

OHM

大学参考教材系列

输配电工程

〔日〕关根泰次 主编 河野照哉 丰田淳一 著
川濑太郎 松浦虔士
秦晓平 聂凤仁 王克成 译
聂凤仁 校



科学出版社

www.sciencep.com

OHM 大学参考教材系列

输配电工程

〔日〕关根泰次	主编	河野照哉	丰田淳一	著	
		川濑太郎	松浦虔士		
		秦晓平	聂凤仁	王克成	译
			聂凤仁	校	

科学出版社

北 京

图字:01-2003-3491 号

Original Japanese language edition

Daigaku Katei Souhaiden Kougaku Kaitei 2 Han

Edited by Yasuji Sekine

Written by Teruya Kouno, Junichi Toyoda, Tarou Kawase and Kenji Matsuura

Copyright © 1989 by Yasuji Sekine

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese version published by Science Press, Beijing

Under license from Ohmsha, Ltd.

Copyright © 2003

All rights reserved

大学課程

送配電工学 改訂2版

関根泰次 オーム社 2002

图书在版编目(CIP)数据

输配电工程/(日)关根泰次主编;秦晓平等译;聂凤仁校. —北京:科学出版社, 2004

(OHM 大学参考教材系列)

ISBN 7-03-012078-7

I. 输… II. ①关…②秦…③聂… III. ①输电-电力工程-高等学校-教材
②配电系统-电力工程-高等学校-教材 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 079089 号

责任编辑 崔炳哲 **责任制作** 魏 谨

责任印制 刘士平 **封面设计** 李 力

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>

源海印刷有限责任公司 印刷

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社发行 各地新华书店经销

2004年1月第 一 版 开本: A5(890×1240)

2004年1月第一次印刷 印张: 8 1/4

印数: 1 5 000 字数: 215 000

定 价: 20.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

本书是以大学工科类电气工程专业的学生为对象,按每周 2 学时授课目标所编撰的教科书。

在日本关于输配电工程的教科书,迄今为止已出版 100 多种,其中不乏名著。由此也可以看出,包括输配电工程在内的电工学所涉及的领域是非常广泛的。最近在工程技术进步、经济规模扩大的背景下,输配电工程各分支领域的技术也在飞速发展。

本书的第一版是在大约 20 年前,以已故的东京大学藤高周平教授收集归纳的素材为中心,并按照他的宗旨,北起仙台、西至姬路的日本诸多大学的教授集体编撰的,因而具有鲜明的特色。

在本书第二版的修订中,吸取了后来技术进步的成果,并考虑到时代变革的因素,对第一版的内容进行了大胆的筛选取舍。但是,第二版中仍然保留了第一版的特点——由各个专业领域的专家分别执笔撰写自己擅长的课题,既要保证内容深刻,又要努力做到易于理解。

本书以阐述基本原理为重点,同时,为了让读者自己检测对于内容的理解程度,在各章的末尾都附加了必要的限量的习题,并包括提示和答案。此外还列出了参考文献,以利于读者以本书为基础作进一步的深入研究。殷切希望读者能够灵活运用本书。

担任本书第一版编辑和执笔工作的是:藤高周平博士

(已故)、海津明彬博士、天中郁雄博士和麻生忠雄博士(已故)。本书的修订版之所以能够取得新的进展,是与他们在第一版中打下的基础分不开的。对于他们慷慨允诺修订,并把执笔工作转交给现职专家的风范,谨表示深深的谢意。

关根泰次

本书各章的执笔情况如下:

第1章	绪论	关根泰次(东京大学)
第2章	输电方式	河野照哉(东京大学)
第3章	线路参数和输电特性	关根泰次(东京大学)
第4章	稳定性和输电容量	关根泰次(东京大学)
第5章	故障计算	关根泰次(东京大学)
第6章	中性点接地方式和接地	丰田淳一(东北大学)
第7章	电力系统的绝缘和避雷技术	河野照哉(东京大学)
第8章	电力系统的保护	丰田淳一(东北大学)
第9章	感应干扰与电波干扰	河野照哉(东京大学)
第10章	直流输电	关根泰次(东京大学)
第11章	地下输电线路	松浦虔士(大阪大学)
第12章	配电与户内配线	川濑太郎(千叶大学)

目 录

第 1 章 绪 论	1
-----------------	---

第 2 章 输电方式 3

2.1 交流和直流	3
2.2 输电方式	5
2.3 输电电压	8
2.4 架空输电线路的构造	11
练习题	23

第 3 章 线路参数和输电特性 25

3.1 电 感	25
3.2 静电电容	31
3.3 电阻和电导	34
3.4 输电线路稳态时的电压和电流分布	34
3.5 圆 图	44
练习题	53

第 4 章 稳定性和输电容量 55

4.1 静态稳定性	55
4.2 摆动方程	58
4.3 暂态稳定性和等面积法	58
4.4 暂态稳定性的数值计算	61
4.5 动态稳定性	62

4.6	稳定性的提高	64
4.7	输电容量和固有负荷	71
	练习题	73
第5章	故障计算	75
5.1	同步电机的对称分量阻抗和基本方程式	75
5.2	空载同步电机的故障	79
5.3	输电系统的故障	81
5.4	并列的双路输电线故障	86
	练习题	89
第6章	中性点接地方式和接地	91
6.1	中性点接地的目的	91
6.2	中性点接地方式	93
6.3	接地和接地施工	95
6.4	接地电极和接地电阻	96
6.5	接触电压和跨步电压	100
	练习题	101
第7章	电力系统的绝缘和避雷技术	103
7.1	发生在电力系统的过电压及其绝缘	104
7.2	雷电冲击	109
7.3	开关冲击	121
7.4	短时间过电压	128
	练习题	130
第8章	电力系统的保护	133
8.1	电力系统保护的目	133
8.2	保护继电器及其特性	135

8.3	保护范围和信号检出的方法	140
8.4	保护继电方式	143
8.5	系统保护	146
	练习题	147
第 9 章	感应干扰与电波干扰	149
9.1	静电感应	149
9.2	电磁感应	150
9.3	电 晕	152
9.4	电视信号的干扰	156
	练习题	156
第 10 章	直流输电	157
10.1	交流输电与直流输电的比较	157
10.2	直流输电线路的构成	158
10.3	整流器的工作原理	159
10.4	逆变器的工作原理	165
10.5	直流输电线路的电压-电流特性	167
	练习题	168
第 11 章	地下输电线路	171
11.1	电力电缆	172
11.2	线路参数	175
11.3	输电特性	179
11.4	敷设方式与线路结构	185
11.5	电流容量	190
11.6	电缆线路的绝缘与保护	197
	练习题	203

第 12 章 配电与户内配线	205
12.1 配电系统的结构	205
12.2 配电系统的设施	212
12.3 配电方式	215
12.4 配电计划	217
12.5 配电系统的计算	220
12.6 配电系统的保护	224
12.7 户内配线的特点	226
练习题	227
 练习题简答	229
参考文献	253

第 1 章 绪 论

能源问题不仅关系到各国的社会活动和经济活动,而且影响着全人类的前途,它与地球层面的各种问题相关联。在自然界中,不存在天然的电能,所用电能都是通过水力、石油、煤炭、天然气、原子能等一次能源的加工转化而成的,因而称之为二次能源。从能源消费的角度来看,电能所占的比例越来越大。

在人类消费能源的初级阶段,只知道燃烧薪柴、木炭、煤炭,利用其产生的热能。而在当今世界,出于安全性、清洁性、优良的控制性能等目的,能源消费中,电能所占的比例大增。事实上,世界上主要能源消费国家中,日本已成为电能消费比例最高的国家之一。到 2000 年,电能消费已占全部能源消费的二分之一。

为了生产这些电能,日本每年民用设备投资额的四分之一甚至三分之一都用于扩充电力设备,即使从国民经济的角度来看,这也是一个非常大的比例。在过去数十年间,对电力设备的投入一直保持着这种高比例。预计在今后相当长的时间内,这种高投入仍会保持下去。

电力设备的一半以上是将发电厂发出的电能向消费者输送、分配的输配电设备。在电能的输送、分配过程中也伴随着各种各样的困难。例如,要与雷电、台风、盐害¹⁾、地震等自然灾害作斗争,还要对妨碍环境景观,产生静电干扰、电磁感应等对社会环境造成影响的现象采取必要的消除对策。此外,在日本,因为人口稠密,国土狭长,还必

1) 指海水、海风的侵蚀。——译者注

须尽量设法提高土地的利用率。

为了解决这些问题,经过百余年孜孜不倦的努力,已经开发出各种各样先进的技术。日本建造的输配电系统,成功地实现了世界范围内尚无先例的大功率长距离输配电,并且在世界上人口最为稠密的地区实现电力供应。特别是在严酷的自然环境中,能够保持输配电系统高度的可靠性,足以在全世界引以为荣。

上述的支持大功率、长距离、高密度输配电系统的各种技术,将在第2章以后涉及,其中还包括无功功率、稳定性等独特技术。充分理解这些技术是极其重要的。另外,在这些技术的背后,输配电系统技术的系统化、自动化、电子信息化和系统运营等技术的进步都对输配电工程有很大的贡献。因此还希望读者关注并努力学习本书之外的各种相关技术,如电子材料、信息通信、仪表控制、系统工程等。

第 2 章 输电方式

电力事业始于低电压的直流电,由于人们认识到交流电具有可以用变压器方便地升降其电压这一优点,时至今日交流输电已经被广泛地应用。

交流输电方式的频率有 50Hz 和 60Hz,在线间最大电压相同的情况下,线路所用的导线量最少的三相三线输电方式最为普遍。

另外,随着高电压大容量的交直流变换技术的进步,在长距离输电、海底电缆、50 Hz 与 60 Hz 系统间的联网等方面,也可采用直流输电。

随着输电容量的增大,输电距离加长,输电电压越高则越有利。现在的最高输电电压大约是 20 年前的两倍。

输电线路由电线、绝缘物、支持物等构成。

2.1 | 交流和直流

1. 直流输电

世界最初的电力事业是在 1882 年由爱迪生在伦敦和纽约发起的,当时使用的都是 110V 的直流电。1887 年,由东京电灯株式会社采用直流 210V 供电,便开始了日本的供电事业。

像这种低电压输电,距离发电厂越远,效率就越低,所以人们希望

采用高电压化输电。进行高电压直流输电,需要有高电压的直流发电机,而且还要根据不同情况,采用多台发电机串联运行的方式。而交流输电则可以利用简单高效的变压器升降电压,从而逐步确立优势地位。现在已普遍采用三相三线制的交流输电方式。

简单地说,在输电线路方面,直流输电比交流输电优点要多一些,而从发电、用电和电压升降的角度考虑,交流输电比较有利。所以,自然而然地会想到采用交流发电,用变压器升压,变换成直流后输电,然后再变换成交流,通过变压器降低到适当的电压后送至用户这种组合方式。自从开发出高电压、大容量的水银整流器制成的交直流变换装置后,直流输电再度得到实用化。

直流输电的优点归纳如下:

① 交流输电时,如果架空输电线路距离变长,线路电抗所引起的稳定性问题限制了输电功率,而直流输电只有电阻分量,没有稳定性问题。

② 用电力电缆输电时,交流电对线路上的静电电容充电,充电电流和绝缘体的介质损失使输电功率和输电距离受到限制。跨海输电必须使用海底电缆,这时采用直流输电就极为有利。

③ 如果把两个交流的电力系统用直流输电相联网,就不会受不同频率或频率波动的影响,事故发生时应不使短路电流增加,从电力系统控制方面考虑,也有很多优点。

1954年,瑞典首次利用交直流变换装置实现横穿波罗的海,连接瑞典本土和哥得兰岛的海底电缆直流输电,输电功率为20MW。该输电线路只用一根电缆,而利用海水形成回路,输电电压为100kV,输电距离为96km。

日本建设的联接50Hz和60Hz两个电力系统的佐九间频率变换所(300MW,125V)于1965年投入运行,新信浓频率变换所(300MW,125kV)于1977年投入运行。因输电距离为零,没有建设直流输电线路。

另外,在1979年建设了连接本州和北海道的直流输电线路。设

计电压为 $\pm 250\text{kV}$, 168km 直流输电线路中, 44km 是海底电缆, 兼备上述条件②和③。

上述的直流输电工程中, 哥得兰岛和佐九间频率变换所使用的是水银整流器, 后来换成了晶闸管装置。新信浓频率变换所、北海道和本州开始就采用晶闸管装置。世界上的交直流变换装置已全都采用了晶闸管装置。

符合条件①, 即长距离架空直流输电的实例, 已在前苏联、美国、加拿大、南非等国家计划和实施。

2. 50Hz 和 60Hz

除了电气铁路等特殊场合, 世界各国的交流电频率均采用 50Hz 和 60Hz。在日本, 关东、东北、北海道为 50Hz, 而中部、北陆、关西、中国、四国、九州、冲绳为 60Hz。这是因为在电力事业的初期, 东京引进的是德国 AEG 公司 50Hz 的发电机, 大阪引进的是美国 GE 公司 60Hz 的交流发电机。后来新增的设备要与原发电机并联运行, 也自然采用各自的频率。这就是目前采用两种频率的原因。

第二次世界大战以后, 曾决定把供电频率统一为 60Hz, 后因通货膨胀带来的经费问题, 至今未能实现。两个电网系统发展到了目前的阶段, 统一频率已经很困难, 所以, 必须加强类似佐久间、新信浓这种频率变换所的建设, 以实现直流输电联接两个电网。

2.2 | 输电方式

1. 三相输电方式的优点

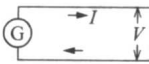
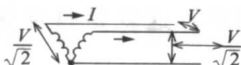
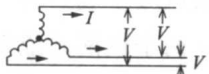
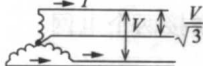
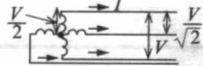
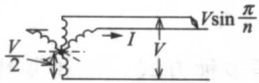
交流输电可分为单相和三相等多种方式。三相制比起单相制有很多优点: 易于产生旋转磁场, 瞬时功率不随时间变化而保持恒定, 输电线路所用导线量少。因此除了室内配线等小功率供电时采用单相交流方式, 其余场合都采用三相交流输电方式。

2. 每一根导线的输电功率

对于各种输电方式,设线间电压有效值之中的最大值(对称 n 相 n 线制中,具有 180° 相位差的两根导线间)为 V ,线路电流的有效值为 I ,这时,每根导线输电功率的比较情况见表2.1。通过比较可知三相三线制是最为有利的,目前输电都采用这种方式。

表 2.1 输电方式和每一根导线的输电功率

(在最大线间电压有效值 V 为一定时)

输电方式		接线图(一例)	输电功率	每一条电线的输电功率	
				输电功率	比率(设 $\cos\varphi=1$)
直流二 线制			VI	$\frac{VI}{2}$	100
交 流 方 式	单相二 线制		$VI\cos\varphi$	$\frac{VI\cos\varphi}{2}$	100
	二相三 线制		$\sqrt{2}VI\cos\varphi$	$\frac{\sqrt{2}VI\cos\varphi}{3}$	94
	三相三 线制		$\sqrt{3}VI\cos\varphi$	$\frac{\sqrt{3}VI\cos\varphi}{3}$	115
	三相四 线制		$\sqrt{3}VI\cos\varphi$	$\frac{\sqrt{3}VI\cos\varphi}{4}$	87
	四相四 线制		$4 \cdot \frac{V}{2} I\cos\varphi$	$\frac{VI\cos\varphi}{2}$	100
	对称 n 相 n 线 式(n 为 偶数)		$n \cdot \frac{V}{2} I\cos\varphi$	$\frac{VI\cos\varphi}{2}$	100

三相四线制能够方便地利用线电压和相电压两种电压值,因此,配电时多采用这种方式。

3. 所需导线量

以下对输电功率为 P , 输电损失为 P_1 时, 所需要的导线量进行比较。

(1) 单相二线制 P 和 P_1 表示如下:

$$P = VI \cos \varphi$$

$$P_1 = 2I^2 R$$

式中, R 是 1 根导线的电阻。设输电距离为 l , 导线截面积为 S , 电阻率为 ρ , 则电阻 $R = \rho l / S$ 。所需要的导线量与导线的全截面积 $2S$ 成比例, 因此, 可以得到

$$2S = \frac{4P^2 \rho l}{P_1 V^2 \cos^2 \varphi} \quad (2.1)$$

由此可知, 在输电功率和输电损失一定的情况下, 电压和功率因数越高, 与其平方成反比的导线需要量就越少。

(2) 三相三线制 条件和(1)相同, 可得

$$P = \sqrt{3}VI \cos \varphi$$

$$P_1 = 3I^2 R$$

所需导线的全截面积为:

$$3S = \frac{3P^2 \rho l}{P_1 V^2 \cos^2 \varphi} \quad (2.2)$$

比较式(2.1)和式(2.2), 在线间电压 V , P , P_1 分别相等的情况下, 三相三线制所用导线量是单相二线制的 75%。三相四线制还要增加中性线的导线量, 如果中性线采用与另外三根导线相同的直径, 则总的导线用量与单相二线制的情况相同。

(3) 对称 n 相 n 线制 (n 是偶数) 同样

$$P = \frac{nVI \cos \varphi}{2}$$

全截面积

$$nS = \frac{4P^2 \rho l}{P_1 V^2 \cos^2 \varphi} \quad (2.3)$$

和单相二线制的情况相同。这时 V 是线电压有效值的最大值。

2.3 输电电压

1. 标称电压和最高电压

输电电压是用三相交流线电压的有效值来表示的。即使在输电线路相同的情况下,这个电压也随地点而变化,而且在同一地点也随时间而变化。因此,把某个输电线路具有代表性的线电压称为**标称电压**(nominal voltage),如称某输电线路的电压是 500kV 或 275kV,指的就是标称电压。

另外,把通常的运行状态下所产生的最高线电压称为**最高电压**。输电线路的线电压会因负荷突然脱落而产生破坏绝缘的异常事故,为了避免这种事故,应在最高电压以下运行。

可以规定几种标称电压的标准值。表 2.2 列出了日本的 10kV 以上的标称电压值。此外,还规定了与各标称电压相对应的最高电压值。

表 2.2 日本的标称电压和最高电压(JEC 158-1970) 单位:kV

标称电压	11	22	33	(66,77)	110	(154,187)	(220,275)	500
最高电压	11.5	23	34.5	(69,80.5)	115	(161,195.5)	(230,287.5)	525/550

日本的标称电压除了 500kV 之外,都是 11 的倍数。这种规定值是随着时代的变迁而改变的,并且还要尽量与国际标准相统一。为什么采用这样的数值,其原因往往不能简单地说明。

标称电压之所以是 11 的倍数,是因为输电线路的送电端电压要高于受电端电压约 10%,把受电端相应电压的整数值作为标准值,可是其后的某个时期,又把送电端的电压值作为标称电压。

在同一地域内,可以采用表 2.2 的括号中两个数值中的一个。

除了 500kV 之外,最高电压都是 11.5 的倍数。这也是按受电端