



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



FUNDAMENTALS OF ELECTRICAL ENGINEERING

# 电气工程基础

( 第三版 ) 下册

陈慈萱 主 编

向铁元 副主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

# 电气工程基础

## (第三版) 下册

主 编 陈慈萱

副主编 向铁元

主 审 涂光瑜 谈顺涛



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

本书分为上、下册，此为下册。全书主要包括电力系统组成的特点和接线方式，电力系统中的电气主设备和负荷，电力系统在稳态或故障时分析计算的基本理论和方法，电力系统稳定的基本概念，远距离输电技术，电力系统的内部过电压和防雷保护，电力系统的继电保护、控制与信号系统，电力系统自动化技术以及变电站电气部分课程设计的基本方法。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化和相关专业的本科教学用书，也可作为高职高专及函授教材，同时可供电气工程相关专业的技术人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电气工程基础. 下册/陈慈萱主编. —3版. —北京: 中国电力出版社, 2016. 7

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-5123-9120-8

I. ①电… II. ①陈… III. ①电气工程—高等学校—教材  
IV. ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 061239 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 [http: //www. cepp. sgcc. com. cn](http://www.cepp.sgcc.com.cn))

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2003 年 9 月第一版

2016 年 7 月第三版 2016 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.75 印张 435 千字

定价 38.00 元



## 敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

# 前 言

《电气工程基础》是为电气工程及其自动化和相关专业编写的一部宽口径专业基础教材。本书第一版于2003年出版发行，得到广大使用者的认可。2012年修订后出版发行的第二版于2014年入选“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。现针对使用过程中发现的一些问题和不足之处，结合我国电力工业的发展，增补修订为第三版。

本书分上、下册，共十六章，由陈慈萱任主编，向铁元任副主编，其中第一章由关根志修订补充，第四、十四、十六章由陈丽华、彭辉修订补充，第五章由向铁元、徐箭修订补充，第十章由徐箭、田翠华修订补充，第十五章由张莲梅补充。本书上册由徐箭统稿，下册由彭辉统稿，终稿由陈慈萱、向铁元审定。

对书中疏漏和不足之处，恳切希望使用本书的广大读者提出宝贵意见。

编 者

2016年3月

## 第二版前言

《电气工程基础》是为宽口径的“电气工程与自动化”或“电气工程及其自动化”专业编写的一部专业基础教材。该书第一版于2003年出版发行，得到广大使用者的认可，沿用至今。

随着我国电力工业的发展，近年来新知识、新技术、新工艺、新设备不断涌现，为更好地满足教学需要，我们就使用过程中发现的一些问题和不足之处，在第一版的基础上对各章进行了修订和补充。本版将第一版的第15章电力系统通信和第16章电力系统自动控制技术两章的内容进行了整合，构成为第二版的第十五章电力系统自动化技术。

全书共16章，分上、下两册，上册为一～九章，下册为十～十六章。

第一版各章节的编者（陈慈萱、向铁元、肖军华、张承学、关根志、刘涤尘、陈丽华、陈昆薇、陈柏超、殷小贡）和张元芳、丁坚勇、乔卉、郭晓云、田翠华、方华亮等共同完成了第二版的修订和补充工作。陈慈萱对全书进行了统稿。

华中科技大学涂光瑜教授和武汉大学谈顺涛教授担任了本书的审稿工作，提出了许多宝贵的修改意见，在此表示衷心感谢。

限于编者水平，书中错误与不足之处在所难免，恳切希望使用此书的教师和学生提出意见。

编者

2012年9月

## 第一版前言

《电气工程基础》是为宽口径的“电气工程与自动化”或“电气工程及其自动化”专业编写的一部专业基础教材，是在“电工基础”、“电机学”、“电子技术”、“计算机技术”等基础课程后的一门大型专业平台课。

本课程以电能的生产、输送以及确保电力系统运行中的“安全、可靠、优质、经济”原则为主线，将“电力系统分析”、“继电保护”、“自动化”、“高电压技术”、“电力电子技术”以及“通信技术”等传统专业课中的相关内容融合成一体，介绍了电力系统的组成及其主要设备和接线方式、远距离输电技术、简单的潮流和短路计算方法以及电力系统稳定的基本概念、电力系统运行中的过电流和过电压保护、电能质量的控制以及电力系统中的通信和自动控制的特点，最后通过相关的课程设计巩固所学内容，并为学生选择和学习相关专业课程打下基础。

全书共 17 章，分上、下两册，上册为 1~9 章，下册为 10~17 章。其中第 1 章由关根志编写，第 2、5、6、8 章由向铁元编写（其中第 2 章的第 3 节由刘涤尘编写），第 4、14、17 章由陈丽华编写，第 7、9 章由陈昆薇编写，第 10 章由陈柏超编写，第 13 章由肖军华编写，第 15 章由殷小贡编写，第 16 章由张承学编写。陈慈萱编写了第 3、11、12 章并对全书进行统稿。陈允平教授主审了全书，并提出许多宝贵意见。

本书是在全院教师的大力支持下完成的。谈顺涛教授在本书的编写和统稿过程中做了大量组织工作，张元芳教授在本书的定稿过程中花费了很多心血。“电气工程基础”课程教学小组阅读了初稿，提出了很多修改意见。在此表示衷心的感谢。

由于编写时间仓促，错误和不足之处在所难免，恳切希望使用此书的教师和学生提出意见。

编 者

2003 年 6 月

# 目 录

前言

第一版前言

第二版前言

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| <b>第十章 远距离输电</b> .....      | 1   |
| 第一节 远距离交流输电 .....           | 1   |
| 第二节 高压直流输电 .....            | 9   |
| 第三节 灵活交流输电系统 .....          | 22  |
| 第四节 特高压输电 .....             | 28  |
| 本章小结 .....                  | 34  |
| 思考题与习题 .....                | 34  |
| <b>第十一章 电力系统内部过电压</b> ..... | 35  |
| 第一节 概述 .....                | 35  |
| 第二节 操作过电压 .....             | 35  |
| 第三节 谐振过电压 .....             | 45  |
| 第四节 电磁式电压互感器饱和引起的过电压 .....  | 57  |
| 本章小结 .....                  | 61  |
| 思考题与习题 .....                | 62  |
| <b>第十二章 电力系统防雷保护</b> .....  | 63  |
| 第一节 雷电放电过程及雷电参数 .....       | 63  |
| 第二节 雷电过电压的形成 .....          | 67  |
| 第三节 防雷保护装置 .....            | 70  |
| 第四节 架空输电线路的防雷保护 .....       | 79  |
| 第五节 发电厂和变电站的防雷保护 .....      | 83  |
| 第六节 配电变压器防雷 .....           | 85  |
| 第七节 电力系统接地 .....            | 86  |
| 本章小结 .....                  | 90  |
| 思考题与习题 .....                | 91  |
| <b>第十三章 电力系统继电保护</b> .....  | 92  |
| 第一节 概述 .....                | 92  |
| 第二节 输电线路的继电保护 .....         | 96  |
| 第三节 电力变压器的继电保护 .....        | 117 |
| 第四节 微机型继电保护 .....           | 123 |

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| 本章小结·····                       | 126        |
| 思考题与习题·····                     | 127        |
| <b>第十四章 发电厂变电站的监视与控制系统·····</b> | <b>129</b> |
| 第一节 电气二次系统的基本概念·····            | 129        |
| 第二节 控制回路和信号回路常用的低压电器·····       | 139        |
| 第三节 高压断路器的控制·····               | 144        |
| 第四节 高压隔离开关的电动操作与闭锁·····         | 148        |
| 第五节 发电厂变电站的操作电源·····            | 150        |
| 本章小结·····                       | 157        |
| 思考题与习题·····                     | 158        |
| <b>第十五章 电力系统自动化技术·····</b>      | <b>160</b> |
| 第一节 概述·····                     | 160        |
| 第二节 电力系统调度自动化·····              | 161        |
| 第三节 电力通信网络及其通信规约·····           | 174        |
| 第四节 电力系统典型自动控制装置·····           | 185        |
| 第五节 配电网自动化·····                 | 210        |
| 第六节 变电站综合自动化·····               | 221        |
| 第七节 智能变电站·····                  | 225        |
| 本章小结·····                       | 230        |
| 思考题与习题·····                     | 231        |
| <b>第十六章 变电站电气部分课程设计·····</b>    | <b>233</b> |
| 第一节 变电站电气设计程序·····              | 233        |
| 第二节 电气主接线的选择·····               | 235        |
| 第三节 电气设备的选择·····                | 241        |
| 第四节 互感器及接地开关的配置原则·····          | 252        |
| 第五节 防雷装置的配置原则·····              | 254        |
| 第六节 绝缘的选择·····                  | 255        |
| 第七节 配电装置的选择·····                | 259        |
| <b>附录·····</b>                  | <b>266</b> |
| 附录Ⅰ 导体常用规格及载流量·····             | 266        |
| 附录Ⅱ 开关电器参数·····                 | 269        |
| 附录Ⅲ 电抗器技术数据·····                | 272        |
| 附录Ⅳ 电力变压器技术数据·····              | 273        |
| <b>参考文献·····</b>                | <b>276</b> |

## 第十章 远距离输电

随着电力负荷的日益快速增长,大型和特大型发电机组不断投入运行,为将电能从大型火电厂、水电厂和核电站输送到远方负荷中心地区,必然会遇到远距离输电问题。实现远距离的大功率传输,需采用超高压或特高压输电技术。在超(特)高压输电技术中有交流输电和直流输电两种方案。其中交流输电是目前国内外最基本的远距离输电方式,其特点是中间抽能方便、经济。直流输电不存在同步稳定性问题,是大区域电力系统互联的理想方式,但直流输电系统造价高、中间抽能困难。

我国电能输送距离在 50~300km 时,采用 110、220kV 的高压(HV)交流输电;输送距离在 300~1000km 时,采用 330、500、750kV 的超高压(EHV)交流输电,以及  $\pm 500$ kV 的超高压直流(EHVDC)输电;输送距离在 1000km 以上时,采用 1000kV 的特高压(UHV)交流输电,以及  $\pm 800$ kV 的特高压直流(UHVDC)输电。

### 第一节 远距离交流输电

由于远距离输电一般均在 300km 以上,与 50Hz 工频交流电的  $1/4$  波长(1500km)的数值接近或相当,所以在对远距离输电线路进行分析计算时,应考虑其电气参数的分布特性。

#### 一、长线基本方程及稳态解

图 10-1 (a) 所示为一长度为  $l$  的单导体长线。设线路单位长度的电阻、电感、电容、电导分别为  $R_0$ 、 $L_0$ 、 $C_0$ 、 $G_0$ ,在离线路端口 2 距离  $x$  处取一微元段  $dx$  的等效电路,如图 10-1 (b) 所示。根据基尔霍夫电压定理有

$$u + du = R_0 dx + L_0 dx \frac{\partial i}{\partial t} + u \quad (10-1)$$

同理,由基尔霍夫电流定理得

$$i + di = G_0 dx(u + du) + C_0 dx \left[ \frac{\partial}{\partial t}(u + du) \right] + i \quad (10-2)$$

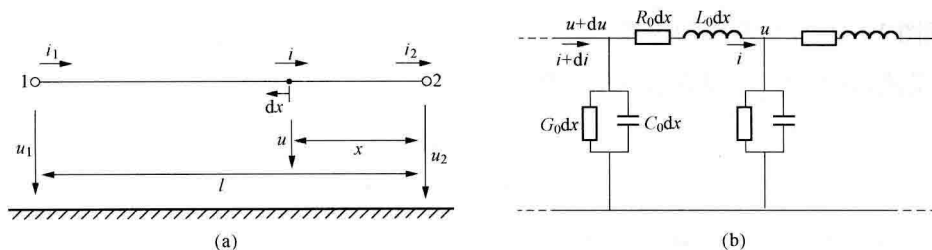


图 10-1 单导体长线及微元等效电路示意图

(a) 单导体线路示意图; (b) 微元等效电路示意图

对式 (10-1)、式 (10-2) 进行整理, 并忽略高阶微分项, 可得微分方程组为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} &= R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \\ \frac{\partial i}{\partial x} &= G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (10-3)$$

对于电压、电流均为正弦波的稳态情况, 式 (10-3) 可改写为

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\dot{U}}{dx} &= (R_0 + j\omega L_0) \dot{I} \\ \frac{d\dot{I}}{dx} &= (G_0 + j\omega C_0) \dot{U} \end{aligned} \right\} \quad (10-4)$$

将式 (10-4) 中的第二式代入第一式, 可得出关于电压相量的二阶微分方程

$$\frac{d^2 \dot{U}}{dx^2} = (R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0) \dot{U} \quad (10-5)$$

由式 (10-4) 中的第一式得电流表达式为

$$\dot{I} = \frac{1}{(R_0 + j\omega L_0)} \frac{d\dot{U}}{dx} \quad (10-6)$$

令  $\gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)}$ ,  $Z = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}}$ , 则式 (10-5) 和式 (10-6) 可分别表示为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \dot{U}}{\partial x^2} &= \gamma^2 \dot{U} \\ \dot{I} &= \frac{1}{\gamma Z} \frac{d\dot{U}}{dx} \end{aligned} \right\} \quad (10-7)$$

式中:  $\gamma$  为线路的传播系数;  $Z$  为线路的波阻抗。

传播系数和波阻抗是反映长线电气性能的特征量, 与线路参数和运行频率有关, 而与线路电压、电流的大小无关。

式 (10-7) 的解为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_x &= M \operatorname{ch}(\gamma x) + N \operatorname{sh}(\gamma x) \\ \dot{I}_x &= \frac{1}{Z} [M \operatorname{sh}(\gamma x) + N \operatorname{ch}(\gamma x)] \end{aligned} \right\} \quad (10-8)$$

式中:  $\dot{U}_x$ 、 $\dot{I}_x$  分别为  $x$  处的电压、电流相量;  $M$ 、 $N$  为待定系数。

根据图 10-1 (a) 所示的边界条件:  $x=0$  时,  $\dot{U}_x = \dot{U}_2$ ,  $\dot{I}_x = \dot{I}_2$ , 可求出  $M = \dot{U}_2$ ,  $N = Z \dot{I}_2$ , 于是式 (10-8) 可写成如下的矩阵形式, 即

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_x \\ \dot{I}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x & B_x \\ C_x & A_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (10-9)$$

式中:  $A_x = \operatorname{ch}(\gamma x)$ ,  $B_x = Z \operatorname{sh}(\gamma x)$ ,  $C_x = \frac{\operatorname{sh}(\gamma x)}{Z}$ ,  $A_x^2 - B_x C_x = 1$ 。

若已知线路端口 2 的电压和电流, 则通过式 (10-9) 可解出距端口 2 任意点  $x$  处的电压与电流的大小与相量。显然, 将  $x=l$  代入式 (10-9), 即可得出线路两端的电压、电流关系为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (10-10)$$

式中:  $A = \operatorname{ch}(\gamma l)$ ,  $B = Z \operatorname{sh}(\gamma l)$ ,  $C = \frac{\operatorname{sh}(\gamma l)}{Z}$ 。

对于一般的远距离交流输电线路, 有  $R_0 \ll \omega L_0$ ,  $G_0 \ll \omega C_0$ , 故可忽略线路的损耗, 即认为  $R_0 = 0$ ,  $G_0 = 0$ , 据此可将导线的传播系数  $\gamma$  和波阻抗  $Z$  分别简化为

$$\gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} \approx j\omega \sqrt{LC_0} = j \frac{\omega}{v} = j\alpha$$

$$Z = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \approx \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = Z_c$$

式中:  $v$  为波在无损架空导线上的传播速度, 其值为  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ;  $Z_c$  为无损架空导线的波阻抗, 约为  $370 \sim 410 \Omega$ , 若为分裂导线, 则  $Z_c$  约为  $270 \sim 310 \Omega$ 。

此时式 (10-9) 和式 (10-10) 可分别改写为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_x \\ \dot{I}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha x) & jZ_c \sin(\alpha x) \\ j \frac{1}{Z_c} \sin(\alpha x) & \cos(\alpha x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (10-11)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha l) & jZ_c \sin(\alpha l) \\ j \frac{1}{Z_c} \sin(\alpha l) & \cos(\alpha l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (10-12)$$

传播系数  $\gamma$  也可表达为

$$\gamma = j \frac{\omega}{v} = j \frac{\omega l}{v} \times \frac{1}{l} = j \frac{\lambda}{l}$$

这里  $\lambda = \frac{\omega l}{v} = \alpha l$ , 为导线长度的电角度。取  $v = 3 \times 10^5 \text{ km/s}$ , 则有

$$\lambda = \frac{\omega l}{3 \times 10^5} (\text{rad}) = \frac{2\pi \times 50l}{3 \times 10^5} (\text{rad}) = \frac{\pi l}{3000} (\text{rad}) = \frac{180^\circ l}{3000} = 0.06^\circ l$$

据此可知, 当  $l = 100 \text{ km}$  时  $\lambda = 6^\circ$ , 当  $l = 1500 \text{ km}$  时  $\lambda = 90^\circ = \frac{\pi}{2}$ 。

## 二、线路的自然功率

当线路传输的有功功率发生变化时, 末端电压会随之改变。假定线路由 1 (首端) 向 2 (末端) 传输有功功率  $P$  (不考虑无功功率), 则由式 (10-12) 可得

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cos \lambda + jZ_c \left( \frac{P}{\dot{U}_2} \right) \sin \lambda \quad (10-13)$$

式中:  $\lambda = \alpha l$ ;  $\dot{U}_2$  为  $\dot{U}_2$  的共轭。

取  $\dot{U}_2 = U_2 \angle 0^\circ$  为参考相量, 则有  $\dot{U}_2 = \dot{U}_2^* = U_2$ 。由式 (10-13) 可推导出

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\sqrt{1 + \sqrt{1 - (P^*)^2 \sin^2(2\lambda)}}}{\sqrt{2} \cos \lambda} \quad (10-14)$$

式中:  $P^* = \frac{P}{U_1^2} = P/P_n$ ;  $P_n = \frac{U_1^2}{Z_c}$ ,  $P_n$  称为自然功率。

当  $P_* = 1$ , 即  $P = P_n$  时, 线路所传输的功率等于自然功率, 此时由式 (10-14) 可得  $U_2/U_1 = 1$ , 即线路末端电压等于首端电压。

同理, 由式 (10-11) 不难导出, 在传输功率等于自然功率的条件下, 线路任意点的电压均与首、末端电压相等。其物理意义为: 此时在长线输电系统中, 线路电容所吸收的容性无功功率 (或发出的感性无功功率), 等于线路电感所消耗的无功功率。

取一个微元段线路, 该微元段线路电感消耗的无功为  $dQ_L = \omega L_0 I^2 dx$ , 该微元段线路对地电容所吸收容性无功 (充电无功) 为  $dQ_C = \omega C_0 U^2 dx$ 。当两者相等时, 即  $\omega L_0 I^2 = \omega C_0 U^2$ , 可得线路传输的功率为

$$P = UI = U \sqrt{U^2 \frac{\omega C_0}{\omega L_0}} = \frac{U^2}{\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}} = \frac{U^2}{Z_c} = P_n$$

即此时线路传输的功率就是线路的自然功率。这说明, 线路在传输自然功率时, 线路本身不需要从系统吸取或向系统提供无功功率。当线路输送的功率大于自然功率时, 线路电感所消耗的无功功率大于线路电容所发出的无功功率, 此时线路末端的电压将低于送端的电压, 需用串联电容器的方法来补偿线路电感所消耗的无功功率, 以降低线路的电压损耗。当线路输送的功率小于自然功率时, 线路电感所消耗的无功功率小于线路电容所发出的无功功率, 此时线路末端的电压将高于送端的电压, 需用并联电抗器的方法来补偿线路电容发出的无功功率, 以抑制线路末端电压升高。

当线路的波阻抗确定后, 线路输送的自然功率和输电电压的平方成正比, 所以提高输电电压是提高线路输电能力的有效措施。以 1000kV 的特高压输电为例, 其输送的自然功率可以是 500kV 超高压输电的 4 倍。当输电电压确定后, 线路输送的自然功率仅和线路波阻抗相关, 此时降低波阻抗可以提高线路输送的自然功率, 例如采用分裂导线、紧凑型线路或电缆线路。但由于波阻抗只是线路单位长度电感和电容的函数, 所以对相同结构的线路来说, 长线路和短线路所能输送的自然功率是一样的, 即线路所能输送的自然功率与线路长度无关。

### 三、空载线路的电压分布

空载线路末端电压升高是远距离交流输电必须解决的问题。由式 (10-11) 和式 (10-12) 可求得线路末端开路 ( $I_2 = 0$ ) 时, 沿线电压分布为

$$\dot{U}_x = \dot{U}_2 \cos \alpha x = \dot{U}_1 \frac{\cos \alpha x}{\cos \alpha l} \quad (10-15)$$

线路末端电压和首端电压间的关系为

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cos \alpha l \quad \text{或} \quad \dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_1}{\cos \alpha l} \quad (10-16)$$

式 (10-15) 表明无损空载长线沿线电压按余弦规律分布。图 10-2 绘制了线路长度分别为 200、300、400、600km 无补偿空载长线的沿线电压分布图。由图可见, 线路末端电压最高, 且末端电压随线路长度的增长而加大, 沿线电压

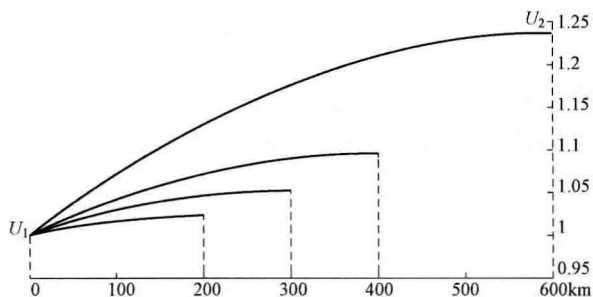


图 10-2 空载长线沿线电压分布

也随线路长度的增长而加大。

有时为了便于计算和分析,也可将线路用集中参数阻抗的电路来代替。当长线末端开路时,从首端向线路看去,线路可等值为一个阻抗  $Z_{BK}$ ,即等值为末端开路的首端入口电抗。由式(10-12)可知

$$Z_{BK} = \frac{\dot{U}_{1(I_2=0)}}{\dot{I}_{1(I_2=0)}} = \frac{\cos \alpha l}{j \frac{\sin \alpha l}{Z_c}} = -jZ_c \cot \alpha l \quad (10-17)$$

由式(10-16)可以看出,当  $\alpha l = \frac{\pi}{2}$  时,线路末端电压可以上升到无穷大,此时相应的

线路长度  $l = \frac{\pi}{2\alpha} = \frac{\pi}{2} \times \frac{v}{\omega} = 1500$  (km),即为工频波长的  $1/4$ ,称为  $1/4$  波长谐振。上述空载长线末端电压高于首端电压的现象称为电容效应(或法拉第效应),是由长线线路电容电流流经电感所引起的。法拉第效应所引起的工频电压升高(称为工频过电压)会对线路绝缘造成危害,必须采取措施加以限制。采用并联电抗器对线路电容进行补偿是限制长线工频过电压的主要手段。

**【例 10-1】** 已知一条 400km 的 500kV 超高压长线路(参见图 10-1),  $L_0 = 0.89\text{mH/km}$ ,  $C_0 = 16.1\text{nF/km}$ ,忽略线路电阻和泄漏导纳,末端开路。试求:

- (1) 线路末端(2端)与首端(1端)相对地电压幅值大小之比;
- (2) 线路沿线相对地电压分布。

**解** (1) 在式(10-12)中令  $l = 400\text{km}$ ,  $\dot{I}_2 = 0$  (末端开路),则有

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\cos(\omega l \sqrt{L_0 C_0})} = \frac{1}{\cos(100\pi \times 400 \times \sqrt{0.89 \times 10^{-3} \times 16.1 \times 10^{-9}})} = 1.125$$

(2) 由式(10-11)可得线路沿线电压分布为

$$\frac{U_x}{U_1} = \frac{U_x}{U_2} \frac{U_2}{U_1} = 1.125 \cos(\omega x \sqrt{L_0 C_0}) = 1.125 \cos(0.001189x)$$

根据上面计算结果,即可画出 400km 线路的沿线电压分布。

#### 四、远距离输电线路的功率—电压特性

线路空载时的电压分布已在前面阐述,这里介绍的是线路受端接有不同功率因数负荷时的功率—电压特性。

给定受端负荷为  $P_2 - jQ_2$ ,则有

$$\dot{I}_2 = \frac{P_2 - jQ_2}{\dot{U}_2}$$

代入式(10-12)可得

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cos \alpha l + jZ_c \sin \alpha l \left( \frac{P_2 - jQ_2}{\dot{U}_2} \right) \quad (10-18)$$

对于任意给定的受端负荷和送端电压,可由式(10-18)求出受端电压。图 10-3 给出的是在送端电压  $U_1$  固定的情况下,受端电压  $U_2/U_1$  和受端负荷  $P_2/P_n$  之间的关系曲线。

由图 10-3 可以看出:①对应于每个负荷功率因数,都有一个固有的最大传输功率极限。②低于最大传输功率极限值运行时可以有二个不同的电压值,正常运行时电压应取较高

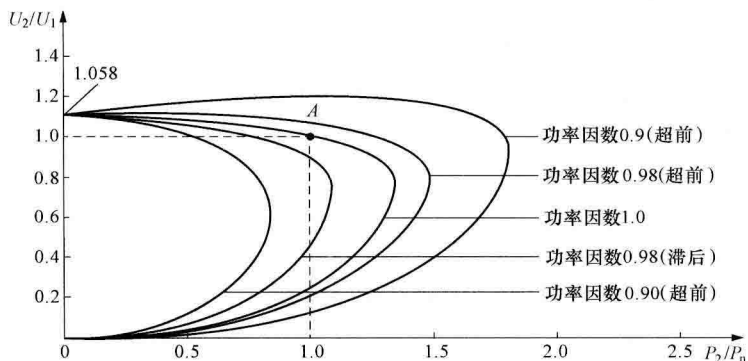


图 10-3 送端电压固定时, 线路的电压—功率特性

的值, 即应限制在 1.0pu 左右的较小范围内。③负荷功率因数对电压  $U_2$  和最大传输功率极限有明显的影响。当受端为感性负荷时, 最大传输功率极限和  $U_2$  均较小; 当受端为容性负荷时, 最大传输功率极限和  $U_2$  较高, 而且  $U_2$  随  $P_2$  的变化比较平稳。据此可知, 在受端安装并联电容器或静止式动态无功功率补偿装置 (SVC) 补偿, 将能较好地调节电压, 提高输送功率极限。

### 五、并联电抗器

在远距离输电时, 为补偿线路电容而普遍装设并联电抗器。直接装设在超 (特) 高压线路上的并联电抗器, 在工程上称为高抗, 其主要功能是补偿线路的容抗、限制线路工频过电压、配合中性点小电抗抑制潜供电流等。超 (特) 高压电网中的并联电抗器亦可设计为 220、110kV 或 35kV 电压等级, 分别接至超 (特) 高压变压器的中压和低压第三绕组上, 后者在工程上称为低抗。低抗的主要作用是调节线路无功潮流。

#### 1. 对空载长线末端电压的限制

采用并联电抗器对超 (特) 高压线路电容进行补偿是限制长线工频过电压的主要手段。并联电抗器可以设置在线路的一端、两端或者中部。下面以图 10-4 所示电抗器 (感抗为  $X_L$ ) 接在无损线路末端为例来进行分析。将图 10-4 的线路和并联电抗器分别用无源二端口网络代替, 得到图 10-5 所示长线路的复合无源二端口网络。

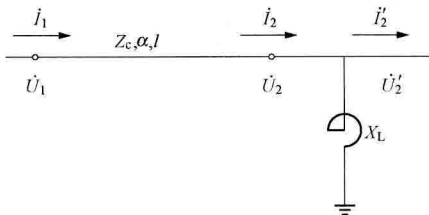


图 10-4 无损线路末端接有并联电抗器

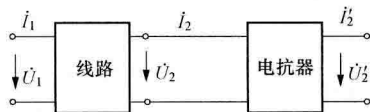


图 10-5 长线路的复合无源二端口网络

写出并联电抗器的二端口网络表达式

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{jX_L} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2' \\ \dot{I}_2' \end{bmatrix} \quad (10-19)$$

将式 (10-19) 代入线路二端口网络表达式 (10-11) 得

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{U}_x \\ \dot{I}_x \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \alpha x & jZ_c \sin \alpha x \\ j\frac{1}{Z_c} \sin \alpha x & \cos \alpha x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{jX_L} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}'_2 \\ \dot{I}'_2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \alpha x + \frac{Z_c}{X_L} \sin \alpha x & jZ_c \sin \alpha x \\ j\left(\frac{\sin \alpha x}{Z_c} - \frac{\cos \alpha x}{X_L}\right) & \cos \alpha x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}'_2 \\ \dot{I}'_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10-20)$$

因  $\dot{I}'_2 = 0$ ,  $\dot{U}'_2 = \dot{U}_2$ , 所以有

$$\dot{U}_x = \left( \cos \alpha x + \frac{Z_c}{X_L} \sin \alpha x \right) \dot{U}_2 \quad (10-21)$$

$$\dot{U}_1 = \left( \cos \alpha l + \frac{Z_c}{X_L} \sin \alpha l \right) \dot{U}_2 \quad (10-22)$$

于是可得

$$\dot{U}_x = \frac{\cos \alpha x + \frac{Z_c}{X_L} \sin \alpha x}{\cos \alpha l + \frac{Z_c}{X_L} \sin \alpha l} \dot{U}_1 \quad (10-23)$$

取  $\tan \beta = \frac{Z_c}{X_L}$ , 式 (10-23) 可简化为

$$\dot{U}_x = \frac{\cos(\alpha x - \beta)}{\cos(\alpha l - \beta)} \dot{U}_1 \quad (10-24)$$

线路末端电压为

$$\dot{U}_2 = \frac{\cos \beta}{\cos(\alpha l - \beta)} \dot{U}_1 \quad (10-25)$$

根据式 (10-24) 即可作出电压沿线路的分布曲线, 如图 10-6 所示。由式 (10-24) 并可知当  $\alpha x - \beta = 0$  时, 将出现最大电压  $U_m$ , 即最大电压出现在离线路末端  $x = \beta/\alpha$  处, 其值为

$$U_m = \frac{U_1}{\cos(\alpha l - \beta)} \quad (10-26)$$

与式 (10-16) 相比可知, 当线路末端有电抗器时, 线路出现的最高电压比无电抗器时要低。

显然, 并联电抗器调整电压的作用与电抗器的容量  $Q_L$  以及所补偿长线电容的无功功率  $Q_C$  有关。 $Q_L$  和  $Q_C$  的比值称为补偿度, 用  $T_K$  表示, 可得

$$\begin{aligned} T_K &= \frac{Q_L}{Q_C} = \frac{U_N^2/X_L}{U_N^2 \omega C_0 l} = \frac{1}{X_L \omega C_0 l} \\ &= \frac{\sqrt{L_0/C_0}}{X_L} \times \frac{1}{\omega \sqrt{L_0 C_0} l} = \frac{Z_c}{X_L} \times \frac{1}{\alpha l} = \frac{\tan \beta}{\alpha l} \end{aligned} \quad (10-27)$$

式中:  $U_N$  为线路的额定电压。

**【例 10-2】** 在 [例 10-1] 中的线路末端接入一感抗值为  $970\Omega$  的高抗, 求此时的末端

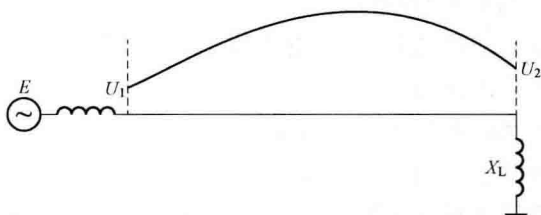


图 10-6 末端有并联电抗器时线路的沿线电压分布

电压与首端电压之比 (忽略线路无功损耗) 以及沿线最高电压和首端电压之比。

解  $\lambda = \alpha l = \omega l \sqrt{L_0 C_0} = 100\pi \times 400 \sqrt{0.89 \times 10^{-3} \times 16.1 \times 10^{-9}} = 0.4757(\text{rad})$

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = \sqrt{\frac{0.89 \times 10^{-3}}{16.1 \times 10^{-9}}} = 235(\Omega)$$

$$\beta = \arctan \frac{235}{970} = 0.2377(\text{rad})$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\cos 0.2377}{\cos(0.4757 - 0.2377)} = 1.0$$

$$\frac{U_m}{U_1} = \frac{1}{\cos(0.4757 - 0.2377)} = 1.029$$

可见, 本例中在线路末端并入电抗器后, 空载线路末端电压降至与首端电压相等。沿线电压最高值从首端电压的 1.125 倍 (见例 10-1) 降低为 1.029 倍。

## 2. 对潜供电流的抑制

在超 (特) 高压输电线路运行中, 时常会发生因雷击闪络等原因所产生的单相电弧接地故障。在具有单相重合闸的线路中, 当故障相被切除后, 通过健全相对故障相的静电和电磁耦合, 在接地电弧通道中仍将流过不大的感应电流, 称为潜供电流或二次电流。潜供电流的存在可能会使单相重合闸失败。为此, 在超 (特) 高压输电线路中, 要采用在并联电抗器中性点加小电抗的潜供电流补偿方法来减小潜供电流, 使接地电弧迅速熄灭, 以保证单相重合闸的成功。

参看图 10-7, 图中 A、B 相为健全相, C 相为故障相。由于电源中性点是接地的, 所以当 C 相导线在靠近电源端的 k 点发生电弧接地时, 在 C 相线路两端的断路器跳闸后, A 相和 B 相电源将经过该两相导线和 C 相导线间的互部分电容  $C_{13}$  和  $C_{23}$  对 C 相接地电弧供电, 这叫潜供电流的横分量 (即静电分量)。同时, A 相和 B 相导线电流  $\dot{I}_A$  和  $\dot{I}_B$  会通过该两相导线与 C 相导线间的互感  $M_{13}$  和  $M_{23}$  在 C 相导线上感应出电动势  $E$ , 这个电动势  $E$  将通过 C 相导线右端的  $C_{33}$  向 k 点的接地电弧供电, 这叫潜供电流的纵分量 (即电磁分量)。于是接地电弧将不能自熄。为消除潜供电流的横分量, 可在线间加一组合适的 D (三角形) 连接的电抗器用以补偿线间互部分电容, 也可以用一组中性点不接地的 Y (星形) 连接的等值电抗器来代替。为消除潜供电流的纵分量, 需在各相导线首末端对地间各加一组合适的中性点接地的 YN 连接 (星形连接并有中性线引出) 的电抗器, 用以补偿导线对地的自部分电容。为了方便, 这些 Y 连接的和 YN 连接的电抗器又可简化合并为中性点对地加装小电抗器 (感抗为  $X_n$ ) 的 Y 连接的电抗器, 如图 10-8 所示。

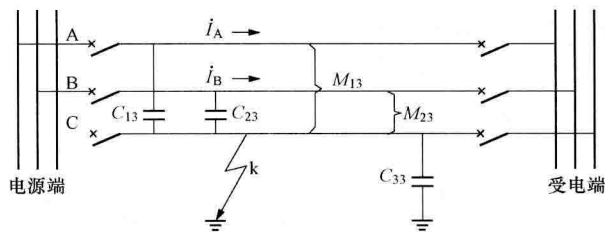


图 10-7 潜供电流示意图

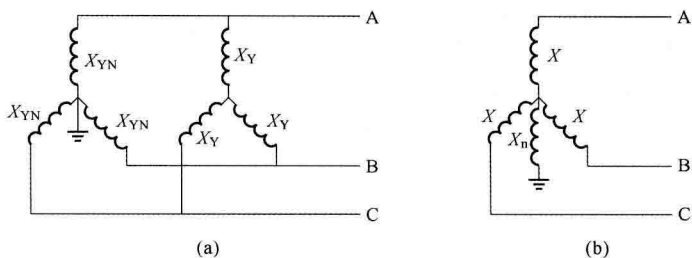


图 10-8 计算各序电抗器

(a) 电路图; (b) 等效电路

不难看出, 对于三个单相电抗器而言, 图 10-8 (a) 中所示的 YN 连接与 Y 连接的电抗器并联后的正序电抗为  $X_1 = X_{YN} X_Y / (X_{YN} + X_Y)$ , 而其零序电抗为  $X_0 = X_{YN}$ 。如用图 10-8 (b) 来等效代替图 10-8 (a), 则图 10-8 (b) 中  $X$  的值应为

$$X = X_1 = X_{YN} X_Y / (X_{YN} + X_Y) \quad (10-28)$$

$X_n$  的值可由  $X_0 = X + 3X_n = X_{YN}$  求出, 即

$$X_n = \frac{1}{3}(X_0 - X) = \frac{1}{3}[X_{YN} - X_{YN} X_Y / (X_{YN} + X_Y)] \quad (10-29)$$

因此, 采用图 10-8 (b) 的并联电抗器 (电抗为  $X$ ) 中性点加小电抗器 (电抗为  $X_n$ ) 的方法可有效减小单相电弧接地故障时的潜供电流, 使单相重合闸的成功率大为提高。

## 第二节 高压直流输电

目前, 高压直流输电已发展为一种重要的远距离传输电能的形式。随着大功率电力电子器件的不断改进和完善, 直流输电系统的可靠性将越来越高, 经济性也越来越好。

### 一、高压直流输电的基本概念

高压直流输电系统主要包括换流站 (包括整流站和逆变站) 和直流线路两大部分。图 10-9 为其接线示意图, 图中系统 I 为送端系统, 系统 II 为受端系统。直流输电是指在送端换流站将送端系统的正弦交流电经换流变压器升压后, 由整流器整流, 通过直流线路传输到受端换流站, 由逆变器逆变成正弦工频交流后, 再经换流变压器降压与受端系统相连。换流站的整流和逆变功能借晶闸管阀系统来实现。高压直流输电系统中换流站出线端对地电位为正的称为正极, 与之相连的导线称为正极导线 (或线路); 对地电位为负的则称为负极。

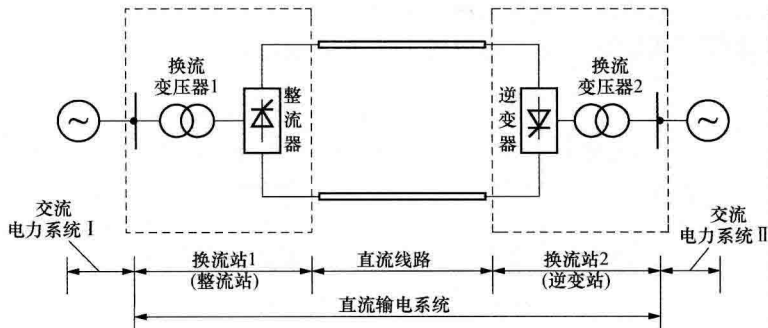


图 10-9 直流输电系统接线示意图