



先进能源智能电网技术丛书

智能电网

规划与运行的 评估理论与应用

严正 · 著



科学出版社

先进能源智能电网技术丛书

智能电网规划与运行的 评估理论与应用

严 正 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

首先,本书对智能电网的新特征以及智能电网评估研究现状进行了阐述,并提出了传统评估方法的局限性与智能电网评估的新问题。然后,第2~5章对智能电网规划与评估理论的数学基础进行了系统介绍,包括经典评估理论与方法、经典规划理论与方法、评估理论与方法的扩展以及规划理论与方法的扩展。在第6~15章,围绕智能电网的规划、运行和控制,介绍了基于传统和扩展的数学理论的智能电网规划与评估分析的模型与方法,包括智能电网技术效率评估、技术进步评估、动态评估、智能变电站技术成熟度评估、黑启动恢复方案评估、电磁环网运行方案评估、电动汽车充电决策方案评估以及智能电网下的电力负荷预测、不确定条件下的源-网-荷协调规划、大数据相关技术用于智能电网评估。书中提供了大量实例,既包含智能电网技术、经济分析与评估的宏观问题,也涉及智能电网环境下先进技术在规划与运行控制应用中的相关具体问题。

本书可供电力和能源领域相关的科研人员和工程技术人员参考使用,也可作为相关高校高年级学生和研究生专业参考书。

图书在版编目(CIP)数据

智能电网规划与运行的评估理论与应用 / 严正著.
—北京: 科学出版社, 2017.7
(先进能源智能电网技术丛书)
ISBN 978-7-03-053617-4

I. ①智… II. ①严… III. ①智能控制-电网-电力系统规划-评估 ②智能控制-电网-运行-评估 IV. ①TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 132483 号

责任编辑: 王艳丽
责任印制: 谭宏宇/封面设计: 殷 靓

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>

南京展望文化发展有限公司排版

上海叶大印务发展有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 7 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 7 月第一次印刷 印张: 18 插页: 1

字数: 405 000

定价: 108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

先进能源智能电网技术丛书

编辑委员会

顾问专家：饶芳权

主任委员：江秀臣

副主任委员：蔡旭 韦巍

委员：（按姓氏笔画排序）

尹毅 朱森 刘东 严正

黄学良 符杨 解大



当今人类社会面临能源安全和气候变化的严峻挑战,传统能源发展方式难以为继,随着间歇式能源大规模利用、大规模电动车接入、各种分布式能源即插即用要求和智能用户互动的发展,再加上互联网+智慧能源、能源互联网(或综合能源网)等技术的蓬勃兴起,推动了能源清洁化、低碳化、智能化的发展。在能源需求增速放缓、环境约束强化、碳排放限制承诺的新形势下,习近平主席于2014年提出了推动能源消费、供给、技术和体制四大革命及全方位加强国际合作的我国能源长期发展战略。作为能源产业链的重要环节,电网已成为国家能源综合运输体系的重要组成部分,也是实现国家能源战略思路和布局的重要平台。实现电网的安全稳定运行、提供高效优质清洁的电力供应,是全面建设小康社会和构建社会主义和谐社会的基本前提和重要保障。

电力系统技术革命作为能源革命的重要组成部分,其现阶段的核心是智能电网建设。智能电网是在传统电力系统基础上,集成新能源、新材料、新设备和先进传感技术、信息技术、控制技术、储能技术等而构成的新一代电力系统,可实现电力发、输、配、用、储过程中的全方位感知、数字化管理、智能化决策、互动化交易。2014年下半年,中央财经领导小组提出了能源革命、创新驱动发展的战略方向,指出了怎样解决使用新能源尤其是可再生能源所需要的智能电网问题是能源领域面临的关键问题之一。

放眼全球,智能电网已经成为全球电网发展和科技进步的重要标志,欧美等发达国家已将其上升为国家战略。我国也非常重视智能电网的发展,近五年来,党和国家领导人在历次政府工作报告中都强调了建设智能电网的重要性,国务院、国家发改委数次发文明确要加强智能电网建设,产业界、科技界也积极行动致力于在一些方向上起到引领作用。在“十二五”期间,国家科技部安排了近十二亿元智能电网专项资金,设置了九项科技重点任务,包括大规模间歇式新能源并网技术、支撑电动汽车发展的电网技术、大规模储能系统、智能配用电技术、大电网智能运行与控制、智能输变电技术与装备、电网信息与通信技术、柔性输变电技术与装备和智能电网集成综合示范,先后设立“863”计划重大项目2项、主题项目5项、支撑计划重大项目2项、支撑计划重点项目5项,总课题数合计84个。国家发展和改革委员会、国家能源局、工业和信息化部、国家自然科学基金委员会、教育部等部

委也在各个方面安排相关产业基金、重大示范工程和研究开发(实验)中心,国家电网公司、中国南方电网有限公司也制定了一系列相关标准,有力地促进了中国智能电网的发展,在大规模远距离输电、可再生能源并网、大电网安全控制等智能电网关键技术、装备和示范应用方面已经具有较强的国际竞争力。

国家能源智能电网(上海)研发中心也是在此背景下于2009年由国家能源局批准建立,总投资2.8亿元,包括国家能源局、教育部、上海市政府、国家电网公司和上海交通大学的建设资金,下设新能源接入、智能输配电、智能配用电、电力系统规划、电力系统运行五个研究所。在“十二五”期间,国家能源智能电网(上海)研发中心面向国家重大需求和国际技术前沿,参与国家级重大科研项目六十余项,攻克了一系列重大核心技术,取得了系列科技成果。为了使这些优秀的科研成果和技术能够更好地服务于广大的专业研究人员,并促进智能电网学科的持续健康发展,科学出版社联合国家能源智能电网(上海)研发中心共同策划组织了这套“先进能源智能电网技术丛书”。丛书中每本书的选择标准都要求作者在该领域内具有长期深厚的科学研究基础和工程实践经验,主持或参与智能电网领域的国家“863”计划、“973”计划以及其他国家重大相关项目,或者所著图书为其在已有科研或教学成果的基础上高水平的原创性总结,或者是相关领域国外经典专著的翻译。

“十三五”期间,我国要实施智能电网重大工程,设立智能电网重点专项,继续在提高清洁能源比例、促进环保减排、提升能效、推动技术创新、带动相关产业发展以及支撑国家新型城镇化建设等方面发挥重大作用。随着全球能源互联网、互联网+智慧能源、能源互联网及新一轮电力体制改革的强力推动,智能电网的内涵、外延不断深化,“先进能源智能电网技术丛书”后续还会推出一些有价值的著作,希望本丛书的出版对相关领域的科研工作者、生产管理人员有所帮助,以不辜负这个伟大的时代。

江秀臣

2015.8.30 于上海

前 言



智能电网建设作为一项长期艰巨复杂的系统工程,涉及技术领域宽泛、环节众多,量化评估先进技术在电网智能化进程中取得的成效是一项极具挑战但有现实意义的工作。在当前智能电网中新技术大规模应用的时代背景下,研究并分析适应于电网智能化建设和发展的技术先进性评估方法,不仅能够分析智能电网运行中所处的状态,而且可以评判智能电网未来规划建设的合理性,为智能电网中技术发展的价值评估提供一定的参考。

随着智能电网的建设不断深入,新技术将在电力系统各领域中得到更加广泛的应用与发展,这也将是智能电网发展的必然趋势。然而,在现有的成果中,尚未形成针对智能电网评估的理论体系,同时已有的研究成果多为仅从单一角度分析智能电网技术的应用效果,评估体系缺乏关联性与全面性,并且智能电网技术评估与分析的方法也很不完善。因此,系统地阐述智能电网评估的概念,并与各领域的智能电网技术相结合,提出不同视角下的智能电网的评估方法体系,将其应用于智能电网规划与运行的分析中,解决先进技术对智能电网建设影响的评估问题,具有极大的理论意义和工程实用价值。

本书主要介绍智能电网规划、运行、控制中的评估理论、方法及其应用效果。全书在内容上分为两个方面:首先是深化研究规划与评估理论、方法,期望形成一个更加科学、完备的基础理论体系,达到基础性、通用性、体系性的目标,为智能电网相关评估应用提供新的理论基础与数学工具。其次是探究基于提出的理论体系的智能电网相关领域的评估应用研究。在继承已有理论的基础上,开拓新的理论研究,将其应用到智能电网规划、运行、控制的评估与技术经济分析中,初步形成了智能电网规划与运行评估分析的方法体系,实现了“理论-方法-工具”三者紧密互动与融合,为评估理论与应用研究提供了有效的研究工具与分析思路。

第1章“绪论”阐述智能电网的基本特征、内涵、覆盖领域,以及评估理论应用于智能电网各领域的研究现状,产生新问题之后,分基础和应用两个部分进入主体内容。基础篇(第2~5章)是本书的基础理论部分,系统地介绍本书研究智能电网规划与评估理论的数学基础,包括经典评估理论与方法、评估方法的理论拓展、经典规划理论与方法,以及近年来规划理论的最新研究成果。应用篇(第6~13章)是本书的方法分析与应用部分,围绕智能电网的规划、运行和控制主要领域,介绍基于传统和扩展的数学理论的智能电网规划

与评估分析的模型与方法,书中提供了大量实例,既包含智能电网技术经济分析与评估的宏观层面问题,也涉及智能电网环境下先进技术在规划与运行控制应用中的相关具体问题。

本书以解决智能电网规划与评估的理论方法为出发点,围绕当前电力系统相关领域的评估研究中存在的问题、新的现象及研究热点,在总结现有模型、方法的特点与不足的基础上,突破传统思维定势,提出了具有一般变革与创新性的方法论,能够从整体上把握评估理论体系的脉络,重点解决评估在规划、运行与控制领域的基本理论问题与关键性技术。

本书在撰写过程中还参考了其他学者应用相关评估理论进行电力系统评估分析的许多专著,在此向这些学者表示衷心的感谢。本书部分研究工作先后得到了国家高技术研究发展计划(2012AA050803)、国家自然科学基金(No. 51377103)、高等学校博士学科点专项科研基金(20120073110020)的资助,特此致谢。

本书是我们近年来科学研究工作的总结,部分内容取材于本课题组所培养的韩冬、徐潇源、许少伦博士,李磊、张良、张道天硕士,以及周云、李亦言、孙凯华等的学术论文或学位论文。本课题组的孙云涛、倪兆瑞等协助校对了本书的初稿。

清华大学康重庆教授、西安交通大学别朝红教授,以及华北电力大学谭忠富教授在百忙之中审阅了全书的初稿并提出许多宝贵意见,在此深表感谢。上海交通大学电气工程系和国家能源(上海)智能电网研发中心为本书的撰写提供了良好的条件,在此一并表示感谢。

作者希望本书能够起到抛砖引玉的作用,能为智能电网研究人员提供一些参考,推动我国智能电网评估理论向更高水平发展。尽管在本书的编写过程中已经对结构脉络、体系安排、素材选择与文字描述竭尽全力、精益求精,但限于作者水平有限,书中难免存在不足之处,真诚期待读者批评和指正。

作 者

2016年9月于上海交通大学

目 录



序
前言

- 第 1 章 绪论 1
 - 1.1 智能电网特征 1
 - 1.2 国内外智能电网规划与评估研究现状 2
 - 1.2.1 综合评价模型 3
 - 1.2.2 综合评价方法 4
 - 1.3 传统电力系统规划与评估的方法 5
 - 1.4 智能电网规划与评估的新问题 8
 - 参考文献 13
- 第 2 章 经典评估理论及方法 17
 - 2.1 层次分析法 17
 - 2.1.1 层次分析法概述 17
 - 2.1.2 层次结构模型建立 18
 - 2.1.3 判断矩阵构造 19
 - 2.1.4 一致性检验 20
 - 2.1.5 重要度计算 21
 - 2.1.6 层次分析法的应用步骤 22
 - 2.2 数据包络分析方法 22
 - 2.2.1 数据包络分析方法概述 22
 - 2.2.2 数据包络分析模型 23
 - 2.2.3 数据包络分析方法的应用步骤 25
 - 2.3 主成分分析法 26
 - 2.3.1 主成分分析法基本思想 26
 - 2.3.2 主成分分析法数学解释 26

2.3.3	主成分分析计算步骤	28
2.3.4	主成分分析评价流程	31
2.3.5	主成分分析法在电力系统中应用概述	31
2.4	生产函数法	32
2.4.1	生产函数的一般形式	33
2.4.2	生产函数的数学性质	34
2.4.3	技术进步的数量特征	35
2.5	系统动力学	37
2.5.1	系统动力学理论简介	37
2.5.2	系统动力学理论的基本观点	38
2.5.3	系统动力学分析、研究、解决问题的主要过程与步骤	39
2.5.4	系统动力学构模原理、方法	41
	参考文献	41
第3章	经典规划理论及方法	43
3.1	线性规划	43
3.1.1	线性规划的定义和标准形式	43
3.1.2	线性规划问题解的概念和性质	44
3.1.3	单纯形法	45
3.1.4	线性规划问题的对偶理论	47
3.2	非线性规划	49
3.2.1	无约束优化问题	49
3.2.2	无约束优化问题的最优性条件	49
3.2.3	无约束优化问题的求解算法	50
3.2.4	约束优化问题的最优性条件	53
3.2.5	约束优化问题的求解算法	53
	参考文献	55
第4章	评估理论与方法的扩展	56
4.1	基于云模型的新评估方法	56
4.1.1	定性指标及云模型的提出	56
4.1.2	云和云滴	56
4.1.3	正态云模型	57
4.1.4	定性指标处理步骤	58
4.2	超效率概念在数据包络法中的应用	58
4.3	灰色聚类分析法	59
4.3.1	灰色系统理论简介	59
4.3.2	灰色聚类分析法原理	62
4.3.3	不同白化权函数及其特点	65
4.4	随机前沿生产函数法	68
	参考文献	69

第5章 规划理论与方法的扩展	70
5.1 大规模数学规划的计算问题	70
5.1.1 模拟技术与智能算法	70
5.1.2 不确定规划模型的求解算法	73
5.1.3 不确定规划建模和算法问题的分析	73
5.2 鲁棒优化理论产生背景	74
5.2.1 不确定规划与鲁棒优化	74
5.2.2 鲁棒优化理论的发展	76
5.3 鲁棒优化模型及方法	78
5.3.1 鲁棒线性优化	79
5.3.2 鲁棒二次优化	80
5.3.3 鲁棒半定优化	81
5.3.4 鲁棒优化方法在电力系统中的应用	82
5.3.5 小结	82
参考文献	83
第6章 智能电网技术效率评估	85
6.1 概述	85
6.2 技术效率描述	85
6.3 效率评估模型	86
6.3.1 技术效率评估模型	86
6.3.2 智能电网分配效率评估模型	89
6.3.3 参数估计与模型检验	90
6.4 算例分析	91
参考文献	99
第7章 智能电网技术进步评估	101
7.1 概述	101
7.2 技术进步评估模型	102
7.2.1 广义生产函数模型	102
7.2.2 C-D生产函数的适用性分析	104
7.2.3 测算智能电网技术进步的实现过程	106
7.3 算例分析	109
7.3.1 原始数据	109
7.3.2 结果分析	111
参考文献	116
第8章 智能电网动态评估	118
8.1 概述	118
8.2 智能电网建设动态特性	118
8.3 动态评估模型	119
8.3.1 模型结构设计	119

8.3.2	模型方程关系和参数	120
8.4	算例分析	122
	参考文献	125
第 9 章	智能变电站技术成熟度评估	127
9.1	引言	127
9.2	智能变电站技术简介	128
9.2.1	IEC 61850 标准	128
9.2.2	电子式互感器技术	129
9.2.3	在线监测技术	129
9.3	技术成熟度评估模型	130
9.3.1	智能变电站技术成熟度指标体系	130
9.3.2	智能变电站技术成熟度评估理论方法选取	135
9.3.3	基于灰色聚类分析法的智能变电站技术成熟度评估模型	137
9.4	实例分析	141
9.4.1	智能变电站技术成熟度指标数据	141
9.4.2	层次分析法评估应用	143
9.4.3	灰色聚类分析法评估应用	147
9.4.4	结果分析	149
	参考文献	155
第 10 章	智能电网中黑启动恢复方案评估	156
10.1	概述	156
10.2	总体思路及步骤	157
10.2.1	基于云模型的定性指标量化过程	157
10.2.2	云-数据包络分析方法主要步骤	158
10.3	黑启动方案评估模型	159
10.3.1	联合 DEA 模型	159
10.3.2	黑启动方案评价模型	160
10.4	算例分析	161
	参考文献	165
第 11 章	智能电网中电磁环网运行方案评估	167
11.1	概述	167
11.2	PSS/E 和 Python 介绍	169
11.3	电磁环网运行评估方法	170
11.3.1	电磁环网运行指标	170
11.3.2	电磁环网运行决策系统	173
11.4	算例分析	173
11.4.1	sawvn 算例分析	173
11.4.2	华东交流特高压电网皖南站附近电磁环网分析	175
	参考文献	180

第 12 章 电动汽车充电决策方案评估	182
12.1 概述	182
12.2 电动汽车充放电特性分析	182
12.2.1 影响电动汽车充电负荷的因素	182
12.2.2 电动汽车电池特性	184
12.2.3 电动汽车的行驶特性	185
12.2.4 电动汽车充电负荷模型	186
12.3 电动汽车充电站内有序充电策略	188
12.3.1 电动汽车有序充电管理模式	188
12.3.2 以电动汽车聚合商为主体的有序充电	189
12.3.3 以电网公司为主体的有序充电	196
12.3.4 以个体电动汽车用户为主体的有序充电	199
12.3.5 有序充电中的电价机制及激励机制	201
12.4 算例分析	205
12.4.1 假设条件	205
12.4.2 无序充电下的仿真计算	206
12.4.3 以电动汽车聚合商为主体的有序充电仿真计算	206
12.4.4 以电网公司为主体的有序充电仿真计算	209
12.4.5 以个体电动汽车为主体的有序充电仿真计算	210
12.4.6 有序充电中的电价机制以及激励机制仿真计算	212
参考文献	214
第 13 章 智能电网下的电力负荷预测	216
13.1 概述	216
13.1.1 负荷预测分类	216
13.1.2 负荷预测一般步骤	218
13.2 负荷预测常用方法	219
13.3 智能电网环境下的负荷预测	222
13.3.1 城市化定义与特征	222
13.3.2 城市化主要构成要素提取	223
13.4 基于城市化特性的中长期负荷预测	224
13.4.1 基于城市化特性的中长期负荷预测建模思路	224
13.4.2 基于层次分析法的权重计算	224
13.4.3 基于模糊聚类分析法的中长期负荷预测	226
13.4.4 算例分析	227
13.4.5 总结	230
13.5 基于城市化特性的饱和负荷预测	230
13.5.1 基于城市化特性的饱和负荷预测建模思路	231
13.5.2 城市化要素主成分提取	232
13.5.3 主成分与负荷序列基频分量提取	232

13.5.4	饱和负荷预测实现	233
13.5.5	算例分析	234
13.5.6	总结	238
参考文献		238
第 14 章	不确定条件下智能电网源-网-荷协调规划	241
14.1	概述	241
14.2	不确定因素分析	241
14.3	不确定条件下规划模型	242
14.3.1	不确定参数在约束条件中	245
14.3.2	不确定参数在目标函数中	246
14.4	计算复杂度分析	248
14.5	算例分析	256
14.5.1	原始数据与参考系统	256
14.5.2	结果分析	258
参考文献		265
第 15 章	大数据相关技术用于智能电网评估	267
15.1	智能电网与大数据的关系	267
15.2	大数据在智能电网评估的应用	268
15.2.1	智能电网的数据特征	268
15.2.2	研究方法	269
参考文献		269
附录		271

第 1 章



绪 论

1.1 智能电网特征

智能电网是现代电网的建设目标和发展方向,是保障国家能源安全、实现低碳经济的重要手段^[1]。智能电网中先进技术是支撑电网朝着智能化发展的核心要素。与传统电网相比,先进技术赋予智能电网的智能化属性是新一代电网的典型特征,体现了现代电网的核心价值与功能特性^[2]。

智能化是电网未来发展的侧重点与聚焦点,同时也为新一代智能电网在规划、运行和控制上的经济性、安全性、可靠性、环保性以及适应性等多个方面提出更高的要求与标准^[3,4]。现有的研究主要集中在传统电网下电力系统规划的经济性和可靠性方面,对于智能电网环境下,无论是经济上、安全上还是技术适应性方面,开展的研究相对较少。

先进的智能电网技术主要是指电力系统中发电、输电、变电、配电、用电、调度环节所采用的新技术和新设备,具体为一次侧的各电网环节中应用节能减排和使电网安全优化运行的技术,以及支撑电网高效灵活运行的二次侧技术和控制中心技术,包括量测技术、通信技术、信息集成处理技术、电力电子技术、控制决策技术等^[5]。技术为智能电网带来的积极效益一般体现为提高电网管理大容量间歇式能源发电能力,降低电网运行的经济成本,强化电网安全可靠运行的能力,实现与用户灵活高效互动,以及节能减排带来的社会效益。评估先进技术对智能电网规划、运行和控制的影响,不仅能够反映电网智能化的水平,还可以衡量智能化带来的经济社会效益。然而,智能电网是一项建设周期长、技术难度高、投资规模大的系统性综合工程,定量地评估先进技术在智能电网建设过程中的实施效果通常较为困难^[6]。因此,为了保证智能电网建设能够健康、科学、有序地推进,开展智能电网规划和运行中的技术先进性评估研究,是一项十分重要的课题。

技术先进性,从经济管理学的角度来看,是指工程项目中选择的技术设备可以展现其所能发挥的最先进的成果效益,在技术水平、优化性能、智能化程度、降低成本、节能环保、新技术普及等诸多方面具有技术上的先进特征和优势。对于现代电力系统及能源工

业领域,技术先进性是指智能电网技术应用在电网各环节中,并为电网带来积极影响所表现出的特性^[7],通常以技术进步、技术效率、技术效益等技术经济指标作为其衡量标准。开展关于智能电网技术先进性的评估方法研究,从宏观的技术经济分析的视角,研究用于描述智能电网规划与运行中的技术先进性特点的评估指标,为智能电网规划决策提供科学、精准,以及面向电网实际运行的评估依据,是具有重要理论价值与现实意义的工作。

智能电网在未来发展的过程中,必将经历和面临各种新技术对电网带来的效益与冲击,如大规模可再生能源接入电网、分布式电源即插即入、多样化的负荷需求等。智能电网技术为电网智能化发展带来红利的同时,也将更多的不确定因素引入电网的规划、运行与控制领域。从微观角度,分析未来不确定因素下的新技术对智能电网规划与运行的影响,量化评估技术先进性与不确定因素之间的相互关系,可以精准把握智能电网在规划与运行上的新技术投入强度和力度。因此,研究与智能电网技术相适应的电力系统规划的评估方法具有理论意义和实用价值。

随着智能电网的建设不断深入,新技术将在电力系统各领域中得到更加广泛的应用与发展,这也将是智能电网发展的必然趋势。然而,在现有的成果中,尚未形成针对智能电网技术先进性评估的理论体系,同时已有的研究成果多为仅从单一角度分析智能电网技术的应用效果,评估体系缺乏关联性与全面性,并且智能电网技术评估与分析的方法也很不完善。因此,系统地阐述技术先进性的概念,并与各领域的智能电网技术相结合,提出不同视角下的智能电网技术先进性的评估方法体系,并将其应用于智能电网规划与运行的分析中,解决先进技术对智能电网建设影响的评估问题,具有极大的理论意义和工程实用价值。

1.2 国内外智能电网规划与评估研究现状

电力系统技术经济评价主要涵盖电力工业的经济效益分析、综合评价分析、方案比较分析等方面。其中,综合评价分析是当前智能电网环境下关于电力系统技术经济评估领域的热点问题。美国能源部(Department of Energy, DOE)于2010年率先提出了适用于美国智能电网技术经济分析的综合评价指标体系框架,基于六项主要功能特性的评价指标体系用于评估美国智能电网的技术水平与发展程度^[8]。美国另一电力科研机构——电力科学研究院(Electric Power Research Institute, EPRI)也发布了用于测算智能电网示范项目成本收益的评价指标体系^[9]。反观欧洲智能电网评估研究,欧洲输电商联盟也设计了支持新能源和分布式能源发展的欧洲智能电网综合评价指标体系^[10],用于评估分析智能电网推进过程中带来的效益与影响。随后,IBM公司从战略发展的角度提出了智能电网成熟度模型,倡导以成熟度的理念从8个主要方面评估智能电网建设所处的等级阶段^[11]。相比于国外研究,我国的智能电网正处于全面建设与引领提升相结合的发展阶段,对于其综合评价研究,与国外先进经验相比,也开展了一些关于智能电网建设和发展的综合评价研究,包括示范工程综合评价体系和智能电网指标体系与综合评价理论研究^[12,13],为智能电网在整体建设水平和示范工程实施效果等方面的评估提供了参考依据。

纵观国内外相关研究,本章从综合评价模型与方法两个主要方面,对现有研究做出总结与梳理。

1.2.1 综合评价模型

本章从多属性的评价指标体系、关键技术领域评估和成本效益综合分析三个主要方面,总结与分析现有电力系统中的技术经济综合评价模型。

1. 多属性多指标综合评价模型

指标是评价的标准与尺度,用于反映多种因素影响下评价对象所展现出来的不同属性。多属性多指标的综合评价模型适用于电力系统技术经济发展的整体水平与建设成效的综合评判研究,其意义在于为系统规划的决策者与管理者提供宏观战略层面的评价结果,反映电力系统技术应用在规划目标、内涵属性、功能特性等方面的综合实施效果。现有的电力系统技术经济分析的综合评价指标体系大多采用基于层次分析的递阶层次结构^[14,15],该类指标体系架构具有以下特点。

(1) 通过分析电网技术发展的规划目标与技术基本特性、影响要素之间的对应关系,设计出技术影响下的目标-要素-指标相互耦合的评价指标体系。通过阐述该评价体系中各指标的功能属性与内涵定义,进而可以明确其应用场景和评估效果。

(2) 基于层次分析的递阶层次结构具有强大的可兼容性。无论是定性还是定量类别的评价指标,通过对不同类别指标量化和标准化的处理,均可以实现客观、有效评估。

(3) 该类结构的评价指标体系要求各指标之间关系相互解耦,并具有“去相关性”的特点。具体含义是指通过指标优化策略,如主成分分析^[16]、因子分析^[17]、聚类分析^[18]等,剔除指标数据体系内各评价指标间的相关性,减少指标信息的交叉重叠,使评价过程具有客观性、简洁性和可操作性。

2. 关键技术领域评估模型

由于技术可以应用在电力系统的不同领域,除了需要对电力系统整体的技术经济特性做出综合评价外,还需要结合决策者的关注点,对特定的电网环节和技术领域进行专门的评估研究。

电力系统一般可以划分为发电、输电、变电、配电、用电、调度环节。目前针对某一环节开展的综合评估研究,典型研究有:文献[19]提出了配电网规划的综合评价指标体系,该指标体系涵盖了“抗大面积停电能力”、“输电网与配电网供电匹配度”、“电网可扩展裕度”等多类属性的评价指标,其特点表现为更加突出了配电网规划与运行之间的协调性;对于电网中某一特定技术领域的综合评价研究,文献[20]从可靠性、经济性、市场运营和环保性建立了微电网规划的评价指标体系,用于对微电网结构设计及运行方式效果进行综合评估;文献[21]提出并设计了一种电网黑启动方案的评价指标体系,通过对火电机组状态进行综合评价,为黑启动决策提供了有益参考。基于指标体系建立综合评价模型的研究思路不仅能够实现对特定领域与环节的技术实施效果进行有效评估,而且能够进一步对其中相关因素之间的作用关系进行深入分析。

3. 成本效益综合评估模型

投资与技术是电力系统技术经济分析的关注点,也是电力系统规划与建设的支撑点。成本效益分析概念的产生是用于评估工程项目是否具有推广价值,将其应用于电网技术