

电力系统分析 (SI 版)

Power System Analysis

John J. Grainger

[美] William D. Stevenson 著

Gary W. Chang

王 晶 孙向飞 译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是美国“电力系统分析”的经典教材,该版本为SI版(国际单位制版)。全书涵盖了电力系统分析的基本主题,包括现代电力系统的演变、主要元件、控制与运行,电网的分散管理和智能电网的概念。主要内容为:电力系统分析中单相和三相交流电路的基本原理;变压器和同步电机的稳态运行分析;输电线路的参数推导;不同长度线路的等效电路模型;网络分析;故障分析和对称分量法;保护原理和保护设备;发电机组的调度问题和现代自动发电控制;电力系统遭受不同扰动时发电机的行为。同时,本书有大量的讨论和案例,各章附有习题。学生可以借助MATLAB的图形用户界面开发环境(GUIDE)对习题进行分析,从而了解电力系统分析的基本概念。

本书适合作为“电力系统分析”课程的专业教材,以供电气工程与自动化、能源与动力等电气类专业的本科生或研究生学习,也可供电气工程师参考。

John J. Grainger, William D. Stevenson, Gary W. Chang.

Power System Analysis.

9781259008351.

Copyright © 2016 by McGraw-Hill Education.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education and Publishing House of Electronics Industry Co., Ltd. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Translation Copyright © 2022 by McGraw-Hill Education and Publishing House of Electronics Industry Co., Ltd.

版权所有。未经出版人事先书面许可,对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制传播,包括但不限于复印、录制、录音,或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译版由麦格劳-希尔教育出版公司和电子工业出版社有限公司合作出版。此版本经授权仅限在中华人民共和国境内(不包括香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾)销售。

版权© 2022 由麦格劳-希尔教育出版公司与电子工业出版社有限公司所有。

本书封面贴有 McGraw-Hill Education 公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2017-6138

图书在版编目(CIP)数据

电力系统分析;SI版/(美)约翰·J. 格兰杰(John J. Grainger),(美)威廉·D. 史蒂文森(William D. Stevenson),(美)张文恭著;王晶,孙向飞译.—北京:电子工业出版社,2022.10

书名原文:Power System Analysis

ISBN 978-7-121-44458-6

I. ①电… II. ①约… ②威… ③张… ④王… ⑤孙… III. ①电力系统-系统分析-高等学校-教材 IV. ①TM711

中国版本图书馆CIP数据核字(2022)第197913号

责任编辑:杨 博

印 刷:

装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:29.5 字数:755千字

版 次:2022年10月第1版

印 次:2022年10月第1次印刷

定 价:99.00元

所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:yangbo2@phei.com.cn。

译者序

智能电网、可再生能源、电力市场、通信和控制技术的发展给电力系统带来新的挑战和机遇。熟悉并掌握这些新技术成为现代电气技术人员的一个基本要求。

本书是北卡罗来纳州立大学荣誉教授 John J. Grainger 和已故的 William D. Stevenson 教授所著的《电力系统分析和电力系统元件》一书的改版。它不但对电力系统的基本原理和方法进行了详细介绍，而且对电力系统的新发展和新概念进行了综述。此外，书中还提供了大量配套的讨论、案例和练习题。读者可以借助 MATLAB 的分析能力，深入了解电力系统分析的基本概念。

本书由我(浙江工业大学信息学院王晶博士)和昆明理工大学电力学院孙向飞博士合译。其中，我负责全稿初译工作，孙向飞博士负责继电保护相关的翻译工作。

本书的翻译工作历时一年多，交稿时百感交集。整个过程时间太长、变化太快、挑战太多。所幸朋友多方支持和帮助，使我在斗转星移、昨是今非、沧海桑田中学会坚强。感谢孙向飞博士在我最需要的时候鼎力相助，感谢 Martha、Emma 给予的无微不至的照顾，感谢我年迈的父母永远欣赏、慈爱的关注，感谢杨博编辑给予的无条件协助。

最后，感谢我的丈夫和一对可爱儿女的陪伴及坚定不移的支持。

由于本书涉及电力系统的各个领域，内容非常丰富，而译者水平有限，难免存在错误和疏漏的地方，希望得到读者的不吝赐教。

王晶于杭州

前 言^①

过去的二十年间，现代电力系统发展迅速，传统的电力设施捆绑服务发展成一个宽松的市场化环境。大型集中式的化石燃料发电发展成利用可再生能源的小型分布式发电。由于电网实时监控和控制的需要，电力系统的智能化运行已从依靠运行人员的、基于经验的经典信息和通信技术时代发展到智能电网时代，从而避免了大范围停电，并给系统带来了实时控制的能力。虽然现代电力系统日趋复杂，但对系统可靠和高效运行的要求仍然保持不变。

本书是北卡罗来纳州立大学荣誉教授 John J. Grainger 和已故的 William D. Stevenson 教授所著的《电力系统分析和电力系统元件》一书的改版。为了与电力工程的最新发展保持同步，作者对原书的内容进行了修订，加入了一些新的内容，从而向正在学习电力系统的本科生或研究生提供全面而基础的知识，以帮助他们了解当今电力系统分析遇到的主要问题。本书通过对实际案例的分析，使读者能深入理解现代电力系统元件的基本原理，包括发电、输电、运行和控制。

本书的第 1 章简要介绍了现代电力系统的主要研究内容，包括现代电力系统的演变、主要元件，以及控制与运行。本章还对电网的分散管理和智能电网的概念进行了介绍。第 2 章对单相和三相交流电路的基本原理进行了介绍。第 3 章对变压器和同步电机的稳态运行进行了分析。第 4 章对输电线路的参数进行了推导，第 5 章对不同长度的线路建立了等效的电路模型。第 6 章介绍了网络分析的原理，以形成用于潮流分析的节点导纳矩阵和阻抗矩阵。第 7 章介绍了几种常用的潮流分析方法，第 8 章到第 10 章研究故障分析和对称分量法，对电力系统在异常状态下短路电流和电压的计算进行了分析。第 11 章着重介绍保护原理和对电力系统不同元件进行保护的装置。第 12 章在考虑输电线路损耗的情况下，讨论了发电厂内及不同发电厂之间发电机组的经济调度问题，同时介绍了电厂的现代自动发电控制。第 13 章重点分析了电力系统遭受不同程度的扰动时发电机的行为，首先分析了经典的两机问题，然后提出了暂态稳定分析的数值方法。

本书在各章结尾处提供了实例、复习题和习题。本书中的大多数实例都附有人在 GUIDE(图形用户界面开发环境)下开发的 MATLAB 程序，以方便读者理解基本概念，并通过软件包学习仿真技术。MATLAB 可以帮助读者轻松、快速地计算电力系统中的问题。手工计算结果也可以通过该工具建模来验证。MATLAB 可以实现对不同向量矩阵和数值分析方法的处理，并获得电力系统问题的解决方案。建议读者进入在线学习中心时，使用 MATLAB 2013a 或更新的版本。

① 本书译者针对部分与国内情况不一致的内容和知识点进行了修改。本书部分符号正、斜体与原书保持一致。

在本书的成书过程中，我要感谢我的研究生，Bob Chang, Shone Chen, Jian-Hua Chiao, Cheng-Yu Yu, Zoe Tang, Jeffrey Chen, Yi-Ying Chen, Henry Hong, Derek Yeh, Yu-Luh Lin, Jou-Wen Chen 和 Sandy Lin。感谢他们热心地参与 MATLAB 代码和其他习题的编写。

同时，感谢我的妻子 Fu-Nien，她对我的这个长期项目给予了极大的支持。感谢我的儿子 Brian 和我的女儿 Emily 在我成书过程中表现的耐心和帮助。

除了 McGraw-Hill 教育(亚洲)公司和几位匿名审稿者对本书提供的宝贵意见和建议，我还要感谢中国台湾电力公司向本书提供了各种设备的照片。

Gary W. Chang, 博士, 高级工程师 IEEE 会士

作者简介

Gary W. Chang 分别于 1982 年、1988 年和 1994 年获得台湾台北理工学院的电气工程学士学位、台湾清华大学的硕士学位和得克萨斯大学奥斯汀分校的博士学位。

Chang 博士于 1994—1995 年期间在美国加州担任顾问职务，并参与美国电力科学研究所的电能质量项目，以及太平洋瓦电公司的配电自动化项目。1995—1998 年，他任职于美国明尼苏达州的西门子输配电有限责任公司，并负责全球电网能源管理系统项目的资源调度。Chang 博士于 1998 年 8 月加入中国台湾中正大学电气工程系，并于 2005 年晋升为正教授。2010 年后，他成为该学校的杰出教授。

Chang 博士在学术界和工业界都很活跃。他的论文不但发表在电力工程领域的众多杂志和国际会议上，而且也成为技术报告和教材的内容。Chang 博士是电力工程领域的多个国际期刊的编辑。他也是 IEEE 电力和能源学会台北分会的前任主席。2001 年后，他在 IEEE 电力和能源学会的输电和配电委员会和电能质量小组委员会中担任过多个领导职务。他是 IEEE 会士，同时也是在美国明尼苏达州注册的专业工程师。

John J. Grainger 是北卡罗来纳州立大学电气和计算机工程学院的名誉教授。他本科毕业于爱尔兰国立大学，之后在威斯康星大学麦迪逊分校获得硕士和博士学位。

Grainger 博士是北卡罗来纳州立大学电力研究中心的创始人，该中心联合院校和工业界，对电力系统工程进行合作研究。他主要负责该中心的输电和配电系统规划、设计、自动化和控制，以及电力系统动态特性的项目研究。

Grainger 教授还任教于威斯康星大学麦迪逊分校、伊利诺伊理工学院、马凯特大学和北卡罗来纳州立大学，并在爱尔兰供电局、芝加哥的英联邦爱迪生公司、密尔沃基的威斯康星电力公司、罗利的卡罗来纳电力照明公司分享了他的行业经验。Grainger 博士是旧金山的太平洋瓦电公司、罗斯密的南加州爱迪生公司等多家电力行业组织的活跃顾问。他曾参加的教育和技术协会包括 IEEE 电力和能源学会、美国工程教育学会、美国电力会议、国际配电会议(CIRED)和国际大型电力系统理事会(CIGRE)。

Grainger 博士在 IEEE 电力和能源工程协会期刊上发表了很多论文。1985 年，他获得 IEEE 输电和配电委员会颁发的最佳论文奖。1984 年，Grainger 教授获得爱迪生电气研究所的 EEI 电力工程教育奖。

目 录

第 1 章 背景	1
1.1 电的发展简史	1
1.2 现代电力系统的演变	2
1.3 发电和电力需求	4
1.4 输电、配电和变电站	6
1.5 负荷研究	7
1.6 故障计算	7
1.7 电力系统保护	8
1.8 经济分配	8
1.9 稳定性分析	9
1.10 电力系统运行与控制	9
1.11 电网的去管制和重组	10
1.12 智能电网	11
1.13 小结	12
第 2 章 基本概念	13
2.1 引言	13
2.2 单相交流电路	14
2.3 三相交流电路	22
2.4 标么值	30
2.5 单线图	34
2.6 阻抗和电抗图	35
2.7 小结	36
复习题	36
习题	37
第 3 章 变压器和同步电机	40
3.1 理想变压器	40
3.2 单相变压器的等效电路	45
3.3 自耦变压器	49
3.4 单相变压器的阻抗标么值	50
3.5 三相变压器	53
3.6 三绕组变压器	57
3.7 三相变压器：相移和等效电路	59
3.8 抽头切换和调压变压器	64
3.9 同步电机	68

3.10	同步电机的工作原理	70
3.11	同步电机的等效电路	73
3.12	有功功率和无功功率控制	79
3.13	同步发电机的运行极限	83
3.14	小结	88
	复习题	88
	习题	90
第4章	输电线路参数	96
4.1	导线的电阻	96
4.2	输电线路的串联阻抗	100
4.3	输电线路的换位	108
4.4	输电线路的并联导纳	111
4.5	大地对三相输电线路电容的影响	119
4.6	小结	123
	复习题	124
	习题	125
第5章	输电线路建模	129
5.1	短输电线路	129
5.2	中等长度输电线路	133
5.3	长输电线路	134
5.4	长输电线路的等效电路	141
5.5	输电线路的潮流计算	144
5.6	输电线路的无功功率补偿	145
5.7	直流输电	147
5.8	小结	148
	复习题	148
	习题	149
第6章	电网计算	153
6.1	节点和节点导纳矩阵	153
6.2	利用 Kron 降阶法消除节点	159
6.3	节点阻抗矩阵	164
6.4	戴维南定理和节点阻抗矩阵	165
6.5	Z_{bus} 阵的修改	169
6.6	节点阻抗矩阵的直接求解法	175
6.7	对 Y_{bus} 进行三角分解法求 Z_{bus}	178
6.8	等功率变换	182
6.9	小结	185
	复习题	185
	习题	186

第 7 章 潮流分析	189
7.1 Gauss-Seidel 迭代法	189
7.2 Newton-Raphson 法	193
7.3 潮流计算	198
7.4 Gauss-Seidel 潮流法	202
7.5 Newton-Raphson 潮流法	208
7.6 快速解耦潮流法	222
7.7 小结	228
复习题	228
习题	229
第 8 章 对称故障	234
8.1 RL 串联电路的暂态过程	234
8.2 故障时有载发电机的内电势	236
8.3 利用节点阻抗矩阵 Z_{bus} 进行故障计算	241
8.4 使用 Z_{bus} 等效电路进行故障计算	245
8.5 断路器的选择	249
8.6 小结	256
复习题	256
习题	257
第 9 章 对称分量和序网	260
9.1 对称分量法的基本原理	260
9.2 Y 型和 Δ 型对称电路	263
9.3 基于对称分量的功率	268
9.4 Y 型和 Δ 型阻抗的各序电路	270
9.5 对称输电线路的各序电路	273
9.6 同步电机的各序电路	277
9.7 Y- Δ 型变压器的各序电路	282
9.8 不对称串联阻抗	289
9.9 序网	290
9.10 小结	293
复习题	293
习题	295
第 10 章 不对称故障	297
10.1 电力系统的不对称故障	297
10.2 单相接地故障	305
10.3 相间故障	309
10.4 两相接地故障	312
10.5 实例	317
10.6 断路故障	325
10.7 小结	333

复习题	335
习题	336
第 11 章 电力系统保护	339
11.1 保护系统的性质	339
11.2 保护区	341
11.3 互感器	342
11.4 基于逻辑判断的保护继电器	344
11.5 主保护和后备保护	350
11.6 输电线路保护	351
11.7 电力变压器的保护	360
11.8 保护继电器的发展	363
11.9 小结	363
复习题	363
习题	364
第 12 章 经济调度与自动发电控制	366
12.1 同一发电厂内机组的负荷分配	366
12.2 考虑机组功率极限时发电厂内机组的负荷分配	372
12.3 发电厂间的负荷分配	377
12.4 网损方程	386
12.5 自动发电控制	393
12.6 小结	401
复习题	401
习题	402
第 13 章 电力系统稳定性	405
13.1 稳定性问题	405
13.2 转子动态和摇摆方程	406
13.3 摇摆方程的深入讨论	409
13.4 功角方程	412
13.5 同步功率系数	416
13.6 稳定性的等面积准则	419
13.7 等面积准则的更多应用	423
13.8 多机稳定性分析: 经典模型	424
13.9 摇摆曲线的逐步求解法	430
13.10 暂态稳定性的计算机程序	437
13.11 影响暂态稳定性的因素	439
13.12 小结	440
复习题	440
习题	442
附录 A	444
中英文对照表	450

第1章 背景

电力系统是人类有史以来最复杂的基础设施之一。住宅、商业和工业用户都需要用电，因此保证能源的可持续发展是一个国家生活水平持续提高的必要条件。此外，在保护环境的前提下保证电能的质量和供电的可靠性也意义重大。因此，电力系统需要高素质的工程师不断研究和利用各种新技术，从而解决电力工业面临的各种问题。

电力系统是一种转换和传输能量的手段，它实现对能量的即用即用。现代电力系统包含5个关键部分：发电厂、变电站、输电网、配电网和负荷。发电机将各种能源转换为电能。变压器改变输入和输出端口上的电压和电流等级。变压器和输电线路实现对电能的输送和分配，它们或者直接向电力用户供电，或者通过互联系统向其他电力系统供电。配电系统实现所有负荷与变电站的连接，其中变电站用于进行电压变换和实现开关功能。

本书旨在介绍现代电力系统分析所使用的方法。首先对电力系统的发展进行综述，然后对输电网、系统运行和控制相关的主题进行讲解。

1.1 电的发展简史

电磁的研究始于英格兰的 William Gilbert，1600年，他在 *De Maganete* 一书中详述了他多年的研究成果，并创造了用于描述电的术语——“电子”。1663年，德国的 Otto von Guericke 建造了第一台静电发电机，它通过摩擦一个旋转的硫磺球得到静电。1729年，英格兰的 Stephen Gray 发现了电的传导性。1733年，法国的 Charles Francois du Fay 提出，电有两种形式，即负电荷和正电荷。1745年，荷兰物理学家 Pieter van Musschenbroek 发明了最早的电容器，它被称为莱顿罐，用于储存和释放电荷。1752年，Benjamin Franklin 发现闪电就是电流，之后他发明了避雷针，这成为第一个实用的电力案例。1785年，法国 Charles-Augustin de Coulomb 在他的研究报告中描述了电和磁的相互作用规律，并且成功地设计了一种仪器，以观察仪器表面的电流分布。因为该项研究的重要性，后人以他的名字来命名电量的单位库仑(C)。

在 Coulomb 之后，英格兰的 Henry Cavendish、意大利的 Luigi Galvani 和 Alessandro Volta 对电的实用化都做出了重大贡献。1747年，Henry Cavendish 发表了不同材料导电率的测定结果，1786年，Luigi Galvani 证明了神经脉冲的电学基础。1800年，Alessandro Volta 制造出电流桩并首次发明了实用的发电方法。该发明被认为是第一个能够提供可靠、稳定电流的电池，它使研究人员能够探讨更多的电磁现象。为了表彰他的贡献，电压的单位被命名为伏特(V)。

1820年，丹麦的 Hans Christian Oersted 发现电流在导线中流动时，导线会发热，同时附近的罗盘指针会发生偏移。同年，法国的 André-Marie Ampère 提出，当电流流过两根长直平行导线时，导线之间的作用力与它们之间的距离成反比，与流经它们的电流强度成正比。后来，电流的单位就以他的名字命名为安培(A)。1827年，德国的 Georg Simon Ohm 通过电学实验发现了电压、电流和电阻之间的基本关系，即欧姆定律。1831年，英格兰的

Michael Faraday 通过一系列实验发现了电磁感应现象。他的实验结果带来了现代电动机、发电机和变压器等电力设备的产生。1832 年, Faraday 证明了由电磁产生的感应电、由电池产生的伏打电和静电的性质相同。大约同一时间, 美国科学家 Joseph Henry 发现了电磁自感现象, 他被认为是电动机的发明者。随后以他的名字命名了电感的标准单位亨利(H)。受 Faraday 的启发, 苏格兰的 James Clerk Maxwell 在 1864 年证明了电场和磁场之间的微妙关系, 即麦克斯韦方程, 该方程还意外地与光速建立了联系。由此产生出光是电磁现象的想法, 随后得到电的移动速度接近于光速的结论。图 1.1 所示为电学认知过程中的基础里程碑。

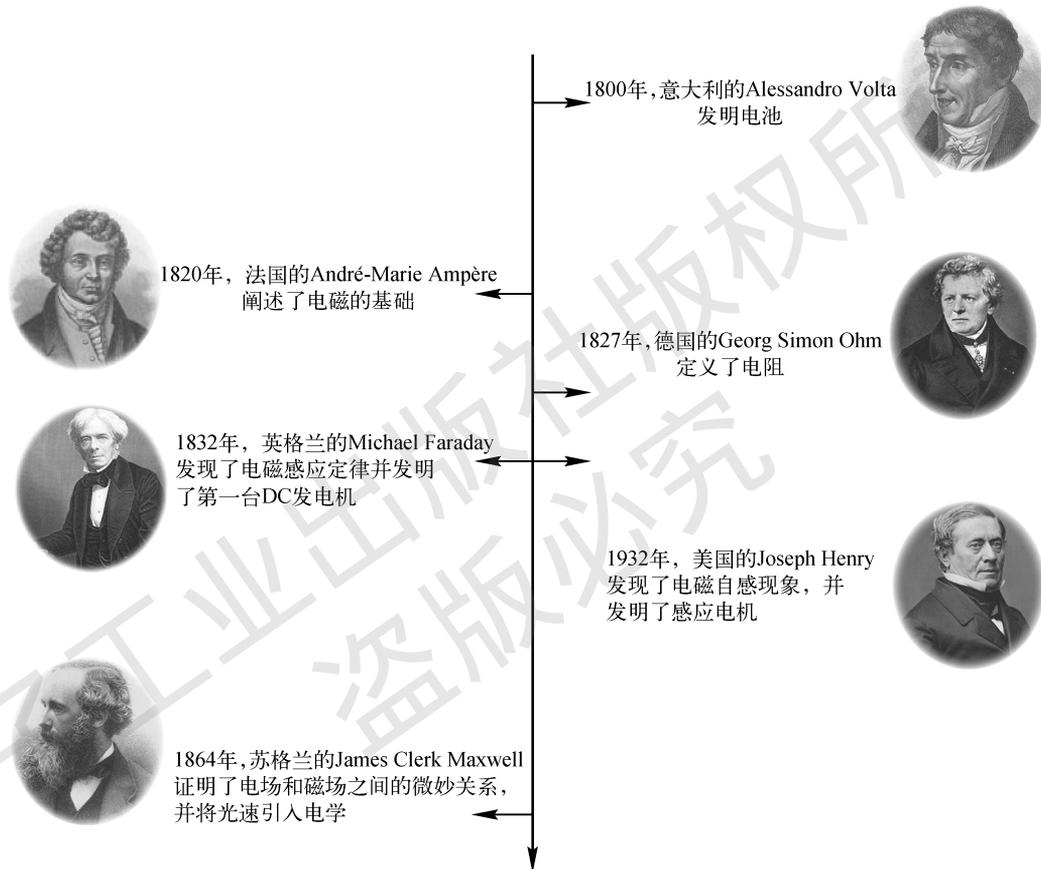


图 1.1 电学认知过程中的基础里程碑

1.2 现代电力系统的演变

1878 年, Thomas Edison 发明了白炽灯, 1882 年, 他在曼哈顿珍珠街建立了集中式低压直流(DC)发电厂, 向 225 间住宅中的 5000 盏电灯供电, 随后, 电气化的发展使人类生活进入了一个崭新的时代。1881—1884 年, 法国的 Lucien Gaulard 和英国的 John Dixon Gibbs 对变压器的优点, 即改变电压, 进行了证明。同一时间, George Westinghouse 正密切关注欧洲交流(AC)输电的发展。1885 年, 当 Westinghouse 得到 Gaulard-Gibbes 在美国的专利权后, 立即开始发展交流系统。1885—1886 年的冬天, Westinghouse 的早期合伙人 William Stanley, 对变压器进行了改造和测试, 他在位于马萨诸塞州大巴灵顿的实验室里铺设了第一个实验用的交流配电系统, 向镇上的 150 盏电灯供电。美国的第一条交流输电线路于 1890 年投入运

行，它利用威拉米特河瀑布进行水力发电并将产生的电能输送到 13 英里外俄勒冈州的波特兰。之后，业界对采用直流还是交流进行输电的问题展开了激烈的争论，直到 1896 年，Westinghouse 和 Nikola Tesla 在尼亚加拉大瀑布上修建了第一个水电站，它将交流电力输送到 26 英里之外的纽约水牛城，这标志着交流系统的最终胜出。

最早的输电线路是单相线路，主要用于照明供电。最早的电动机是单相电机，不过，Nikola Tesla 在 1888 年 5 月 16 日发表了一篇关于两相感应同步电动机的论文。这使得多相电机的优点得以凸显，1893 年在芝加哥的哥伦布博览会上，两相交流配电系统也公之于世。此后，交流输电（特别是三相交流输电）系统逐渐取代了直流输电系统。截至 1894 年 1 月，美国一共有 5 个多相发电厂，其中 1 个采用两相发电，其余 4 个电厂均为三相发电。当时大部分电能都采用交流输电方式，这是因为变压器能使输电电压高于电源电压或用户电压，所以交流输电系统能输送更多的电能。

直流输电系统中，交流发电机通过变压器和整流器向直流线路供电，在直流线路的末端逆变器将直流电转换为交流电，然后再由变压器进行降压。通过在直流线路的两端加装整流和逆变装置，电力可以实现双向输送。研究表明，在长距离输电的场合，直流架空线路比交流线路的性价比更高。此外，直流输电系统能够连接非同步运行的电力系统（例如，50 Hz 和 60 Hz 系统）。欧洲的输电线路通常都比美国长得多，而且欧洲很多区域的直流输电线路既有地下铺设方式，也有架空线路方式。在加利福尼亚州，通过沿着海岸线的 500 kV 交流线路可以将大量的水电从太平洋西北部输送到加利福尼亚州的南部，也可以通过内华达州的 800 kV（线间电压）直流输电线路将水电送达更远的内陆。

在交流输电的早期，美国曾疯狂地提升电压等级。1890 年，威拉米特-波特兰线路的电压等级是 3300 V。1907 年，线路的电压等级到了 100 kV。1913 年，电压上升到 150 kV，1923 年为 220 kV，1926 年为 244 kV，1936 年，胡佛水坝-洛杉矶的线路投入运行时，线路电压为 287 kV。1953 年建成了 345 kV 的线路。1965 年投入运行了 500 kV 线路。4 年后的 1969 年，第一条 765 kV 线路开始运行。20 世纪 70 年代开始盛行对 1000 kV 及以上电压等级的研究。但是，由于成本高昂，目前 1000 kV 及以上电压等级的商用电力系统已很少见。从 20 世纪 90 年代开始，美国和其他许多国家放宽了对电力市场的管制，输电业务与配电业务开始分离^①。图 1.2 所示为现代电力工业形成过程中的里程碑。

美国早期的电力系统是分地区建立的，因此，截至 1917 年，这些系统都在各自区域内独立运行。但是，随着对功率需求和可靠性要求的不断提高，电气工程师们开始探讨相邻系统互联的可能性。第一，系统互联的性价比很高，投入少量的发电机就能满足轻载或空载的需要，同时互联系统可以共用备用发电机以满足峰荷或负荷的突然增加（用于支撑这一类负荷增长的备用通常称为旋转备用）。第二，系统互联可以减少发电机的数量，因为电网通常可以从互联的其他电网获得额外的电力供应。第三，系统互联可以充分利用最经济的能源。甚至，在某些时段内系统可以选择由其他系统供电，因为向其他供应商购电的成本远小于自

^① 1949 年之前，我国的电力工业发展缓慢，输电线路建设同样迟缓，当时的电压等级按具体的工程需求决定。1908—1943 年，我国分别有 22 kV、33 kV、44 kV、66 kV、110 kV 和 154 kV 电压等级的输电线路。1949 年以后，我国开始按电网发展规划统一电压等级，之后逐渐形成了经济合理的电压等级序列。1981 年以前，我国主要以 220 kV 电压等级的电网为骨干网架。1981 年以后，随着我国第一条 500 kV 交流输电系统（平武线）的建成，开始形成了以 500 kV 和 330 kV 为主要网架的超高压电网。目前，面临大规模、远距离输电以及全国联网的需要，我国正在进行 1000 kV 交流和 ± 800 kV 直流特高压输电试验示范工程的建设，并建立了用于深入研究的特高压试验研究基地。——译者注

已发电。目前，互联系统中不同电网之间交换电能已经成为一种常态。

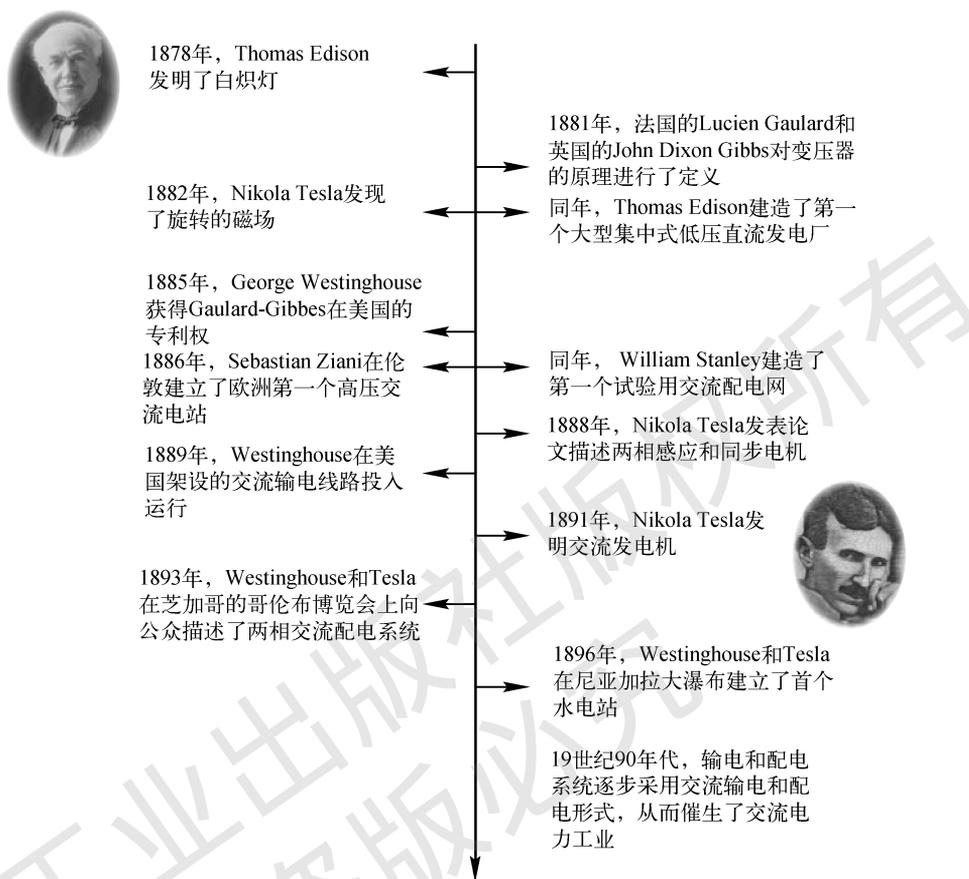


图 1.2 现代电力工业形成过程中的里程碑

互联系统也带来了许多新问题。不过，大部分新问题都得到了妥善解决。互联系统使得电流增大。当系统发生短路时，断路器将动作以中断该电流。如果互联系统联络节点上没有安装合适的继保装置和断路器，那么任何一个系统中由于短路造成的扰动都会扩散到互联系统的其他部分。互联系统以及互联系统中所有同步发电机的额定频率都必须相同。

在规划电力系统的运行、改造和扩容时，需要考虑负荷、故障计算、保护(用于防止系统遭受闪电、开关浪涌及任何短路的影响)，以及系统的稳定性。在分析系统的运行效率时，需要确定任一时刻总发电量在各个电厂及电厂中各个机组单元之间的分配。

本章首先介绍发电、输电和配电的基本概念，然后对上文中的问题进行简单分析。最后，本章还将阐述计算机在电力系统规划和运行上的巨大贡献。

1.3 发电和电力需求

发电厂生产电能以满足各种负荷需求(即各种活动需要或者消耗的电能)，同时保持整个电网电压和频率的稳定。发电厂的发电机组可以按燃料进行分类。不可再生的能源包括化

石燃料和核燃料，使用这一类燃料的电厂称为火力发电厂，它通过汽轮机和(或)燃气轮机带动发电机产生电能。可再生能源主要包括水力、风力、太阳能、生物能和地热能。图 1.3 和图 1.4 分别为化石燃料发电和联合循环发电的典型结构。

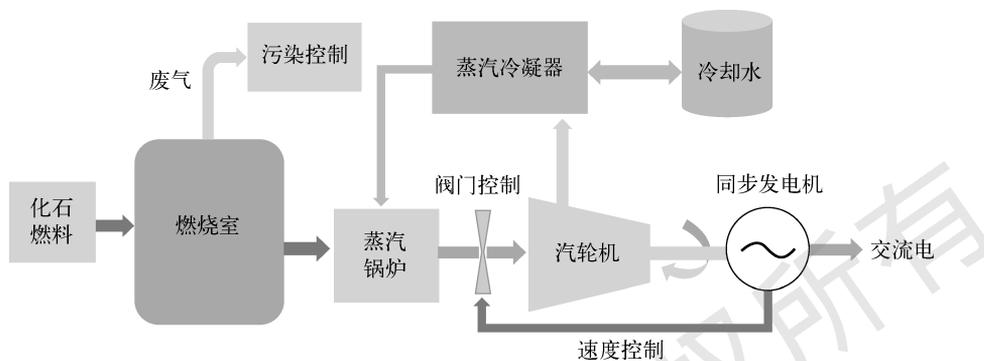


图 1.3 化石燃料发电的典型结构

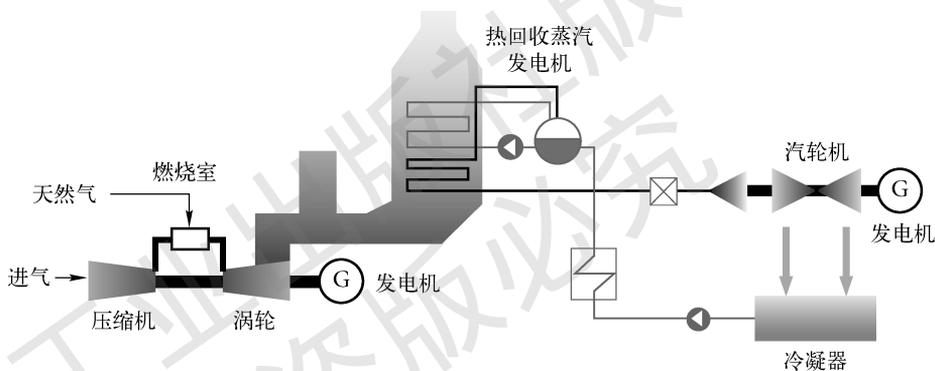


图 1.4 联合循环发电的典型结构

全球的电力需求极大，而且这种需求还在迅速增长，导致消耗的化石燃料也与日俱增。不过，在过去的几十年间，全球的主要发电燃料已经发生了很大的变化。统计数据显示，尽管在 20 世纪 70 年代至 20 世纪 90 年代期间，依靠核电和天然气的发电量持续增长，但煤炭仍然是最常用的燃料。由于受到 20 世纪 70 年代中期石油危机的影响，依靠石油的发电量持续下降。

因为化石燃料价格太高，同时温室气体(主要是二氧化碳)的排放对环境造成了很大的影响，所以业界掀起了一股狂潮，大力研究能替代化石燃料的能源(特别是可再生能源)。在这些可再生能源中，风力和太阳能的增长最快，天然气排名第二。燃煤发电在未来的一段时期内仍然占据主导地位，但随着全球对温室气体排放的限制，以及天然气成本的降低(因为页岩气生产技术的不断进步)，上述情况可能会大为改观。核能发电在 2010 年之前是一个热门的选择，但是在福岛核电站事件之后，很多国家开始重新考虑原有的核电政策，有些国家甚至取消了这些政策。尽管如此，受环境问题和能源安全性问题的影响，未来核能发电仍然会得到持续发展。

虽然可再生能源在环保方面优势明显，但在短期内，大多数可再生能源技术都无法与化石燃料的性价比相抗衡(不包括电价特别高或者政府提供奖励的场合)。风力和太阳能都是

间歇性能源，它们只有在资源充沛时才能被利用。一般而言，风电场和光伏电站的运行成本低于传统热电厂；但是，风电场和光伏电站的工程造价高昂，因此建造和经营可再生发电厂的成本很高。此外，由于风力和太阳能并不是随时随地唾手可得的能源，电气工程师们很难控制它们，因此它们并不是可靠的发电方式。为了缓解上述间歇性问题，可以采用高性价比的储能新技术，以及分布式风力和太阳能发电场的方式。

1.4 输电、配电和变电站

大型同步发电机的端电压通常不超过 30 kV。汽轮发电机的额定容量可达 2000 MVA。发电机的输出频率为 50 Hz 或 60 Hz，其中北美、中美洲和亚洲一些国家通常使用 60 Hz。对于大多数国家，低压指的是额定电压小于 1 kV，中压的范围为 1~69 kV。在美国，输电线路上的电压通常大于 69 kV，低于 69 kV 的电压被认为是配电电压。通常情况下，发电机的输出电压需要升压到 115~765 kV 或更高。美国标准的高压(HV)为 115 kV、138 kV、161 kV 和 230 kV，超高压(EHV)为 345 kV、500 kV 和 765 kV^①。

实际运行中，已经有 1000 kV 输电线路(通过 1200 MVA 升压变压器升压)。1100~1500 kV 的超高压(UHV)电压等级也在研究中。对于输电能力达 MVA 级的线路，提高输电线路电压等级的优势很明显。

不过，从 20 世纪 90 年代起，利用直流输送电力的高压直流输电系统(HVDC)更为普及。高压直流输电的关键技术是在送电端将交流电转换为直流电，然后在受电端将直流电变换回交流电。送电端和受电端都通过变换站来完成电力的转换。当代技术已经可以实现 ± 800 kV 的直流输电。随着发电厂离负荷中心越来越远，当高压交流系统(HVAC)的传输距离大于 600~800 km(海底电缆超过 50 km)时，或者不同频率的电网需要进行互联时，高压直流输电的性价比更高。研究表明，直流输电系统被越来越多地应用于大型输电或海上风力发电的输送中。

在人口密集的地区或者无法架设架空线路的场合(由于空间限制或施工困难等原因)，通常使用地下电缆来构建输电网。地下电缆埋入大地时，必须使用绝缘材料。近年来，固体绝缘电缆主要使用额定电压 500 kV 的交联聚乙烯绝缘技术。800 kV 交流电缆的研发情况也有见诸报端。

输电电压第一次降压发生在大型变电所中，输电电压被降至 34.5~138 kV(由输电线路的电压等级决定)，并向某些工业用户直接供电。第二次降压发生在配电站中，线路电压被降至 4~34.5 kV 左右(通常为 11~15 kV)，对应的系统被称为主配电系统。例如，12470 Y/7200 V 的主配电系统，表示线电压为 12470 V，线对地或者线对中性点的电压为 7200 V。还有一种应用不太广泛的、电压等级更低的主配电系统，其电压为 4160 Y/2400 V。大多数工业负荷都由主配电系统供电，此外，主配电系统还通过配电变压器的二次侧向住宅区提供单相、三线电能。例如，二次侧的连接方式为：两相导线之间的电压为 240 V，第三相导线接地，其他两相导线对地电压为 120 V。另外，二次侧电路还有额定值为 208 Y/120 V 或 480 Y/277 V 的三相、四线系统。图 1.5 所示为包含不同电压等级的现代电力系统的概貌。

^① 在我国，标准的高压通常指的是 110 kV 和 220 kV，超高压指的是 330 kV、500 kV 和 750 kV，特高压电网中的电压指的是交流 1000 kV 和直流 ± 800 kV。——译者注

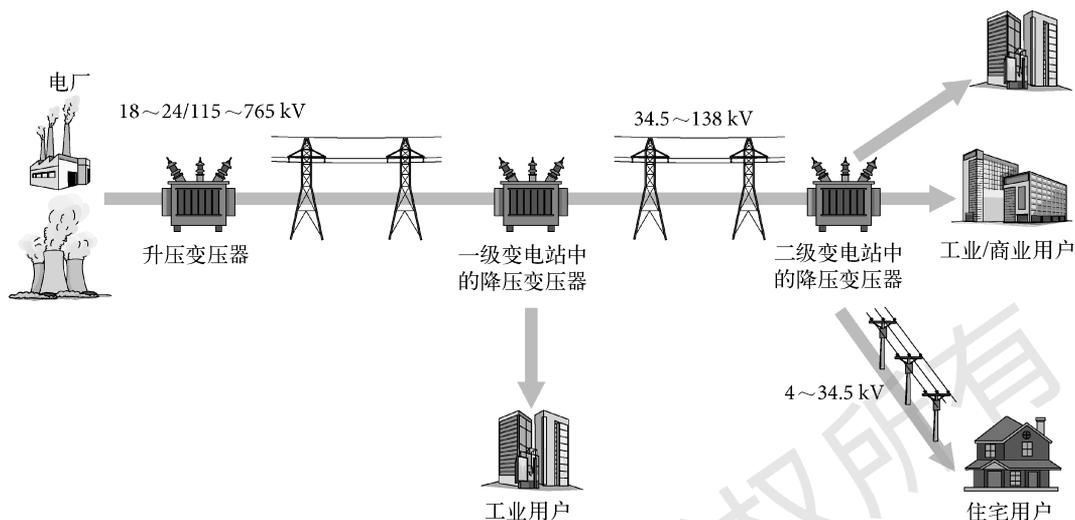


图 1.5 包含不同电压等级的现代电力系统的概貌^①

1.5 负荷研究

负荷研究是为了确定正常运行条件下电网各节点的电压、电流、有功功率、无功功率或功率因数。负荷研究对于系统的发展规划至关重要，因为新负荷、新发电站及新输电线路都会影响系统的正常运行。

复杂系统的潮流计算(或负荷潮流)可以利用数字计算机完成。例如，分布式计算机可以对包含上万个节点和线路的系统进行实时潮流计算。

需要强调的是，对电力系统进行分析是系统规划中一个非常重要的内容，因为这些系统一旦规划好，可能会在 10~20 年内保持不变。在负荷中心还没有建立前，电力公司就需要清楚地知道发电厂厂址可能存在的问题，并提前完成线路的优化，以期向日后新建成的负荷中心供电。我们将在第 7 章学习基于计算机的潮流计算。

1.6 故障计算

电路的故障是指对正常电流造成干扰的任何事件。大多数 115 kV 以上输电线路的故障都是由闪电引起的，它会导致绝缘子闪络。导线与接地杆塔之间存在的高电压可能会引发电离现象，并为雷击电荷提供接地通路。一旦导线与大地之间建立了电离路径，导线中的电流将通过这条低阻抗的电离路径流向大地，然后通过大地流到变压器或发电机的接地中性点，从而形成完整的通路。和接地无关的线间故障在实际运行中相对较少。

断路器动作并将故障线路与系统中的其余部分隔离可以实现电离路径的中断并去游离。

^① 我国电压等级少，因此配电层次简单。目前，除西北电网外，大部分电网的电压等级都是 500/220/110/35/10/0.38 kV，西北电网的电压等级分别为 750/330/110/35/10/0.38 kV 和 220/110/35/10/0.38 kV。电能送到负荷中心后，首先经过地区变电站将电压降低到 10 kV，然后再由 10 kV 配电线路输送到配电变压器，最后经过配电变压器将电压变成 0.38 kV 后向电力用户供电。单相用户得到的是相电压为 220 V 的民用交流电。——译者注

去游离的时间大约为 20 个周期，之后断路器重合闸，通常不会再次引发电弧。实际运行中可以对输电线路进行超高速重合闸，但如果是永久性故障，那么不管开关如何投切，重合闸都无效。永久性故障的原因有很多，比如线路接地、冰荷导致的绝缘子串破损、杆塔的永久性损坏以及避雷器故障等。

经验表明，70%~80%的输电线路故障都是单相接地故障，也就是单相导线与杆塔和大地发生闪络。大约有 5%的故障和三相线路有关，即三相故障。其他的输电线路故障包括两相接地故障以及与接地无关的线间故障。除三相故障外，上述所有故障均为不对称故障，系统各相间不再保持对称。

断路器可以在故障后的几个周期内动作，将故障与故障两侧的线路隔离。故障发生时，电力系统中的电流既不同于断路器动作前的电流，也不同于断路器不动作(未将故障与其他部分隔离)而系统重新进入稳态的电流。

正确选择断路器需要考虑两个因素：一是故障发生瞬间的电流大小，二是断路器必须能切断该故障电流。通过故障计算可以确定不同故障发生时系统各处的电流。这些计算数据可以用于对继保装置进行设置，从而控制断路器的动作。

后续章节中我们将学习一种强有力的分析工具，即对称分量法。它使得对非对称故障的分析几乎和三相故障分析一样容易。同样，非对称故障计算也必须使用数字计算机。因此，我们还将学习相关的计算机基本操作。

1.7 电力系统保护

电力系统包含各种元件，如发电机、变压器、母线、输电线路、电机，以及其他设备和负荷。故障可能对电力系统的元件造成很大的破坏。因此，需要通过各种方法(例如，设备开发、保护方案设计以及大量研究)来持续提高保护的能力，从而防止故障损坏输电线路和设备，或者造成发电的中断。

电力系统中故障的持续时间通常很短，因此故障发生的几个周期后可以通过自动重合闸的方式恢复正常运行。如果故障是永久性故障，则必须隔离故障，从而维持和确保系统的其余部分正常运行。检测故障并控制断路器的设备称为继保装置。在具体应用中，需要指明各种继电器的保护区域。继电器还将作为相邻区域或故障发生区域内另一个继电器的备份，以防止相邻区域中的继保装置拒动。在随后的章节中，我们将讨论继保装置的基本特点，并对实际案例、继电器的各种应用和继电保护的演变历史进行介绍。

1.8 经济分配

有一种说法，认为传统的电力工业正在逐步丧失竞争力，这是因为美国的每个电力公司都垄断了一个地区的电力服务。不过，将新产业引入一个地区时，就会带来竞争。一方面，理想的电价是决定一个新产业选址的重要指标。当然，和迅速增加的成本和不稳定的电价(相对于经济环境稳定时的电价)相比，电价不再是最重要的因素。另一方面，电力委员会通过制定电价规则不断向各个电力公司施压，以期在生产成本日益增高的压力下赚取合理的利润并达到经济利益最大化。

经济调度可以解决上述难题，它将系统的总负荷分配给使用不同燃料的各种发电厂，从而实现最经济的运行。后续章节中我们将学习通过计算机对系统中的所有电厂进行连续控制的案例，随着负荷的变化，发电厂间的功率将达到更经济的分配。

1.9 稳定性分析

交流发电机或同步电动机中的电流受电机感应电压(或内电势)的幅值、内电势的相角(以系统中其他电机的相角为参考)，以及电网和负荷特点的影响。例如，两台交流发电机并联且空载运行时，如果它们内电势的幅值和相角都相等，那么两台发电机中的电流将为0。如果它们的内电势幅值相等，但相角不同，那么两台电机的电压差不等于0，这时两台电机之间将出现电流，电流的大小和方向由两台电机的电压差和阻抗决定。其中一台电机相当于发电机，向另一台电机供电，而另一台电机相当于电动机，接受电能。

内电势的相角由电机转子的相对位置决定。如果发电机之间非同步，那么发电机内电势的相角将不断变化，这属于不稳定运行。只有各台电机的转速与参考转速相等且保持不变时，同步电动机内电势的相角才能保持恒定。当系统负荷(任何一台发电机带的负荷或者整个系统的总负荷)变化时，发电机的电流或者整个系统的电流都将发生变化。

如果电流的变化没有导致电机内电势幅值的变化，则电机内电势的相角必须发生变化。为了调节内电势的相角，转速需要发生短时变化，因为相角由转子的相对位置决定。当电机的相角调整到新的角度或者引起相角瞬变的扰动被清除时，电机再次恢复同步速度。系统中的电机如果不能与其他电机保持同步，将会在系统中产生很大的环流。如果系统设计合理，继保装置和断路器会将该电机从系统中切除。稳定性分析是研究系统中发电机和电动机维持同步运行的问题。

稳定性分析按照它们是否包含稳态或暂态条件进行分类。交流发电机的可输出功率和同步电动机的可承载负荷都有最大值限制，这个限制称为稳定极限。任何使发电机的机械输入功率或电动机的机械负荷超过稳定极限的变化都将导致系统不稳定。负荷突增、故障、发电机励磁丢失以及开关动作都会造成系统扰动并导致失步，有时渐变的扰动也会导致功率达到极限并造成系统失步。根据系统是突然还是逐渐到达不稳定点的情况，可以将功率的极限分别称为暂态稳定极限和稳态稳定极限。

目前有多种提高稳定性以及预测稳态和暂态情况下稳定极限的方法。后续章节中我们将学习两机系统的稳定性分析。虽然两机系统的分析比多机系统简单，但研究两机系统可以推演得到许多提高稳定性的方法。复杂的多机系统的稳定性极限预测则需要通过数字计算机完成。

1.10 电力系统运行与控制

现代电力系统信息和通信系统(SCADA/EMS)用于实现对系统的运行与控制。SCADA/EMS系统可以与其他系统集成并用于分析和决策支持。能源管理系统(EMS)是电网运营商用于监控、控制和优化发电和输电性能的计算机软件包。其中的优化软件包是高级应用程序，它是指用于发电控制和调度的应用程序的集成。图1.6所示为EMS的典型结构，它包含电网控制中心的主要功能。

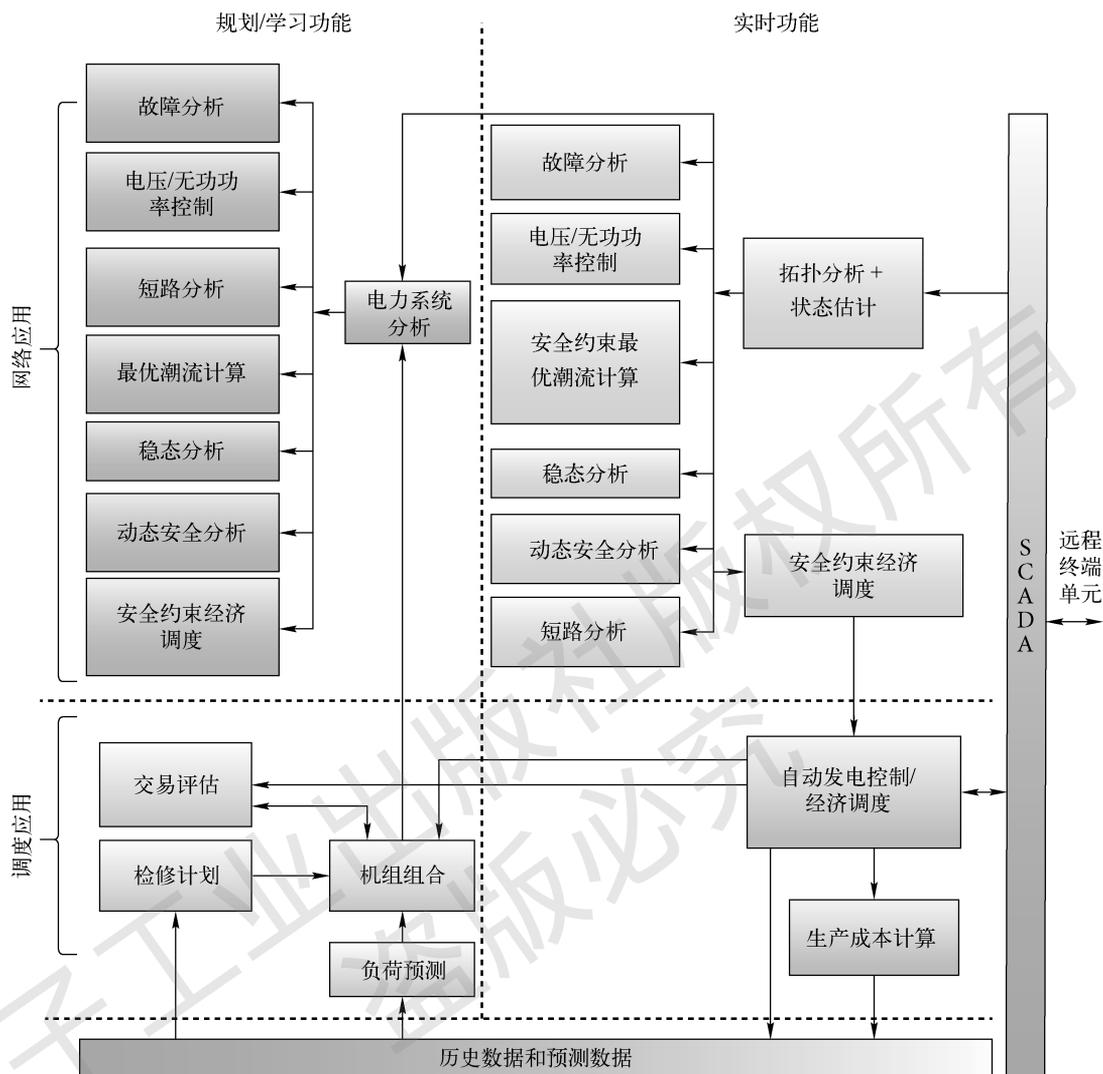


图 1.6 EMS 的典型结构

EMS 系统中的监测和控制模块称为数据采集与监视控制系统(SCADA)。SCADA 系统处理通信协议并通过 EMS 对系统进行控制。通过 SCADA 系统，运行人员能够在有人值班变电站和控制中心对无人值守的变电站进行远程控制，并从 SCADA 系统获取成功完成操作的指示。SCADA 系统还为远程运行人员提供指定设备或过程的状态，同时提供足够的信息用于激活这些设备或过程。数据采集是指对模拟电流和电压实测数据的收集，或对远程终端单元(RTU)发送的断路器状态(断开和闭合)的收集。运行人员和维修工程师通过分析这些数据实现对电网的监测，“控制”指的是将命令信号发送给需要操作的设备。

1.11 电网的去管制和重组

从 20 世纪 90 年代开始，英国、美国和世界上许多其他国家都开始放宽对电力市场的管制，输电业务与配电业务逐渐分开。许多电力公司将发电业务也进行了剥离。电力工业从一个经典的垄断结构转变为充满竞争的结构。因为独立电源供应商和电力批发市场的繁荣，发

电方垄断消费者市场的经济性和效率都大不如从前。零售商自主选择电源供应商能刺激市场降低电力成本、增加发电量并提升服务。

在去管制和重组下，发电、输电和配电的垂直关系从法律上(或功能上)被拆开。批发和零售电力环节加入竞争。批发电力市场由多家发电公司组成，它们都在同一个中央池中，一旦与买家签署合同，就出售他们的电力。零售则允许用户直接从批发市场上选择电力销售商或生产商。但是，输电和配电仍然被天然垄断，因此需要监管。为了实现有效的竞争，必须通过监管来确保市场参与者平等对待并准入电网。图 1.7 所示为去管制和重组下北美电力系统的业务结构。

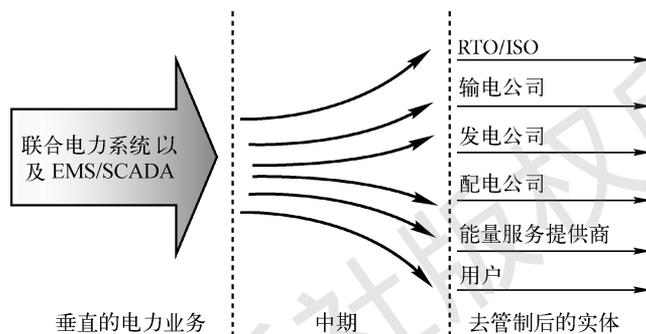


图 1.7 去管制和重组下北美电力系统的业务结构

去管制之前，通常由若干个电力公司组成联合电力系统，以平衡所辖电网中的负荷需求。联合电力系统通过制定对应的机制，实现不同电力公司之间的电力分配以及各电力公司 EMS/SCADA 系统的调度和控制。区域输电组织(RTO)负责对大型高压输电网进行协调、控制和监测，使州际的电力输送更为便利。在欧洲，输电系统运营商(TSO)执行与 RTO 类似的功能。独立系统运营商(ISO)是在美国联邦能源管理委员会(FERC)的指导和建议下形成的，它的工作与 RTO 相同，但通常只在特定的地域内进行控制。美国的电力市场分别由 10 个不同的主要的独立系统运营商(ISO)及区域输电组织(RTO)服务。

1.12 智能电网

智能电网是指 21 世纪利用计算机远程控制和自动化技术实现的输电和配电系统。实现智能电网的基础是在传统电网中采用先进的现代通信和信息技术(ICT)。

智能电网的出现与整合分布式能源资源(DER)、提高能效以及提供可靠电力供应的需求密切相关。通过 ICT 集成，可以将采集到的电力系统数据转化为有用的电网智能化信息。驱动智能电网发展的技术有 5 种，它们是集成通信、传感和测量技术、先进元件、高级控制方法以及改进的接口和决策支持。

发电、输电、配电和测量技术的有效协调能确保能源的高效利用和电力的可靠供应。例如，让 DER 并网并实现最优利用，需要利用电力系统和 DER 的实时双向通信来实现智能化的管理和元件的集成。DER 可以帮助电力系统缓解电网拥塞、满足本地负荷需求并提供优质的电力。和传统电网相比，智能电网有很多优势，包括：电力扰动后的自愈能力、授权用户积极参与的能力、应对攻击的弹性运行能力、高质量的电力供应能力、电网资产的优化能力、各种发电方式的适应能力，以及支持电力服务创新和电力市场的能力。

智能电网的主要特点之一是为各种需求提供高质量的电力。在数字经济时代，电力供应的可靠性对电力工业的可持续发展起着至关重要的作用。为了满足用户对优质电力的需求，智能电网需要能提供不同等级的电力，因此，电网必须更加智能。第一，采用广域监测和动态输送容量测量技术可以提高变电站的自动化程度，在系统故障时迅速自愈。第二，采用数字继电器和智能电子器件(IED)取代传统的保护装置，提高 SCADA 系统的管理和控制能力。此外，电力系统元件之间的传感、控制、通信机制和操作流程等应用也逐渐成为智能电网不可缺少的组成部分。新技术和新功能使得智能电网比传统的电网更具竞争力。图 1.8 所示为智能电网的覆盖范围，图 1.9 所示为传统电力系统向智能电网的演变。

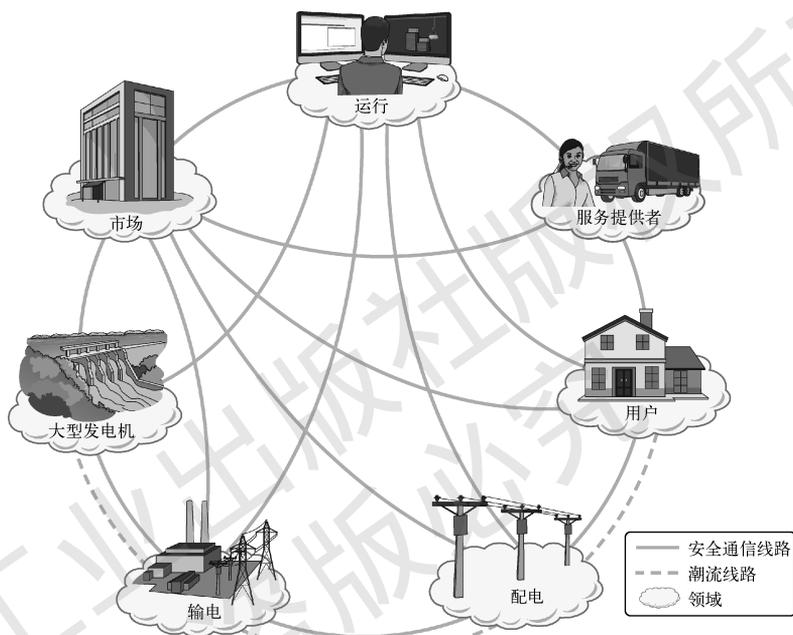


图 1.8 智能电网的覆盖范围(来源: NIST 智能电网框架 1.0)

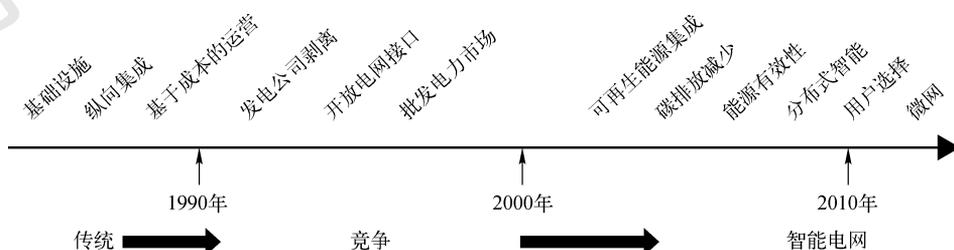


图 1.9 传统电力系统向智能电网的演变

1.13 小结

本章简要概述了电力系统的发展，对涉及现代电力系统运行、改造和扩容方面的重要问题进行了描述，并介绍了电力工业的最新发展情况。

需要强调的是，负荷研究、故障分析、稳定性分析和经济调度等内容必须掌握好，因为它们对系统的设计和可靠运行以及相关控制设备的选择至关重要。为了持续提升系统的可靠性和经济性，电气工程师们在电力系统的发展中将会面临更多的挑战。