

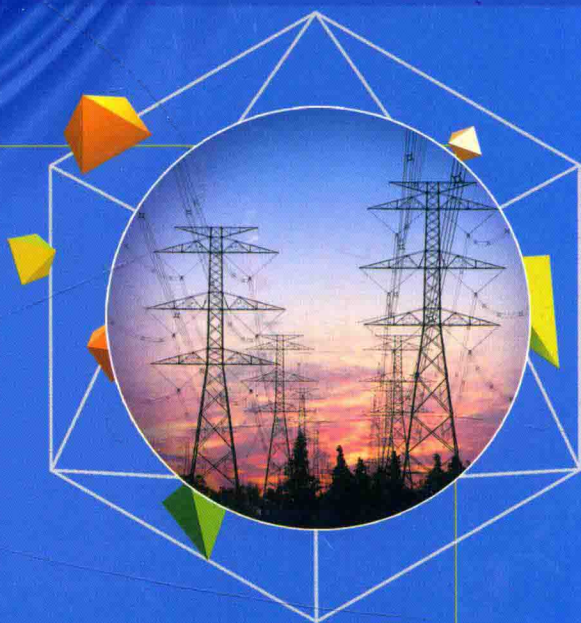
普通高等教育“十三五”规划教材
21世纪电力系统及其自动化规划教材

电力系统分析

Power System Analysis

© 孙淑琴 等编著

第2版



习题参考答案, 教学视频

普通高等教育“十三五”规划教材

21 世纪电力系统及其自动化规划教材

电力系统分析

第 2 版

孙淑琴 李 昂 李再华 编著



机械工业出版社

本书共分 8 章, 主要包括电力系统基础知识、电力系统各元件稳态参数及模型、电力系统稳态分析及计算、有功功率及频率调整、无功功率及电压调整、电力系统暂态分析及计算、电力系统稳定性分析计算。全书自第 3 章开始, 利用电力网络经典案例, 将潮流、短路、暂态稳定性分析等计算机解法的规范化表达及详细计算过程进行了例举, 读者可以通过这些案例的计算过程, 编写计算程序, 进而掌握课程的基本理论, 学会分析问题及解决问题的方法。

本书可以作为电气工程、电力系统等专业的教学用书, 同时也可供从事电力系统工作的工程技术人员和相关专业人员参考。

本书配有免费电子课件, 欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载, 或发邮件到 jinacmp@163.com 索取。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统分析/孙淑琴, 李昂, 李再华编著. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2018. 10

21 世纪电力系统及其自动化规划教材 普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-60968-1

I. ①电… II. ①孙… ②李… ③李… 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 (2018) 第 217276 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: 吉 玲 责任编辑: 吉 玲 张莉萍 刘丽敏

责任校对: 张晓蓉 封面设计: 张 静

责任印制: 孙 炜

天津嘉恒印务有限公司印刷

2019 年 1 月第 2 版第 1 次印刷

184mm×260mm · 20.75 印张 · 561 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-60968-1

定价: 49.80 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

服务咨询热线: 010-88379833

读者购书热线: 010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

金书网: www.golden-book.com

序

电力系统是关系国计民生和国家能源安全的重要基础设施，覆盖数百万平方公里，设备数量数以百亿计，电能以光速在电力系统中传输，发电、输电、用电实时动态平衡，是人类制造的规模最大的动态系统，其运行特性十分复杂，保障电力系统的安全高效运行极具挑战性。

电力系统分析理论是掌握电力系统运行特性、保障电力系统安全高效运行的基础理论，也是电力系统（电气工程）及其自动化专业的核心课程。

该书在修订过程中参考了国内电力系统稳态分析、暂态分析的经典教材，并结合西方相关教材的特点、优秀理念和系统分析思想，阐述了电力系统的基础知识、电力元件稳态参数及模型、电力系统稳态运行分析计算、电力系统有功功率及频率调整、电力系统无功功率及电压调整、电力系统故障分析计算和电力系统稳定性分析等基础理论。内容比较全面，也有自己的特色。

该书的作者具有丰富的教学和工程实践经验，在全面介绍电力系统的组成、原理、特性，及其控制方法和技术等基础知识的同时，还较多地考虑了电力系统的实际情况。因此，在帮助学习和理解电力系统分析理论方面，有望取得良好的效果。

电力系统是专业知识积淀浓厚的行业，新技术的应用也很广泛，既包括电力系统本身的新技术，也包括计算机、通信、控制、电子、机械、材料、人工智能等其他专业的众多新技术。因此，希望读者能够用继承和发扬的态度来学习，为电力系统的发展不断补充新的思想、新的科学、新的技术、新的方法。目前我们正处在新一代电力系统形成和发展的重要阶段，电力系统将向清洁低碳、安全高效的综合能源系统转型。新一代电力系统的发展，需要我们大家的一致努力。希望此书能够给大家带来开卷之益。

中国电力科学研究院

河涌

前言

自本书第1版出版以来,电力工程科学和技术发展较快,尤其计算机在电力系统仿真分析、调度控制等方面应用广泛而深入的情况下,电力市场化改革也对电网安全提出了新的要求。十多年来,我在吉林大学讲授“电力系统分析”课程,教材第1版的出版得益于授课心得、国内外教材的优秀理念和系统分析思想。当时由于教学课时有限,第1版编写时精简了教材内容,教材使用的六年中也发现了部分内容有所缺失。针对国家提出的深化工程教育改革、推进新工科建设与发展以及教学的实际需要,本书再版时进行了更为全面、系统、精细的计算和分析。期望本书可以作为电气工程(电力系统)相关专业的教学用书和国内电力行业工作者的参考书籍。

本书共分8章,在结构、形式及内容上主要参考国内电力系统稳态分析、暂态分析等经典中文教材,结合了西方相关教材的特点、优秀理念和系统分析思想,主要阐述电力系统基础知识、电力系统各元件稳态参数和模型、电力系统稳态分析及计算、电力系统暂态分析及计算、电力系统稳定性分析及计算等几部分。其中第1章中增加了中国电力工业发展历史和负荷曲线等内容;第2章中丰富了变压器模型部分内容;第3章中增加了静态安全分析部分内容;第4章中增加了有功功率经济分配部分内容;第5章中增加了无功功率负荷优化部分内容;第6章中增加了三相对称短路计算的计算机求解部分例题及习题;第7章中修订了对称分量法的部分表述,丰富了电力系统元件序网络和序参数等内容,增加了不对称故障计算机求解部分例题及习题;第8章中替换了暂态稳定性分析计算部分内容,增加了计算机求解例题及习题。全书自第3章开始围绕典型例题,分别展示了电力网络潮流、短路以及暂态稳定性分析规范化计算机解法的详细求解过程,使学生通过这几部分例题的求解过程就能自行编写计算程序,验证教材中的基本理论及计算方法。希望通过对这些基础性例题的求解,帮助读者掌握分析问题和解决问题的方法,启发读者去创新、开发新的应用领域。

为了便于读者使用,书中增加了一些研究分析型习题,全部习题的解答、各章节重点难点及经典案例的计算机仿真部分内容将在与本书配套的《电力系统分析学习指导及经典案例数值计算》中给出。

中国电力科学研究院的李再华老师是本书再版的合作者,他主要从事电力系统分析和软件开发工作,参与修订了本书第1章、第4章和第8章,并且仔细地阅读了部分章节的书稿,精炼了一些内容的文字表述。在此对李再华老师表示感谢。

感谢我的学生鲁宇,在第1版教材出版时就曾协助整理过部分文字,本次又参与了第4章部分内容的文字整理工作。

在本门课程授课之初,我曾求助于本科阶段的老师和同学们,他们的指导和帮助,使我逐渐理清了“电力系统分析”课程的重难点以及授课方法。教材第1版出版后我也曾请母校的老师们协助审阅,他们提出了一些意见和建议,但更多的是鼓励,在此我要感谢他们。

本书第1版被很多学校电气工程专业选作教材或参考书,并多次重印。在教材再版之初我曾与这些学校的教师们联系,并征求修订意见,得到了很多对修订教材的支持和建议的回复,在此对各位同仁表示感谢。

本人在吉林大学主讲这门课程十余年,听课学生数千,他们提出的问题和与我的讨论都对我启发很大,他们对知识的渴求与热情和勇于探索的创新精神,给予了我不断的动力和强

有力的支持，使我有信心修订本书。他们在校期间完成的毕业论文、课程设计报告等对本书再版有很大的帮助，部分学生为本书的修订提供了教学反馈并协助收集资料、绘制图表、整理例题及习题答案等。在此对十多年来陪伴在我身边的学生们表示感谢。

我还要感谢吉林大学仪器科学与电气工程学院的领导，为我提供了良好的教学与科研环境，他们对本书的修订给予了支持和信任，使我能够顺利地完成本书的再版工作。

感谢汤涌教授为本书作序，感谢易俊和郑超，他们仔细审阅了全部书稿，并提出了宝贵意见和修改建议。

在本书编写过程中参照了书后“参考文献”中所列书目，查阅了国内电力设计院的电力设计规程等相关资料，在此对原作者表示衷心感谢！

本书修订获得了“吉林大学‘十三五’规划教材”项目经费的支持，在此对学校提供经费支持表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请广大读者和同仁批评指正。

Email: sunsq@jlu.edu.cn

孙淑琴
于吉林大学地质宫

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电力系统概述	1
1.1.1 电力工业在国民经济中的地位	1
1.1.2 电力工业的历史及发展方向	1
1.1.3 我国古代对电和磁的认识及近现代 电力工业的发展	2
1.1.4 电力系统的基本参数	3
1.2 电力系统运行应满足的基本要求	5
1.2.1 电力系统运行的特点	5
1.2.2 电力系统运行的基本要求	5
1.2.3 电力系统的负荷曲线	6
1.3 电力系统接线方式和电压等级	7
1.3.1 电力系统的接线方式	7
1.3.2 电力系统的电压等级	9
1.3.3 电力系统不同电压等级的适用 范围	10
1.3.4 电力系统中性点接地方式	11
1.4 电气工程学科和电力系统分析课程	13
1.4.1 电气工程学科	13
1.4.2 电力系统分析课程的内容	14
1.4.3 计算机在电力系统运行与规划中的 应用	14
本章小结	15
习题	15

第 2 章 电力系统各元件稳态参数及 模型	16
2.1 同步发电机数学模型及运行特性	16
2.1.1 同步发电机稳态数学模型	16
2.1.2 原动机调节效应	19
2.1.3 励磁调节效应	21
2.1.4 同步发电机接入系统	22
2.1.5 同步发电机的运行范围	23
2.2 电力线路的参数及数学模型	24
2.2.1 电力线路的基本结构	24
2.2.2 电力线路的参数	25
2.2.3 电力线路的数学模型	28
2.3 电力变压器的参数与数学模型	34
2.3.1 理想变压器	34
2.3.2 实际双绕组变压器	36

2.3.3 三绕组变压器	39
2.3.4 自耦变压器	42
2.3.5 变压器的Ⅱ形等效电路	44
2.3.6 电抗器的参数和等效电路	45
2.4 负荷的运行特性及数学模型	46
2.5 电力网络的数学模型	47
2.5.1 多电压等级网络中参数及变量的 归算	47
2.5.2 标幺制	51
2.5.3 多电压等级电力网络标幺值等效 电路	56
2.5.4 具有非标准电压比变压器时的电力 网络等效电路	59
本章小结	63
习题	63

第 3 章 电力系统稳态分析计算	65
3.1 潮流计算的基本原理	65
3.1.1 潮流计算的基本物理量	65
3.1.2 潮流计算的数学模型	66
3.1.3 潮流计算的约束条件	68
3.2 电力网络潮流计算的手算解法	68
3.2.1 电压降落与功率损耗的计算	68
3.2.2 辐射形电力网络的潮流计算	72
3.2.3 远距离输电线路的潮流分布	79
3.3 复杂电力网络潮流计算的计算机解法	83
3.3.1 导纳矩阵的形成	83
3.3.2 高斯-塞德尔法	87
3.3.3 牛顿-拉夫逊法	92
3.3.4 快速分解法	108
3.3.5 直流法	113
3.4 静态安全分析	117
3.4.1 概述	117
3.4.2 静态安全指标体系	118
3.4.3 静态安全分析工作流程	119
本章小结	120
习题	120

第 4 章 电力系统有功功率及频率 调整	124
4.1 有功功率的平衡	124

4.1.1 有功功率电源与备用容量	124	6.1.2 计算短路电流的基本目的	177
4.1.2 有功功率平衡及各类发电厂 (机组)的合理组合	127	6.2 无限大功率电源供电系统的三相 短路	178
4.2 频率调整的必要性	128	6.2.1 无限大功率电源的概念	178
4.3 电力系统的频率特性	129	6.2.2 无限大功率电源供电电路突然 三相短路的暂态过程	179
4.3.1 发电机组自动调速系统工作 原理	129	6.2.3 短路冲击电流和短路全电流 有效值	181
4.3.2 发电机组的有功功率—频率静态 特性	130	6.2.4 短路容量	183
4.3.3 有功负荷的频率静态特性	131	6.3 同步发电机突然三相短路的物理过程及 短路电流分析	184
4.4 频率调整	132	6.3.1 同步发电机在空载情况下突然三相 短路的物理过程	184
4.4.1 频率的一次调整	132	6.3.2 无阻尼绕组同步发电机空载时的 突然三相短路电流	186
4.4.2 频率的二次调整	134	6.3.3 无阻尼绕组同步发电机负载时的 突然三相短路电流	188
4.4.3 主调频厂的选择	135	6.3.4 有阻尼绕组同步发电机的突然 三相短路电流	189
4.4.4 互联系统的频率调整	135	6.3.5 自动调节励磁装置对短路电流的 影响	191
4.5 有功功率的经济分配	140	6.4 电力系统三相短路的实用计算	193
4.5.1 火电厂间有功功率负荷的经济 分配	140	6.4.1 短路电流实用计算的基本假设与 基本任务	193
4.5.2 水火电厂间有功功率负荷的经济 分配	144	6.4.2 起始次暂态电流的计算	194
本章小结	149	6.4.3 应用叠加原理计算电力系统三相 短路	198
习题	149	6.4.4 任意时刻三相短路电流的计算	200
第5章 电力系统无功功率及电压 调整	151	6.5 计算机计算复杂系统短路电流周期分量 起始值的原理	202
5.1 无功功率平衡	151	6.5.1 基本原理	202
5.1.1 电力系统中的无功功率电源	151	6.5.2 利用节点阻抗矩阵计算的方法	203
5.1.2 电力系统中的无功功率负荷及无功 功率损耗	153	6.5.3 利用节点导纳矩阵计算的方法	209
5.1.3 电力系统中的无功功率平衡	154	6.5.4 短路点在线路上任意处的计算 方法	211
5.2 电压调整的必要性	155	本章小结	213
5.2.1 电压偏移对用电设备的影响	156	习题	214
5.2.2 无功功率与节点电压的关系	157	第7章 电力系统不对称故障分析 计算	215
5.2.3 负荷分类及其对电压影响的 控制	158	7.1 对称分量法	215
5.3 电压管理与电压调整	158	7.1.1 不对称短路后电力网络的特点	215
5.3.1 电压中枢点的概念	159	7.1.2 对称分量法的概念	216
5.3.2 电压中枢点的电压偏移和调压 方式	159	7.1.3 对称分量法在电力系统不对称 短路分析中的应用	218
5.3.3 电压调整的方法	161	7.2 电力系统元件的序参数及序网络	221
5.4 无功功率负荷的经济分配	168	7.2.1 阻抗负荷的序网络及序参数	221
5.4.1 等微增率准则的应用	168	7.2.2 发电机的序网络及序参数	223
5.4.2 无功功率补偿的经济配置	172		
本章小结	174		
习题	174		
第6章 电力系统对称故障分析计算	176		
6.1 短路的基本知识	176		
6.1.1 短路的原因、类型及危害	176		

7.2.3 电动机的序网络及序参数 225

7.2.4 变压器的序网络和序参数 226

7.2.5 输电线路的序网络及序参数 233

7.2.6 电缆线路的序网络及序参数 237

7.3 电力系统的序网络 237

7.4 简单不对称短路故障分析 241

7.4.1 单相接地短路 243

7.4.2 两相短路 247

7.4.3 两相接地短路 248

7.4.4 正序等效定则 251

7.5 不对称短路时网络中电流和电压的分布 255

7.5.1 不对称短路时网络中电流和电压的分布计算和规律 255

7.5.2 对称分量经变压器后的相位变化 256

7.6 不对称短路时运算曲线的应用 261

7.7 电力系统非全相运行的分析 262

7.7.1 单相断线 263

7.7.2 两相断线 264

7.8 不对称故障的计算机算法 264

7.8.1 不对称故障的通用边界条件 264

7.8.2 计算机计算不对称故障的数学描述 265

7.8.3 计算机计算程序原理框图 273

本章小结 274

习题 274

第8章 电力系统的稳定性分析计算 ... 276

8.1 电力系统稳定的概念 276

8.1.1 静态稳定 277

8.1.2 暂态稳定 278

8.1.3 动态稳定 279

8.1.4 电力系统稳定运行的基本要求 280

8.2 同步发电机的机电特性 280

8.2.1 同步发电机的转子运动方程 280

8.2.2 发电机的电磁转矩和功率 282

8.3 电力系统的静态稳定分析 283

8.3.1 单机—无穷大系统的静态稳定 283

8.3.2 小扰动法分析电力系统的静态稳定 285

8.3.3 多机系统的静态稳定近似分析 289

8.3.4 提高系统静态稳定性的措施 292

8.4 电力系统的暂态稳定分析 294

8.4.1 基本假定 294

8.4.2 简单电力系统的暂态稳定分析 294

8.4.3 暂态稳定计算的数学原理 300

8.4.4 暂态稳定计算模型选择与描述 303

8.4.5 暂态稳定性计算算法推导 304

8.4.6 提高系统暂态稳定性的措施 316

本章小结 321

习题 321

参考文献 323

第1章

绪论

本章提要

电力工业是国民经济及社会发展的支柱产业，在国民经济中占有重要地位，它的发展是社会进步和物质文化及生活现代化的需要。本章主要讲述电力系统的基本知识，内容有电力工业的地位、历史及发展方向，电力系统的基本参数、组成，电力系统运行的基本要求，电力系统的电压等级等。

1.1 电力系统概述

1.1.1 电力工业在国民经济中的地位

电能是一种十分重要的二次能源，它通常是由蕴藏于自然界中的煤、石油、水力、天然气、核燃料、风能、太阳能等一次能源转换而来的。同时，电能也可以方便地转换为机械能、光能、热能、化学能等其他形式的能量供人们使用。电能的生产和使用具有其他能源不可比拟的优点，它转换效率高、输送距离长、控制灵活、生产成本低、环境污染小。因此，电能已成为工业、农业、交通运输、国防科技及人民生活等各方面不可缺少的能源。

电力工业的发展水平是一个国家经济发达程度的重要标志。电力工业在我国国民经济中占有十分重要的地位，是国民经济重要的基础工业，也是国民经济发展战略中的重点和先行产业。电力工业的发展必须优先于其他工业部门，其建设和发展的速度必须高于国民经济生产总值的增长速度，只有这样，国民经济各部门才能够快速而稳定地发展，这是社会的进步、综合国力的增强和人民物质文化生活现代化的需要。“社会要发展，电力要先行”，可以看出电能在国民经济和人民日常生活中的作用。

1.1.2 电力工业的历史及发展方向

19 世纪上半叶电磁学的蓬勃发展为电气技术的兴起奠定了理论基础，而电能的应用则促进了工业化国家生产力的飞速发展。1820 年，丹麦科学家奥斯特（Hans Christian Oersted）通过实验证实了电流的磁效应；1821 年，英国科学家法拉第（Michael Faraday）提出了电磁能转化为机械能的可行性；1831 年，法拉第发现了电磁感应定律，并建立了第一座发电机原型。在这些发现的基础上，很快出现了多种重要电气设备，其中有代表性的有：1831 年，美国发明家亨利（Joseph Henry）发明的直流电动机；1870 年，比利时工程师格拉姆（Gramme）发明直流发电机；1873 年，德国工程师阿特涅（Artemis）发明的交流发电机；1879 年，美国发明家爱迪生（Thomas Alva Edison）发明的电灯；1888 年，南斯拉夫裔美国发明家特斯拉（Nikola Tesla）发明的交流电动机。初期的电力线路使用的主要是 100~400V 低压直流电。由于输电电压低，输送的距离不可能远，输送的功率也不可能很大。

1875 年，巴黎北火车站建成世界上第一座火电厂，为附近照明供电。1879 年，美国旧金

山实验电厂开始发电,是世界上最早出售电力的电厂。但是这时候输电距离很短。1882年9月,德国工程师米勒(Oskar von Miller)和法国工程师德波列茨(Marcel Deprez)首先实现了较高压的直流输电,将位于密士巴赫(Miesbach)煤矿的蒸汽机发出的电能输送到57km外的慕尼黑(Munich),用以驱动水泵运转。采用的电压为直流1500~2000V,输送功率首端为2.5kW,末端为1.5kW,效率为60%。随着生产力的发展,要求增大输送功率与输送距离,提高输送效率,这就要求提高输电电压,而发电机电压因技术和材料等限制不可能很高,且直流高压输电与用户低压用电之间存在着难以克服的矛盾,使得当时的直流输电制遇到很大的挑战。几乎与此同时,1882年10月,法国工程师高兰德(Lucien Gauland)和英国工程师吉布斯(John Gibbs)制成了第一台3000V/100V的二次发电机(带变压器功能的发电机),1883年又制成一台容量约5kV·A的二次发电机在伦敦郊外一个小型电工展览会上展出表演;1885年,匈牙利工程师布拉什(O. T. Blathy)等三人研究出封闭磁路的单相变压器,由此实现了单相交流输电。1885年,美国企业家威斯汀豪斯(George Westinghouse)首先在匹兹堡(Pittsburgh)建立交流电网。1889年,俄国工程师先后发明了三相异步电动机、三相变压器和三相交流制。1891年,德国工程师米勒主持展出了最早的输电系统,奠定了近代三相交流输电技术的基础。三相交流制的优越性很快显示出来,使运用三相交流制的发电厂迅速发展,而直流制不久便被淘汰。

由于实际运行中发现受端系统在缺乏多电源支持的情况下非常薄弱,逐渐出现了多电源点的互联运行,从而形成了早期的互联电网。随着输电电压、输送距离和输送功率的不断提高,更大规模的电力系统不断涌现。从电网的经济性角度看,互联技术的发展所带来的效应是明显的,如将多个小电网连成大型互联电网后,有利于不同地区间的电力平衡和经济调度,有利于安排机组的检修和事故备用容量,有利于充分利用廉价的水电资源,有利于实现负荷点的多路供电以提高供电可靠性等,并有利于提高系统的抗冲击能力,提高系统的供电质量。

自19世纪80年代开始有了输电工程以来,已有130多年的历史。近代电力系统的面貌已今非昔比,旧貌换新颜。电力系统不仅在输电电压、输送距离、输送功率等方面有了千百倍的增长,而且在电源构成、负荷成分、运行控制技术等方面也有很大变化。不仅有燃烧煤、石油、天然气等利用化学能的火力发电厂,利用水能的水力发电厂,利用核能的原子能发电厂,也有利用风能、太阳能、潮汐能、地下热能、生物质能等的发电厂。在负荷成分方面,不仅有电动机、电灯,还有相当比重的空调装置、电热装置、整流装置、储能装置等,负荷特性差别很大。

20世纪60年代以来,以电子技术(控制、通信和计算机技术)引入电力系统为标志,使其在运行管理上实现高度自动化。如今,不仅组成电力系统的各主要环节都配备有日益数字化的测量、保护、控制装置,而且不少电力系统还配有用以管理全系统运行的数字计算机系统。这种计算机系统,称为能量管理系统。它与电力系统联机,具有持续不断监视、控制后者的功能。

更值得一提的是,为解决远距离交流输电问题,工程师又转向直流输电,从而进一步提高输送能力。如今的直流输电电压已超过 ± 800 kV,输电距离已超过2000km,输送功率已超过8000MW,与百年前米勒和德波列茨的实验相比,已有霄壤之别。

1.1.3 我国古代对电和磁的认识及近现代电力工业的发展

众多古籍和文物证明,早在4700多年前的轩辕黄帝时代,我们的祖先就发现了磁并制造了指南车。战国时代制成了司南用于航海,并有“指南微偏不全南也”的科学论断,后经阿拉伯人和波斯商人传入欧洲。3000多年前的我国殷商时期,甲骨文中就有了“雷”及“电”的形声字。西周初期,在青铜器上就已经出现加雨字偏旁的“電”字。春秋时期,《管子》

一书中就有关于雷电和磁石的记载。东汉时期的王充在《论衡》一书中提到利用摩擦生电识别琥珀真假的方法,并举例说明雷电和摩擦电是一致的,驳斥了雷电是“天公发怒”的迷信之说。三国和南北朝时期,古籍中就出现过“避雷室”,说明当时我国已经有了避雷装置。古代对电的记载和研究应用,丰富了人们对电的认识,近代电学正是在对雷电及摩擦生电的记载和认识的基础上发展起来的。但是我国在近代自然科学方面逐渐落后于西方发达国家,电力工业发展的初期完全靠引进,技术方面受制于人。

清光绪五年(1879年)5月28日,英国工程师毕晓浦(J. D. Bishop)在上海租界乍浦路开办电厂,以7.46kW蒸汽机为动力,带动自激式直流发电机发电,这是我国土地上正式发电的第一座电厂。1888年12月,清政府工部为修葺北京西苑(今中南海),在仪銮殿(今怀仁堂)西墙外安装了1套容量为15kW的发电机组,成立西苑电灯公所,供清宫廷照明用电。同时,清朝军机处神机营机器制造局在河北张家口开设龙烟铁矿,建自备电厂,容量20kW,用于照明。1890年,清宫廷在颐和园安装了1套15kW直流发电机组,成立颐和园电灯公所,供园内照明用电。1894年,在河北北宁铁路矿山工厂内安装了1套40kW直流发电机组。这些设施于1900年毁于八国联军。

我国第一座水电站是云南昆明的石龙坝水电站,位于昆明市郊的螳螂川上,是我国最早兴建的水电站。石龙坝水电站是清光绪三十四年(1908年)由昆明商人王筱斋为首招募商股、集资筹建的,1910年7月开工,1912年4月发电,安装两套单机容量240kW的水轮机组,用22kV输电线路向32km外的昆明市供电。1931年以后,日本侵占我国东北三省,为了大量生产军需物资,在东北多地建立了电力系统,主要包括:①东北中部电力系统,以丰满水电厂为中心,采用154kV输电线路,连接沈阳、抚顺、长春、吉林和哈尔滨等地区;②东北南部电力系统,以水丰水电厂为中心,采用220kV和154kV输电线路,连接大连、鞍山、丹东、营口等地区;③东北东部电力系统,以镜泊湖水电厂作为中心,采用了110kV输电线路,连接鸡西、牡丹江、延边等地区。此外,中国较大的电力系统还有冀北电力系统,以77kV输电线路连接北京、天津、唐山等地区。

1949年中华人民共和国成立时,全国发电装机容量1849MW,年发电量约43亿kW·h,居世界第25位。1952年我国建设的第一套高温高压热电机组位于黑龙江富拉尔基热电厂,单机容量只有2.5万kW。到1978年改革开放前,我国电网的最高电压等级是1972年6月6日建成投产的西北电网——刘家峡—天水—关中的330kV交流输电线路,其余都是220kV或110kV以下的电网。

1949年以后,尤其是改革开放以来,我国的电力工业有了很大的发展。截至2016年年底,我国全口径发电装机容量16.5亿kW,年发电量5.99万亿kW·h,均居世界第一位。全国火电装机10.5亿kW、水电装机3.3亿kW、并网风电装机1.5亿kW、并网太阳能发电装机容量7742万kW、核电装机3364万kW,创造了多项世界之最。未来电网的发展方向是建设以特高压电网为骨干网架(通道),以输送清洁能源为主导,全球互联的坚强智能电网,适应各种分布式电源接入需要,能够将风能、太阳能、海洋能等清洁能源输送到各类用户,是服务范围广、配置能力强、安全可靠、绿色低碳的全球能源配置平台。

1.1.4 电力系统的基本参数

电力系统主要由发电厂、输电线路、配电系统及负荷组成,通常覆盖广阔的地域。发电厂将原始能源转换为电能,经过输电线路送至配电系统,再由配电线路把电能分配给负荷(用户),由上述四个部分组成的统一整体叫作电力系统。发电机将机械能转换为电能,输电线连接发电厂与配电系统以及与其他系统实现互联。配电系统连接由输电线供电的局域内的所有单个负荷。电力负荷包括电灯、电热器、电动机(异步电动机、同步电动机等)、整流

器、变频器、电池或其他装置，在这些设备中电能又将转换为光能、热能、机械能、化学能等。

由此可见，广义的电力系统应该是由锅炉、反应堆、汽轮机、水轮机等动力源，发电机等生产电能的设备，变压器、电力线路等变换、输送、分配电能的设备，电动机、电热炉、电灯等各种消耗电能的设备，以及测量、保护、控制装置乃至能量管理系统所组成的统一整体，是一个庞大而复杂的整体。电力系统中，由变压器、电力线路等变换、输送、分配电能设备所组成的部分常称为电力网络，如图 1-1 所示。

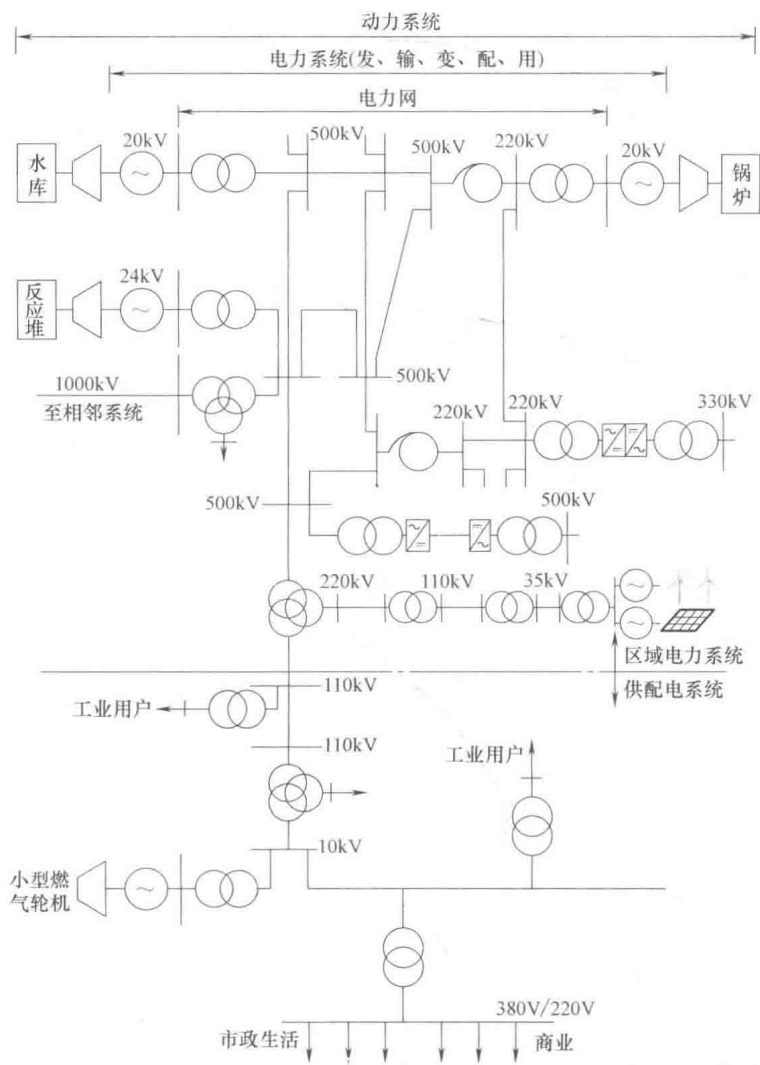


图 1-1 电力系统和电力网示意图

- 电力系统可以用一些基本参量进行描述，简述如下：
- 1) 总装机容量。电力系统的总装机容量指该系统中实际安装的发电机组额定有功功率的总和，标准单位有千瓦（kW）、兆瓦（MW）、吉瓦（GW）等，但通常也可以采用万千瓦、亿千瓦等。
 - 2) 年发电量。电力系统的年发电量指系统中所有机组全年发电量的总和，标准单位有千瓦时（kW·h）、兆瓦时（MW·h）、吉瓦时（GW·h）、太瓦时（TW·h），口语中常以度计，1度=1kW·h。

3) 最大负荷。最大负荷指规定时间(一天、一月或一年)内电力系统总有功功率负荷的最大值,单位有千瓦(kW)、兆瓦(MW)、吉瓦(GW),也可以采用万千瓦、亿千瓦等。

4) 年用电量。年用电量指接在系统上所有用户全年所用电能的总和。

5) 额定频率。按国家标准规定,我国所有交流电力系统的额定频率均为50Hz。国外电力系统额定频率有50Hz或60Hz两种。美国、加拿大、墨西哥、巴西和韩国等采用60Hz,日本则同时采用50Hz和60Hz。历史上曾出现频率为25Hz以水电为主的电力系统,现在已经被淘汰。

6) 电压等级。电压等级包括交流电力系统发展过程中制定的一系列额定电压,包括输电网额定电压和配电网额定电压。最高电压等级是反映电力系统建设和运行水平的重要参数。所谓最高电压等级,是指电力系统中最高电压等级电力线路的额定电压,以千伏(kV)计。2009年1月,我国国家电网投运了当时世界最高电压等级的1000kV输电工程。民用电压等级也是电力系统的一个重要基本参量。我国和大部分国家或地区的民用电压采用220V,美国、加拿大、日本、我国台湾采用110V,还有的国家或地区是两种兼有,如我国香港和古巴采用110V和220V、沙特和越南采用127V和220V、印度尼西亚采用127V和240V。

1.2 电力系统运行应满足的基本要求

1.2.1 电力系统运行的特点

电力系统运行的特点有:

- 1) 电与国民经济各个部分之间的关系都很密切。
- 2) 电力系统的各种暂态过程非常短促,当电力系统受到扰动后,由一种状态过渡到另一种运行状态的时间非常短。
- 3) 电能难以大量储存。即电能的生产、输送、分配及消费几乎是同时进行的,在任一时刻,发电机发出的电能等于负荷消费的电能(在发电机容量允许范围内)。
- 4) 对电能质量(电压和频率)的要求十分严格,偏离规定值过多时,将导致产生废品、损坏设备,甚至出现从局部范围到大面积停电。

由于以上特点,电力系统的运行必须安全、稳定、可靠。

1.2.2 电力系统运行的基本要求

根据电能生产、输送、消费的特殊性,对电力系统运行有如下三点基本要求:

1. 保证供电的可靠性

对用户供电的中断将会使生产停止,人民的生活秩序、生活质量受到影响,甚至会危及人身、设备的安全,造成严重后果。但是在某种特殊情况下,当电力系统无法满足全部负荷的需要时,应有选择性地保证重要用户的供电。根据供电可靠性分类,电力负荷分为三级。

(1) 一级负荷

对一级负荷中断供电,将可能造成生命危险、设备损坏、破坏生产过程、使大量产品报废,给国民经济造成重大损失,使市政生活发生混乱。

(2) 二级负荷

对二级负荷停止供电,将造成大量减产、交通停顿、使城镇居民生活受到影响等。

(3) 三级负荷

不属于一、二级负荷的其他负荷,如工厂的附属车间、小城镇、农村的非重要负荷等。

2. 保证良好的电能质量

电能质量包含电压质量、频率质量和波形质量三个方面。电压质量和频率质量一般都

以偏移是否超过给定值来衡量,我国规定,220V单相供电电压的允许偏移量是额定值的 $-10\%\sim+7\%$,额定频率是50Hz,允许的偏移量为 $\pm 0.2\sim\pm 0.5\text{Hz}$ 。波形质量则以畸变是否超过给定值来衡量,所谓畸变率(或正弦波形畸变率),是指各次谐波有效值二次方和的方均根值与基波有效值的百分比。给定的允许畸变率常因供电电压等级而异,例如,以380V、220V供电时为5%,以10kV供电时为4%等。所有这些质量指标,都必须采取一些手段予以保证。

对于电压和频率质量的保证,我国电力行业早有要求,并将其作为考核电力系统运行质量的重要内容之一。在当前条件下,为保证电能质量,需要增加系统电源的有功功率备用、动态无功功率,合理调配用电、节约用电,提高系统的自动化水平。保证波形质量,就是指限制系统中电流、电压的谐波,关键在于限制各种换流装置、电热炉、电力机车、空调等非线性负荷向系统注入的谐波电流,或改进换流装置的设计、装设滤波器、限制不符合要求的非线性负荷等的接入等。

3. 保证系统运行的经济性

电能的生产规模很大,消耗的一次能源在国民经济一次能源中的比重约为40%,并将不断增长,而且电能转换、输送、分配时的损耗绝对值也相当可观。因此,降低每生产 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 电能所消耗的能源和降低转换、输送、分配时的损耗,具有重要意义。煤耗率和线损率是考核电力系统运行经济性的重要指标,所谓煤耗率,是指煤生产 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 电能所消耗的标准煤重,以 $\text{g/kW}\cdot\text{h}$ 为单位,而标准煤则是含热量为 29.31MJ/kg 的煤。所谓线损率或网损率,是指电力网络中损耗的电能与向电力网络供应电能的百分比。

为保证系统运行的经济性,应开展系统经济运行工作,使各发电厂所承担的负荷合理分配,在保证安全、优质供电的前提下,将单一电力系统联合组成联合电力系统,可以提高供电可靠性,减少备用容量,可更合理地调配用电,降低联合系统的最大负荷,提高发电设备利用率,减小系统中发电设备的总容量,可更合理地利用系统中各种类型的发电厂,从而提高运行的经济型。同时,由于个别负荷在系统总负荷中所占比重的减小,其波动对系统电能质量的影响也将减小。

1.2.3 电力系统的负荷曲线

负荷曲线是电力系统中负荷随时间变化的曲线,按负荷性质可分为有功负荷曲线和无功负荷曲线,按时间可分为日负荷曲线、月负荷曲线、年负荷曲线等。负荷曲线是电力系统调度控制和规划设计的重要依据。电力系统的负荷涉及众多用户,负荷特性各异,不同用户的用电情况可以不同,且事先很难确知在什么时间、什么地点发生多大变化。因此,电力系统的负荷变化带有随机性。负荷曲线用于记录负荷随时间变化的情况,并据此研究负荷变化的规律。部分负荷曲线实例如图1-2所示。

根据全年的日负荷曲线可以得到以下信息:

1) 年最大负荷:全年中负荷最大的半小时的平均功率,因此年最大负荷也称为半小时最大负荷。

2) 平均负荷:电力负荷在一年或一段时间内平均消耗的功率,也就是电力负荷在某时间内消耗的电能除以时间的值。

3) 负荷系数:用电负荷的平均负荷与最大负荷的比值。

4) 年最大负荷利用小时数:一个假想的时间,在此时间内,电力负荷按年最大负荷持续运行所消耗的电能,恰好等于该电力负荷全年消耗的电能。计算公式:年最大负荷利用小时数=年用电量/年最大负荷。

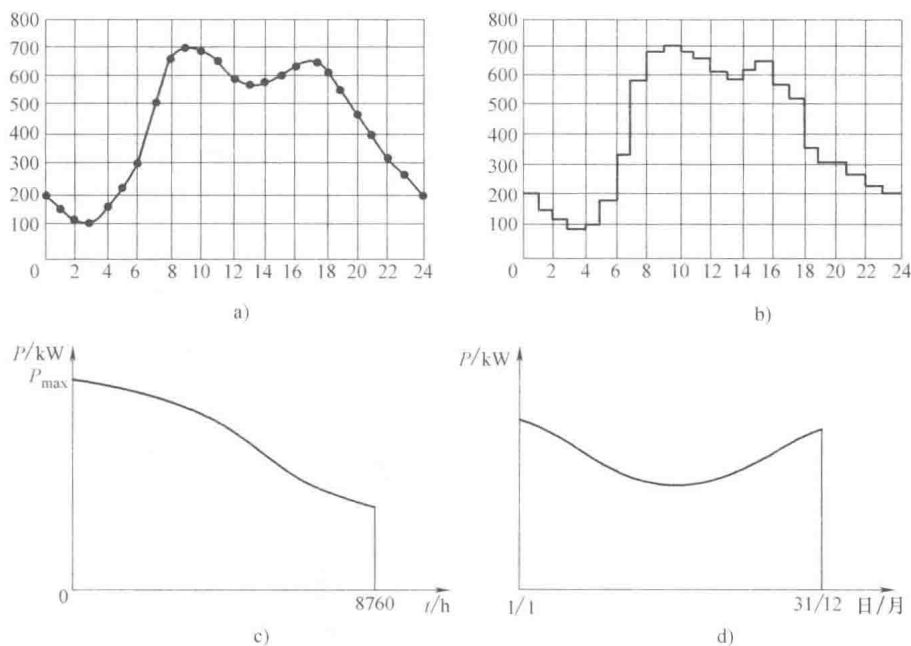


图 1-2 电力系统负荷曲线示意图

a) 折线形日负荷曲线 b) 阶梯形日负荷曲线 c) 年负荷持续时间曲线 d) 年每日最大负荷曲线

1.3 电力系统接线方式和电压等级

1.3.1 电力系统的接线方式

电力系统接线图是电力系统整体性质的图形表示，分为地理接线图与电气接线图。地理接线图是在地理图上布点布线，可与地理图较好地吻合，显示系统中发电厂、变电站的地理位置，电力线路的路径，以及它们之间的连接形式。因此，由地理接线图可获得对该系统的宏观印象。但是地理接线图的地理特性决定其不同区域天然具有不同的疏密程度，而实际上人们往往更关注电网的稠密部分；而且在地理接线图上难以表示主要发电机、变压器、线路等的联系，这时则需要阅读电气接线图。电气接线图一般表示为单线电气接线图，显示电力系统的各个能量变换元件、能量输送元件的连接，显示出组成电力系统主体设备（发电机、变压器、母线、断路器、电力线路等）的概貌。因此，由电气接线图可获得对该系统的更细致了解。实际应用时，一般将地理接线图与电气接线图相结合，可以了解整个系统中发电厂、变电站、电力线路、负荷等的相对位置及电气连接形式。图 1-3 是某电网的地理接线图。

电力系统的接线方式按供电可靠性分为有备用接线方式和无备用接线方式两种。无备用接线方式是指负荷只能从一条路径获得电能的接线方式，根据形状，可分为单回路放射式、干线式和链式网络，如图 1-4 所示。有备用接线方式是指负荷至少可以从两条路径获得电能的接线方式，可分为双回路的放射式、干线式、链式、环式和两端供电网络，如图 1-5 所示。

无备用接线的主要优点在于简单、经济、运行操作方便，主要缺点是供电可靠性差，并且在线路较长时，线路末端电压往往偏低，因此这种接线方式不适用于一级负荷占很大比重的场合。但在一级负荷的比重不大，并可为这些负荷单独设置备用电源时，仍可采用这种接线。这种接线方式之所以适用于二级负荷是由于架空电力线路已广泛采用自动重合闸装置，而自动重合闸的成功率相当高。

