全国发电装机容量达 10.5×10^8 kW,其中火电装机容量为 7.6×10^8 kW,约占全国装机总容量的 72.3%。2012 年,全国新增发电设备容量 8.02×10^7 kW,其中火电新增容量 5.065×10^7 kW。而相关能源集团预测显示,“十二五”期间中国电力行业仍将保持较快增长,预计到 2015 年,电力行业的煤炭消耗量将超过 14×10^8 t 标准煤,较 2010 年 9.1×10^8 t,涨幅超过 50%。因此,电力行业有责任,有义务走资源节约型、环境友好型的发展道路,其中重要的一条道路就是转变发电结构,大力发展新能源和可再生能源。

《中国能源政策(2012)》导向性点出:大力发展新能源和可再生能源,是推进能源多元清洁发展、培育战略性新兴产业的重要战略举措,也是保护生态环境、应对气候变化、实现可持续发展的迫切需要。2011 年,我国非化石能源比重仅占一次能源消费总量的 8% 左右,2012 年为 9% 左右,《中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》提出:到 2020 年,我国非化石能源占一次能源消费比重将达到 15% 左右,单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 40%~45%,能源转型的压力很大。

在节能减排大形势下,发展清洁能源是绿色经济战略必经之路,而风能作为一种可再生、无污染的普遍性能源,将成为发展清洁可再生能源的首选。风电是对风能资源有效利用的一种方式,是一种清洁的发电形式,在能源转换过程中不会产生污染空气的排放物;此外,风电场主要建设在山区、农牧区和沿海盐碱地等偏僻地带,不仅可以有效减少建设和运营过程中对居民生活的影响,而且还能给当地增加旅游资源。因此,除水力发电之外,风力发电是当今世界上可再生能源开发利用中技术最成熟、最具开发规模和商业化发展前景的发电技术。由于其在减轻环境污染、调整能源结构、解决偏远地区居民用电问题等方面的突出作用,展现了很好的发展前景,是中国最重要的后续能源之一,受到中国各大发电集团的重点关注。

我国幅员辽阔,海岸线长,风能资源储量比较丰富,风电发展潜力很大。中国气象科学研究院根据全国 900 多个气象站陆地上 10 m 高度的风能资料进行估算:全国平均风功率密度为 100 W/m^2 ,风能资源总储量约 32.26×10^8 kW,陆地上可开发和利用的风能储量有 2.53×10^8 kW,近海可开发和利用的风能储量有 7.5×10^8 kW,共计约 10×10^8 kW^[3]。《可再生能源中长期发展规划纲要(2004—2020)》中明确提出了未来风力发电发展的目标和前景,其中并网风力发电总装机容量 2010 年为 5×10^6 kW,2020 年达到 3×10^7 kW。

然而风资源具有间歇性、随机性和波动性等特点,必须要有相当规模的常规电源配套进行调峰,才能保证电网的安全稳定运行;与此同时,我国能源资源分布不均衡,其中煤炭资源主要分布在华北、西北地区,风能资源开发条件较好地区也集中在三北(华北、西北、东北)偏远地区和东南沿海地区,煤炭资源和风电资源在地理空间分布上巧合地基本一致。基于上述两点原因,可以提出风力发电与火力发电联合运营的双赢模式。

风火电联合运行模式可以在建立大型风力发电场以充分使用可再生能源的同时,在就近地区也配套建设大量火电机组,除就地消化煤炭资源、减少长途运输消耗,还能为风电机组进行有效调峰,风火电联合运营可以有效地开发清洁能源。两种发电模式的有机结合,既优化了电源结构,又符合我国低碳经济发展的要求,是我国实施节能减排政策、实现可持续绿色发展的正确战略道路。因此,风火电联合运营模式是现阶段值得深入研究的

重要内容。

1.2 国内外研究综述

1.2.1 基于绿色视角经济发展综述

随着环境危机的爆发,人们意识到可持续发展的重要意义。人类社会先后出现了循环经济、生态经济、绿色经济和低碳经济等类似的经济形态。国内外众多学者将目光锁定在绿色视角下经济发展的探究方面。目前,国内外学者对此项研究方兴未艾,正逐步深入。

1.2.1.1 国外研究现状

工业革命以来,西方国家的经济发展走过了一条“先污染,后治理”的道路,绿色运动起源于对环境和社会问题的反思^[4]。1989年,“绿色经济”一词首先出现在英国环境经济学家皮尔斯出版的《绿色经济蓝图》一书中。皮尔斯认为,可持续发展的基本观点是,经济与我们的生存环境是不可分的。它们相互依赖,因为我们管理经济的方式影响环境,环境质量也影响经济的运行^[5]。

20世纪前,对生态环境问题的关注仅仅体现在人口与粮食的矛盾上。第二次世界大战以后,随着环境污染、生态退化、资源不足问题的出现,西方科学家逐渐对以往的经济增长方式产生了质疑,意识到只有考虑到环境承受能力的经济发展方式才能符合发展的规律。尤其是震惊世界的“八大公害”事件的发生,引起了人们的普遍关注。

绿色发展是一个历史进程。1962年,美国生物学家莱切尔·卡尔逊在《寂静的春天》一书中,首次真正结合经济社会问题开展生态学研究,向全球敲响了环境恶化的警钟,拉开了“生态时代”的序幕^[6]。美国经济学家肯尼斯·鲍尔丁在《宇宙飞船经济观》一书中主张建立既不会使资源枯竭、又不会造成环境污染和生态破坏的、能循环使用各种物资的“循环式经济”,以代替过去的“单程式经济”^[7]。

1971年,福雷斯特尔在《世界动态学》一书中提出了动态平衡发展理论,主张有目的地暂时停止物质资料的生产和人口增长,以保持一种动态平衡的经济^[8]。1972年,美国麻省理工学院的丹尼斯·麦多斯领导的17人小组推出了被称为“70年代的爆炸性杰作”的报告——《增长的极限》。他们的基本结论是:“如果世界人口、工业化、污染、粮食生产以及资源消耗按现在的增长趋势继续不变,这个星球上的经济增长就会在今后100年内某一个时候达到极限。最可能的结果是人口和工业生产能力这两个方面发生颇为突然的、无法控制的衰退或下降^[9]。”麦多斯与福雷斯特尔在研究内容和分析方法上基本一致,西方经济学家常将他们的理论联系在一起,形成“福雷斯特尔—麦多斯”模型。

1984年,美国学者爱迪·布朗·韦丝发表《行星托管:自然保护与代际公平》,文章指出,人类的每一代人都是对后代人的地球权益的托管人,并提出实现每一代人之间在开发、利用自然资源方面的权利的平等^[10]。1987年,世界环境与发展委员会发表《我们共同的未来》的报告,进一步明确了可持续发展的概念,将其定义为“既满足当代人的需求,又不危及后代满足其需求的发展”。

20世纪90年代以后,国外学者对绿色视角下经济的研究更加深入和重视。Stokey 在外生的经济增长模型中纳入了对环境污染的考察,探讨技术进步与经济可持续增长的关系,发现人均收入与环境质量之间存在着倒“U”形关系^[11]。2001年,美国布朗教授在《生态经济:有利于地球的经济构想》一书中提出经济系统是生态系统的一个子系统的观

点,这一思想在生态经济学界掀起轩然大波,唤醒大众,敦促各层面决策者改变观念并付诸实践^[12]。

总的来看,国外对于绿色视角下经济发展的研究起步较早,经历了一个历史进程。绿色视角下经济的发展没有固定的模式,但有着基本的发展准则,在发展中要采用节能降耗的技术,减少碳的排放量,促进经济、社会与环境的协调发展。

1.2.1.2 国内研究现状

在能源短缺、气候变化、环境污染等多重危机形势下,基于绿色视角经济的发展已成为全球经济发展的趋势和潮流,我国也不例外。国内学者对于绿色经济的研究起步较晚,但发展较快,有一定的研究成果,同时也存在一些不足。

国内对于绿色视角下经济的研究以可持续发展为基础,大致经历三个阶段。最早的理论从科技的角度认识可持续发展,绿色经济意味着环境的净化;随着研究的深入,在考虑生态与经济协调关系的基础上建立新的理论;继而考虑社会、经济与环境三者关系,谋求,在经济发展、环境保护和社会和谐之间实现平衡^[13]。

季铸教授是绿色经济系统理论的创建者和实践者之一。他认为,中国经济面临消费、投资、出口乏力和通货膨胀的多重挑战,“绿色经济+结构增长”将是中国经济主旋律,在传统工业经济向绿色经济的结构转变中,确定性地实现效率、和谐、持续增长目标^[14]。刘思华教授是较早提出环境与经济问题的学者之一,他认为,低碳经济体作为新的发展模式的创新选择,就在于它是对工业文明的黑色经济发展模式的否定和扬弃,创造出生态文明的绿色经济发展模式^[15]。投资理论专家田江海认为,发展绿色经济是一项系统工程,不但要正确认识和处理人与自然的关系,还必须调整和完善企业生产模式、经济发展方式、体制机制、法律法规、方针政策等^[16]。

总之,国内学者对于绿色视角下经济发展的研究集中停留在定性描述上,缺少定量分析,没有形成系统完整的理论体系。绿色视角下经济转型,将对我国现有经济制度与发展机制提出新的要求,必须进行相应的创新。

1.2.2 电力联合调度综述

1.2.2.1 国内研究综述

大体而言,我国电力调度的方式经历了垂直一体化、电力多元投资主体、市场环境下的调度三个阶段。随着社会的进步和经济的发展及电力体制改革的深入进行,我国的用电需求将越来越大,电网建设和发展的速度越来越快,网架结构越来越复杂,电力调度的研究尤为重要。

近年来,我国学者对于电力调度的研究集中于经济调度、节能调度和智能调度的研究。经济调度模型考虑因素逐渐丰富,逐渐发展形成了动态安全约束经济调度模型。节能调度模型以节能、环保和经济为目标,确定约束条件,建立优化模型。智能电网是未来电网的必然趋势和选择,智能调度是建设坚强智能电网的核心与必然。

电力系统中并存火电、水电、风电等多种能源结构,随着风电、水电的并网,要开展电力联合调度,协调各时段发电形式的分配和调度方案,用以实现资源的最优配置。吴杰康教授等提出一种新的水火电力系统短期优化调度的调度准则,在此基础上给出了基于效益分析的短期优化调度数学及其评价方法^[17]。范国英教授等针对吉林电网风电等新能源接入的特点,对吉林电网智能调度体系框架做了规划研究,提出智能调度建设方案^[18]。

侯佑华教授等得出全网风电极小值对电网运行影响最大的结论,设计出适用于风电运行管理的扁平化调度模式^[19]。

国内学者对于电力调度的算法进行了大量研究。常用的算法有遗传算法、粒子群优化算法、蚁群优化算法、进化算法等。石立宝教授等利用遗传算法求解电力系统有功经济调度问题,并根据存在的不足加以改进^[20-22]。王道军教授、孙俊教授应用量子行为的粒子群算法,并验证了它的可行性^[23]。秦梁栋教授等将各种算法进行整合和改进^[24-26]。秦梁栋教授、曹一家教授提出了一种混合多目标遗传算法来解决电力调度问题的多目标特性^[24]。孟安波、刘永前将遗传算法与人工神经网络结合起来解决电力系统经济调度问题^[25]。罗中良教授等通过混合蚁群算法及序列二次规划法来求解带伐点效应的调度问题^[26]。除一些常用方法外,胡飞雄教授、李建设教授提出基于简单排序法的经济调度最优算法和近似算法,这种算法没有引入任何乘子,单调收敛,计算速度快,并且不存在震荡现象^[27]。吴阿琴教授等基于内点半定规划,提出了一种直接求解 $\{0, 1\}$ -电力调度问题的新方法^[28]。

1.2.2.2 国外研究综述

国外电力调度模式主要经历了两个重要阶段,一是垂直一体化管制下的经济调度模式;二是放松对发电环节管制下的市场竞争调度模式。经济调度模式是以全系统发电成本最低或煤耗最低为目标的发电调度模式^[29]。市场竞争调度模式基于边际成本定价理论,在充分竞争市场环境中,可以达到帕累托效率,实现资源最优配置^[30]。

在电力联合调度中,最早考虑与时间相关约束的是水火电联合调度问题。Ei Hawary M E、Habibollahzadeh H、Medina J、Quintana V H 等分别应用牛顿法、非线性规划法和内点法等算法用以求解水火电联合调度的大规模非线性规划问题^[31-33]。此外,M. R. Farooqi、Lowery P. G、Ma. H 等提出了等微增率、动态规划法、混合整数规划法等方法,力求解决水火电经济调度问题^[34-36],但是这些现代数学优化方法或多或少存在一些缺陷。随着人工智能和计算机技术的快速发展,近年来,智能启发式优化算法为解决水火电联合调度问题研究提供了新的途径。Sendaula、Petter Ronne - Hansen 等分别用模拟退火算法和禁忌搜索法来计算该类问题^[37-38]。

近十年来,全球风电产业超速发展。风电既可以并网运行,又可以和其他能源组成互补系统,风火电联合调度的研究也具有较强的现实意义。国外对于含风电场的电力系统联合调度的研究有以下几个调度模型:考虑备用成本的调度模型、考虑罚因子的调度模型、考虑风险的调度模型和考虑火电机组组合限制条件的调度模型^[39]。Francois Bouffard And Francisco D. Galiana 将随机安全的思想引入到短期优化问题中,利用期望社会成本的概率函数将风电的不确定量化,进而优化^[40]。Vladimiro Miranda 提出了在含风电场的电力系统经济调度过程中考虑调度员态度的模型构建方法^[41]。

1.2.3 风电并网综述

随着经济的发展和社会的进步,人类对能源的需求不断上升。传统利用能源,如煤炭、石油等属于非可再生资源,储量有限,人类社会面临着严重的能源危机。改变能源利用结构,是人类社会谋求可持续发展必须解决的难题。近年来,可再生能源的利用受到了广泛的关注,取得了突破性进展。

风电是技术上较为成熟、分布较为广泛的清洁能源之一,近年来风电发展迅速,在未

来电力系统发展中将占有重要地位。

由于风能自身的随机性和间歇性,使得风电具有不可控性和调节性差的特点。大规模风电接入电网后,会给电力系统带来较大的冲击,对电网带来隐患^[42]。针对风电并网存在的问题,张洋教授从政策研究的角度提出了相关建议,如尽快出台有利于促进风电消纳的各项政策、出台可再生能源接网工程投资通过销售电价疏导的具体办法等^[43]。王增平教授等在分析风电并网存在问题的基础上,从技术角度上提出了改善风电并网运行状况的有效措施^[44~46]。

由于风电的随机性、间接性,为保证安全可靠供电,风电并网必须由常规能源有功出力来提供补偿,可行方案是使风电和火电联合运营,通过调节火电来保证风电,而电网可接纳风电受输送能力、调峰能力、稳定水平、电压波动等因素影响^[47~49]。刘晓明等从技术上可行的角度对电网风电接纳能力进行了分析^[50]。

风电并网不仅要满足技术上的可行性,还要满足经济上的合理性。赵冬梅教授等人阐述了接纳风电所采取的调峰措施,并对各种调峰手段进行经济效益分析^[51]。李军等人就风电项目成本控制方面,从项目实施前、实施过程及建设成本控制三个角度着手,对风电项目成本控制问题展开分析^[52]。谢春瑰等人首次提出了风火电联合运营的观点,利用技术结构比例模型与经济结构比例模型得出风电和火电联合运营的比例,既满足电力系统的稳定运行,同时又使电力系统成本最小^[53]。

全球的风能资源极其丰富,几乎分布在每个国家和地区,世界风电的发展取得了令人瞩目的成就,发展潜力巨大。欧洲一直是风电发展的领军者,欧洲主要发展国家风电已进入产业快速发展时期。国外也有大量学者对风能发电技术和风电并网技术进行研究。

Castro R, Fei joo A. E. 等人从技术角度对风能发电技术进行研究,讨论对风电的容量可信度的评价方法,求得风场的无功功率^[54~55]。Stavarakakis S 和 Kariniotakis N 针对微网,研究了风电的稳定性问题,结果表明有必要对风电并网后的系统稳定性进行认真评估^[56]。Larsson 分析了风力发电机组在并网方式下,风机的同时启动对电网的冲击电流所造成的影响^[57]。Dialynas E N 指出风电并网后,要相应地调整和优化电力系统的运行方式,因此,对电力系统传统的运行方式控制手段做出改进和调整是非常重要的^[58]。

总体来看,近年来国内外学者对于风电项目的研究内容较为丰富,我国对于风电并网的研究起步较晚,国外一些研究成果对其有借鉴意义。其次,国内外专家虽对风电机组联网运行特性作了大量研究,但是在这一领域还缺乏实际的试验来验证。此外,国内外学者对于风电并网的研究主要集中在技术可行性上的探讨,对经济合理性的研究较少。

1.2.4 风电消纳能力综述

随着风电资源的不断被开发利用及风电装机容量的快速增长,规模风电消纳正逐渐成为全世界电网运行调度面临的巨大困难,其中制约风电并网最大的障碍是风电出力的随机性和波动性^[59]。针对这一问题,国内外的一些学者采用了多种处理办法,张节潭等提出了基于等效电量频率法的电力系统随机生产模拟方法来处理风速的随机性^[60];潘迪夫等结合时间序列和卡尔曼滤波法对风速进行预测,克服了时间序列方法预测延时和精度不高的缺陷^[61]。Kariniotakis G 分析了另一种时序神经网络法,并应用其对风速进行了预测,提高风电的预测精度^[62]。

为了减小风电的剧烈波动,使得风电较为平稳地接入系统,目前实际调度中的普遍做

法是通过命令风电场压缩出力,再根据调度计划频繁启停风机来实现。但这无疑有两方面的弊端:一是风电场不能高效运行,造成能源浪费;二是频繁启停会加剧风机损害,减短使用寿命。因此,国内外的学者们致力于找出更加科学的办法。

在政策层面,国内不少学者取得了不少成果。孙元章等提出了促进我国风电可持续发展思路,建立了一套风电消纳能力研究方法,分析得出抽水蓄能建设规模、跨区输电能力是最主要影响因素^[63]。徐伟等为有效解决大规模风电消纳问题,剖析了风电消纳面临的主要问题,提出了低碳能源消纳机制的新构想,探讨了不同时期风电参与市场竞争的可行模式与辅助服务市场设计方案^[64]。徐国丰研究了绿色电力消纳机制,采用了风电非并网消纳模式,提出了大用户专线直购风电的方案^[65]。

在发电侧,可利用其他发电手段与风电出力功率互补再接入电网,使出力较为平稳。肖创英等提出在酒泉地区配套建设火电机组、利用特高压输电风火打捆外送、在更大范围内消纳的建议^[66]。还有些学者提出通过一些调度手段来优化储能和备用,从而达到抑制风电出力波动性的效果。韩涛等研究了优化储能容量、平滑大型风电场因风速不均而造成的输出波动,进而减小风电场对电力系统的影响,并且对影响储能容量的因素进行了分析讨论^[67-68]。葛炬提出了一种含风电场的系统旋转备用获取的机会约束规划方法^[69]。

在需求侧,不少学者提出利用需求响应来抑制风电的波动性。Ramteen Sioshans 基于机组组合模型进行分析,得到了考虑需求弹性能够明显提高风电利用率、减少调度成本的结论,但采用的是确定性模型,没有考虑风电的随机性,需求弹性的处理也略显简单^[70]。Dirk Westermann 等结合广域相量测量技术和需求侧管理,通过控制联络线两端系统负荷来减小风电引起的联络线潮流波动,但没有考虑实时电价的作用,也未给出具体模型^[71]。艾欣等结合日前实时电价决策和可调度需求侧资源,设计了一种利用需求响应实现风电消纳的机会约束模型和机制^[72]。

显然,传统的优化调度方法对随机性变化的风电已经不适用,国内外的学者考虑引入随机规划理论来解决含风电场的动态经济调度问题。陈海焱等应用随机规划理论建立了考虑机组组合的含风电场电力系统动态经济调度模型,并综合应用随机模拟、神经网络和遗传算法的混合智能算法求解模型,但只以常规机组发电成本最小为单目标,没有考虑污染物的排放^[73]。徐玮等建立了含风电场的电力系统动态经济调度模糊模型,并采用下降搜索的改进粒子群算法求解模型,但问题是同样未考虑多个目标^[74]。

1.2.5 综合效益评价综述

作为现代经营管理决策的研究工具,多指标综合效益评价方法与技术已被广泛应用于社会、经济的各个方面,应用领域越来越广泛,研究方法越来越多样、复杂,评价结果越来越科学。

1.2.5.1 综合评价体系研究综述

评价指标体系的构建是多指标综合效益评价的基础,同时也是关键所在。综合评价体系的发展呈现如下趋势:评价内容由单一向多样化发展;定性与定量相结合,定量分析占主导;将社会效益与环境效益作为重点的评价指标。

电力企业是国民经济的基础,随着电力行业改革的深入进行、节能减排措施的不断开展,对电力企业,尤其是火力发电项目综合评价的研究越来越多。在此,以发电项目为视角,研究综合评价体系的构建。

皇甫艺从经济性、环境性、社会性、性能和噪声 5 个方面构建了冷热电联产系统的综合评价模型,在构建评价指标体系时,综合考虑了各方面的属性,以符合可持续发展的要求,达到科学评价的目的^[75]。周萍等从内部效益、环境效益和社会效益等方面分析了影响热电联产企业可持续发展的因素,建立了热电联产企业可持续发展能力的评价体系^[76]。张佳林等在完全性、非相容性、简捷性和客观性的原则下,构建了三层指标体系:目标层是火电企业可持续发展能力;准则层从经济效益发展能力、创新发展能力、环境资源利用能力、社会协调发展能力 4 个方面展开;指标层具体展开^[77]。孙虹等从社会、技术、经济、环境和资源 5 个方面构建了热电项目建设方法的综合评价体系,又分别从社会分析、社会效果、合理可靠性、安全性、先进性、财务评价、国民经济评价、环境污染、生态平衡、节约能源和资源合理利用角度具体构造评价指标^[78]。

我国对发电项目的综合评价展开了一系列的研究,由最初单一的财务评价,逐渐将财务、经济、环境、社会、可持续纳入综合评价的范畴,目前已形成以项目建设评价、经济效益评价、环境影响评价、社会效益评价等内容组成的综合评价体系。

1.2.5.2 综合评价方法研究综述

对于综合评价方法,国内外学者研究领域集中于根据某个具体方法提出自己的改进设想或创新。从早期的评分评价法、组合指标法,到后来的模糊综合评价、层次分析法,再到近期的人工神经网络法、数据包络分析等,国内外学者对于综合评价方法的研究成果丰硕。利用不同的方法对不同领域活动进行综合评价,这种定量分析方法得到了广泛的认可。

国内外学者在综合评价时常用的方法有:多属性决策方法、与运筹学结合的方法、统计分析方法、智能评价方法、以灰色系统理论为基础的灰色综合评价法、模糊综合评价方法、物元分析法、系统模拟与仿真评价等方法。

模糊综合评价方法是应用较广的综合评价方法之一,其本身是模糊数学的一项重要的基本研究内容。Wang M. J. J 将 AHP 和模糊集相结合的综合评价方法应用于检查测试选择^[79]。Maeda H 将模糊集理论引入了多目标决策中,构成模糊决策方法,用于不良定义的决策问题的求解^[80]。陈守煌教授根据自己建立的“模糊优选理论”,提出了“优属度”的概念,并将其应用于综合评价^[81]。Pontil M 将模糊数学、遗传算法、基于 agent 的建模方法和 Swarm 仿真、离散事件系统建模工具 Petri 网等技术方法应用到综合评价领域,更加灵活化、智能化^[82]。刘玉斌对模糊综合评价中的取大取小算法进行了进一步探究^[83]。

随着智能学科的不断融合、计算机和信息技术的发展,涌现出一大批新的、智能的综合评价方法。Dagli C 将人工神经网络技术与综合评价相结合,提供智能决策支持^[84]。Yager R 提出有序加权平均算子 (OWA),在其基础上推广提出了诱导有序加权平均算子 (IOWA)^[85]。Pontil M 等利用支持向量二值分类机进行综合分类评价,这种方法比传统的神经网络方法的精度更好、应用范围更广^[86]。Kazimierz 提出了多属性随机优势评估问题的带偏好关系的 Rough 近似方法^[87]。

总体而言,国外学者对于综合效益评价的研究起步较早,研究主要集中于综合评价方法的创新;国内学者将研究的重点放在指标筛选和指标体系优化上。不同项目、不同领域在评价体系构建上有各自特殊性,但在评价方法上有着共性。在进行多目标综合评价时,应具体问题具体分析,根据被评价对象的特性和评价时的侧重点,研究适合的评价方法。

2 研究理论基础

2.1 绿色经济基本理论

2.1.1 绿色经济的含义

随着经济社会的快速发展,生态环境方面存在的问题日益严重,经济的快速增长不但带来了巨大的能源消耗,更造成环境质量的下降以及生态环境的失衡。面对由于经济发展而造成的生态恶化现象,我们需要反思传统经济发展模式存在的问题,寻求一条以不伤害生态环境为前提、实现人与自然协调发展的新模式。人类发展应该和自然环境相适应,单纯追求经济的高速发展,以牺牲自然环境为代价,将使得经济发展无法可持续。我们应该改变以往的过度消耗资源和严重污染环境的传统经济发展模式,逐步完善当前的经济发展体制,在生态自然环境和资源的承受范围内进行经济发展模式的创新。绿色经济是实现可持续发展、解决经济发展与生态环境矛盾的一种重要发展模式。

“绿色经济”这一概念是由英国经济学家皮尔斯在1989年出版的《绿色经济蓝皮书》中首次提出的。绿色经济是一种可持续发展经济,追求生态和经济的协调发展,将清洁生产和其他环保技术转化为先进生产力,保护资源和能源,维护生态环境。绿色经济以可持续发展为原则,以传统的产业经济为基础,以资源、环境和社会的协调发展为内容,以经济、社会以及自然环境的和谐为目的,是一种逐渐发展的新的经济模式,是产业经济为适应人类新的需要而表现出来的一种形式。绿色经济的发展模式,将众多有益于环境可持续发展的先进技术转化为现实生产力,并构建自然资源与社会环境的和谐发展,实现经济长期稳定的可持续增长。

绿色经济是一种协调发展的可持续发展方式。本书基于绿色经济的研究,主要强调的是协调发展的能力,是经济与社会、与环境共同协调发展能力。基于绿色经济的风火电联合运营的研究,就是在传统联合运营研究的基础上,加重了风电、火电发展与经济社会环境发展相协调的因素,力图达到使用最少的社会环境成本进行经济发展的目标。

2.1.2 绿色经济的基本特征

与传统的经济发展模式相比,绿色经济作为一种新的经济模式,主要具备以下几个方面的特征:

(1) 绿色经济追求经济活动的全面“绿色化”、生态化。在新的国际环境下,倡导绿色经济不仅要大力发展节能环保等绿色产业,还要加大对传统产业的绿色化、生态化改造。这对于当前正处在工业化快速发展阶段的中国显得尤为重要。因此,发展绿色经济,必须加大对传统产业进行绿色化改造的力度,坚决淘汰落后产能,提高环境保护的准入门槛,优化经济发展结构,提升经济发展质量。

(2) 绿色经济以绿色投资为核心、以绿色产业为新的增长点。新阶段下发展绿色经济,必须准确把握绿色经济的核心和增长点,必须加大绿色投资的力度。绿色投资既包括