



21 世纪大学新型参考教材系列

电力系统工程学

〔日〕 大久保仁 编著

Inter
University



科学出版社

OHM 社

00129417



21 世纪大学新型参考教材系列

电力系统工程学

〔日〕大久保仁 编著
提兆旭 译
程浩忠 校



科学出版社

OHM 社

2001. 北京



北航 C0547804

FR04/07

图字:01-2000-4326 号

Original Japanese edition

Interuniversity Denryoku System Kougaku

by Hitoshi Okubo et al.

Copyright © 1998 by Hitoshi Okubo

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese language edition is co-published by Ohmsha, Ltd. and Science Press.

Copyright © 2001

All rights reserved.

本书中文版权为科学出版社和 OHM 社所共有

インターユニバーシティ

電力システム工学

大久保仁 オーム社 1998

图书在版编目(CIP)数据

电力系统工程学/[日]大久保仁编著;提兆旭译. - 北京:科学出版社,2001.5
(21 世纪大学新型参考教材系列)

ISBN 7-03-009193-0

I. 电… II. ①大… ②提… III. 电力系统-系统工程-高等学校-教材
IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 05550 号

北京东方科龙电脑图文制作有限公司 制作

科学出版社 OHM 社 出版

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2001 年 5 月第 一 版 开本: A5(890×1240)

2001 年 5 月第一次印刷 印张: 4 3/4

印数: 1—4 000 字数: 137000

定 价: 12.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前言

在我们的日常生活中,家电是司空见惯的,照明、冷暖空调,还有看电视、听音乐,用电饭锅烧饭以及电冰箱、洗衣机等。此外,工厂的生产设备,以及车间里的计算机、复印机等都要用电。还有电车、电话也用电,就连银行、医院、学校等也离不开电。由此可见,电已经成为支撑现代社会的基础,将来的作用将日益增大。

既然电能作为基础支撑着整个社会的活动,那么把它送到用户的电力系统又是如何构成、如何控制和运行的呢?

电从发生,经过输电、变电、配电才送到用户,这就构成了电力系统。电力系统工程学就是为深刻地理解电力系统,从设备、机器等硬件以及运行、控制这些设备的软件两个方面及其展望未来发展的科学。不仅如此,有关电力系统的这些学问就在于是“工程学”,不仅要理解这些基本原理,而且要根据这些原理加以实际应用。对有关的许多问题进行了讨论,工程学上的现象进行分析和技术开发并能用于现代社会。

因此,我们希望从这些学问中,学到的不仅仅是作为基本原理的电学理论在数学上的解析,而且更要侧重于学习与社会紧密相连的“工程学”方面的知识。随着对本书深入地学习,就会找到一些和现实社会实际相连的结合点。电力系统工程学是实现现代社会重要的学问之一。本书作为入门教科书,由各个分支专业的大学教师,从各自专业的立场出发,通俗易懂地介绍各章的要点。通过学习本书,希望读者在理解基本原理的基础之上,也能学习到一些新技术的开发现状。

此外,上述设备、机器等硬件方面和运行、控制软件方面,是通过“系统”紧密联系起来的,两者不协调的话是不可能实际运行的,理解硬件必须理解软件,这是不可缺的,相反也是一样。从这个意义上说,希望初学者先从学习基础理论开始,然后再进入到与电力系统工程学有关范围广泛的专业知识中。在这个意义上,该书包含了“系统”二字。

电力系统是人类创造的最大而且是最有用的系统。本书期待着初学电

力系统的各位带着更强烈的愿望,使电力系统在将来能得到更大的发展。

最后,向给予本书出版、策划、执笔机会的家田正之编辑委员长,绳田正人编辑干事致以深深的谢意。

大久保仁

电气能源基础
等离子体电子工程学
电力系统工程学
电气电子材料
高电压/绝缘工程学
电动机器
电力电子学

电气能源

公共基础

电磁学A
电磁学B
电气电路A
电气电路B
电子电路A
电子电路B
电气数学
信息数学
程序设计

信息通信

逻辑电路与自动机械
计算机工程学
程序语言设计
信息传送和符号的理论
信息通信工程学
信息网络

测量 · 控制

系统与amp;控制
信号分析
传感测量
柔性信息处理
机器人控制

为了适应21世纪的要求

面向21世纪,日本各大学进行了系与学科的改编、研究生院的调整、导入两期制等。伴随着这些调整,现有的教材显得不适应现代学生的水平和兴趣要求。因此就要求有一套从版面到内容都更新颖的教科书。

本系列正是考虑到这种新的要求,经过不断深入考察和讨论,按照全新的整体编排形式制作完成的新型教材。曾荣获第七届日本工科教育协会奖「业绩奖」。

21世纪大学新型参考教材系列 编辑委员会

主任委员: 家田正之 (爱知工业大学)
编 委: 稻垣康善 (名古屋大学)
白井支朗 (丰桥技术科学大学)
梅野正义 (名古屋工业大学)
大熊 繁 (名古屋大学)
绳田正人 (名城大学)

电子器件

电子物性
半导体工程学
电子器件
集成电路A
集成电路B
光电子学

目 录

1 电力系统工程学的学习方法

1.1 什么是电力系统工程学	2
1.2 电力系统是如何构成的	3
1.3 电是如何输送的	8
1.4 电力输送中电压与输送容量的关系	12
练 习 题	13

2 电力输送设备如何工作

2.1 用架空线输送电力	16
2.2 用地下电缆输送电力	20
2.3 变电站的功能和构成	21
2.4 现代变电站的设备	25
2.5 用户的配电方式	26
练 习 题	30

3 掌握输电线路的电气特性

3.1 输电线路的等效电路	32
3.2 线路参数的计算方法	33
3.3 什么是功率圆图	34
3.4 理解输电特性	38
3.5 功率潮流计算	41
练 习 题	46

4 理解电力系统的运行

4.1 电力系统是如何运行的	48
----------------------	----

4.2	为什么要进行频率控制	50
4.3	电压控制的原理	55
4.4	电力系统经济运行	59
	练 习 题	62
 5 电力系统中发生的异常电压		
5.1	过电压的种类有哪些	64
5.2	什么是交流过电压	65
5.3	什么是操作过电压	68
5.4	什么是雷过电压	71
5.5	什么是直流过电压	76
5.6	什么是绝缘配合	77
	练 习 题	78
 6 学习电力系统故障的计算方法		
6.1	故障种类	80
6.2	计算故障的方法	80
6.3	简单的故障计算	82
6.4	什么是对称分量法	83
6.5	输电线故障的计算方法	88
6.6	中性点接地方式	92
	练 习 题	94
 7 电力系统的稳定性		
7.1	稳定性的定义	96
7.2	稳定性的分类	96
7.3	什么是静态稳定性	97
7.4	什么是暂态稳定性	99
7.5	提高稳定性的方法	104
7.6	什么是电压不稳定现象	107
	练 习 题	109

8 关于直流输电

8.1 交流输电系统和直流输电系统的不同	112
8.2 直流输电系统是如何构成的	113
8.3 变流器是如何工作的	117
8.4 直流功率的控制方法	119
8.5 直流系统的保护和直流断路器原理	121
练 习 题	124

练习题解答	127
参考文献	135

篇外话

输电的黎明期	7
电压和频率的变化	12
鸟害对策	20
标么值法(p. u. 法)	44
调度指令系统	60
系统中发生的过电压波形和试验电压波形的关系	67
对称分量阻抗实例	89
快速重合闸装置	92
与稳定性有关的控制系统:调速器和自动励磁调节器(AVR)	107
同步发电机的电抗	109
换流失败	119

电力系统工程学的 学习方法

因为电能是不能储存的,所以为了取得用电和供电的平衡,对功率潮流进行控制,在日本全国建设了输送电功率的输配变电网,这就叫电力系统。让我们来弄懂电力系统的构成及运行原理,学习能适应社会用电的电力控制技术吧。

1.1 什么是电力系统工程

现代社会离不开电。在日本电能占一次能源供给的比率叫用电率,大约为 40%,在可以预见的将来将达 50%。图 1.1 中画出了用电率随着年代

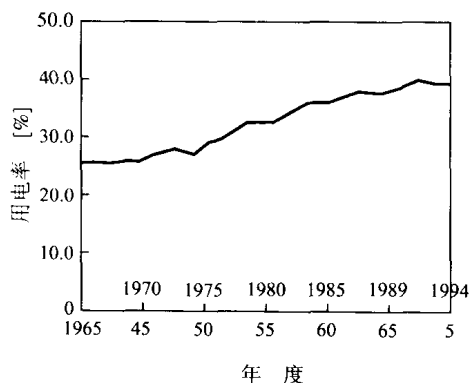


图 1.1 日本的用电率

增长的变化情况。正如图中所示,各个家庭和产业及社会的用电量,年年增长,年用电量如图 1.2 所示,日本全国大约 8000 亿 kWh,提供这些电能的发电机容量最大大约为 17 000 万 kW。由此可以推测,电力负荷每年将以 2% ~ 3% 的速度增长。

因为电是不能储存的,所以为了达到对增长负荷的供电平衡及控制功率的潮流,提高供电可靠性,在

全国范围内建立了连接发电厂到用户的输配电网,这就叫电力系统 (electric power system)。电力系统作为支撑现代社会的基础,具有举足轻重的作用。

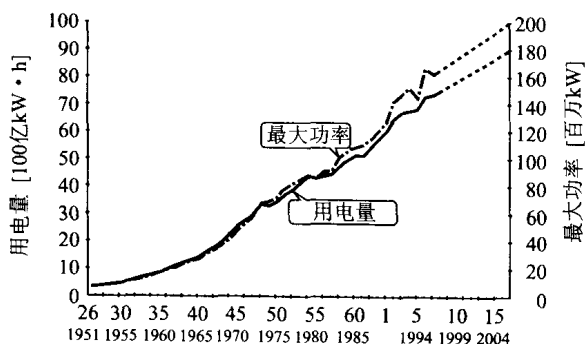


图 1.2 电力负荷的增长

电力系统是由水力、火力发电厂(power station);输送功率用的输电线(transmission line);转换电压、电流进行线路投切、保护的变电站(substation);配电所(switching station);将电力分配到用户的配电网(distribution network)构成的(图 1.3)。也就是说,电力系统是由发电机(generator)、变压器(transformer)、开关装置(switcher)、断路器(circuit breaker)等电力设备和架空线(overhead transmission line)、电缆(cable)等输电线及附属的各种电压电流测量仪器(measuring device)、保护设备(protective device)和控制整个系统的控制系统(control system)构成的。电力系统的主要作用是高可靠性地控制系统,提供高质量的电能,但是在发生事故和异常时,能迅速地进行保护切换和控制,也是它的重要职责。

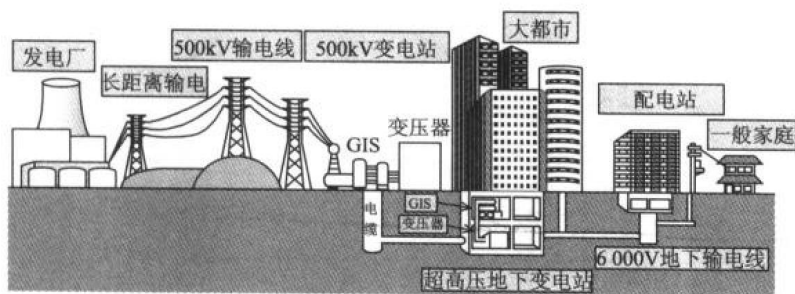


图 1.3 构成电力系统的要素

电力系统工程学就是为了理解电力系统的构成及运行原理,作为工程学,它是学习适应社会变化、对电力供给进行控制的一门学问。下面特别就日本电力供应主干的大容量高电压输电系统的各种技术状况进行介绍,其次就电力系统的未来展望进行讨论。

1.2 电力系统是如何构成的

正如图 1.2 所示,从 1952 年到 1997 年的 45 年间,日本的电力负荷增加了大约 27 倍。如果要表示日本一天平均的电量使用状况的话,其历年变

化情况如图 1.4 所示。由图可见,社会活动频繁的白天和夜间的用电之比,近年来日益扩大。如果按月份来看就如图 1.5 所示。从这些图可以看出,因为电不能储存,所以对应图 1.4、1.5 上所示时间的负荷功率,就可以求出稳定的发电量。这就是电力系统必要性的道理。日本电力系统的特点是由日本所处的地理位置和社会状况所决定的,这就是

- ① 大容量高密度的系统。
- ② 高电压的输电系统。
- ③ 远离电源的系统。

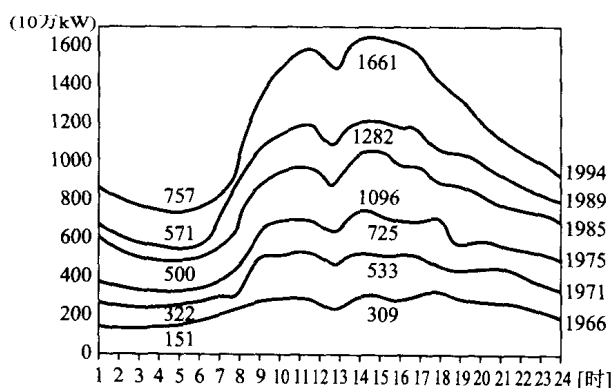


图 1.4 一天的用电变化(日负荷曲线)

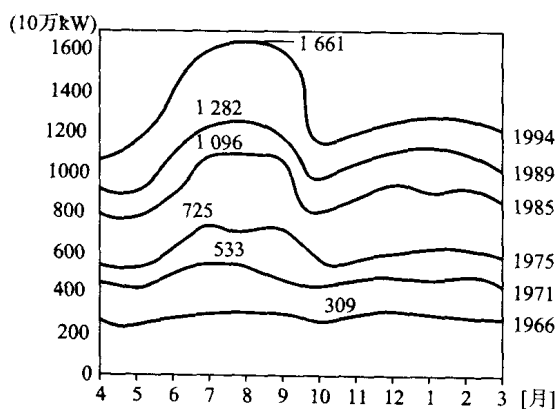


图 1.5 一年的用电变化(年负荷曲线)

即除了高电压大容量长距离输配电是系统的主要特征之外,还有

④ 由于历史的原因,如图 1.6 所示,在狭窄的国土上有两种频率,日本东部是交流 50Hz,日本西部是 60Hz。因此,需要在两频率之间采用直流变换,安装频率变换设备。

此外,在系统运行上还有

- ① 向山丘地带送电雷害多。
- ② 地震多发国家,需要耐震设计。
- ③ 四周环海受台风影响,需要采取措施防止盐害等。

力求在日本特有的条件下稳定地供给电力。因此,在众多条件下,稳定、安全地提供电力的诸多技术是最重要的。其次,伴随着高密度负荷和大容量电能输送,与种种电磁干扰和环境等有关的问题也必须加以解决。但是,由于近年来技术的发展,电力系统和电力设备的设计、运行及制造技术也在进步,如图 1.7 所示,从世界范围看,日本的供电可靠性也是最高水平。

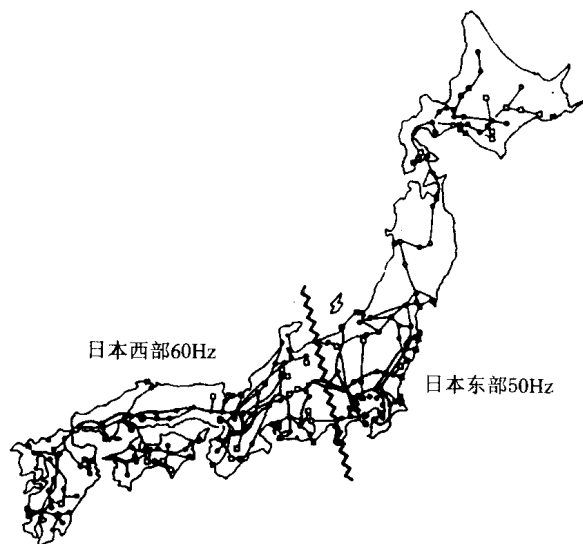


图 1.6 日本的电力系统和交流频率

图 1.3 是电力系统的构成,从系统构成上分类,如图 1.8 所示,整个日本如图 1.6 所示。从北海道到九州、冲绳共有九个电力公司,各个系统联系

在一起共同供电。具体可以从图 1.9 所示的大都市圈来看就会明白。远离城市的火力、核能和水力发电厂的电源,以放射型送到城市的近郊,通过环城四周的 500kV 超高压输电线,又叫外环线,将超高压电能向城市中心供电。通常城市内用地下电缆供电。最近,变电站的地下化也有增加的趋势。在东京圈内,为了向将来的都市中心提供大容量电能,在世界上首次建设了 500kV 的地下变电站。图 1.9 是大城市圈周边的电力系统。

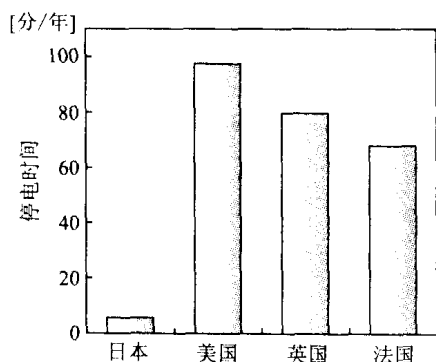


图 1.7 各国的年事故停电时间

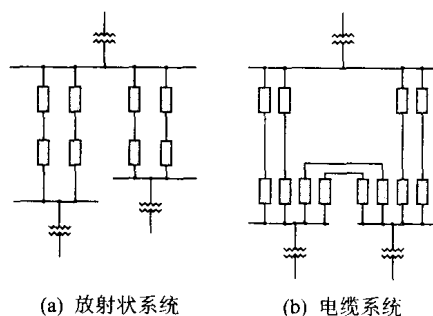


图 1.8 电力系统构成例子

另一方面,为了使处理这样庞大电量的电力系统合理地发挥其功能,仅仅以各个构成要素为对象的运行还是不够的,要以整个系统为对象进行综合运行。

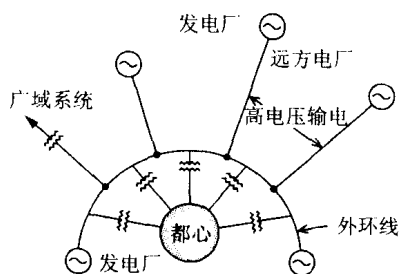


图 1.9 大城市圈周边的电力系统

整个系统运行根据星期、时间和天气、温度等,对应时时刻刻变化的电力需求,进行供电平衡和供需调整的操作,为此要有系统操作控制及事故时的处理。其次,从系统稳定运行和频率、电压调节的必要性,还要对发电机进行调节及对系统进行切换等。最后,还要维护系统,解决由于打雷等自然现象引起的事故和系统不稳定、电压下降等问题而采取的继电保护技术。本书在以下各

章节中,就上述内容按顺序加以介绍。

近来,正考虑将系统总体的综合运行扩大到更广泛的地域,进行广域运

行,达到更经济合理的综合性运行。特别是负荷频率控制等的自动化及各种预测、监视、预先仿真和恢复供电支援系统等,还有配电自动化系统等,都采用计算机技术。图 1.10 是电力公司的调度指令控制室中控制盘的样子,图中是 275kV 和 500kV 电力系统进行综合运行控制的情况。

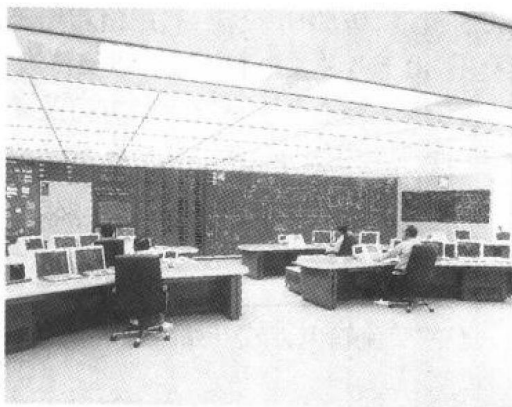


图 1.10 电力调度控制室

(日本中部电力中央调度所。照片提供:日本中部电力股份公司)

输电的黎明期

明治 12 年(1879 年)爱迪生发明了用碳素灯丝制成灯泡且使用化后,明治 15 年(1882 年)爱迪生灯泡出现在纽约帕尔大街上,以 100V 的直流三线式供电,在世界上还是第一次。日本最早是在明治 20 年(1887 年)在东京以直流 200V 的电压三线式的架空导线供电照明。但是真正高电压送电是在明治 32 年间(1899 年),由广岛水力电厂到 9km 的吴村和到 26km 的广岛的 11kV 三相交流电开始的,在同年还有福岛县郡山绢系的昭上发电厂到郡山的 11kV22km 的供电。

其后就是高电压化,在明治 40 年间(1907 年),东京电灯公司从山梨县到东京建设了 76km55kV 双回路三相交流系统,大正 3 年(1914 年)猪苗代水力电气公司,建设了从猪苗代发电厂(输出为 37 500kW)东京田端变电所共 228km,115kV 双回路三相三线交流系统,以后的高电压化发展如图 1.15 所示。现在,275kV,500kV 的输电系统遍布日本全国,可以预见,21 世纪 1000kV 输电系统将会实现。