



国际电气工程先进技术译丛

WILEY

智能电网—— 设计与分析基础

**Smart Grid
Fundamentals of Design and Analysis**

(美) James Momoh 著

张沛超 胡炎 译

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



关于作者

James Momoh博士，是霍华德大学（Howard University）电气与计算机工程系教授，能量系统与控制中心主任。Momoh博士还是美国邦纳维尔电力局（Bonneville Power Administration, BPA）的首席顾问。他已独著或合著了几本书，如Wiley-IEEE出版社出版的《电能处理系统的运行与控制》（Operation and Control of Electric Energy Processing Systems）、《电力系统市场经济的设计与规划》（Economic Market Design and Planning for Electric Power Systems）。Momoh博士主要从事系统工程、能量系统以及电力市场方面的跨学科研究与教育工作。



国际电气工程先进技术译丛

智能电网——设计与分析基础

(美) James Momoh 著
张沛超 胡 炎 译



机械工业出版社

本书共分 11 章, 其内容来自于大量的教学、会议、研究工作, 以及美国和世界各地的学术和工业界就如何实现电网的现代化而进行的研讨。第 1 章介绍了智能电网架构设计; 第 2 章介绍了智能电网通信与测量技术; 第 3~5 章介绍了智能电网设计过程中所用到的分析工具; 第 6 章讨论了设计智能电网的途径; 第 7 章介绍了与智能电网相关的可再生能源与储能技术; 第 8 章介绍智能电网的互操作、标准与信息安全; 第 9 章内容为针对智能电网的研究、教育与培训; 第 10 章介绍了智能电网案例研究与试验平台; 第 11 章简要介绍智能电网特性和面临的挑战。本书适合从事智能电网工作的专家学者和工程技术人员阅读, 也适合作为高等院校相关专业的教材。

Copyright © 2012 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled < Smart Grid: Fundamentals of Design and Analysis >, ISBN <978-0-470-88939-8 >, by < James Momoh >, Published by John Wiley & Sons, Ltd. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版, 未经出版者书面允许, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。版权所有, 翻印必究。

本书版权登记号: 图字 01-2012-4864 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

智能电网: 设计与分析基础/(美) 莫莫 (Momoh, J.) 著; 张沛超, 胡炎译. —北京: 机械工业出版社, 2013. 11

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Smart Grid: Fundamentals of Design and Analysis

ISBN 978-7-111-44523-4

I. ①智… II. ①莫…②张… III. ①智能控制-电力系统 IV. ①TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 252266 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 刘星宁 责任编辑: 刘星宁 版式设计: 霍永明

责任校对: 刘怡丹 封面设计: 赵颖喆 责任印制: 杨曦

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 11.5 印张 · 229 千字

0001—4000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-44523-4

定价: 58.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

智能电网是指采用动态优化技术、具有自愈能力的电网，该电网能够利用实时测量技术，使网络损耗最小化、维持电压水平、提高系统可靠性以及改善资产管理。系统运行人员利用智能电网及其子系统收集的运行数据，可以在系统遭遇各种事故时快速识别最佳方案来防御攻击并恢复系统的正常运行。但是，智能电网技术的实施，首先需要研究、确定其关键的性能评价指标，设计、测试适当的工具，开发合适的课程体系以对现有和未来的人员进行教育，使其掌握实施此类高级系统的知识与技能。

本书的目的，是使读者掌握智能电网的基础理论知识、设计工具、研究现状、发展中的关键问题以及发展前景。本书共分 11 章，其内容来自于大量的教学、会议、研究工作，以及美国和世界各地的学术和工业界就如何实现电网的现代化而进行的研讨。例如，第 3 章所讨论的最优化工具，就专门针对电网的随机性特点并满足自适应要求和预测要求。该章详细介绍的最优潮流，能够基于实时测量数据，利用学习算法，求解出发电、输电、配电、需求响应、网络重构以及自动化功能所需的最优化方案。

我对本书写作过程中给予帮助的人致以谢意。感谢能量系统与控制中心的研究生 Keisha D'Arnaud，为了使本书更适合普通读者，书稿几经修改，而她在此过程中给予了坚持不懈的支持。感谢爱迪生电气研究所的高级执行副总裁 David Owens，以及国家自然科学基金（NSF）电气通信与信息系统（ECCS）项目部主任 Paul Werbos 博士，是他们鼓励并支持我用计算智能方面的知识积累去研究传统技术所无法解决的复杂电力系统问题。尤其在我于 2001~2004 年担任 NSF 的 ECCS 项目部主任期间，他们给予我的支持使我受益匪浅。还要感谢由 NSF 资助的小额探索性研究项目，该项目资助我开发了第一代的动态随机最优潮流系统，而这个系统可作为智能电网设计与开发中的通用工具。

感谢我的家庭给予我的鼓励与支持。感谢我在能量系统与控制中心的学生与同仁们，他们作为热情的读者，让我得以检验与完善自己关于智能电网的思想。我还对能够荣幸受邀到顶级的公用事业行政管理论坛做报告表示感谢，这使我有机会阐述将智能电网推广至全国的意义。所有这一切，都重新燃起了我设计与开发未来电网的兴趣。

James Momoh

目 录

前言

第 1 章 智能电网架构设计	1
1.1 概述	1
1.2 现有电网和智能电网的比较	1
1.3 能源独立和安全法案 (2007): 智能电网实施依据	2
1.4 计算智能	3
1.5 电力系统改进	4
1.6 通信与标准	4
1.7 试验平台	4
1.8 本书结构	4
1.9 智能电网各市场驱动力概览	6
1.10 各利益相关方的角色与职能	6
1.10.1 电力公司	8
1.10.2 政府实验室与示范项目	8
1.10.3 电力系统工程研究中心 (PSERC)	8
1.10.4 研究机构	9
1.10.5 技术公司、销售商与制造厂	9
1.11 基于性能评价的智能电网工作定义	10
1.12 典型架构	10
1.13 智能电网各构成组件的功能	12
1.13.1 智能设备接口组件	12
1.13.2 储能组件	12
1.13.3 输电子系统组件	12
1.13.4 监视与控制技术组件	12
1.13.5 智能配电网子系统组件	12
1.13.6 需求侧管理组件	13
1.14 小结	13
参考文献	13
推荐阅读	13
第 2 章 智能电网通信与测量技术	14

2.1	通信与测量	14
2.2	监视、PMU、智能电表与测量技术	16
2.2.1	广域测量系统 (WAMS)	17
2.2.2	相量测量单元 (PMU)	17
2.2.3	智能电表	18
2.2.4	智能家电	19
2.2.5	高级量测体系 (AMI)	19
2.3	GIS 与谷歌地图工具	20
2.4	多代理系统 (MAS) 技术	21
2.4.1	用于智能电网的多代理系统	21
2.4.2	多代理系统示例	22
2.4.3	多代理技术	23
2.5	微电网与智能电网的比较	23
2.6	小结	24
	参考文献	24
第3章	用于智能电网设计的性能分析工具	26
3.1	潮流计算研究概述	26
3.2	智能电网中潮流计算的挑战以及现有方法的不足	26
3.3	潮流计算研究现状：经典与扩展的方程与算法	27
3.3.1	高斯-赛德尔方法	27
3.3.2	牛顿-拉夫逊方法	28
3.3.3	快速解耦方法	29
3.3.4	配电网潮流方法	29
3.4	阻塞管理效果	32
3.5	用于智能电网设计的潮流计算	33
3.6	随机动态最优潮流 (DSOPF) 在智能电网中的应用	34
3.7	静态安全评估 (SSA) 和预想事故分析	35
3.8	预想事故及其分类	38
3.8.1	稳态预想事故分析	39
3.8.2	性能指标	39
3.8.3	灵敏度分析方法	40
3.9	智能电网预想事故研究	41
3.10	小结	42
	参考文献	42
	推荐阅读	42

第4章 智能电网稳定性分析工具	44
4.1 电网稳定性概述	44
4.2 现有电压稳定性分析工具的优点与不足	44
4.3 电压稳定性评估	48
4.3.1 电压稳定与电压崩溃	49
4.3.2 电压稳定分类	50
4.3.3 静态稳定性 (I 型不稳定)	51
4.3.4 动态稳定性 (II 型不稳定)	51
4.3.5 动态电压稳定性研究中的分析技术	51
4.4 电压稳定性评估技术	53
4.5 电压稳定性指标	56
4.6 静态电压稳定性研究中的分析技术	58
4.6.1 用于检测电压崩溃点的直接法	59
4.6.2 非直接法 (连续方法)	59
4.7 电压稳定性的应用与实施示例	60
4.8 通过电压稳定的预防控制实现稳定性约束优化	61
4.9 功角稳定性评估	63
4.9.1 暂态稳定性	64
4.9.2 应用于实际电力系统的稳定性分析	65
4.9.3 稳定区域的边界	66
4.9.4 主导 UEP 搜索算法	68
4.9.5 智能电网 DSA 设计中的过程变化	69
4.10 状态估计	71
4.10.1 加权最小二乘法估计的数学公式	73
4.10.2 坏数据的检测和辨识	74
4.10.3 预估计分析	74
4.10.4 后估计分析	77
4.10.5 鲁棒状态估计	77
4.10.6 智能电网环境下的状态估计	80
4.10.7 实时网络建模	82
4.10.8 智能电网中状态估计实施方法	82
4.10.9 动态状态估计	83
4.10.10 小结	84
参考文献	84
推荐阅读	85

第5章 用于智能电网设计的计算工具	86
5.1 计算工具概述	86
5.2 决策支持工具 (DS)	86
5.3 优化技术	88
5.4 经典优化方法	90
5.4.1 线性规划	90
5.4.2 非线性规划	90
5.4.3 整数规划	91
5.4.4 动态规划	92
5.4.5 随机规划与机会约束规划 (CCP)	92
5.5 启发式优化	93
5.5.1 人工神经网络 (ANN)	94
5.5.2 专家系统 (ES)	95
5.6 进化计算技术	96
5.6.1 遗传算法 (GA)	97
5.6.2 粒子群优化 (PSO)	97
5.6.3 蚁群优化	98
5.7 自适应动态规划技术	99
5.8 Pareto 方法	101
5.9 混合优化技术及智能电网应用	101
5.10 计算挑战	102
5.11 小结	103
参考文献	103
第6章 智能电网设计的路径	106
6.1 引言	106
6.2 智能电网发展的障碍和解决方案	106
6.3 基于先进的优化和控制技术的智能电网设计路径	108
6.4 一般层次的自动化	108
6.4.1 可靠性	109
6.4.2 稳定性	110
6.4.3 经济调度	110
6.4.4 机组组合	111
6.4.5 安全性分析	112
6.5 输电层次中智能电网的大型电力系统自动化	112
6.5.1 故障和稳定性诊断	113

6.5.2 无功功率控制	113
6.6 配电系统自动化需求	114
6.6.1 电压无功功率控制	115
6.6.2 电能质量	116
6.6.3 网络重构	117
6.6.4 需求侧管理	117
6.6.5 分布式发电控制	118
6.7 智能电网的终端用户/家用电器层次	118
6.8 自适应控制和最优化方法的应用	118
6.9 小结	119
参考文献	119
推荐阅读	120
第7章 可再生能源与储能	121
7.1 可再生能源	121
7.2 智能电网中可利用的可持续能源	121
7.2.1 太阳能	122
7.2.2 太阳能发电技术	122
7.2.3 光伏系统建模	122
7.2.4 风电机组系统	124
7.2.5 生物质-生物能	126
7.2.6 小型与微型水电	126
7.2.7 燃料电池	126
7.2.8 地源热泵	127
7.3 可持续能源利用中的渗透率与波动性问题	127
7.4 需求响应问题	128
7.5 电动汽车与插电式混合动力电动汽车	129
7.6 插电式混合动力电动汽车技术	130
7.7 环境影响	131
7.7.1 气候变化	131
7.7.2 气候变化的影响	132
7.8 储能技术	132
7.9 税收抵免	136
7.10 小结	137
参考文献	137
推荐阅读	138

第8章 互操作、标准与信息安全	139
8.1 引言	139
8.2 互操作性	139
8.2.1 互操作性发展现状	140
8.2.2 互操作性的益处与挑战	140
8.2.3 智能电网环境下的互操作模型	140
8.2.4 智能电网通信网络的互操作性	140
8.2.5 互操作性和电网的控制	141
8.3 标准	141
8.4 智能电网信息安全	143
8.4.1 信息安全发展现状	144
8.4.2 信息安全风险	146
8.4.3 高级量测体系中的信息安全考虑	147
8.4.4 降低信息安全风险的途径	148
8.5 信息安全以及用户可采取的防御措施	148
8.6 小结	149
参考文献	149
推荐阅读	150
第9章 智能电网的研究、教育和培训	151
9.1 引言	151
9.2 智能电网的研究领域	151
9.3 智能电网的研究活动	152
9.4 跨学科的研究活动	152
9.5 智能电网教育	153
9.5.1 模块1: 引言	154
9.5.2 模块2: 体系结构	154
9.5.3 模块3: 功能	154
9.5.4 模块4: 工具和技术	154
9.5.5 模块5: 设计途径	155
9.5.6 模块6: 可再生能源技术	155
9.5.7 模块7: 通信技术	155
9.5.8 模块8: 标准、互操作和信息安全	155
9.5.9 模块9: 案例研究和试验平台	155
9.6 培训和职业发展	156
9.7 小结	156

参考文献	156
第 10 章 智能电网的案例研究和试验平台	157
10.1 引言	157
10.2 示范工程	157
10.3 高级计量	157
10.4 含可再生能源的微网	158
10.5 电力系统的机组组合问题	159
10.6 用于配网自动化最优网络重构的自适应动态规划	163
10.7 可再生能源接入的案例研究	167
10.7.1 智能电网行动描述	167
10.7.2 智能电网应用的实施方法	168
10.8 试验平台和评测系统	168
10.9 智能输电的挑战	169
10.10 智能输电的益处	169
10.11 小结	169
参考文献	170
第 11 章 后记	171
附录 缩略语表	173

第 1 章 智能电网架构设计

1.1 概述

现有电网采用一种由发电、输电、配电等环节构成的垂直结构，并在控制系统和各类设备的支持下实现系统的可靠、稳定和经济运行。然而，系统运行人员正在面临着前所未有的挑战，例如，在现有系统中接入可再生能源、技术的快速革新以及多样化的市场主体和终端用户。作为下一代电网的智能电网，将充分利用通信手段和实时测量技术来提高系统的适应性和预测能力，抵抗来自内部和外部的安全威胁。智能电网的设计框架是基于对现有电力行业的拆分、重组以及资产优化。这个新一代的电网将能够：

- 1) 处理调度计划和跨区能量传输中的不确定性；
- 2) 接纳可再生能源；
- 3) 优化输配电网的传输容量，满足对电能质量和可靠性的日益增长的需求；
- 4) 应对系统运行中出现的难以预料的事件和各种不确定性，并积极地进行规划。

1.2 现有电网和智能电网的比较

如上所述，现有电网中存在一系列因素使其不能有效地满足供电可靠性的要求。表 1.1 将现有电网和智能电网做了比较。

表 1.1 现有电网和智能电网的比较^[4]

期望的特点	现有电网	智能电网
用户的主动参与	信息对用户不透明,用户不能参与互动	提供充分的信息,用户通过需求响应和分布式能源主动参与互动
兼容所有发电和储能形式	以集中式发电为主,分布式能源的接入存在很多障碍	存在大量“即插即用”、可再生的分布式能源
新产品、服务和市场	有限的、集成度很差的趸售市场;用户有限的参与机会	成熟、高度集成的趸售市场;新兴电力市场的增长
为数字经济提供高质量电能	重点关注停运,而对电能质量问题则响应很慢	优先保证电能质量,有各种各样的质量/价格方案可供选择,快速处理问题
资产优化利用和高效运行	运行数据与资产管理缺乏集成,业务流程陷入筒仓模式	极大扩展了电网参数的采集范围;注重事故预警,以尽量减少对用户的影响
对系统扰动的预测与应变能力(自愈能力)	立足于防止事故的进一步扩大;强调故障后对资产的保护	对事故的自动检测和响应;通过持续的预测分析来防患于未然
抵御信息攻击与自然灾害的能力	易受到恐怖袭击和自然灾害的影响,响应速度慢	对信息攻击与自然灾害具有抵御能力,快速的系统恢复能力

1.3 能源独立和安全法案（2007）：智能电网实施依据

在美国前总统 George W. Bush 签署的 2007 能源独立和安全法案（EISA）中对智能电网做了生动的描绘：智能电网应能够有效而可靠地实施预测、实现自适应和自重构。如该法案中所概括的，美国电网的现代化目标就是为了维护一个可靠而安全的电力基础设施^[2]，以满足未来需求增长的要求。图 1.1 说明了推进这样一个



图 1.1 智能电网的基本特征

高效、可靠系统发展所需的一系列特性。

本法案成立了一个智能电网专门委员会，其职责是“确保原本分散在能源部以及联邦政府其他部门中的、与智能电网相关的技术与实践活动得以彼此沟通、协同与整合”^[1]。专门委员会的任务包括：研究与开发；开发广为接受的标准与协议；厘清智能电网技术实践与电力公司管制之间、智能电网技术实施与基础设施开发、系统可靠性和安全性之间以及智能电网技术实践与电能供需、传输、分配乃至政策等方方面面的关系。针对这项法案，美国的研究与教育团体正在积极参与：

- 1) 智能电网研发项目；
- 2) 开发广为接受的智能电网标准和协议[⊖]；
- 3) 开发满足智能电网实施条件的基础设施；
- 4) 开发系统可靠性与安全性的保障技术；
- 5) 制定政策，鼓励为智能电网的发、输、配诸环节提供技术支持。

智能电网开发与实施中有5个关键方面，如图1.2所示。

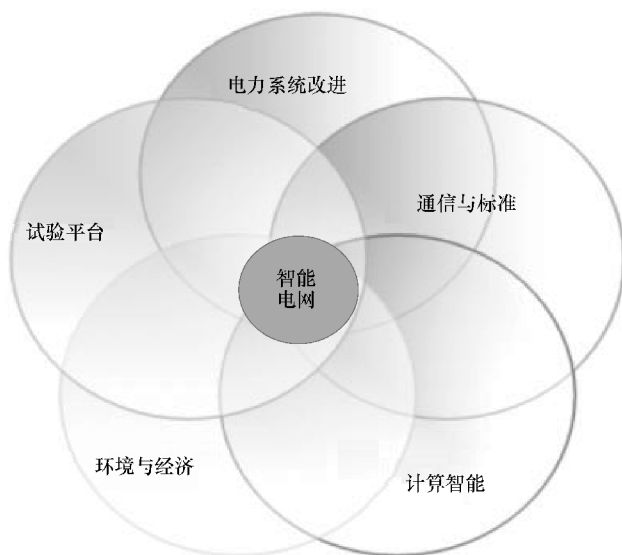


图 1.2 智能电网实施的5个关键方面

1.4 计算智能

在本书中，“计算智能”特指对大电网进行优化所需的一系列高级分析工具，如基于启发式或进化理论的规划软件、决策支持工具以及自适应优化技术。

⊖ 原文此处为保护（protection），依上下文应为协议（protocol）。——译者注

1.5 电力系统改进

决策者们认为，在全美广泛采用可再生能源^[4,5]，将有助于减少热能和化石能源消耗产生的碳排放，满足需求的不确定性的要求，并在一定程度上提高电能输送的可靠性。

1.6 通信与标准

由于电网运行规划的时间尺度可能短至 1h，智能电网的高级自动化系统会在快速的决策过程中产生海量运行数据。利用新算法可使智能电网具备更强的自适应性和预测能力，这样，就需要为电网的管理、运行和市场营销所需的通信网络制定新的规范。

1.7 试验平台[⊖]

以上对智能电网的特征作了讨论。只有评估当前电网和拟建的智能电网，才可以充分显示智能电网的特点和所面临的挑战。这样的智能电网系统一旦被全面实现，将允许用户参与互动，并在高级软件的支持下提高发、输电能力，降低电网的脆弱度，保证适应性、可靠性、充裕度和电能质量。培训工具的开发和电网运行管理所需的技能培训都会创造许多新的就业机会，这也是智能电网发展的重要目标之一。如今，智能电网将在试验平台和示范项目中进行测试。为了尽快建成第一代智能电网，相关的试验平台和研究中心应开展跨学科合作。

为消除导致系统脆弱性的根源，电力公司和智能电网技术厂家应重点关注系统安全控制，不能仅仅盯住局部的脆弱性和威胁。但是，在现有系统上很难甚至不可能增加安全控制，理想的做法是将其集成到全新的系统中，这样可以避免很多实施上的问题。对于已建成的安全控制中心，还需要对其有效性进行定期评估，以保持智能电网对各种新威胁的抵御能力。

1.8 本书结构

本书共分为 11 章。本章为概述，讲述智能电网的概念、基本原理、工作定义以及系统架构。第 2 章介绍了智能电网的通信与测量技术。第 3 章介绍与潮流计算、最优潮流、预想事故分析等相关的软件工具，而与电压稳定、功角稳定和状态估计等相关的软件则放到第 4 章介绍。第 5 章评估了适应智能电网特点的各种计算智能方法。第 6 章阐述了使用通用动态随机优化技术的智能电网路径设计。第 7 章

⊖ 原文本节标题为“环境与经济”，此处根据上下文修改为“试验平台”。——译者注

对可再生能源及其波动性、随机性问题作了综述，随后讨论了储能技术及其容量和配置问题。为了评价可再生能源的经济和环境效益，本章还专门讨论了需求侧管理(DSM)和需求响应、气候变化以及税收抵免等几个问题。第 8 章讨论了制定国家标准的重要性。随后又讨论了互操作性问题，分析了在满足系统运行约束的前提下，如何使新技术能易于适配到老系统。为了保护可再生能源的安全利用和通信基础设施，本章还讨论了信息安全问题。为充分发挥新技术的性能优势和经济效益，需要开展一系列重大研究，并且不能忽视职业教育和培训，第 9 章对此作了介绍。第 10 章研究了若干智能电网开发案例，讨论了用于辅助实施的试验平台。在智能电网得以全面实施之前，研究人员和决策者尚面临很多巨大挑战，本章对此作了概括，并呼吁加大投资和开展跨学科合作。图 1.3 是本书各章内容的示意图。



图 1.3 本书各章内容的示意图