



高等院校电气工程及其自动化专业系列精品教材

供 配 电 系 统

(第 二 版)

杨 岳 编著



科 学 出 版 社

高等院校电气工程及其自动化专业系列精品教材

供配电系统

(第二版)

杨 岳 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书按卓越工程师教育培养计划要求编写。全书系统地介绍了供配电系统的构成、分析计算和基本的工程设计方法,对运行管理也有所涉及。

本书以技术原理为基础,以供配电工程体系为构架,以供配电工程现状和最新的工程标准为依据选取和组织编写内容。全书共 11 章,第 1 章介绍电力系统和电力工程的背景知识,第 2 章介绍供配电系统的结构,第 3 章介绍与供配电工程密切相关的基本计算方法和基本元件模型,第 4~11 章对供配电系统分析与设计所涉及的主要问题逐一进行专项介绍,包括负荷计算、短路电流计算、故障保护、设备选择、电击防护、电能质量、过电压与雷电防护等内容。本书附录中收录了较多的工程数据,可供学生了解实例、完成作业使用,也可部分满足供配电系统课程设计与毕业设计的需要。

本书重视工程应用与基础理论之间的关系,围绕解决问题的过程强化工程训练。本书可作为电气工程及其自动化、自动化、建筑电气与智能化等专业本科学生的专业课教材,也可作为以上方向专业硕士和工程技术人员参考书,还可供注册电气工程师(供配电专业)考试复习与培训使用。

图书在版编目(CIP)数据

供配电系统/杨岳编著. —2版. —北京:科学出版社,2015.1

(高等院校电气工程及其自动化专业系列精品教材)

ISBN 978-7-03-043054-0

I. ①供… II. ①杨… III. ①供电系统-自动化技术-高等学校-教材②配电系统-自动化技术-高等学校-教材 IV. ①TM52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 012828 号

责任编辑:余 江 张丽花/责任校对:郭瑞芝

责任印制:霍 兵/封面设计:迷底书装

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>

保定市中西美凯印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年12月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015年1月第 二 版 印张:26

2015年1月第八次印刷 字数:616 000

定价:52.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书是在总结第一版使用情况的基础上,为适应教育部卓越工程师教育培养计划(以下简称卓越计划)要求而编写的。

卓越计划的要求之一是按通用和行业标准培养。就专业课程而言,主要涉及按行业标准培养的问题。行业标准既体现在工程规范、产品标准等技术文件中,也蕴涵在供配电工程实践活动中。本书以供配电工程体系为构架确定编写范围,以供配电系统工程设计为主线组织编写内容,以勘察设计行业对注册供配电工程师的要求为主要依据掌握编写深度,以期达到符合行业标准的目 的。

卓越计划的另一要求是注重工程实践和工程创新能力的培养。作者认为,这不是简单地多给学生提供实践机会就能解决的问题,课程教学根本的任务是为学生在实践中自主学习与拓展创新奠定意识、素质和能力基础。本书试图以解决问题的过程为着重点,通过问题剖析和案例数量的累积,从特殊到一般,渐次推进工程素养的基本训练。比如,详细介绍和讨论标么制规则体系的形成过程,展示目标、依据、方法、格式等工程规则体系要素的具体运用,而制定工程规则就是一种典型的工程实践创新活动;再如严格用电路分析的原理和方法展示对称分量法求取两相短路电流的过程,示范如何在工程实践中正确、有效地运用基础理论解决实际问题。本书较多地介绍与供配电系统相关的规范、标准,介绍技术原理与工程方法之间的异同,介绍产品性能对技术条件的拓展或约束,介绍工程问题的多因素关联性和解决方案的非唯一性特征等,强化工程意识的培养。本书习题除了基本练习以外,还有部分需要对结论进行技术分析并做出技术判断的题目,用以培养学生的主动思考习惯和责任意识。习题中还有部分拓展学习的建议,可指导学生自主学习。

全书共 11 章,基本涵盖现状供配电系统工程设计所涉及的主要内容,还部分涉及供配电系统运行管理的内容。书中附录收列了一些工程数据、产品样本和规范条文,可供学生了解实例、完成作业用。本书插图所用字母代码遵循最新的制图标准,但工程现状是老标准的文字符号还在广泛使用,新老标准交替会有一段过渡时期,因此特别提请读者多加留意。本书所涉及的工程标准涵盖面很广,既有制造业的产品标准,又有工程建设行业的设计施工及验收规范,还有营运行业的运行规程等;既有国内标准,又有 IEC 等国际标准。各标准对部分术语的定义和部分方法及数据的应用有所不同。为避免混乱,书中对一些典型的情况进行了注释或说明,也特别提请读者在阅读时不要混淆。

作者所从教的专业几年前已加入卓越计划,作者按卓越计划要求教授本门课程已历学生几届,因此本书既是对卓越计划培养方式的探索,也是若干年教学实践的阶段性小结,其间不断有学生、同事和同行对课程提出有益的意见和建议,在此表示感谢。本课程组的雍静老师多次参与本书编写大纲的讨论,并提出意见和建议,在此深表谢意。

本书适合电气工程及其自动化、自动化、建筑电气与智能化等专业的本科生使用,也可作为以上方向专业硕士的参考书,还可供相关专业的本科生及工程技术人员参考。

由于作者水平有限,书中疏漏之处在所难免,请读者和专家批评指正。

作 者

2014 年 9 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电能与电力系统	1
1.2 电力系统的表达	4
1.3 电力系统的标准电压	10
1.4 电力负荷	14
1.5 城市电网与供配电系统	17
思考与练习题	23
第 2 章 供配电系统的构成	24
2.1 供配电系统结构要素	24
2.2 变配电所电气主接线	27
2.3 供配电系统的网络接线	34
2.4 供配电设施之变配电所	37
2.5 供配电设施之电力线路	46
2.6 供配电系统接地与带电导体形式	50
2.7 等电位联结	58
思考与练习题	61
第 3 章 供配电系统计算基础	64
3.1 单相交流电路计算	64
3.2 三相交流电路计算	66
3.3 标幺制及标幺值电路	69
3.4 标幺制在供配电工程中的应用	72
3.5 变压器主要电气参数	77
3.6 交流异步电动机主要电气参数	83
3.7 电力线路电路模型与参数	85
思考与练习题	87
第 4 章 负荷计算	89
4.1 负荷调查与分析	89
4.2 负荷热效应与计算负荷概念	92
4.3 负荷计算	95
4.4 功率与电能损耗计算	100
4.5 无功功率补偿	102
4.6 负荷计算示例	106
思考与练习题	107

第5章 短路电流计算	109
5.1 短路概述	109
5.2 供电系统三相短路暂态过程	112
5.3 供电系统三相短路全电流特征分析	117
5.4 远端短路三相短路电流计算	122
5.5 不对称短路电流计算与对称分量法	128
5.6 不对称短路电流分析计算示例	133
思考与练习题	140
第6章 供电系统继电保护与自动装置	143
6.1 故障与保护	143
6.2 保护用继电器的保护特性	146
6.3 电流保护装置的接线方式与工作原理	153
6.4 线路相间短路的电流三段保护	158
6.5 线路异常运行状态保护	163
6.6 配电变压器保护	168
6.7 其他设备保护简介及保护整定计算示例	172
6.8 变配电所自动装置及其与保护的配合	176
思考与练习题	180
第7章 中高压系统主要配电设备及选择	182
7.1 短路电流的效应	182
7.2 电气设备选择的一般性问题	187
7.3 配电断路器选择	191
7.4 断路器的操作控制	196
7.5 熔断器及其选择	201
7.6 负荷开关-熔断器组合及其选择	205
7.7 互感器及其选择	211
思考与练习题	219
第8章 低压配电系统及设备选择	221
8.1 低压配电系统结构	221
8.2 低压系统短路电流计算	227
8.3 低压配电电器	232
8.4 低压配电线路的过电流保护	242
8.5 低压断路器过电流保护的级间配合	247
8.6 低压配电线路的接地故障保护	253
思考与练习题	260
第9章 电能质量及电力线缆与变压器选择	264
9.1 电能质量概述	264
9.2 线路和变压器电压损失计算	267
9.3 电压偏差及电压调整	270
9.4 谐波及其治理	273

9.5 变压器选择 278

9.6 电力线缆载流量 282

9.7 电力线缆选择 286

思考与练习题..... 290

第 10 章 供配电系统过电压防护 293

10.1 过电压与设备耐压..... 293

10.2 雷电与雷电参数..... 296

10.3 雷电能量在导体上的传输..... 301

10.4 避雷器..... 307

10.5 大气过电压防护..... 312

10.6 中、高压系统内部过电压示例..... 321

10.7 低压系统工频电压异常示例..... 328

10.8 过电压保护应用示例..... 334

思考与练习题..... 337

第 11 章 建筑物防雷、工程接地装置及低压系统电涌保护 339

11.1 建筑工程防雷体系及建筑物防雷类别..... 339

11.2 建筑物外部防雷系统..... 341

11.3 建筑物内部防雷系统及雷击电磁脉冲防护..... 350

11.4 工程接地装置..... 356

11.5 电涌..... 361

11.6 电涌保护器..... 366

11.7 低压系统电涌保护配置..... 369

11.8 电涌保护的级间配合..... 377

11.9 电涌保护与其他保护及系统接地形式的配合..... 378

思考与练习题..... 383

参考文献..... 387

附录..... 388

第 1 章 绪 论

1.1 电能与电力系统

1.1.1 电气工程

从 18 世纪后半叶卡文迪什和库仑的静电研究，到 19 世纪后半叶麦克斯韦电磁波理论的建立与验证，在一个多世纪的时间里，关于宏观电磁现象的物理学研究取得了巨大的成就。在此基础上，电磁现象的工程应用从 19 世纪中前期(大约为我国的鸦片战争时期)开始起步，并向两个主要的方向发展。其一是将电作为信息的载体进行信号传送，称为电信；其二是将电作为能源加以利用，称为电力。前者的典型代表有大家熟知的莫尔斯电报和贝尔电话等，后者则是以电解、电弧灯和电动机开始的。迄今，这两个方向都发展形成了各自庞大的工程体系，且“电信”已融入内涵更为丰富的“信息与通信”领域中，并成为其重要的组成部分；而“电力”的工程应用，则成就了今天所说的“电气工程”领域。

1.1.2 电力系统

1. 电力系统的任务

电力系统既是电气工程的基础，又是电气工程的重要组成部分，它产生于人们有控制地使用电能的需求。尽管现代电力系统庞大而复杂，但建立电力系统的初衷却很简单，就是希望以工业化的形式为用电设备提供电能。这一愿望简洁明了地揭示了电力系统的根本任务。

电力系统的任务，揭示了人们建造电力系统的动力，而电力系统最终以何种面目被建造出来，存在多种可能性。因此，不能满足于从电力系统的既有形式去理解电力系统，而应该更进一步探究电力系统为什么被构建成为现在这种形式，以及电力系统是否还可以有其他形式等问题。电力系统的任务是展开以上思考的最好切入点。

2. 电力系统的构成

电力系统由发电、输变电、变配电和用电等环节构成，它们分别完成电能的生产、传输、分配与消费等任务，如图 1-1 所示。工程上，又将电力系统中除去发电机和用电设备的部分称为电力网络，简称电网；将电力系统连同发电机的原动机系统(如汽轮机与锅炉及其控制系统)统称为动力系统，或称为广义电力系统。

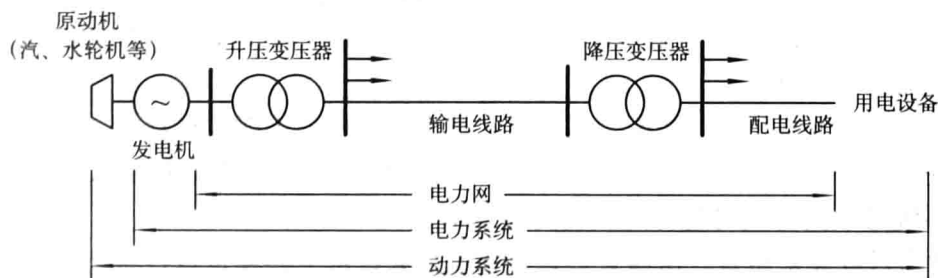


图 1-1 简单电力系统模型

以上结构是现状电力系统的主流形式，这里除了有历史沿革和相互借鉴等因素以外，主要原因还是在于这种结构具有充分的技术合理性，这些技术合理性主要源于以下事实。

(1) 自然界不存在足量的可被有控制地使用的原生电能，因此发电环节是必不可少的。

(2) 因地理条件、环保、安全等诸多原因，发电厂与用电负荷中心通常相距甚远，输电环节由此产生。

(3) 即使在城市、厂矿等负荷中心，负荷一般也是分布在不同地点的，且类别多样、数量庞大、权属又各有不同，无法将它们集中在一个地点使用电能，这就需要将电能向负荷进行分配。这表明了配电环节的必要性。

因此，不要认为电力系统天生如此——其实自然界原本并不存在电力系统。电力系统以这样的结构存在，是在实现有控制地使用电能这一目标的过程中，科学家和工程师不断实践的结果。随着科学技术的发展和社会环境的改变，电力系统的结构会否发生一些变化，我们既可拭目以待，更可投身其中。

3. 电力系统各环节的作用

(1) 发电。发电是电能生产环节，其作用是将其他形式的能转换成电能。这些其他形式的能主要有煤、油等矿物的化学能，水、风、潮汐等流体的机械能，地热资源中的热能，以及核能和太阳能等，这些能源均为自然界自身所蕴藏，称为一次能源，相应地将它们所生产出的电能称为二次能源。发电厂一般以其所使用的一次能源冠名，如燃煤火力发电厂、水力发电厂、核电厂等。

(2) 输变电。输变电是电能流通环节之一，其作用是将电能集中地从一处输送到另一处，一般来说传输的功率大、距离长。因长距离大功率输送电能所产生的损耗较大，一般需要使用比较高的电压，但发电机因制造和运行等方面的原因，输出电压不可能很高，因此必须在电源侧将电压升高再进行电能传输，这就使升压变电成为输电一个必不可少的环节，统称为输变电。

(3) 变配电。变配电是电能的另一个流通环节，其作用是在负荷侧将集中的电能分配给散布的用户。输变电环节传输来的电能电压一般较高，而用户由于安全等诸多方面的原因不能使用很高的电压，因此需要先将电压降低后再进行分配，故统称为变配电。

(4) 用电。用电是将电能转化为其他形式的能，如机械能、热能、光能、声能等。

4. 电力系统的运行特点

电能既是电力系统的产品，又是电力系统的消费品。与一般工业产品相比，它有其自身的特点，这些特点最终反映在对系统运行的要求上。

(1) 可靠性要求非常高。电能突出的优点使其成为大多数生产和生活活动中的首选能源，使用上的广泛性决定了它的基础性和重要性特征。电能供应的不足或中断，不仅会造成比较大的经济损失，还会产生诸多不便、混乱甚至严重事故和灾难。因此，电力系统的运行，需要很高的可靠性。

(2) 生产和消费需要实时平衡。以现有的技术，电能尚不能大量存储，因此需要生产与消费同时完成。但电能的消费是由庞大的用户群共同确定的，用电量的大小有一定的随机性，电力系统必须具有应对这种随机性的技术措施。

(3) 暂态过程非常短暂。所谓暂态，是指电力系统从一种稳定运行状态转变到另一种稳定运行状态之间的过渡过程，这种转变一般是由系统的扰动和故障产生的。电力系统对扰动和故障的响应若不及时，常常会产生比较严重的后果。因此电力系统需要有完善的自动控制

与保护手段。

5. 电力系统的联网运行

实际的电力系统，一般不只有一个电源，而是将分布在不同地点的多个电源组成网络，共同服务于所有用户，这就称为电力系统的联网运行。图 1-2 是联网运行的概念性示例。图 1-2(a)为处于不同区域的两个独立的简单电力系统，各自电源服务于各自负荷，电网间无电气联系，对发、用电不平衡及电网元件故障等问题无法相互支援；图 1-2(b)将两个电力系统在电源侧联网，联络线 W_0 在两个电源间形成了双向电能传输通道，可将电能两个电源间进行调度，以应对单个电源与负荷供需不平衡的情况，这条线有别于由电源向负荷供电的单向电能传输线路 W_a 和 W_b ；图 1-2(c)是在负荷侧联网，联络线 W_1 除了可以调度电源电能外，还可以在输电线路 W_a 、 W_b 其中一条故障时，将故障线路所带负荷转移到另一条线路传输，前提是线路传输容量充足。

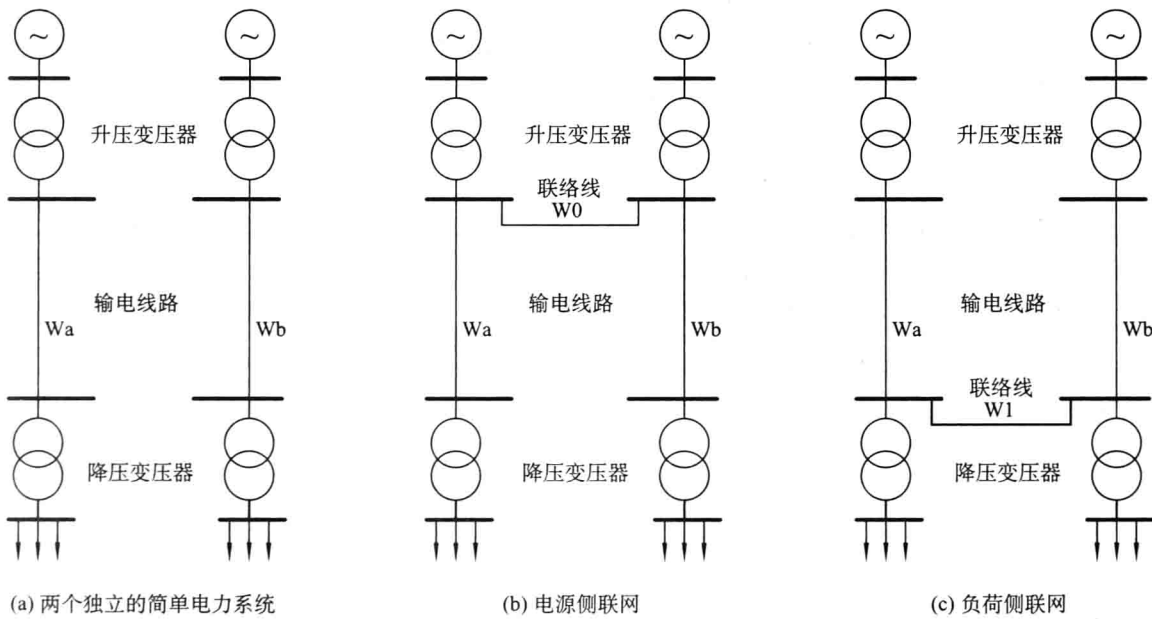


图 1-2 电力系统联网运行概念示意

实际电力系统联网远比上述示例庞大、复杂。联网运行的理论依据主要可以用两个数学定理来表述，这两个定理分别是大数定理和比例尺定理，它们主要表述的是资源效率与服务对象数量之间的关系，在此不进行详述。从工程的角度看，联网运行主要有以下好处。

(1) 提高电网和发电设备的利用率。用电负荷并不会一直维持在一个恒定量值，而是随时间变化的，其最大值(峰值)和最小值(谷值)之间有一定的落差，称为峰谷差。为了在峰值时满足供电需求，电网和发电设备必须具有不小于峰值负荷的容量，但这些容量在非峰值负荷期间就会出现闲置，使得设备利用率降低。联网运行相当于扩大了用户样本数量和分布区域，由于不同类别负荷(如生活照明负荷与生产动力负荷)峰、谷值出现时间不一致，不同地区间负荷峰、谷值出现的时间也可能有差异，使得总的负荷峰谷差趋于减小，有利于提高设备的利用率。

(2) 优化一次能源的利用。这一点主要体现在两方面。一方面，联网会使总的负荷量值增大，使得采用大容量发电机组成为可能，而大容量发电机组的效率一般要高于小容量机

组；另一方面，联网可合理调配可再生与不可再生能源，如可以充分利用季节优势，在丰水期多发廉价的水电，以减少煤、油等矿产的消耗。

(3) 提高供电可靠性。联网不仅使发电机的数量增加，而且使可供选择的供电路径增多，系统对个别发电机及电网元件故障的代偿能力因此提高，供电可靠性更有保障。

(4) 提高电能质量。联网使负荷波动相对减小，系统对局部故障的代偿能力增强，从而使电压波动、频率稳定性等电能质量指标得到提高。

当然，联网运行也并非百利无弊。大电网一旦发生稳定性故障导致系统崩溃，则会导致一个很大的区域、一个国家甚至若干个国家停电，产生严重的混乱，造成巨大的损失。这种事故在国外已多次发生，在我国也曾有发生。

1.1.3 电能的商品属性

电力系统中的电能，既是一种产品，又是一种商品，它也会经历一般商品生产、流通、交换与消费等各个环节。从商业的角度看，电力系统不过是一个为电能完成其商品活动所搭建的技术平台，电能的商品属性对这个平台的结构和运行管理等会产生多方面的影响，举例如下。

1. 基于商业属性的电网划分

从技术上看，电网是一个整体，完成将电能从发电机传输到用电设备的任务。但从营运的角度看，电力用户与供电企业各有其电网，它们在权属上是不同的。前者是需方，其电网一般称为用户电网或专用电网；后者是供方，其电网一般称为公共电网。公共电网上可供用户电网接入的位置称为电网的公共连接点，缩写为 PCC(Point of Common Coupling)点。在该点处，电能完成了其最末一个环节的商品交换行为。

2. 电能质量控制

无论产品还是商品，都存在着质量问题，商品的质量问题具有更广泛的社会属性。与其他商品质量相比，电能质量有两个重要特点：一个是电能质量对各行各业、千家万户具有基础性的影响力；另一个是电能质量不仅取决于生产者，也取决于消费者，与消费者的使用过程关系甚至更为密切。因此，对于电能质量的控制，需要以技术原理、法律、法规等为依据，技术、经济、管理等手段并用，供电企业和电力用户共同努力，才能收到好的效果。

3. 商业模式的影响

从电能供应方来看，从早期的厂网一家，到后来的厂网分离，再到正在酝酿中的输配分离，实际上是经营主体的商业角色在发生着变化。各经营主体之间及其与用户之间相互博弈，力图使自身利益最大化，营运策略会随着商业模式的变化而改变，这其中会深度涉及技术问题。例如，厂网分离后，电网对上网电厂的选择，会综合考虑发电量、上网电价、网络容量、损耗及可靠性等问题，而电厂也会根据电网的营运策略调整停机检修计划等。再如，如果实施电力用户直接向电厂购电的商业模式，则电网变成了交易的中介，其利润大小与电价的关联性弱化，而与电网损耗、电网建设及运行成本等关联性更大，这可能导致电网在规划设计、运行调度等方面的技术取向发生某些改变。

1.2 电力系统的表达

所谓表达研究对象，是指用约定的方式传达出关于对象的有用信息。如何对所研究的对

象进行表达,是几乎所有技术领域都会面临的一项基础性课题。对表达的基本要求是规范、简洁和高效。所谓规范,就是要遵守约定的表达规则;所谓简洁,就是要尽量减少无关的信息;所谓高效,就是要选择恰当的表达方式,如有选择地使用图形、语言、图表、模型、公式和数据等,使信息传达更具效率。

就电力系统而言,表达主要涉及两个方面的问题,一个是内容问题,另一个是手段问题。面对不同的技术任务,表达的内容和手段都可能会有所不同。从工程实践的一般情况看,电力系统需要表达的内容主要体现在系统结构和运行状态两个方面,表达的手段有很多种类,基本的要素为术语与符号。

1.2.1 结构描述

结构描述是对电力系统实体的静态表达,所要表达的信息,主要包括网络拓扑、设备与线缆(或统称网络元件)设置和结构参数三大类。网络拓扑表明了电力系统电能传输通道的构成,元件设置表明了网络拓扑的技术实现形式,结构参数则定量表明了系统各环节的技术属性。

1. 一次系统与二次系统

工程界习惯将电力系统划分为一次系统和二次系统两部分。电力系统中,电作为能源通过的部分称为一次系统,对一次系统进行测量、保护、监控的部分称为二次系统。一次系统主要由发电机、变压器、电力线缆及各种配电电器等构成。二次系统主要由二次电源、继电保护、测量监视、运行控制等部分构成。从控制工程的角度看,一次系统相当于受控对象,二次系统相当于控制环节,受控量主要有开关电器的开、闭等数字量和电压、功率、频率、发电机功率角等模拟量。

请注意不要将一、二次系统与变压器的一、二次侧系统的概念混淆。以下有关结构描述的问题,主要以一次系统为例,其结论也适用于二次系统。

2. 电气图

电力系统结构描述的最有效和最常见的方式是电气图,主要是电气制图中的简图(Diagram)。所谓简图,是指用图形符号、带注释的围框或简化外形表达系统中各组成部分之间相互关系及其联结的一种技术文件。简图不必表达实体的几何形状与空间位置,表达实体几何形状和空间位置的图在电气制图中称为图(Drawing)^①,如建筑平面图或设备机械结构图。有时需要综合运用简图和图来表达电力系统。为了方便,工程上也常将这种电气图称为简图。

表达一次系统最常用的简图为接线图,主要有电气接线图和位置接线图两种类型。

(1) 电气接线图。它属于按功能布局的简图,主要表明系统中设备与线路的电气关系,但并不考虑它们的实际位置和几何尺寸。电气接线图又有单线表示法和多线表示法两种常用形式。

电力系统是三相系统,每一环节都有若干导体或绕组等元件,将它们一一图示出来,就是多线表示法,又称多线接线图,如图 1-3(a)所示。如果更关心的是系统中各组成环节的相

^① 这句话中遇到一个同字异义的情况。前一个“图”指的是语言文字中用图示方式表达信息的一般含义,后一个“图”特指电气制图中一种图的类别,请注意根据语境进行辨析。详细请参见 GB/T 6988.1—2008《电气技术用文件的编制 第1部分:规则》。

互关系而不是细节的电路连接，则可以用一根线表示三相线路、用图形符号的单线形式表示系统中的设备或设施来绘制简图，就是单线表示法，又称单线接线图，如图 1-3(b)所示。

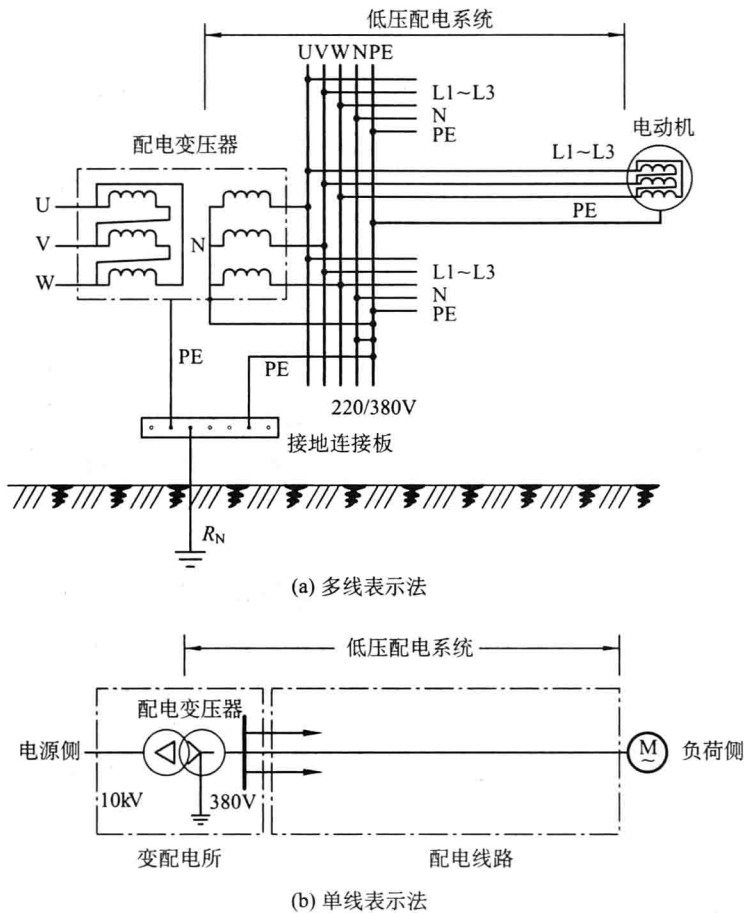


图 1-3 电气接线图

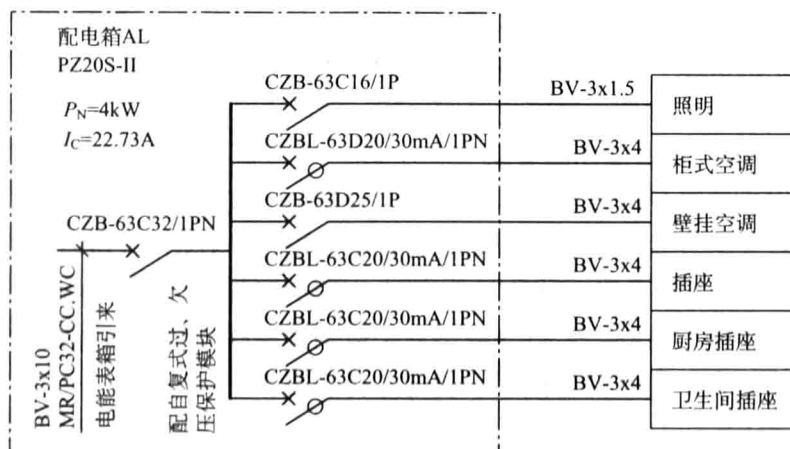
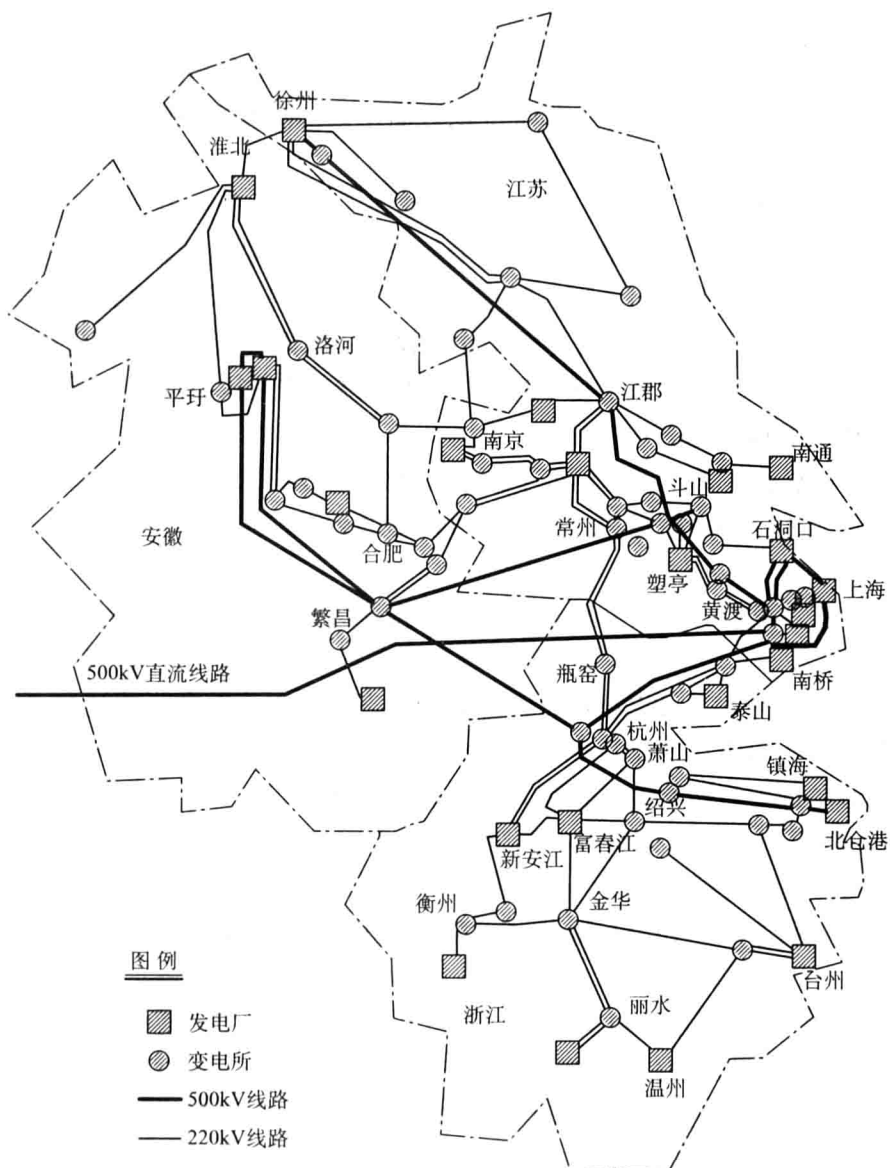
(2) 位置接线图。它属于按位置布局的简图，主要表明系统中设备、设施的位置和线路的敷设路径。图 1-4 所示为华东地区若干年前的输电网地理接线图，即为位置接线图的一个示例。位置接线图一般采用单线表示法。

电气接线图和位置接线图都有不同的表达层次。就电气接线图而言，它可以是一个大区域电网的网络接线图，也可以是一座变电所的电气主接线图，甚至可以是一只配电箱的系统图。就位置接线图而言，它可以是区域电网的地理接线图，也可以是一所大学的电气总平面图，或者建筑物一个房间的照明或动力配电平面图。

工程上又常将电气接线图称为系统图，位置接线图称为平面图。

3. 结构参数

结构参数是系统及其各环节技术属性的量化表达，主要可分为两类，一类是系统中各元件的电气参数，如额定电压、阻抗等；另一类是非电气参数，如体积、重量、尺寸、间距、位置坐标等。结构参数的表达有多种方式，最常见的是在接线图上用标注的方式来表达。图 1-5 所示是一只住宅配电箱的系统图，图中标注了配电箱和各开关的型号规格、各线路的用途、导线根数与型号规格等。



1.2.2 运行状态描述

运行状态描述是对电力系统工作情况的动态描述,可供表达的信息非常多,需要根据技术任务合理取舍。

1. 运行状态及其划分

由于各种变化和不可控因素的存在,电力系统不可能总是运行在设定的理想状态。根据系统偏离理想状态的程度及后果,可以对系统的运行状态进行如下分类。

(1) 正常运行状态。是指系统可持续工作,没有中断系统正常工作的迹象显现。应特别说明,正常运行状态并不表明系统处于理想的工作状态。例如,发电机轻载并不是最理想的状况,但属于正常运行状态。

(2) 异常运行状态。是指系统偏离了设定的状态,已经有中断系统工作或损坏系统的迹象出现,但还不至于立刻产生后果,系统仍可以继续运行一段时间,如过载、小接地系统单相接地等。

(3) 故障状态。是指出现如果不采取措施,系统就会立刻损坏或发生工作中断的事件,如短路、断线等。

根据状态的持续性,又可以将运行状态分为稳态和暂态两大类。请注意,稳态不一定是正常运行状态,暂态也不一定是故障状态。例如,系统过载运行就是一种稳态,而发电机功率角或励磁电流的调整虽然是暂态过程,但仍属正常运行。

2. 运行参数

1) 本构参数与运行参数

本构参数与运行参数是相互对应的两类参数,正确理解这两类参数,对于本课程的学习是很重要的。

所谓本构参数^①,是指由对象的结构、材料、尺寸、制造工艺等所决定的反映对象自身特性的参数。前面介绍的电力系统的结构参数,实际上就是一系列元件本构参数的集合。

所谓运行参数,是指对象在工作时某些物理量的实际量值。这些量值关联着对象的工作状态。

本构参数与运行参数即使是同一个物理量,也具有不同的含义。例如,电动机的额定功率是一个本构参数,它是指设定的电动机的最佳输出机械功率,通过正确的设计制造,这一参数成为电动机本身的特性;而电动机工作时实际的输出功率,是电动机的一个运行参数,这一参数主要由电动机所拖动的机械负载而非电动机自身决定。一般来说,本构参数和运行参数之间会有一定的关系,这种关系一般表现为要求运行参数尽可能趋近本构参数,或者要求将运行参数控制在本构参数所确定的范围之内。

2) 运行参数与运行状态描述的关系

运行参数可以准确地反映系统的运行状态。长期的工程实践发现,运行状态的变化,一定伴随着某些运行参数在量值、特征或相互关系上的变化。找出运行状态与运行参数之间的对应关系,有时是很容易的,有时却是一项非常困难的工作,但这种困难正好给电气工程师提供了技术发挥的空间。另外,运行参数不只是被动地反映系统的运行状态,通过对某些运行参数的调节,可以在一定程度上控制系统的运行状态。

^① 力学中也有本构参数一词,用于研究应力与应变之间的关系。本书取本构参数的广义含义,请不要与力学中的同一词汇混淆。

3. 常用的运行状态显示方式

在发电厂、变电所及电网调度所的中央控制室中，都有模拟屏或信息终端显示器。这些设备会全面地记录并有选择地显示系统的实时运行状态。在发电厂和变电所的主要一次设备处，一般还有单台设备的就地状态显示，如开关的闭合与断开、线路电流大小、母线电压高低等。就状态显示的具体方式而言，主要有以下几种。

(1) 语言文字。主要描述系统或设备的总体状态，如正常运行、故障停机、计划检修等，多用于运行管理。

(2) 特征参数。精确描述系统或设备的运行情况，如负荷曲线、变压器负载率、功率因数、发电机转速等，主要用于运行控制和调度。

(3) 声光信号。直观提示运行状态，或提出警示、报警。例如，用红、绿灯光表示停止和运行，用声光报警提示设备故障等。声光信号主要用于状态和事件提醒。

1.2.3 术语与符号

就电气技术文件和专业出版物而言，在表达手段上，用得最多的是语言表达、图形表达、公式表达和图表表达。在这几种表达方式中，术语和符号是表达的基本要素。

1. 术语

术语是用来表达系统或其组成类别、特征、工作状态等的技术词汇。有些术语由相关标准或规范给予了严格定义，有些则是工程界约定俗成的。对于前者，在使用时要准确理解其内涵与外延，而对于后者，有时会有模糊的边界，在理解上更应仔细甄别它出现在某一处时的准确含义。例如，“负载”一词，它既可能指具体的用电设备，也可能指用电功率，还可能指的是设备阻抗，这就需要根据实际情况来判别其真实含义。

2. 图用符号

用电气图来描述电力系统时会用到图用图形符号和标识代号(旧称图用文字符号)，图用图形符号用于构成电气简图中的图示部分，标识代号除用于电气简图的标注外，还可用于其他电气技术文件的编制。图用图形符号和标识代号可以看成特定工程语言的词汇。图形符号以图形为主要形式，表达一定事物或概念；标识代号以西文字符及其组合为主要形式，用于标志、识别特定事物或概念。

这里要特别说明一下有关相序的表示。我国电工界长期习惯用 A、B、C 表示三相系统的相序，但国家标准 GB/T 4728《电气简图用图形符号》第 11 部分中规定：交流系统电源第 1、2、3 相分别用 L1、L2、L3 表示，交流系统设备端第 1、2、3 相分别用 U、V、W 表示。该标准发布于 1985 年并已多次更新，全面贯标也逾 20 年，因此本书采用国标表示方法，并且在不特指是电源还是设备端时，统一用 U、V、W 或 1、2、3 表示相序。

3. 参量符号及下标

当用公式或图表来表达参量之间的关系时，会用到参量的符号表示。参量一般均采用西文字符表示，并遵守国家标准或业界习惯。这里特别说明一下本书对下标的使用方法。下标一般表示参量的属性或所指的对象，例如， U 表示电压，加上下标“r”， U_r 就表示“额定”电压，这里下标“r”表示了电压 U 的属性。如果还要表明这是特指电动机 M1 和 M2 的额定电压，则可分别用 $U_{r, M1}$ 和 $U_{r, M2}$ 表示，下标“M1”、“M2”表明了 U_r 所指的对象。

这里约定，当有多个下标时，总是表示属性的下标在前，表示对象的下标在后，容易混淆时，中间用“·”隔开。

1.2.4 电气工程技术表达的相关标准简述

技术表达既是某个工程领域的基础,其本身又是一个庞大而复杂的专业领域,有其自身的原理和规则,并形成一个专门的体系。就电力系统的表达而言,这个体系主要涉及若干标准,这些标准规定了电力系统技术表达的语言和语法,必须遵守。虽不要求读者全面掌握这些标准,但作为一项基础性的工程训练,读者应该对工程标准问题有所了解,并熟悉这些标准中与本课程相关的最主要内容。

1. 电气制图标准

电气制图国家标准分为符号与代号、文件编制、文件集规则、数据结构等几个大的部分,是一个庞大的标准体系。与本课程密切相关的主要有四部标准,其中的 GB/T 6988《电气技术用文件的编制》和 GB/T 4728《电气简图用图形符号》两部标准发布于 20 世纪 80 年代中期,并于 90 年代推进贯标,之后不断推出更新版本。这两部标准等同或等效采用国际电工委员会(IEC)的有关标准,使我国在电气制图领域的工程语言及规则得到统一,并与国际上电气制图领域通用的工程语言和规则协调一致,但与我国之前的传统习惯差异较大,以至于到现在还常有贯标不到位的情况出现。

第三部标准曾经是与以上两部标准密切相关的另一部国家标准 GB/T 7159—87《电气技术中的文字符号制定通则》,该标准以国际通用西文字符作为字母代码,完全不同于以前以汉语拼音缩写作为字母代码的做法,并引入了项目代号的概念和规则,与传统习惯差异很大,贯标工作一度较为困难。当贯标工作艰难地有所成效时,该标准于 2004 年被宣布废止,其内容由 2002 年开始陆续发布的 GB/T 5094《工业系统、装置与设备以及工业产品结构原则与参照代号》和 GB/T 20939—2007《技术产品及技术产品文件结构原则 字母代码 按项目用途和任务划分的主类和子类》替代。新标准中,“项目代号”改变为“参照代号”,字母代码(分为单字母主类代码和细化的双字母子类代码)范围从电气工程扩展到一切工业领域。本书标识代号中的字母代码执行新的国家标准。从工程现状来看,很多实际使用的技术文件仍是按 GB/T 7159—87 执行的,这是标准转换期常会遇到的情况,读者应学会主动适应并正确对待这种情况。

第四部标准 GB/T 18135《电气工程 CAD 制图规则》是为适应计算机制图广泛应用的状态制定的,该标准于 2000 年发布,并陆续更新。

2. 参量与参量符号标准

与参量和参量符号相关的国家标准主要为 GB 3100—1993《国际单位制及其应用》和 GB 3101—1993《有关量、单位和符号的一般原则》,这两部标准是各技术领域的通用标准,也适用于电气工程领域。

1.3 电力系统的标准电压

基于工程体系配套等原因,电力系统生产出的电能必须满足一定的标准,将这些标准称为电能的规格。电气设备均应按电能的规格设计制造,而电力系统也应时刻将其生产的电能维持在设定的规格范围内。由于发电设备具有电压源属性,电能的规格一般用电压这一电气参量表征,它主要包括以下几个方面。

(1) 电压波形。通常只有两种——直流和正弦交流,尤以正弦交流应用最为广泛,直流