

电气工程基础

陈慈萱 主编

电气工程基础（下册）

电气工程基础



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

陈慈萱 主编

电气工程基础 (下册)



中国电力出版社出版

(北京市西城区百万庄大街24号 100037)

中国电力出版社北京

印刷厂印刷

中国电力出版社北京 100037

100037 中国电力出版社北京



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

中国电力出版社

MAH 43/03

内 容 提 要

本书分为上、下册，上册主要讨论：电力系统组成的特点和接线方式，电力系统中的负荷和主设备元件，电力系统在稳态或故障时分析计算的基本方法，电力系统稳定的基本概念。下册主要讨论：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，通信原理和监控技术以及电力系统设计的基本方法。本书作为高等学校电气工程类专业的教学用书，也可供与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. —北京: 中国电力出版社, 2004

ISBN 7-5083-2007-7

I. 电... II. 陈... III. 电气工程 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 003916 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2004 年 2 月第一版 2004 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 18.25 印张 410 千字

印数 0001—4000 册 定价 27.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

委员会名单

电气工程基础 (下册)

主 编 陈慈萱

编委 向铁元 刘涤尘 关根志 陈柏超

肖军华 张元芳 张承学 陈丽华

陈昆薇 殷小贡 谈顺涛

主 审 陈允平

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，是在学习电工基础、电机学、电子技术、计算机技术等基础知识后的一门大型专业平台课。

本课程以电能的生产和输送为纲，以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、基本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对相关专业的选择和学习打下基础。

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（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。陈慈董编写了第 3、11、12 章并对全书进行统稿。陈允平主审了全书，并提出许多宝贵意见。

本书是由武汉大学电气工程学院组织编写，得到了全院教师的大力支持。谈顺涛教授在本书的编写和统稿过程中做了大量协调工作。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，提出了许多修改意见。在此一并表示衷心的感谢。

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 12 月

目 录

电气工程基础(下册)

前言

10 远距离输电	305
10.1 交流远距离输电	305
10.2 并联电抗器的作用	309
10.3 高压直流输电	312
10.4 灵活交流输电系统	320
本章小结	325
思考题与习题	325
11 电力系统内部过电压	327
11.1 概述	327
11.2 操作过电压	328
11.3 谐振过电压	337
11.4 电压互感器饱和过电压	347
本章小节	352
思考题与习题	353
12 电力系统防雷保护	354
12.1 雷电过电压的成因及其特点	354
12.2 防雷保护装置	360
12.3 架空输电线路防雷	370
12.4 变电站防雷	373
12.5 配电变压器防雷	375
12.6 电力系统接地	377
本章小节	380
思考题与习题	381
13 电力系统继电保护	382
13.1 继电保护的基本原理	382
13.2 输电线路的继电保护	386
13.3 电力变压器的继电保护	408

本章小节	414
思考题与习题	414
14 发电厂变电所的控制与信号系统	416
14.1 电气二次回路	416
14.2 控制回路和信号回路常用低压电器	420
14.3 高压断路器的控制回路	423
14.4 高压隔离开关的电动操作与闭锁	426
14.5 信号及测量回路	427
14.6 发电厂变电所的操作电源	429
本章小节	435
思考题与习题	435
15 电力系统通信	437
15.1 概述	437
15.2 数字通信原理	441
15.3 光纤通信	449
15.4 微波中继通信	459
15.5 电力线载波通信	467
15.6 电力系统远动及其规约	474
15.7 电力通信网络技术	478
本章小节	485
思考题与习题	487
16 电力系统自动控制技术	488
16.1 概述	488
16.2 电力系统调度自动化	492
16.3 电力系统典型自动控制装置	503
16.4 配电网自动化	527
本章小节	537
思考题与习题	538
17 变电所电气部分课程设计	540
17.1 设计程序	540
17.2 主接线的选择	542
17.3 电气设备的选择	546
17.4 互感器及接地开关的配置原则	555
17.5 防雷装置的配置原则	557
17.6 绝缘的选择	558
17.7 配电装置的选择	563

附录 I	导线常用规格及载流量	570
附录 II	架空线路和电缆线路参数	572
附录 III	矩型、槽型导体长期允许载流量	575
附录 IV	开关电器技术参数	576
附录 V	电抗器技术数据	578
附录 VI	电力变压器技术数据	579
参考文献		586

远 距 离 输 电

将电能从大型火力、水力等发电厂输送到远方负荷中心地区时会遇到远距离输电问题。要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和直流两种方案,可根据技术经济条件和自身电气特点加以选择。超高压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。超高压直流输电不存在同步稳定性问题,是大区域电网互联的理想方式,但直流输电系统造价高、中间抽能困难。

10.1 交流远距离输电

这里所说的远距离一般指 300km 以上。由于 50Hz 工频交流电的 $1/4$ 波长为 1500km,与远距离输电线路长度的数量级接近或相当,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

一长度为 l km 的单导体长线如图 10-1 (a) 所示,设线路单位长度电阻、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 ,则微元段 dx 的等效电路如图 10-1 (b) 所示。

根据基尔霍夫电压定律,由图 10-1 (b) 有

$$u + du = iR_0dx + L_0dx \frac{\partial i}{\partial t} + u \quad (10-1)$$

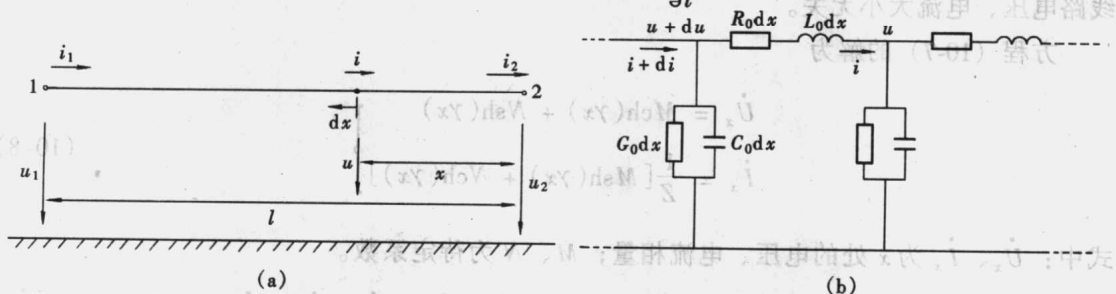


图 10-1 单导体长线及微元等效电路示意图

(a) 单导体线路示意图; (b) 微元等效示意图

同理，由基尔霍夫电流定律得

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

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

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

对于电压、电流均为正弦波的稳态情况，式 (10-3) 可改写为

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

将方程组 (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

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

由方程组 (10-4) 中的第一式得电流表达式为

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

$$\text{令 } \gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} = \beta + ja, Z = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} = R + jX$$

则式 (10-5) 和式 (10-6) 可表示为

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

式中： γ 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、电流大小无关。

方程 (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： $\dot{U}_x$ 、 $\dot{I}_x$ 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



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

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

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位。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

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

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

对于一般的交流远距离输电线路, 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 $R_0 = 0$, $G_0 = 0$, 据此可把导线的传播系数 γ 和波阻抗 Z 简化为

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

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

$$v = 1 / \sqrt{L_0 C_0}$$

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

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

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

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) 有

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

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) 不难推导出

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

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

当 $P_* = 1$, 即 $P = P_n$, 则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。这说明, 超高压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。为此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, 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, 此时线路末端电压将高于送端的电压。为此, 需用并联电抗器的方法来补偿线路电容发出的无功, 抑制电压升高。

三、空载线路的电压分布

空载线路末端电压升高是交流远距离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

$$\dot{U}_x = \dot{U}_2 \cos ax = \dot{U}_1 \frac{\cos ax}{\cos al} \quad (10-15)$$

线路末端电压和首端电压间的关系为

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

式(10-15) 表明无损空载长线沿线电压按余弦规律分布, 如图 10-2 所示。



图 10-2 空载长线沿线电压分布

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} , 即末端开路的首端入口电抗。从式(10-12) 可知

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

由式 (10-16) 可以看出, 当 $\alpha l = \frac{\pi}{2}$ 时, 末端电压可以上升到无穷大, 此时有 $Z_{BK} = 0$, 相应的架空线路长度为 $l = \frac{\pi}{2\alpha} = \frac{\pi}{2} \frac{v}{\omega} = 1500\text{km}$, 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 (或法拉蒂效应), 是由长线路电容电流流经电感所引起的。法拉蒂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, 应采取措施加以限制。采用超高压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】 有一 400km 的 500kV 超高压长线路 (参见图 10-1), 已知 $L_0 = 0.89\text{mH/km}$, $C_0 = 16.1\text{nF/km}$, 忽略线路电阻和泄漏导纳, 末端开路。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

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

(2) 由式 (10-11) 可得线路沿线电压分布为

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

根据上面计算结果, 线路沿线电压分布如图 10-3 所示。

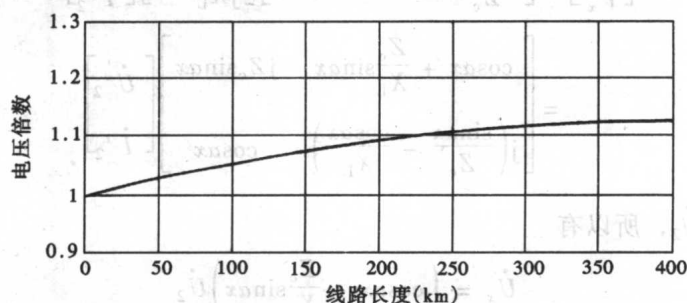


图 10-3 [例 10-1] 的计算结果

10.2 并联电抗器的作用

在超高压线路中, 为补偿导线电容, 普遍装设并联电抗器。500kV 超高压并联电抗器是超高压电网中重要的无功补偿设备, 工程上称为高抗, 其主要功能是限制线路工频过电压、补偿线路电容无功、配合中性点小电抗抑制潜供电流等。超高压电网中并联电抗器亦可设计为 220kV、110kV 或 35kV 电压等级, 分别接至超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。

一、对空载长线末端电压的限制

为了补偿长线的电容效应, 限制工频过电压升高, 在超高压远距离输电线路中一般都设置有并联电抗器, 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 所示电抗器接在空载线路末端为例来进行分析。将线路和并联电抗器分别用无源二端口网络代替, 如图 10-5 所示。写出并联电抗器的二端口网络表达式。

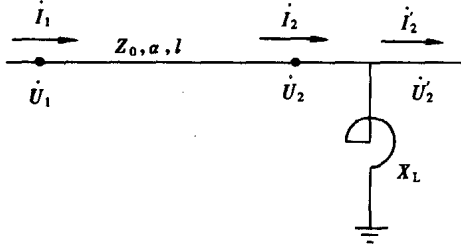


图 10-4 无损线路末端接有并联电抗器

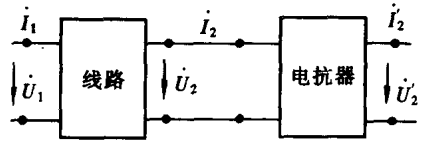


图 10-5 长线路的复合无源二端口网络

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{jX_L} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}'_2 \\ \dot{I}'_2 \end{bmatrix} \quad (10-18)$$

将式 (10-18) 代入线路二端口网络表达式 (10-11) 得

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{U}_x \\ \dot{I}_x \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \alpha x & jZ_c \sin \alpha x \\ j\frac{1}{Z_c} \sin \alpha x & \cos \alpha x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{jX_L} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}'_2 \\ \dot{I}'_2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \alpha x + \frac{Z_c}{X_L} \sin \alpha x & jZ_c \sin \alpha x \\ j\left(\frac{\sin \alpha x}{Z_c} - \frac{\cos \alpha x}{X_L}\right) & \cos \alpha x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}'_2 \\ \dot{I}'_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10-19)$$

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

$$\dot{U}_x = \left(\cos \alpha x + \frac{Z_c}{X_L} \sin \alpha x \right) \dot{U}_2 \quad (10-20)$$

$$\dot{U}_1 = \left(\cos \alpha l + \frac{Z_c}{X_L} \sin \alpha l \right) \dot{U}_2 \quad (10-21)$$

于是可得

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

取 $\operatorname{tg} \beta = \frac{Z_c}{X_L}$, 式 (10-22) 可简化为

$$\dot{U}_x = \frac{\cos(ax - \beta)}{\cos(al - \beta)} \dot{U}_1 \quad (10-23)$$

线路末端电压为

$$\dot{U}_2 = \frac{\cos\beta}{\cos(al - \beta)} \dot{U}_1 \quad (10-24)$$

根据式 (10-23) 即可作出电压沿线路的分布曲线如图 10-6 所示。并可知当 $ax - \beta = 0$ 时, 将出现最大电压 U_m , 即最大电压出现在离线路末端 $x = \beta/a$ 处, 其值为

$$U_m = \frac{U_1}{\cos(al - \beta)} \quad (10-25)$$

与式 (10-16) 相比可知, 当线路末端有电抗器时, 线路上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

$$\begin{aligned} T_k &= \frac{Q_L}{Q_C} = \frac{U_N^2/X_L}{U_N^2\omega C_0 l} = \frac{1}{X_L\omega C_0 l} \\ &= \frac{\sqrt{L_0/C_0}}{X_L} \frac{1}{\omega \sqrt{L_0 C_0} l} = \frac{Z_c}{X_L} \frac{1}{al} = \frac{\operatorname{tg}\beta}{al} \end{aligned} \quad (10-26)$$

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 970Ω 的高抗, 求此时的末端电压与首端电压之比 (忽略线路有功损耗)。

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

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

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

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

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。

二、对潜供电流的抑制

在超高压线路运行中, 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, 称为潜供电流或称二次电流。潜供电流的存在可能会使单相重合闸失败。为此, 在超高压远距离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式来减小潜供电流, 使接地电弧迅速熄灭, 以保证单相重合

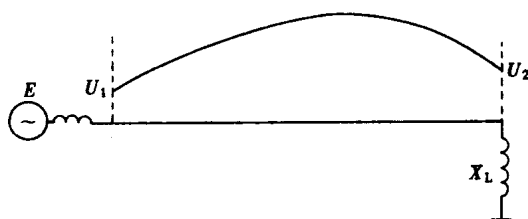


图 10-6 末端有并联电抗器时
线路的沿线电压分布

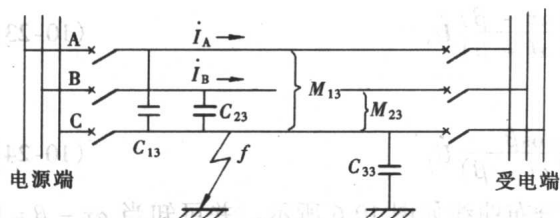


图 10-7 潜供电流示意图

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, 当 C 相导线在靠近电源端的 f 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 f 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 Δ 连接的电抗器将线间互部分电容补偿掉, 也可以用一组中性点不接地的 Y 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 连接的电抗器将导线对地的自部分电容补偿掉。为了方便, 这些 Y 连接的和 YN 连接的电抗器又可简化合并成为中性点对地加装小电抗器 X_n 的 Y 连接的电抗器, 如图 10-8 所示。

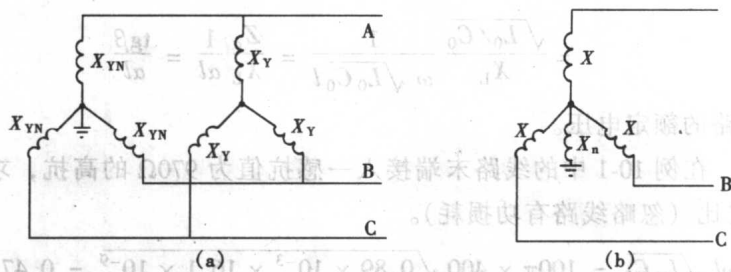


图 10-8 计算各序电抗器

(a) 电路图; (b) 等效电路

不难看出, 对三个单相电抗器来说, 图 10-8 (a) 中所示的 YN 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 $X = X_1 = X_{YN}X_Y / (X_{YN} + X_Y)$, X_n 的值可由 $X_0 = X + 3X_n = X_{YN}$ 求出, 即 $X_n = \frac{1}{3} (X_0 - X) = \frac{1}{3} [X_{YN} - X_{YN}X_Y / (X_{YN} + X_Y)]$ 。因此, 采用图 10-8 (b) 的并联电抗器中性点加小电抗器的方法可使单相重合闸的成功率大为提高。

10.3 高压直流输电

直流输电是指将送端系统的正弦交流电在送端换流站升压整流后通过直流线路传输到受端换流站, 受端换流站将直流逆变成正弦工频交流后降压和受端系统相连。换流站的整

流和逆变功能籍可控硅阀系统来实现。

与交流输电相比,直流输电具有稳定性好,控制灵活等优点,特别适合于跨海输电、大区域电网互联、远距离输电及风力发电等非工频系统与工频系统的联网等。

直流输电目前已发展为一种重要的电能传输形式。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会越来越高,经济性也会越来越好。

一、直流输电的接线方式

直流输电系统有三种基本接线方式:单极线-地直流输电、单极两线直流输电和双极直流输电。

1. 单极线-地直流输电

单极线-地直流输电如图 10-9 所示,送端、受端输电线路由一根导线(通常为负极)和大地所形成的回路组成。该接线方式比较经济,但地电流对地下埋设的金属物,如管道等,腐蚀严重。

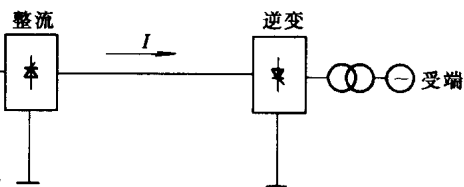


图 10-9 单极直流输电

2. 单极两线直流输电

单极两线接线方式如图 10-10 所示,其与单极线-地直流输电方式相比,无大地回流所造成的腐蚀问题,且电磁干扰小。

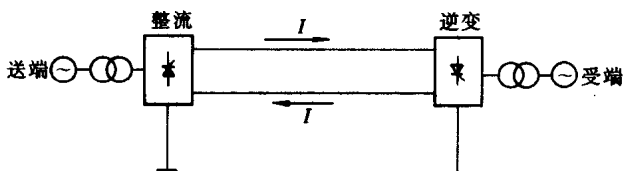


图 10-10 单极两线直流输电

3. 双极直流输电

双极直流输电系统(图 10-11)具有两条输电线,其中一根为正极性,另一根为负极性,线路两端中点接大地。当电网正常运行时,流经大地的电流为零。若某一根线路发生故障,则另一根

线路以大地为回路,还可以传输一半的电,从而提高了输电可靠性。双极直流输电是工程实际中应用得最多的接线方式。

下面在输电线路导线截面相等、对地绝缘水平相同的条件下,就双极直流输电的功率输送能力以及功率损耗方面与三相交流输电作一比较。

设双极直流输电的最大对地电压为 $\pm U_d$, 导线允许通过的电流为 I_d , 则其输送功率 P_d 为

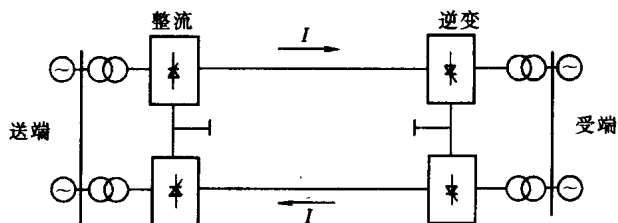


图 10-11 双极直流输电

$$P_d = 2 U_d I_d \quad (10-27)$$

不计集肤效应,在同一导线截面下,导线允许通过的交流电流有效值为 $I_a = I_d$, 而在