

21世纪工程技术新型教程系列

# 电力传输 工程

〔日〕松浦虔士 编著

本系列为日本名牌大学面向21世纪教育改革成果

**薄**

最薄的大学专业系列教材。易于讲授

**精**

内容充实精要，结构紧凑。易于学习

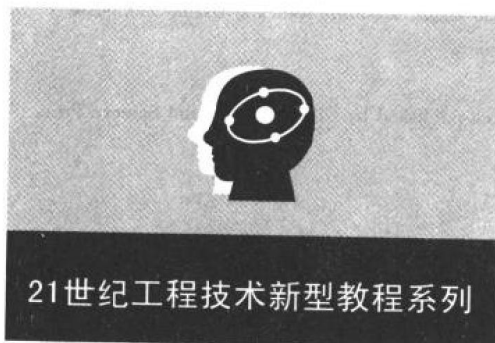
**新**

反映理论与实用技术的最新发展。易于成才

科学出版社

OHM社





---

# 电力传输工程

---

[日] 松浦虔士 编著  
曹广益 钱允琪 译  
李福寿 程浩忠 校

科学出版社 OHM 社  
2001

**图字:01-2000-1575号**

Original Japanese edition

Shinsedai Kougaku Shirinzu: Denki Enerugii Tensoukougaku

Edited by Kenji Matsuura

Written by Kenji Matsuura, Katsuo Isaka, Kazuhiro Kaneko, Osamu Fukumasa

Copyright © 1999 by Kenji Matsuura

Published by Ohmsha, Ltd.

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

Copyright © 2001

All rights reserved.

本书中文版版权为科学出版社和 OHM 社所共有

**新世代工学シリーズ**

**電気エネルギー伝送工学**

松浦虔士 オーム社 1999 第1版 第1刷

**图书在版编目(CIP)数据**

电力传输工程/[日]松浦虔士编著;曹广益、钱允琪译.

-北京:科学出版社,2001.2

(21世纪工程技术新型教程系列)

ISBN 7-03-009002-0

I.电… II.①松…②曹…③钱… III.①输电-电力工程-教材②配电系统-电力工程-教材  
IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 81457 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 2 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16

2001 年 2 月第一次印刷 印张: 11 3/4

印数: 1—5 000 字数: 186 000

**定 价: 23.00 元**

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

# 丛书序

主编 樱井良文

现在,很多大学正在进行学部、学科的重组,以研究生培养为重点,引入学期制,采用新的课程体系和不断深入的教育计划改革,特别是由于学期制教育的引入,使得原来以分册编写的教材在一个学期的教学中很难消化。因此,各学校对“易教”、“易学”的教材需求越来越迫切。

《21世纪工程技术新型教程系列》是面向通信、信息,电子、材料,电力、能源,以及系统、控制等多学科领域的新型教程系列。这些教程均由活跃在各学科领域第一线的教授任主编,由年轻有为的学者执笔,内容丰富,有利于对学科基础的理解。版面设计时为学生留出了写笔记的空间,是一种可以兼作笔记,风格别致的教科书。

希望肩负新世纪工程技术领域发展重任的青年读者们,通过本教程系列的学习,建立扎实的学科基础,在实践中充分发挥自己的应用能力。

## 21世纪工程技术新型教程系列编辑委员会

### 主 编

樱井良文 大阪工业大学校长  
大阪大学名誉教授

### 副主编

西川祯一 大阪工业大学信息科学部学部长  
京都大学名誉教授

### 编委(按姓氏笔画顺序)

|      |                      |      |                      |
|------|----------------------|------|----------------------|
| 广濑全孝 | 广岛大学教授               | 井口征士 | 大阪大学教授               |
| 木村磐根 | 大阪工业大学教授<br>京都大学名誉教授 | 仁田旦三 | 东京大学教授               |
| 白井良明 | 大阪大学教授               | 西原浩  | 大阪大学教授               |
| 池田克夫 | 京都大学教授               | 滨川圭弘 | 立命馆大学副校长<br>大阪大学名誉教授 |

MHC 53 / 01

# 前 言

---

开始接触电力传输工程的学生,首先的感觉可能是,认为所研究的电力系统过于庞大、复杂而又奇妙,因此难于着手。

这是很自然的,因为学生对于构成电力传输的复杂输配电网络和没有使用过的变电设备及其控制、运行方法等都是平时很难接触到的。

对此不用担心,只要有一些数学与电气电子技术基础的读者都容易入门。本书是由长期在这个领域从事教学的4位老师执笔编写的,编写中对于送配电和变电的硬件与软件内容注意从基本事项说起。通过本书的学习,随着逐步对电力传输技术的基本原理的深刻理解,兴趣就会增加,想学好这门课的欲望也就自然而然产生了。

通过进一步的学习,对最初难于着手、难于理解的电力系统,会逐步地弄清它的组成。在懂得了电力传输中要使用电线、电缆和变压器的同时,如下一些疑问也会一个个得到解答。例如,为什么需要电容器与电抗器?电压、功率因数与无功功率的关系怎样?为什么要用高电压?线路故障时电压与电流的分布是怎样的?送配电电路和变电设备中出现一次性瞬时过电压波是怎么一回事?避雷器的作用是什么?断路器的切断时间应是多少?继电保护系统是用什么方式和如何动作的?线路与环境之间存在什么关系?为什么使用由晶闸管这种半导体开关器件所组成的交直流换流器?高次谐波是如何发生的?其相应的防范措施是什么?

最后,对电力系统能如下理解就可以了,即它是“全球范围的巨大的电路网络”,通过对它的合理设计、建设、运行和控制,可以传输电力。掌握了这些,就可以慢慢体会到本书最后一章所叙述的“电力传输技术100多年来的发展历程”,进而对将来继续发展所呈现出来的各种课题亲自进行选题,并对之进行挑战!

人类为了建筑高度的文明,享受丰裕的生活,任何时候都不能缺少电力。为此,我们希望读者理解对起重要作用的电力传输技术进行学习意义,期待你们成长为对电力传输发展作出贡献的研究者和工程技术人员。

最后,向对本书的编辑和发行工作作出贡献的OHM社表示深切感谢。

松浦虔士

# 目 录

---

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| <b>第 1 章 电力是如何传输的</b> .....    | 1  |
| 1.1 电力的产生与输送 .....             | 1  |
| 1.2 电力的传输电压 .....              | 3  |
| 1.2.1 传输电压的探讨 .....            | 3  |
| 1.2.2 频率与线路回路 .....            | 5  |
| 1.3 电力的传输方式 .....              | 6  |
| 1.3.1 交流输电方式 .....             | 6  |
| 1.3.2 直流输电方式 .....             | 8  |
| 1.4 输电系统的构成 .....              | 9  |
| 1.4.1 交流输电系统的构成 .....          | 9  |
| 1.4.2 直流输电方式的基本构成 .....        | 10 |
| 1.4.3 电力传输网的构成 .....           | 10 |
| 练习题 .....                      | 12 |
| <br>                           |    |
| <b>第 2 章 送配电线路的构成与结构</b> ..... | 13 |
| 2.1 架空送配电线路 .....              | 13 |
| 2.1.1 电 线 .....                | 13 |
| 2.1.2 绝缘子 .....                | 13 |
| 2.1.3 支撑物 .....                | 14 |
| 2.1.4 铁 塔 .....                | 15 |
| 2.2 地下送配电线路 .....              | 16 |
| 2.2.1 地下送配电 .....              | 16 |
| 2.2.2 电力电缆 .....               | 17 |
| 2.3 低压配电线的电气接线方式 .....         | 19 |
| 2.3.1 树枝状方式 .....              | 19 |
| 2.3.2 组合方式 .....               | 20 |
| 2.3.3 低压网络方式 .....             | 20 |
| 2.4 高压配电线的电气接线方式 .....         | 21 |
| 2.4.1 树枝状方式 .....              | 21 |
| 2.4.2 环状方式 .....               | 21 |
| 2.4.3 高压网络方式 .....             | 22 |

|                                |           |
|--------------------------------|-----------|
| 练习题 .....                      | 22        |
| <b>第 3 章 变电所的组成 .....</b>      | <b>23</b> |
| 3.1 变电所及其功能 .....              | 23        |
| 3.1.1 变电所 .....                | 23        |
| 3.1.2 变电所的构成器件及其作用 .....       | 23        |
| 3.2 变电所的运行和控制 .....            | 30        |
| 3.2.1 变电所运行的目的 .....           | 30        |
| 3.2.2 监视装置 .....               | 31        |
| 3.2.3 事故的对应措施 .....            | 32        |
| 3.3 交直流换流站的功能 .....            | 33        |
| 练习题 .....                      | 33        |
| <b>第 4 章 电力的传输特性 .....</b>     | <b>35</b> |
| 4.1 电压降 .....                  | 35        |
| 4.2 电压变化率 .....                | 37        |
| 4.3 功率损耗和功率因数的改善 .....         | 38        |
| 4.3.1 功率损耗 .....               | 38        |
| 4.3.2 功率因素的改善 .....            | 40        |
| 4.4 送电电压与送电功率的关系 .....         | 42        |
| 练习题 .....                      | 43        |
| <b>第 5 章 故障现象和故障计算 .....</b>   | <b>45</b> |
| 5.1 传输系统的故障 .....              | 45        |
| 5.1.1 电力传输系统的事故 .....          | 45        |
| 5.1.2 简单电路的故障计算 .....          | 46        |
| 5.2 三相交流与对称分量法 .....           | 47        |
| 5.3 三相交流发电机的基本方程 .....         | 49        |
| 5.4 故障计算实例 .....               | 52        |
| 5.4.1 单相接地故障 .....             | 52        |
| 5.4.2 两相接地故障 .....             | 53        |
| 5.4.3 两相短路故障 .....             | 55        |
| 5.4.4 简单电力系统的单相接地故障 .....      | 57        |
| 练习题 .....                      | 59        |
| <b>第 6 章 稳定性的概念和输送功率 .....</b> | <b>61</b> |
| 6.1 电力传输的稳定性 .....             | 61        |

|              |                        |           |
|--------------|------------------------|-----------|
| 6.2          | 稳定性的解析模型 .....         | 62        |
| 6.2.1        | 单机对无限大母线系统的摇摆方程式 ..... | 63        |
| 6.2.2        | 双机系统的摇摆方程式 .....       | 64        |
| 6.3          | 静态稳定 .....             | 65        |
| 6.4          | 暂态稳定 .....             | 68        |
| 6.4.1        | 分段计算法 .....            | 69        |
| 6.4.2        | 等面积定则 .....            | 71        |
| 6.5          | 电压稳定性 .....            | 74        |
| 6.6          | 提高送电容量的方法 .....        | 77        |
|              | 练习题 .....              | 78        |
| <b>第 7 章</b> | <b>过电压与绝缘配合 .....</b>  | <b>79</b> |
| 7.1          | 雷电波 .....              | 79        |
| 7.1.1        | 雷电电荷的发生和雷电放电的机理 .....  | 79        |
| 7.1.2        | 雷电过电压 .....            | 80        |
| 7.1.3        | 雷电观测 .....             | 82        |
| 7.2          | 操作过电压 .....            | 83        |
| 7.2.1        | 操作过电压发生 .....          | 83        |
| 7.2.2        | 操作过电压倍数 .....          | 83        |
| 7.3          | 暂时过电压 .....            | 84        |
| 7.4          | 绝缘措施 .....             | 85        |
| 7.4.1        | 防雷措施 .....             | 85        |
| 7.4.2        | 过电压抑制措施 .....          | 86        |
| 7.4.3        | 防污秽措施 .....            | 87        |
| 7.4.4        | 超高压送电线的绝缘设计例子 .....    | 89        |
| 7.5          | 绝缘配合 .....             | 89        |
|              | 练习题 .....              | 91        |
| <b>第 8 章</b> | <b>继电保护方式 .....</b>    | <b>93</b> |
| 8.1          | 保护继电器的功能与种类 .....      | 93        |
| 8.1.1        | 保护继电器的功能 .....         | 93        |
| 8.1.2        | 保护继电器的种类 .....         | 93        |
| 8.2          | 送电线的保护方式 .....         | 95        |
| 8.2.1        | 短路保护 .....             | 96        |
| 8.2.2        | 接地保护 .....             | 97        |
| 8.3          | 母线的保护方式 .....          | 98        |
| 8.3.1        | 单母线保护方式 .....          | 98        |
| 8.3.2        | 母线保护方式 .....           | 99        |



|             |                   |            |
|-------------|-------------------|------------|
| 8.4         | 变压器的保护方式          | 99         |
| 8.4.1       | 比率差动保护方式          | 99         |
| 8.4.2       | 高次谐波抑制式比率差动保护方式   | 100        |
| 8.4.3       | 瓦斯保护              | 101        |
| 8.5         | 发电机的保护方式          | 101        |
| 8.5.1       | 相间短路保护方式          | 101        |
| 8.5.2       | 内部接地保护方式          | 103        |
| 8.5.3       | 层间短路保护方式          | 103        |
| 8.5.4       | 失磁保护方式            | 103        |
|             | 练习题               | 105        |
| <b>第9章</b>  | <b>直流输电</b>       | <b>107</b> |
| 9.1         | 直流输电的组成和方式        | 107        |
| 9.1.1       | 直流输电系统的基本结构       | 107        |
| 9.1.2       | 直流输电线路的方式         | 108        |
| 9.2         | 换流器的工作原理          | 109        |
| 9.2.1       | 换流器中的三相桥式电路       | 109        |
| 9.2.2       | 正向换流器(整流)的工作原理    | 110        |
| 9.2.3       | 逆变器的工作原理          | 112        |
| 9.3         | 直流输电的特性和运行、控制     | 114        |
| 9.3.1       | 正向换流器和逆变器的特性      | 114        |
| 9.3.2       | 直流输电系统的运行和控制      | 115        |
|             | 练习题               | 119        |
| <b>第10章</b> | <b>电磁感应和无线电干扰</b> | <b>121</b> |
| 10.1        | 静电感应              | 121        |
| 10.1.1      | 静电感应的原理           | 121        |
| 10.1.2      | 静电感应电压的计算         | 122        |
| 10.1.3      | 感应电流的计算           | 123        |
| 10.1.4      | 电力线周围空间的电场计算      | 123        |
| 10.1.5      | 对于人体的静电感应         | 124        |
| 10.1.6      | 防止静电感应影响的措施       | 125        |
| 10.2        | 电磁感应              | 125        |
| 10.2.1      | 电磁感应的原理           | 125        |
| 10.2.2      | 电磁感应电压的计算         | 126        |
| 10.2.3      | 电力线周围空间的磁场计算      | 126        |
| 10.2.4      | 对于人体的电磁感应         | 127        |
| 10.2.5      | 防止电磁感应影响技术        | 127        |

|               |                                  |            |
|---------------|----------------------------------|------------|
| 10.3          | 电晕噪声、带电 .....                    | 127        |
| 10.3.1        | 导线的表面电场 .....                    | 128        |
| 10.3.2        | 电晕噪声 .....                       | 128        |
| 10.3.3        | 带 电 .....                        | 129        |
| 10.4          | 电波干扰 .....                       | 129        |
| 10.5          | 电磁场对生物体的影响 .....                 | 130        |
| 10.5.1        | 电场引起的人体感应电流 .....                | 130        |
| 10.5.2        | 磁场引起的人体感应电流 .....                | 131        |
| 10.5.3        | 电磁场对人体影响的评价 .....                | 131        |
|               | 练习题 .....                        | 132        |
| <b>第 11 章</b> | <b>配电与负载的关系 .....</b>            | <b>133</b> |
| 11.1          | 负载的增加和配电设备的规划(配电规划) .....        | 133        |
| 11.1.1        | 设备需要率 .....                      | 133        |
| 11.1.2        | 负载分散因数 .....                     | 134        |
| 11.1.3        | 负载率 .....                        | 134        |
| 11.2          | 负载与事故措施(配电线的保护方式) .....          | 134        |
| 11.2.1        | 配电变电所的保护 .....                   | 136        |
| 11.2.2        | 柱上变压器事故与保护 .....                 | 136        |
| 11.3          | 负载与高次谐波的影响 .....                 | 137        |
| 11.3.1        | 高次谐波的定义 .....                    | 137        |
| 11.3.2        | 电力系统电压畸变的实际状况 .....              | 139        |
| 11.3.3        | 高次谐波影响状况 .....                   | 140        |
| 11.3.4        | 高次谐波影响的抑制措施 .....                | 141        |
| 11.3.5        | 电力电容器附加串联电抗器和<br>高次谐波的扩大 .....   | 145        |
|               | 练习题 .....                        | 148        |
| <b>第 12 章</b> | <b>电力传输技术展望 .....</b>            | <b>149</b> |
| 12.1          | 电力传输技术的发展 .....                  | 149        |
| 12.1.1        | 至今的发展历史 .....                    | 149        |
| 12.1.2        | 围绕电力传输的环境的变化 .....               | 151        |
| 12.2          | 电力传输技术的未来 .....                  | 153        |
| 12.2.1        | 新技术的发展方向 .....                   | 153        |
| 12.2.2        | 利用架空及地下送电线路的大容量<br>高密度电力传输 ..... | 154        |
| 12.2.3        | 通过电力电子控制来达到电力传输的<br>柔性化 .....    | 156        |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 12.2.4 在配电系统中引进中、小规模<br>分散电源 ..... | 158 |
| 12.2.5 来自宇宙的无线送电 .....             | 160 |
| 练习题 .....                          | 161 |
| <b>练习题简答</b> .....                 | 163 |
| <b>参考文献</b> .....                  | 171 |

# 第 1 章

# 电力是如何传输的

---

为了把发电厂发出的电能(电力,电功率)送到用户,必须要有电力输送设备。本章将简要介绍电力的传输(流动)及传输方式。首先要了解电能的产生及到用户的途径。其次,学习目前在电力传输中占主体地位的交流输电中的输电电压。在交流输电中,由于无功功率的控制和输电系统的稳定性等与直流输电相比有不利的方面,因此还要学习交流、直流两种输电方式的内容和特点以及输电系统的构成。另外,因为有关内容要在以后各章中进行详细叙述,所以只要把本章介绍的电力输送概要作为预备知识了解即可。

## 1.1 电力的产生与输送

能源,可以说与粮食和水一样,是支撑现代社会文明的物质基础之一。人类通过消耗能量而生活,进行社会活动。地球上可以利用的能源(能量资源)有化石能源、自然能源及核能源。电能是通过这些能源的变换而生产出来的,其能源形态的相互关系简略图如图 1.1 所示。

电能(电力)具有能量变换的多样性,可瞬时传输及快速反应,可以有其他能源没有的极其优良的特征,因此在许多方面得到广泛应用。可以预期,电力在全消耗能源中所占的比例今后会越来越大。从这几十年家庭生活来看,使用电力的家电产品的数量及其种类增加之快令人吃惊。冰箱、电饭煲、洗衣机、吸尘器、空调、计算机、传真机、录相机、电视机、微波炉等等,举不胜举。但是,电力作为电气的本质是,在电力从生产到使用的过程中要让它暂停及贮藏是非常困难的,因此电力具有生产和消费都必须是同时进行的特征(制约)。这样,作为电力使用的一个原则,是对应于随时随刻需要的变化,在保持其质量稳定的同时,要求没有障碍地保证提供需要量。

另一方面,由于电力应用的扩展和增大,伴随着电力供给源的大型化,要求一次能源大容量化和多样化,而且由于受到种种社会的、地理条件的限制,电源地点和用户所在地的距离越来越远,关系越来越复杂。高质量且稳定的电力供应是维持现代产业和高度信息化社会的基本条件。

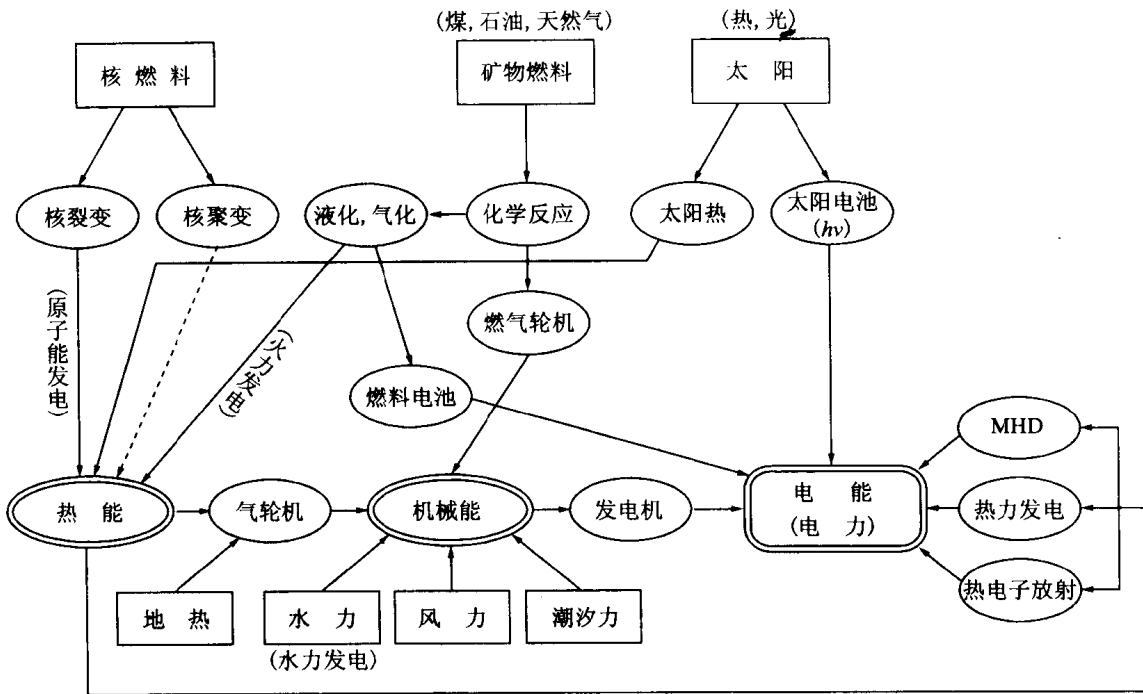


图 1.1 能量的形态与相互关系

在妥善解决地球环境问题及资源枯竭问题的同时,维持稳定的电力供应,是 21 世纪的一个重大课题。

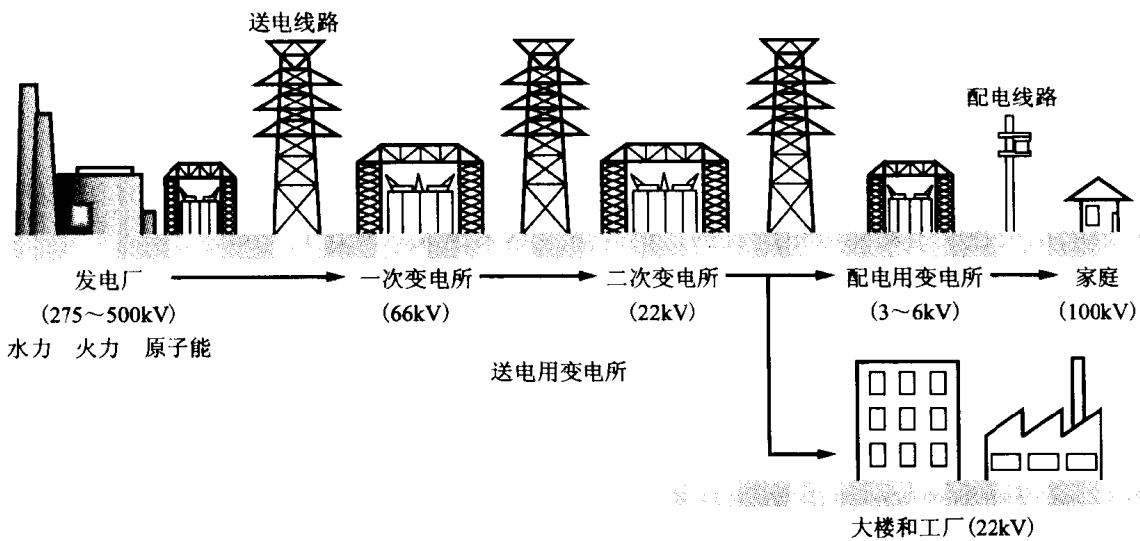


图 1.2 从发电厂到用户的传输过程

在这种情况下,由送电线、配电线及变电所、换流站所构成的电力传输设备,在电力生产与用户之间起到传送优质电力的作用。电力从发电

厂发出后传输到工厂、大楼以及我们家庭的传输过程的概念图如图 1.2 所示。电力从距离遥远的发电厂到用户用高压电源送电系统传输,即从发电厂到变电所、从变电所到变电所由干线传输;而到个别的用户处,则通过配电线来传输。这种电力传输设备又称电力流通设备;电力供应的可靠性与设备可靠而稳定的运行有密切关系。也就是说,对于流通设备,必须同时考虑到它足够的传输能力及其性能的稳定。

最近,为了能够远距离、大容量送电(表 1.1),在送变电设备送电电压上升的同时,导体、支撑物、开关电器已逐步大型化。另一方面,由于城市的现代化,空间狭小,因而地下设备及小型化设备也不断发展。配电线方面也同样为适应负荷密度的增加、环境的保护,要求有相适应的性能、结构及外观。另外在传输方式上,与传统的交流方式相比,直流输电方式也逐步发展,在城市的地下送电、横渡海峡的海底送电、远距离架空送电等处使用,还与交流方式并用。另外,对于今后高密度的用户地区的电力传输,正研究采用气体绝缘管路输送,或者用极低温、超导体的送电方式。根据需要,期待着新方式的出现。

如上所述,电力传输的送、配线路以及变电所、换流站设备是电力供应不可缺少的重要设备。在对这些设备作计划与应用时,对每个设备的结构和特性以及由这些设备所组成的电力系统的作用与所要求的各种功能必须有充分的了解及研究。

表 1.1 发电厂大容量化的变迁

| 项 目               | 过 去       | 现 在         | 将 来           |
|-------------------|-----------|-------------|---------------|
| 最大发电机组容量[MW]      | 250 ~ 600 | 800 ~ 1 200 | 1 500 ~ 2 500 |
| 1 个发电厂的最大输出规模[MW] | 2 000     | 5 000       | 10 000        |

## 1.2 电力的传输电压

### 1.2.1 传输电压的探讨

电力传输时,有电压与电流两个方面,还伴随着必然的损失。以图 1.4 所示的单相 2 线制的电路为例,试考虑高效的送电情况。线间电压为  $V[V]$ , 线路电流为  $I[A]$ , 负载功率为  $P[W]$ , 负载功率因数为  $\cos\phi$ , 则有

$$P = VI\cos\phi [W] \quad (1.1)$$

关系。另外,单线的线路电阻为  $R[\Omega]$ , 线路的功率损耗(电阻性损耗)为  $P_i[W]$ , 损耗率为  $\rho$ , 则

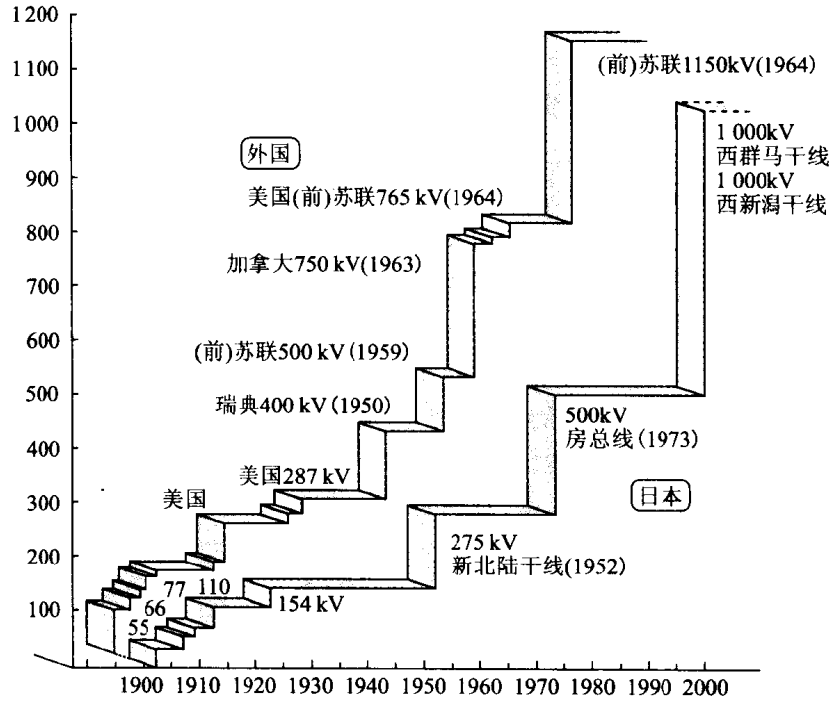


图 1.3 送电电压的变迁

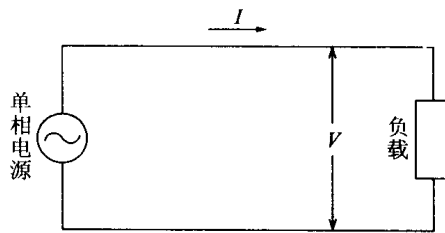


图 1.4 单相 2 线制

$$P_l = 2I^2R \quad \rho = \frac{P_l}{P} \tag{1.2}$$

如果负载所需的功率  $P$  和功率因数确定, 则式(1.1)的电流可由下式得出:

$$I = \frac{P}{V \cos \phi} \text{ [A]} \tag{1.3}$$

由式(1.2)和(1.3)得

$$P_l = \frac{2P^2R}{V^2 \cos^2 \phi} \text{ [W]} \tag{1.4}$$

假设  $P$ 、 $R$  不变,  $P_l$  按与  $V^2$  成反比关系变小, 因此为提高送电效率, 电压越高越好。但是, 电压过度升高, 增加了输电线和变压器等电力设备

的绝缘要求而成本提高,因此也不能无限制地升高电压。

现在,代表性的电压是:从发电厂送出的主干系统的送电电压为500kV或275kV;到用户附近地区,降压到154kV、66kV、22kV;对于大容量用户,就用这种电压直接供电;在配电系统中用高压6.6kV或200、100V供应给一般用户(图1.2)。另外,为适应电力需要量的增加,近年来也开始向1000kV送电的实用化进展。

如果送电电压自由取值,那么在两条以上送电线路相互连接时或在电力设备制造上都会不合适,所以规定了标准电压。如表1.2所示,规定以线间电压表示的标称电压作为标准电压。在根据标准电压选择送电电压时,要考虑到送电功率,送电距离和已有电力设备的关系及将来的设备规划等,进行综合考虑。

表 1.2 日本的标准电压 (JEC - 158)

| 标称电压 [V] | 最高电压 [V]        |
|----------|-----------------|
| 3 300    | 3 450           |
| 6 600    | 6 900           |
| 11 000   | 11 500          |
| 22 000   | 23 000          |
| 33 000   | 34 500          |
| 66 000   | 69 000 }        |
| 77 000   | 80 500 }        |
| 110 000  | 115 000         |
| 154 000  | 161 000 }       |
| 187 000  | 195 000 }       |
| 220 000  | 230 000 }       |
| 275 000  | 287 500 }       |
| 500 000  | 525 000/550 000 |

注:有“|”符号的,在同一地区只采用其中一种。

### 1.2.2 频率与线路回路

交流方式的频率影响到电源设备、使用电器的结构与规格,它又使输电线路的电抗、电纳变化,引起系统的无功功率、电压调整率和送电的稳定极限功率等的变动。另外,在频率特别低时产生照明电灯的闪烁,使电动机达不到额定的转速等。因而,必须选择合理的频率。现在世界上主要使用的频率为50Hz、60Hz二种。50Hz以欧洲为中心普及,60Hz以美国为主逐步发展。

受到欧洲与美国的影响,在日本交流频率以富士河为界,包含有东侧的静冈、山梨,新潟各县的关东以北的地区为50Hz,而其西侧的地区为60Hz。这是由于在电力事业开始之时,进口的发电机在东京及其周围是德国制的为50Hz,大阪地区是美国制的为60Hz。因此使全国的系统联系产生麻烦,这对于电源和用户设备的制造和操作两方面均带来不便。



## 电力的传输电压

设输电线的电流为  $I$  [A], 电阻为  $R$  [ $\Omega$ ], 输电线上的焦耳热耗为  $P_i$  [W], 则  $P_i = I^2 R$ 。因此, 要传输相同的功率, 则把输电电压提高, 使其成反比的电流变小即可。这样可以抑制  $P_i$ , 提高输电效率。当然, 提高了送电电压, 必须提高输电线及变压器等电力设备的绝缘性能, 使成本增加。因此, 也不能无限制地提高输电电压。

计算输电电压的经济数值的经验式是 Still 式。根据线路的全长  $l$  [km] 和受端功率  $P_R$  [kW], 可用下式计算出输电电压(线间)  $V$  [kV]。

$$V = 5.5 \sqrt{0.6l + \frac{P_R}{100}}$$

另外, 还有  $V = K \sqrt{l P_R}$  ( $K$  为常数) 的关系式。此式的导出例如可根据后面第 6 章中所叙述的式 (6.6), 设  $X \approx \omega L l$ ,  $E_s E_R = E^2$ , 则可求得  $E = K \sqrt{l P_R}$  ( $K = \sqrt{\omega L / \sin \theta}$ )。

从这些式中可知,  $l$  及  $P_R$  变大,  $V$  也随着变大。另外,  $l$  即使不那么大, 但  $P_R$  很大时(例如在大城市)传输电压也有必要提高。

至于传输线路的回路数, 日本一般都用 2 回路方式。回路的数目依存于传输电力的大小是必然的, 此外, 考虑到传输系统的稳定性和可靠性的提高及使用上的方便, 在很多情况下, 使用 2 回路以及 2 回以上。随着将来输送容量的增加, 还会选定多回路方式。

## 1.3 电力的传输方式

### 1.3.1 交流输电方式

交流方式由于通过变压器很容易地进行有效的升压降压, 现在广泛地应用于电力传输中。

在交流方式中有单相 2 线制、单相 3 线制、三相 3 线制、三相 4 线制等。这些方式各有特征。一般, 对于电灯或家用电器等小功能电器, 应用单相 2 线制、单相 3 线制, 而对于电动机等达到某种程度的负荷或者更大一些负荷, 则应用三相 3 线制或三相 4 线制。其中三相 3 线制被最广泛地利用, 有以下几个优点:

① 容易产生动力源(交流电动机)的重要旋转磁场。

② 在相同的电压、电力、损耗、距离时所需要的电线重量为单相 2 线制的  $3/4$ 。