



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书
出版规划项目

Smart Power Grids 2011



《新能源出版工程》丛书共 23 分册，分别论述太阳能、风能、生物质能、海洋能、核能、新能源汽车、智能电网和煤制油等新能源相关领域的理论研究和关键技术

智能电网规划与控制 的方法和应用

[美] 阿里·凯哈尼 (Ali Keyhani)

[美] 穆哈马特·马瓦里 (Muhammad Marwali)

主编

朱邦俊 译

上海科学技术出版社

 Springer



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书
出版规划项目



智能电网规划与 控制的方法和应用

Smart Power Grids 2011

[美] 阿里·凯哈尼 (Ali Keyhani)

[美] 穆哈马特·马瓦里 (Muhammad Marwali)

主编

朱邦俊 译

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

智能电网规划与控制的方法和应用/(美)凯哈尼
(Keyhani, A.), (美)马瓦里(Marwali, M.)主编;朱
邦俊译. —上海:上海科学技术出版社, 2013. 1

(新能源出版工程)

书名原文: Smart Power Grids 2011

ISBN 978-7-5478-1566-3

I. ①智… II. ①凯… ②马… ③朱… III. ①智能控
制-电力系统-研究 IV. ①TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 272902 号

Translation from English language edition;

Smart Power Grids 2011

by Ali Keyhani and Muhammad Marwali (Eds.)

Copyright © 2012 Springer Berlin Heidelberg

Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved

上海世纪出版股份有限公司
上海科学技术出版社 出版、发行
(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

上海中华商务联合印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张: 35 插页: 8

字数: 815 千字

2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-1566-3/TM•36

定价: 150.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题,
请向工厂联系调换

序 言

近年来,电力系统和电网集成为管理混合能源的智能电网实际上是每一公用事业公司和独立的系统运行商走的技术路线。随着可再生能源使用的深入,伴随着间歇的和分布的发电源集成到当前的电力系统中,新电网面临的挑战越来越大。本书试图探讨的是随着绿色能源、可再生能源和市场结构结合到电力网中所引起的一些问题。把重点放在电网与可再生能源的结合上,是因为这种结合是主要基础设施现代化的推动者,是电力电子技术、自动控制技术、传感测量技术、计算机技术、通信技术和电网基础设施高度集成形成的“智能电网”。

在每一章中,特约作者们介绍智能电网的一些重要领域。第1章介绍智能电网技术的概况,以及为什么它还将是21世纪的关注重点。本章讲述现代工业社会的发展与化石燃料消耗之间的关系的简史以及为什么发展智能电网通信系统和实时定电价是一项紧迫的任务。这一章还讲述光伏系统和风能系统微电网的基本发展以及计算机控制的智能电网。

第二个议题介绍分布式发电机(DG)的负荷频率控制。该系统的控制的重点放在电压的大小和频率控制上,并介绍会导致系统不稳定或电压崩溃的条件。研究了这三个重要问题:何时系统稳定裕度比较低;何时线路阻抗的电阻电抗比较高;何时系统含有不平衡的负荷和/或非线性负荷。

第三个议题是研究级联多电平逆变器。介绍一个向四燃料电池系统供电多电平逆变器的建模和控制。讨论了使用模糊逻辑控制器通过现场可编程门阵列(FPGA)进行联网的模型和单独的受控模型。

第四个议题介绍微电网系统中直流-交流脉宽调制逆变器的控制;高速微发电机的容量;联网的分布式发电系统的有功功率和无功功率控制;以及逆变器的滑动模态控制。

第五个议题介绍通过使用多周期优化法、实时建模和智能电网系统的控制来优化配置主动配电网中的风力涡轮发电机;实时调度中间歇性能源的并网。

总之,本书大多数章节的重点放在电网的控制和规划上。

阿里·凯哈尼,俄亥俄州立大学
穆哈马特·马瓦里,美国 ABB 公司

目 录

第 1 章 绪论 / 1

- 1.1 引言 / 1
- 1.2 太阳能 / 2
- 1.3 风能 / 2
- 1.4 可再生绿色能源微电网构成的电网 / 4
- 1.5 电网互联成大型电网的控制运行 / 5
- 1.6 智能电网 / 8
- 1.7 计算机控制的智能电网 / 10
- 1.8 探索性问题 / 13
- 参考文献 / 16

第 2 章 极端情况下微电网的电压变化 / 22

- 2.1 引言 / 22
- 2.2 常规配电网中的电压变化 / 24
- 2.3 微电网上电压的变化 / 26
- 2.4 电压变化公式的验证 / 28
 - 2.4.1 常规双母线配电网上的验证 / 28
 - 2.4.2 在简单微电网上的验证 / 29
 - 2.4.3 在大型配电网(IEEE 34 节点测试馈电器)上的验证 / 29
 - 2.4.4 在大型微电网上对分布式能源的验证 / 30
 - 2.4.5 四种情况的研究结论 / 31
- 2.5 极端情况下的电压变化 / 31
 - 2.5.1 当分布式能源输出无功功率为正时的电压变化 / 33
 - 2.5.2 当分布式能源输出无功功率为负时的电压变化 / 33
- 2.6 减小极端情况下的电压变化的方法 / 33
 - 2.6.1 通过调节一次配电系统的电压(U_s)来减小电压的变化 / 34

2.6.2 通过减小配电线路的电阻来减小电压变化 / 34

2.6.3 使用无功功率控制来减小电压变化 / 34

2.7 电压水平和入网费用 / 35

2.8 结论 / 36

参考文献 / 36

第3章 紧急情况下微电网的运行和控制 / 38

3.1 引言 / 38

3.2 微电网的动态建模 / 40

3.2.1 燃料电池 / 41

3.2.2 微型涡轮机 / 45

3.2.3 微型风力涡轮机 / 49

3.2.4 光伏电池板 / 50

3.2.5 联网的电力电子接口 / 51

3.3 微电网紧急控制方式 / 55

3.3.1 孤岛运行下微电网的控制 / 56

3.3.2 紧急控制方式 / 58

3.3.3 将低压微电网用于恢复供电 / 61

3.4 应用实例 / 64

3.4.1 微电网孤岛运行 / 65

3.4.2 微电网停电后的启动 / 68

3.5 结论 / 72

参考文献 / 74

第4章 风力发电机的分散式 STATCOM/ESS 控制 / 77

4.1 引言 / 78

4.2 电网法规对风电场连接电网的要求 / 79

4.2.1 故障穿越 / 80

4.2.2 频率—功率变化 / 80

4.2.3 频率控制 / 80

4.2.4 无功功率工作范围 / 80

4.2.5 电压控制 / 80

4.2.6 风力涡轮机的故障穿越方案 / 81

4.3 电力系统的建模 / 82

4.3.1 同步发电机的建模 / 82

4.3.2 风力发电机的建模 / 83

- 4.3.3 STATCOM 的建模 / 85
- 4.3.4 超级电容器的建模 / 87
- 4.3.5 临界切除时间和临界电压 / 87
- 4.4 试验系统和控制任务 / 88
- 4.5 列出问题的算式 / 90
- 4.6 用秩约束的线性矩阵不等式进行分散式控制设计 / 94
- 4.7 控制设计的算法 / 95
- 4.8 控制器的性能估计 / 97
 - 4.8.1 电压的增强和瞬变稳定性的界限 / 97
 - 4.8.2 低电压时有功功率和无功功率的输出 / 99
 - 4.8.3 标准低压穿越要求的比较 / 99
 - 4.8.4 在不同工作条件下的性能 / 100
 - 4.8.5 加装超级电容器的影响 / 100
- 4.9 结论 / 101
- 4.10 分散式 STATCOM/ESS 控制算法 / 102
- 4.11 分散式 STATCOM/ESS 控制算法的参数设计 / 104
- 4.12 由 10 台发电机构成的新英格兰系统的潮流数据 / 109
- 参考文献 / 113

第 5 章 微电网中负荷频率控制：挑战和改进 / 116

- 5.1 引言 / 116
- 5.2 常规的频率/电压下垂控制法 / 117
- 5.3 与各分布式发电机连接的 VSC 的相角下垂控制 / 118
 - 5.3.1 相角下垂 / 118
 - 5.3.2 相角—频率下垂控制和功率共享 / 118
 - 5.3.3 相角频率下垂控制器 / 119
 - 5.3.4 仿真结果 / 120
- 5.4 改善功率共享和系统稳定性的辅助控制环路 / 122
 - 5.4.1 测试系统 / 124
 - 5.4.2 用辅助下垂控制器进行仿真研究 / 124
- 5.5 高输电线阻抗比的农村地区采用下垂控制器的仿真研究 / 128
- 5.6 在不平衡负荷和使用背靠背变换器的情况下, 负荷共享的改进 / 132
 - 5.6.1 微电网的电力质量提高后的运行 / 133
 - 5.6.2 背靠背变换器在功率共享和电力管理中的应用 / 139
 - 5.6.3 背靠背变换器基准的获得 / 141
 - 5.6.4 DG 电源的基准的获得 / 142

5.6.5 仿真研究 / 142

5.7 结论 / 145

参考文献 / 145

第6章 智能电网状态感知中的同步相量测量 / 147

6.1 引言 / 147

6.2 事件探测和定位 / 148

6.2.1 事件触发和事件规模估计 / 148

6.2.2 事件位置 / 151

6.3 广域振荡分析 / 156

6.3.1 振荡探测 / 156

6.3.2 振荡方式分析 / 158

6.4 广域频率和电压相角的可视化 / 162

6.4.1 广域频率可视化 / 163

6.4.2 广域电压相角可视化 / 165

6.5 小结 / 168

参考文献 / 168

第7章 微电网中基于下垂控制的分布式发电机的合成 / 170

7.1 引言 / 170

7.2 基于发电下垂控制的分布式发电机 / 171

7.3 使用串联分布式发电机的微电网 / 173

7.3.1 小信号动态行为 / 174

7.3.2 设计指导 / 180

7.4 分布式发电机并联的微电网系统 / 181

7.4.1 小信号动态行为 / 181

7.4.2 设计建议 / 191

7.5 线路的阻抗比的变化对微电网的动态行为的影响及设计建议 / 193

7.6 小结 / 196

参考文献 / 197

第8章 间歇式能源并网实时调度 / 199

8.1 引言 / 199

8.2 间歇式能源与短期发电调度的结合 / 200

8.3 调度问题的公式阐述 / 201

8.4 建议的调度法 / 204

- 8.4.1 初步可行性解 / 204
- 8.4.2 热电厂的承诺 / 206
- 8.4.3 动态经济调度 / 208
- 8.4.4 蓄电池蓄电模型 / 208
- 8.5 案例研究 / 211
- 参考文献 / 217

第 9 章 具有精确聚合约束的智能电网预测控制 / 219

- 9.1 引言 / 219
- 9.2 控制系统 / 221
- 9.3 智能用户 / 222
- 9.4 能源多面体图 Minkowski 和的加法 / 223
- 9.5 用电分配 / 227
- 9.6 仿真实例 / 229
 - 9.6.1 问题的形成 / 229
 - 9.6.2 仿真数据和参数 / 231
 - 9.6.3 谨慎法 / 231
 - 9.6.4 仿真结果 / 232
 - 9.6.5 参数的相关度 / 232
 - 9.6.6 计算的负担 / 234
 - 9.6.7 通信负荷 / 235
- 9.7 讨论 / 235
- 参考文献 / 236

第 10 章 智能电网的状态估计 / 237

- 10.1 引言 / 237
- 10.2 状态估计在智能电网中的作用 / 239
- 10.3 可观察性分析 / 241
 - 10.3.1 背景 / 241
 - 10.3.2 支路阻抗值对可观察性的影响 / 243
 - 10.3.3 辐射系统的可观察性分析 / 249
- 10.4 配电状态估计 / 251
 - 10.4.1 常规加权最小二乘法 / 253
 - 10.4.2 配电网中负荷的相关性 / 253
- 10.5 配电谐波状态估计 / 260
- 10.6 状态估计的配置 / 261

参考文献 / 261

第 11 章 智能电网管理中的智能多代理系统 / 270

11.1 引言 / 270

11.2 多代理系统 / 271

11.3 建立在免疫基础上的多代理系统 / 273

11.4 配电系统的应用 / 277

11.4.1 船用配电系统 / 277

11.4.2 模拟配电系统的仿真器 / 286

11.5 结论 / 291

参考文献 / 291

第 12 章 外接充电式混合动力电动汽车对供电需求的影响 / 293

12.1 引言 / 293

12.2 PHEV / 296

12.2.1 四种结构 / 296

12.2.2 蓄电池 / 298

12.3 市场普及 / 299

12.4 构成 PCLP 棱柱底的三边的统计研究 / 300

12.4.1 电动汽车每天平均行驶路程的分析 / 300

12.4.2 车辆到达时间分析 / 303

12.4.3 车辆类型分析 / 303

12.5 与 PCLP 棱柱相关的其他因数 / 304

12.5.1 充电基础设施和充电水平 / 304

12.5.2 所需的成比例的能量 / 306

12.5.3 充电进度 / 307

12.6 绘制 PCLP / 308

12.7 改进的方法和经协调的充电 / 311

12.7.1 其他充电水平 / 312

12.7.2 方法 1 / 312

12.7.3 方法 2 / 313

12.8 智能外接充电式混合动力电动汽车和智能电网 / 313

12.9 对废气排放的影响 / 315

12.10 小结 / 317

参考文献 / 318

第 13 章 微电网系统中的三相逆变器的控制 / 321

- 13.1 引言 / 322
- 13.2 三相逆变器系统的状态空间模型 / 323
- 13.3 三相逆变器系统的控制设计 / 330
 - 13.3.1 三相逆变器的离散时间比例积分微分控制设计 / 331
 - 13.3.2 三相逆变器的离散时间伺服系统鲁棒性控制和离散时间滑动方式控制的设计 / 333
- 13.4 几种三相逆变器控制技术的对比 / 365
- 13.5 三相逆变器系统的仿真结果 / 367
 - 13.5.1 平衡线性负荷下的比例积分微分控制器 / 367
 - 13.5.2 不平衡线性负荷下工作的比例积分微分控制器 / 369
 - 13.5.3 在平衡的线性负荷下,离散时间伺服系统鲁棒性控制器和离散时间滑动方式控制器 / 375
 - 13.5.4 在不平衡线性负荷下的离散时间伺服系统鲁棒性问题控制器和离散时间滑动方式控制器 / 375
 - 13.5.5 使用离散时间伺服系统鲁棒性问题控制器和离散时间滑动方式控制器的三相逆变器系统的瞬态响应 / 375
 - 13.5.6 在非线性负荷(波峰因数为 3:1)下离散时间伺服系统鲁棒性控制器和离散时间滑动方式控制器 / 378
 - 13.5.7 短路情况:输出端短路时使用离散时间伺服系统鲁棒性问题控制器和离散时间滑动方式控制器的三相逆变器 / 378
- 13.6 结论 / 378
- 参考文献 / 380

第 14 章 在居民微电网系统中直流变交流的单相逆变器的控制 / 382

- 14.1 引言 / 382
- 14.2 单相全电桥逆变器的模型 / 384
- 14.3 单相逆变器系统的控制分析 / 386
- 14.4 离散时间比例积分微分电压和电流控制的设计 / 387
- 14.5 离散时间伺服系统鲁棒性控制和离散时间滑动方式控制的设计 / 388
 - 14.5.1 离散时间伺服系统鲁棒性电压控制器和离散时间滑动方式电流控制器的设计步骤 / 388
 - 14.5.2 步骤 1——离散时间滑动方式电流控制器的设计 / 389
 - 14.5.3 步骤 2——使用离散时间伺服系统鲁棒性电压控制器的直流变交流的功率变换设备的方程式推导 / 391
 - 14.5.4 步骤 3——离散时间伺服系统鲁棒性电压控制器的设计 / 394

- 14.6 伺服系统鲁棒性问题存在解的必要条件 / 394
- 14.7 内部模型的原理 / 395
 - 14.7.1 伺服系统鲁棒性电压控制器的设计步骤 / 396
 - 14.7.2 步骤 1: 伺服补偿器的设计 / 396
 - 14.7.3 步骤 2: 扩大后的系统的确定 / 397
 - 14.7.4 步骤 3: 稳定补偿器的设计 / 399
- 14.8 仿真结果 / 402
 - 14.8.1 使用离散比例积分微分电压控制器和离散比例积分微分电流控制器的仿真结果 / 403
 - 14.8.2 使用离散时间伺服系统鲁棒性电压控制器和离散时间滑动方式电流控制器的仿真结果 / 406
- 14.9 结论 / 407
- 参考文献 / 408

第 15 章 基于电网接口应用的混合级联 3-5-9 电平逆变器拓扑结构的建模、控制和仿真 / 410

- 15.1 引言 / 410
- 15.2 主系统的配置 / 411
- 15.3 工作原理 / 412
 - 15.3.1 移相脉宽调制控制技术 / 412
 - 15.3.2 混合级联 3-5-9 电平逆变器拓扑结构的模型的开关控制律的发展 / 417
- 15.4 混合级联模型的建立和分析 / 419
 - 15.4.1 abc 坐标中的平均模型 / 419
 - 15.4.2 dq0 坐标中的平均模型 / 423
 - 15.4.3 小信号分析 / 424
- 15.5 变换器控制 / 426
 - 15.5.1 反馈控制 / 426
 - 15.5.2 直流电容器电压的平衡 / 427
- 15.6 基于混合级联 3-5-9 电平逆变器拓扑结构的电网连接系统的仿真分析 / 428
- 15.7 结论 / 435
- 15.8 符号意义表 / 437
- 参考文献 / 438

第 16 章 用于风力发电机逆变器的电网故障穿越控制方法 / 441

- 16.1 引言 / 441
- 16.2 用于风力发电机逆变器的电网故障穿越控制方法的最新研究 / 442
- 16.3 在不同工作条件下,电网侧的变换器分析 / 446
 - 16.3.1 在不平衡工作条件下,电网侧的变换器的分析 / 446
 - 16.3.2 在不平衡工作条件下,电网侧的变换器的分析 / 446
- 16.4 用于风力发电机逆变器的电网故障穿越的通用控制方法 / 449
 - 16.4.1 理论上的方法 / 449
 - 16.4.2 用于风力发电机逆变器故障穿越的控制的通用方法分析 / 452
- 16.5 仿真实例 / 452
- 16.6 结论 / 455
- 参考文献 / 456

第 17 章 燃料电池作为智能电网中的分布式发电机的建模和控制 / 459

- 17.1 引言 / 459
- 17.2 固体氧化物燃料电池和质子交换膜燃料电池的动态模型 / 460
 - 17.2.1 相关研究综述 / 460
 - 17.2.2 PEMFC 和 SOFC 的工作原理 / 461
 - 17.2.3 SOFC 的动态建模 / 462
 - 17.2.4 SOFC 和 PEMFC 的比较 / 469
 - 17.2.5 独立 SOFC 的仿真结果 / 469
- 17.3 潮流控制策略 / 471
 - 17.3.1 相关研究综述 / 472
 - 17.3.2 有功潮流和无功潮流的控制 / 472
 - 17.3.3 仿真结果 / 477
- 17.4 结论 / 481
- 参考文献 / 482

第 18 章 智能电网用高速微型发电机尺寸的确定 / 485

- 18.1 引言 / 485
- 18.2 基本选择 / 486
 - 18.2.1 永磁 / 486
 - 18.2.2 定子和转子材料 / 486
- 18.3 发电机设计参数 / 486
 - 18.3.1 定子的机械设计 / 486
 - 18.3.2 转子的机械设计 / 487
 - 18.3.3 磁极对数和磁极的设计 / 488

- 18.3.4 磁量度 / 488
- 18.3.5 每磁极每相的线槽数 / 489
- 18.3.6 定子绕组 / 489
- 18.3.7 发电机计算用参数 / 489
- 18.3.8 绕组电阻 / 489
- 18.3.9 绕组和磁铁因数 / 491
- 18.3.10 磁通和电压 / 492
- 18.3.11 电机的各种电感 / 493
- 18.3.12 基本损耗 / 494
- 18.4 经典的定尺寸的结果 / 495
 - 18.4.1 发电机的初步定尺寸 / 495
 - 18.4.2 详细的定尺寸 / 497
- 18.5 不受约束的非线性优化 / 500
 - 18.5.1 信赖区法 / 500
 - 18.5.2 Fminsearch 算法 / 500
 - 18.5.3 总损耗减到最小的定尺寸法 / 501
- 18.6 简单受约束的优化 / 504
 - 18.6.1 fmincon 有效组算法 / 504
 - 18.6.2 大规模算法与中规模算法的对比 / 505
 - 18.6.3 总质量最小化定尺寸法 / 505
- 18.7 遗传算法确定高速永磁同步发电机的尺寸 / 509
 - 18.7.1 遗传算法是怎样工作的 / 509
 - 18.7.2 非线性约束解算器的描述 / 509
- 18.8 效率最大化器的本征定尺寸 / 510
- 18.9 受最小损耗约束的最小质量本征定尺寸 / 513
- 18.10 每安培最佳转矩的本征定尺寸 / 515
- 18.11 解析模型间的比较 / 517
 - 18.11.1 旋转应力和保持套 / 517
 - 18.11.2 转子损耗 / 518
 - 18.11.3 比较的结果 / 521
- 18.12 结论 / 529
- 参考文献 / 530

第 1 章

绪 论

Ali Keyhani; Green Energy Laboratory, the Ohio State University. Email: Keyhani@ece.osu.edu

1.1 引言

能源技术在社会和经济发展中起着中心作用。以化石燃料为基础的能源技术曾将人们的生活质量向前推进了一步,但这种推进是以高昂的代价换来的。化石燃料能源是环境污染和恶化的主要原因;环境污染和恶化不可逆转地毁坏了我们的环境面貌;全球变暖^[4, 75, 76]也是过度使用化石燃料的后果。不懈地探索和试图控制宝贵的化石燃料资源(例如石油和天然气),已经加剧了各国之间的政治斗争。现在人类依赖的是非再生能源,随着对能源需求的增长,将会耗尽有限的能源。随着石油供应的逐渐减少,使大家需要寻找可持续供应的能源,所以对环境 and 人类都安全的替代能源就变得日益紧迫。

对工业行业人士而言,改组电力工业是关键的一步,因为改组能使他们便于广泛参与电能的生产、传输、利用以及有效使用。改组电力工业有助于将互联网技术与电网保护、控制和实时定电价的集成。此外,世界范围的全球变暖已经为可再生能源和绿色能源并入电网提供了市场。现在,电力技术正朝着每位电能使用者能成为电能生产者的方向迅速地发展。

Amin^[43]于 2005 年创造了“智能电网”的术语。Shahidehpour 把 Keyhani 专著^[1]前言中关于智能电网的许多定义综合成一句话:“对客户选择能源系统而言,智能电网为电力企业进一步增强可靠性、可持续性和发电能力提供了多种可能”。智能电网可以建立微电网(Micro-Smart Grid, MSG),微电网在临界运行条件下,能像独立的孤岛那样工作。当较大的电网面临重大意外事故时,这种小设备能增强地区电力系统的可靠性。有些微电网设备的应用实例已表明:在分布式电网中,使用智能开关能减少停电的次数和停电持续时间。

此外,智能电网使微电网能优化使用不稳定的和间歇性可再生能源,并增强地区电力系统的可持续性。使用太阳能光伏电池、现场或本地的风能以及供微电网设备使用的储能装置,就能向微电网负荷供电,提供廉价的和可持续的方式。广泛使用储能装置也可以

用在新近出现的外接充电式电动汽车市场中,充电汽车在高峰时间可以使用风能。这种微电网的应用还能减少为了传输可再生电能而广泛地增加高压线,横穿稠密的居民区的情况。然而,电力工业的发展将彻底改变把电送到各消费者的方式,例如改为使用智能电网,因为它能解决实时计费问题,响应每个时间段不同的需求以及扩大用户的选择,提高电能效率。使用新型智能电网,用户就能根据他们每天用电计划、需要和爱好,考虑不同的电价,以便省钱和优化他们的电能使用。智能电网的进展还将能应用自动控制系统,优化家庭和办公的电能使用,确定设备最合适的工作时间,以便减小用电费用。用户的参与将为电力运行的优化提供一些帮助,例如较低的运行费用,这是通过不承诺在高峰时间增添费用高昂的发电设备,减缓强制性的系统升级(为了应付每年几百小时的峰负荷而升级)以及减小传输拥塞的机会(否则电力系统会在接近崩溃的临界点状态工作)来减低运行费用。需求响应还能保证较小的电压波动,有利于日常用电,甚至预报能日常负荷概况,有利于更有效地规划发电过程中燃料和水力的消耗。有关智能电网的这些应用将引导今后电力系统的规划和发展。

1.2 太阳能

太阳能是比较容易得到的可再生能源,太阳能以电磁波(辐射)的形式到达地球。影响地球上给定地点所收到的辐射量的因素包括:地点、季节、湿度、温度、空气质量以及白天持续时间。在给定地点和给定时间所收到的太阳辐射能,以平均辐照度(Incident Solar Radiation)表示,单位 W/m^2 或 kW/m^2 。

地球表面是用假想的纬线和经线来定位的。地球表面的纬线是假想的平行线,以度($^\circ$)计量。纬度从南纬(S) 90° 变到北纬(N) 90° 。经线是假想线,经度从东经(E) 180° 变到西经(W) 180° 。经线在南北极会聚(90°N 和 90°S)。太阳对地球的辐射随基于纬度的地点而变化,大体上在 30°S 和 30°N 之间的地区辐照度最高,如图1-1所示。太阳直接照射在这两纬度之间的纬度取决于一年的时间。如果太阳正对北半球上,则北半球是夏天,而南半球是冬天;如果太阳正对南半球上,则南半球是夏天,而北半球是冬天。

1.3 风能

作为最丰富的能源之一的风能,是全世界增长最快的可再生能源,如图1-1所示。改进后的涡轮发电机和电力变换器设计已促使风能发电的成本显著下降,从1980年的37美分/($\text{kW}\cdot\text{h}$)下降到2008年的4美分/($\text{kW}\cdot\text{h}$),使它成为最廉价的电能。

2008年的全球风能发电量为331 600 000 000 $\text{kW}\cdot\text{h}$,占总发电量的1.6%——使得风能发电成为在水力发电(占16.6%)后的第二大可再生能源,而光伏(Photovoltaic, PV)发电量仅占0.1%。

单是美国就拥有超过 8 000 GW 的陆基风力储能和额外的 2 000 GW 浅海离岸风力储能。美国在 2008 年的总发电量为 1 109 GW,而其未开发的风力储能几乎是它的 8 倍。全球风的运动是根据地球的旋转、太阳辐照度和太阳对地加热地区的季节性变化来预测的。当地对风的影响包括:对陆地的加热,对海洋的加热以及地理因素(例如山和谷)。风可用风速和风向来描述。风速是用风速计测定的,风速计测量旋转的角速度,再把它换算成相应的直线风速,单位为 m/s 或 mile/h。平均风速决定在特定位置的风能潜力。风速测量记录周期为 1 年,然后与附近地点的风速加以比较,可以用得到的长期数据来预测风速和该地提供风能的潜力。

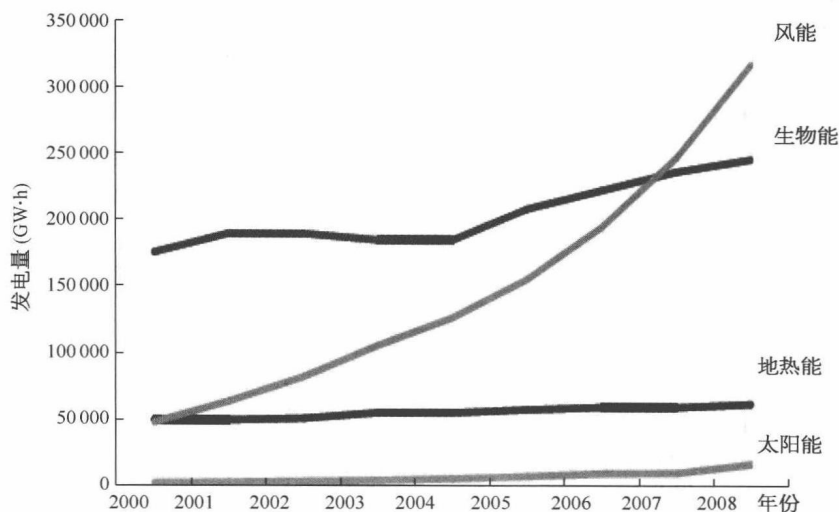


图 1-1 全球风力、生物能、地热能和太阳能的发电量 (2000~2008 年)^[69]

根据美国可再生能源实验室测得的数据对美国各地区所绘制的风能资源图,如图 1-2 所示。该图是根据在 60 m 高度上某地区的年平均风速和风功率密度 (W/m^2) 绘制的;它可以用于某地区风能储能的初步估计。沿海地区具有较高的风资源潜能;美国 90% 的可用风能是在横跨 11 个州的中央大平原的风带内。

表 1-1 风功率等级的划分

风功率等级	风资源潜势	在 50 m 高度上的 风功率密度 (W/m^2)	在 50 m 高度上的 的风速* (m/s)	在 50 m 高度上的 的风速* (m/mile)
3	良	300~400	6.4~7.0	14.3~15.7
4	好	400~500	7.0~7.5	15.7~6.8
5	很好	500~600	7.5~8.0	16.8~17.9
6	极好	600~700	8.0~8.8	17.9~19.7
7	特别好	700~1 800	8.8~11.1	19.7~24.8

* 该风速基于 Weibull 值为 2.0^[8]。