

电视大学 职工大学教材



# 电力系统分析

下 册

华南理工大学 方富洪

广东广播电视大学 关瑞彬 上海市电力工业局 齐家寿

合 编



## 内 容 提 要

本书是根据中央广播电视大学和电业职工大学的“电力系统及其自动化”专业教材编写讨论会所制订的“电力系统分析”课程教学大纲编写的。

全书共十六章，每章都附有小结、思考题和习题，分上、下两册出版。

下册的主要内容是：电力系统的潮流计算及其计算机算法、电力系统的频率调整与电压调整、电力系统的经济计算及运行、功角特性、静态稳定与暂态稳定的基本概念与分析方法及提高稳定的措施、交流远距离输电与直流输电的基本概念，附录中列出了供练习用的牛顿-拉夫逊法潮流计算程序。

中央广播电视大学 教材  
电 业 职 工 大 学

### 电力系统分析

(下 册)

华 南 理 工 大 学 方富祺  
广东广播电视大学 关瑞彬 合编  
上海市电力工业局 齐家寿

\*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 16.5印张 371千字

1990年10月第一版 1990年10月北京第一次印刷

印数 0001—1390册

ISBN 7-120-01145-6/TM·343

定价7.70元

# 目 录

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 第八章 电力系统潮流计算 .....                | 1   |
| 第一节 输电线路的电压降落和功率损耗 .....          | 1   |
| 第二节 输电线路的运行 .....                 | 5   |
| 第三节 变压器的电压降落和功率损耗 .....           | 12  |
| 第四节 开式电力网的潮流计算 .....              | 15  |
| 第五节 闭式电力网的潮流计算 .....              | 26  |
| 小结 .....                          | 43  |
| 思考题 .....                         | 43  |
| 习题 .....                          | 44  |
| 第九章 电力系统潮流的计算机算法 .....            | 46  |
| 第一节 概述 .....                      | 46  |
| 第二节 潮流计算的基本方程 .....               | 46  |
| 第三节 牛顿-拉夫逊法原理 .....               | 49  |
| 第四节 牛顿-拉夫逊法潮流计算 .....             | 52  |
| 第五节 PQ分解法潮流计算 .....               | 68  |
| 小结 .....                          | 74  |
| 思考题 .....                         | 74  |
| 习题 .....                          | 74  |
| 第十章 电力系统的有功功率平衡和频率调整 .....        | 75  |
| 第一节 概述 .....                      | 75  |
| 第二节 电力系统的频率静态特性 .....             | 77  |
| 第三节 电力系统的频率调整 .....               | 83  |
| 第四节 有功功率平衡和系统负荷在各类发电厂间的合理分配 ..... | 91  |
| 小结 .....                          | 94  |
| 思考题 .....                         | 95  |
| 习题 .....                          | 95  |
| 第十一章 电力系统的无功功率平衡和电压调整 .....       | 96  |
| 第一节 概述 .....                      | 96  |
| 第二节 电力系统的无功功率平衡 .....             | 97  |
| 第三节 电力系统的电压管理 .....               | 106 |
| 第四节 发电机调压 .....                   | 111 |
| 第五节 借改变变压器变比来调压 .....             | 112 |
| 第六节 借改变电力网的无功功率分布来调压 .....        | 121 |
| 第七节 按调压要求改善线路参数 .....             | 126 |
| 小结 .....                          | 133 |

---

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 思考题 .....                       | 134 |
| 习题 .....                        | 134 |
| 第十二章 电力系统的经济计算及运行 .....         | 137 |
| 第一节 概述 .....                    | 137 |
| 第二节 电力网年计算支出的计算 .....           | 137 |
| 第三节 经济电流密度 .....                | 139 |
| 第四节 电力网能量损耗的计算 .....            | 140 |
| 第五节 电力网的经济运行 .....              | 149 |
| 第六节 火电厂的经济运行 .....              | 155 |
| 第七节 水、火电厂的经济运行 .....            | 159 |
| 小结 .....                        | 160 |
| 思考题 .....                       | 161 |
| 习题 .....                        | 161 |
| 第十三章 电力系统的功角特性 .....            | 163 |
| 第一节 简单电力系统的功角特性 .....           | 163 |
| 第二节 自动励磁调节器对发电机功角特性的影响 .....    | 169 |
| 第三节 复杂电力系统的功角特性 .....           | 176 |
| 第四节 网络接线与参数对发电机功角特性的影响 .....    | 179 |
| 小结 .....                        | 190 |
| 思考题 .....                       | 190 |
| 习题 .....                        | 191 |
| 第十四章 电力系统的静态稳定 .....            | 192 |
| 第一节 静态稳定的概念 .....               | 192 |
| 第二节 电力系统电压和频率的稳定性 .....         | 195 |
| 第三节 小振荡法 .....                  | 201 |
| 第四节 自动调节励磁装置对静态稳定的影响 .....      | 203 |
| 第五节 提高静态稳定的措施 .....             | 207 |
| 小结 .....                        | 210 |
| 思考题 .....                       | 210 |
| 习题 .....                        | 211 |
| 第十五章 电力系统的暂态稳定 .....            | 212 |
| 第一节 暂态稳定计算的基本假设 .....           | 212 |
| 第二节 简单电力系统的暂态稳定 .....           | 213 |
| 第三节 简单电力系统的极限切除角——面积定则的应用 ..... | 217 |
| 第四节 应用分段计算法计算发电机转子摇摆曲线 .....    | 221 |
| 第五节 复杂电力系统的暂态稳定 .....           | 225 |
| 第六节 电力系统异步运行和再同步 .....          | 227 |
| 第七节 提高暂态稳定的措施 .....             | 229 |
| 小结 .....                        | 236 |
| 思考题 .....                       | 237 |

习题 .....237

第十六章 远距离输电.....239

第一节 概述 .....239

第二节 超高压输电线路的结构 .....240

第三节 超高压大电网的内过电压 .....241

第四节 在超高压电场下工作的人身安全 .....242

第五节 超高压输电线路的输送容量 .....243

第六节 超高压输电线路对邻近电力线路的感应和对周围环境的影响 .....243

第七节 超高压直流输电 .....244

小结 .....249

思考题 .....249

习题 .....249

附录 牛顿-拉夫逊法潮流计算程序 .....250

## 第八章 电力系统潮流计算

### 第一节 输电线路的电压降落和功率损耗

电力系统运行时, 发电机发出的有功功率和无功功率通过输电线路和变压器输送、分配给用户使用, 这时在线路和变压器上会产生功率损耗和电压降落。通常将电力系统的功率分布和电压计算称为潮流计算。

#### 一、输电线路的电压降落

图 8-1 所示的一条均匀分布参数的输电线路可用一个对称  $\Pi$  型的集中参数等值电路来表示。在推导方程时假定采用标么制, 各电量均略去下标, 并以一相的等值电路来计算三相电路。

设已知线路末端电压  $\dot{U}_2$  和感性负荷电流  $\dot{I}$ , 根据电路原理, 可以写出下列方程:

线路末端导纳中的电流为

$$\dot{I}_{s2} = \dot{I}_2 + \dot{I}_{c2} = \dot{U}_2 \frac{G}{2} + j\dot{U}_2 \frac{B}{2} \quad (8-1)$$

线路末端的电流为

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_{s1} \quad (8-2)$$

该电流在线路阻抗上造成的电压降落为

$$\Delta\dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = (R + jX)\dot{I}_1 \quad (8-3)$$

线路始端的电压和电流分别为

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \Delta\dot{U} \quad (8-4)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_{s1} + \dot{I}_{c1} = \dot{I}_2 + \dot{U}_1 \frac{G}{2} + j\dot{U}_1 \frac{B}{2} \quad (8-5)$$

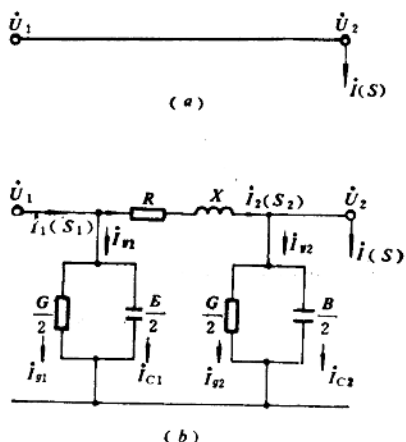


图 8-1 输电线路的等值电路  
(a) 分布参数输电线路; (b) 集中参数等值电路

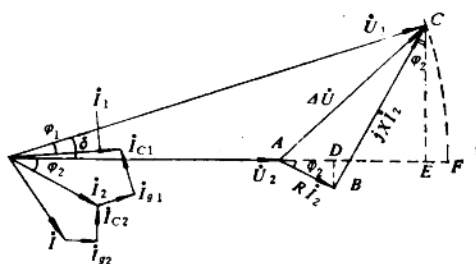


图 8-2 输电线路的电流、电压相量图

以线路末端电压  $\dot{U}_2$  为参考相量, 根据上述各式可相应画出线路的电流和电压相量图, 如图 8-2 所示。图中线段  $\overline{AC}$  定义为输电线路的电压降落  $\Delta\dot{U}$ , 它表示线路始端和末端电压的相量差。电压降落  $\Delta\dot{U}$  在电压相量  $\dot{U}_2$  上的投影  $\overline{AE}$  定义为电压降落纵分量  $\Delta U_2$ 。它的大小等于

$$\Delta U_2 = RI_2 \cos \varphi_2 + XI_2 \sin \varphi_2 \quad (8-6)$$

在与  $\dot{U}_2$  垂直方向的投影  $\overline{CE}$  定义为电压降落横分量  $\delta \dot{U}_2$ 。它的大小等于

$$\delta U_1 = X I_1 \cos \varphi_1 - R I_1 \sin \varphi_1 \quad (8-7)$$

显然, 电压降落为

$$\Delta \dot{U} = \Delta \dot{U}_1 + \delta \dot{U}_1 \quad (8-8)$$

在实际的工程计算中, 负荷通常是用功率来表示的, 对应负荷电流  $\dot{I}_2$  的功率为  $S_2$ , 故有

$$\begin{aligned} S_2 &= \dot{U}_2 \dot{I}_2^* = P_2 + jQ_2 \\ &= U_2 I_2 \cos \varphi_2 + j U_2 I_2 \sin \varphi_2 \end{aligned} \quad (8-9)$$

将式(8-6)、(8-7)的右部同时分别乘以  $U_2/U_2$ , 则可改写为

$$\Delta U_2 = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} \quad (8-10)$$

$$\delta U_2 = \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2} \quad (8-11)$$

将式(8-10)、(8-11)代入式(8-4), 可得线路的始端电压为

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} + j \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2} = U_1 \angle \delta \quad (8-12)$$

它的模和相角分别为

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_2)^2 + (\delta U_2)^2} \quad (8-13)$$

$$\delta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\delta U_2}{U_2 + \Delta U_2} \quad (8-14)$$

式中  $\delta$  —— 线路始端和末端电压相量的相位差。

近似计算时, 可取

$$U_1 = U_2 + \Delta U_2 \quad (8-15)$$

若已知线路的始端电压  $\dot{U}_1$  和电流  $\dot{I}_2$ , 并以  $\dot{U}_1$  相量为参考相量, 经类似推导可得

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = (R + jX) \dot{I}_2 = \Delta \dot{U}_1 + \delta \dot{U}_1 \quad (8-16)$$

$$S_1 = \dot{U}_1 \dot{I}_2^* = P_1 + jQ_1 = U_1 I_2 \cos \varphi_1 + j U_1 I_2 \sin \varphi_1 \quad (8-17)$$

$$\Delta U_1 = \frac{P_1 R + Q_1 X}{U_1} \quad (8-18)$$

$$\delta U_1 = \frac{P_1 X - Q_1 R}{U_1} \quad (8-19)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= \dot{U}_1 - \Delta \dot{U} = \dot{U}_1 - \frac{P_1 R + Q_1 X}{U_1} - j \frac{P_1 X - Q_1 R}{U_1} \\ &= U_2 \angle -\delta \end{aligned} \quad (8-20)$$

$$U_2 = \sqrt{(U_1 - \Delta U_1)^2 + (\delta U_1)^2} \quad (8-21)$$

$$\delta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\delta U_1}{U_1 - \Delta U_1} \quad (8-22)$$

电压降落相量  $\Delta \dot{U}$  在电压  $\dot{U}_2$  和  $\dot{U}_1$  参考相量上的两种分解方法的相量图如图 8-3 所示。

由图可见:  $\Delta U_1 \approx \Delta U_2$ ,  $\delta U_1 \approx \delta U_2$ , 但对电压降落  $\Delta \dot{U}$  来说, 两种方法的计算结果是没有差别的。

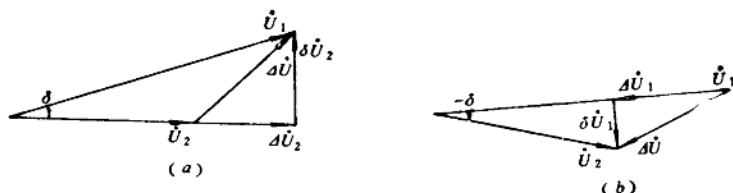


图 8-3 电压降落  $\Delta \dot{U}$  的两种分解方法  
(a) 以  $\dot{U}_2$  为参考相量; (b) 以  $\dot{U}_1$  为参考相量

近似计算时, 线路末端电压可取

$$U_2 = U_1 - \Delta U_1 \quad (8-23)$$

若线路末端负荷为容性, 则上述各式中的无功功率  $Q$  应改变符号。

除了电压降落、电压降落纵分量和横分量这些术语外, 在实际应用中常采用电压损耗和电压偏移的概念。所谓电压损耗是指线路始末两端电压绝对值之差, 用  $\Delta U$  表示, 如在图 8-2 中

$$\Delta U = U_1 - U_2 = \overline{AF} \quad (8-24)$$

由图可见, 当相位差  $\delta$  不大时, 电压损耗  $\overline{AF}$  近似等于电压降落纵分量  $\overline{AE}$ 。衡量电压质量的指标是电压偏移, 电网中某节点的实际电压值  $U$  与电网额定电压值  $U_N$  之差称为该节点的电压偏移, 常用百分值表示, 即

$$\text{电压偏移}(\%) = \frac{U - U_N}{U_N} \times 100(\%) \quad (8-25)$$

电压偏移可能是正值或是负值, 它的大小直接影响用户设备的运行情况。通过电网的电压损耗计算, 可以求得电网中各节点的电压偏移, 从而采取电压调整措施, 力求保证用户在较好的电压水平下运行。

## 二、输电线路的功率损耗

电流通过输电线路的电阻  $R$  和电导  $G$  时会产生有功功率损耗。

线路电阻中的有功功率损耗为

$$\Delta P_L = I_1^2 R = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} R = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} R \quad (8-26)$$

线路始端和末端电导中的有功功率损耗分别为

$$\Delta P_{G1} = U_1^2 \frac{G}{2} \quad (8-27)$$

$$\Delta P_{G2} = U_2^2 \frac{G}{2} \quad (8-28)$$

电流通过输电线路的电抗  $X$  和电纳  $B$  时会产生无功功率损耗。

线路电抗中的无功功率损耗为

$$\Delta Q_L = I_1^2 X = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} X = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} X \quad (8-29)$$

线路始端和末端电纳中的无功功率损耗为负值，即消耗容性无功功率或相当产生感性的无功功率

$$\Delta Q_{B1} = -U_1^2 \frac{B}{2} \quad (8-30)$$

$$\Delta Q_{B2} = -U_2^2 \frac{B}{2} \quad (8-31)$$

若用有名制计算时，习惯采用三相功率和线电压，在式(8-10)~(8-15)、(8-18)~(8-31)中，各参数的单位分别为：每相阻抗为 $\Omega$ ，每相导纳为S，三相功率为MW、Mvar，线电压为kV。此时输电线路的等值电路仍用一相表示。

通常将式(8-10)、(8-11)和(8-18)、(8-19)写成通式

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U} \quad (8-32)$$

$$\delta U = \frac{PX - QR}{U} \quad (8-33)$$

也将式(8-26)和(8-29)写成通式

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R \quad (8-34)$$

$$\Delta Q = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} X \quad (8-35)$$

应用通式时，要注意采用同一侧的功率和电压进行计算，例如，若用末端功率 $P_2$ 和 $Q_2$ ，则必需用对应的末端电压 $U_2$ 。

**例 8-1** 额定电压220kV、长度200km的单回输电线路，已知送入线路的始端功率为 $120 + j0$  MVA，始端电压为240kV，如图8-4(a)所示。线路参数如下： $r_0 = 0.108 \Omega/\text{km}$ ， $x_0 = 0.427 \Omega/\text{km}$ ， $b_0 = 2.665 \times 10^{-6} \text{ S/km}$ ， $g_0 = 0$ 。试求线路末端电压 $U_2$ 和线路送出的末端功率 $S_2$ 。

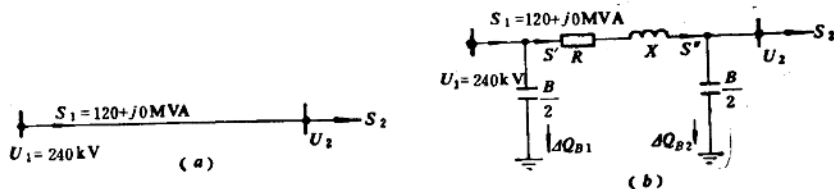


图 8-4 例8-1系统接线图及其等值电路  
(a)接线图；(b)等值电路

**解**

1. 计算线路参数、作出等值电路图

输电线路的电阻、电抗、导纳分别为

$$R = 0.108 \times 200 = 21.6 \Omega$$

$$X = 0.427 \times 200 = 85.4 \Omega$$

$$\frac{B}{2} = \frac{1}{2} \times 2.665 \times 200 \times 10^{-6} = 266.5 \times 10^{-6} \text{S}$$

线路的对称 $\Pi$ 型等值电路如图8-4(b)所示。

2. 计算功率分布和电压

线路始端电纳的无功功率为

$$\Delta Q_{B1} = -U_1^2 \frac{B}{2} = -240^2 \times 266.5 \times 10^{-6} = -15.35 \text{Mvar}$$

线路始端功率为

$$S' = S_1 - (j\Delta Q_{B1}) = 120 + j0 - (-j15.35) = 120 + j15.35 \text{MVA}$$

线路功率损耗为

$$\begin{aligned} \Delta S &= \left( \frac{S'}{U_1} \right)^2 R + j \left( \frac{S'}{U_1} \right)^2 X \\ &= \frac{120^2 + 15.35^2}{240^2} \times 21.6 + j \frac{120^2 + 15.35^2}{240^2} \times 85.4 \\ &= 5.49 + j21.70 \text{MVA} \end{aligned}$$

线路末端功率为

$$\begin{aligned} S'' &= S' - \Delta S = (120 + j15.35) - (5.49 + j21.70) \\ &= 114.51 - j6.35 \text{MVA} \end{aligned}$$

线路末端电压为

$$\begin{aligned} U_2 &= U_1 - \Delta U = U_1 - \frac{P'R + Q'X}{U_1} \\ &= 240 - \frac{120 \times 21.6 + 15.35 \times 85.4}{240} = 223.74 \text{kV} \end{aligned}$$

线路末端电纳的无功功率为

$$\begin{aligned} \Delta Q_{B2} &= -U_2^2 \frac{B}{2} = -223.74^2 \times 266.5 \times 10^{-6} \\ &= -13.34 \text{Mvar} \end{aligned}$$

由线路送出的末端功率为

$$\begin{aligned} S_2 &= S'' - (j\Delta Q_{B2}) \\ &= (114.51 - j6.35) - (-j13.34) = 114.51 + j6.99 \text{MVA} \end{aligned}$$

## 第二节 输电线路的运行

在选择输电线路的导线截面时，已考虑到在晴朗天气下不会发生电晕的要求，因此，线路的电导可当作 $G = 0$ 。

对于短线路，即指在100km以下的架空线路和不长的电缆线路，若线路电压不高时，可略去线路电纳不计，此时线路仅用阻抗来表示，如图8-5(a)所示。

对于中等长度线路，即指在100~300km之间的架空线路和100km以下的电缆线路，则常用图8-5 (b) 的对称Π型等值电路。

对于长线路，即指在300km以上的架空线路和100km以上的电缆线路，则要考虑线路的分布参数特性。在近似计算时，可对线路的电阻、电抗和电纳分别乘以修正系数，在精确计算时，则要用双曲函数来表示线路的参数。这里就不再赘述了。

下面对中等长度线路的几种运行方式进行讨论。

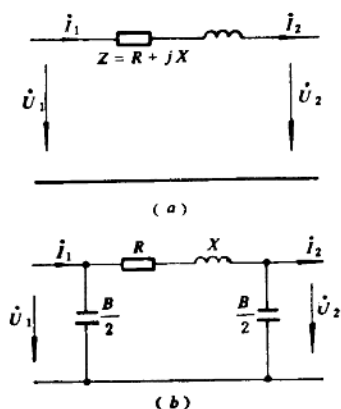


图 8-5 输电线路的等值电路  
(a)短线路；(b)中等长度线路

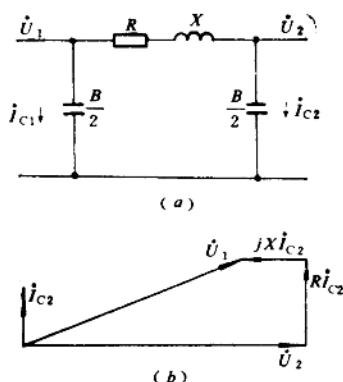


图 8-6 线路的空载运行  
(a)等值电路；(b)电压相量图

## 一、线路空载运行

当线路末端空载时，如图8-6所示。由于线路末端电纳的电容性电流  $\dot{I}_C$  流过线路的阻抗，使线路末端电压升高，而大于线路始端电压。由空载时的电压相量图可看到，线路末端电压升高值近似等于线路阻抗中电压降落的纵分量，即

$$\Delta U = X I_C = X U_1 \cdot \frac{B}{2} = \frac{U_1 b_0 x_0 l^2}{2} \quad (8-36)$$

式中  $b_0$ 、 $x_0$ ——线路单位长度的电纳和电抗。

线路末端电压升高对末端电压的百分值为

$$\Delta U = \frac{b_0 x_0 l^2}{2} \times 100 (\%) \quad (8-37)$$

它与线路长度  $l$  的平方成正比，而与线路的额定电压值无关。式 (8-37) 同样适用于电缆线路。同一导线截面的架空线路与电缆线路相比较，虽然电缆的  $x_0$  较小，但电缆的  $b_0$  却较大，从而使电缆线路空载时末端电压的升高，要比架空线路大得多。例如，用单芯电缆敷设的110kV、100km长的线路，线路空载时，末端电压升高为10%，而同样长度的架空线路的末端电压升高却不到1%。

在线路空载运行和操作空载线路时都应十分注意所出现的末端电压升高现象。

## 二、线路带负荷运行

当线路始端电压与负荷的有功功率 $P$ 恒定时, 由式(8-32)  $\Delta U = \frac{PR+QX}{U}$ 可知: 若负荷的功率因素 $\cos\varphi$ 减少, 即负荷的无功功率 $Q$ 增加时, 使线路的电压损耗 $\Delta U$ 增大。由于线路始端电压维持不变, 因而线路末端电压就减少。反之, 当 $\cos\varphi$ 增加时, 线路末端电压就升高。如果负荷无功功率 $Q$ 由感性变为容性(数学表达式中 $Q$ 变号), 这时线路的电压损耗更为减少, 末端电压更加增高。因此, 改变通过线路的无功功率大小, 可以达到调整线路末端(负荷端)的电压水平的目的。这是目前应用最广泛的电压调整措施之一。

线路带负载或空载运行时, 由线路的电容电流产生的感性无功功率(或消耗的容性无功功率)的数值是十分可观的, 应给予足够的重视。它的数值为

$$Q_b = UI_c = U \times U_b l = U^2 b_l l \quad (8-38)$$

线路的电压等级愈高, 无功功率 $Q_b$ 就愈大。例如, 220kV线路, 导线采用LGJQ-480, 每公里约可产生无功功率130kvar, 若线路长200km, 则产生26Mvar无功功率。因此, 可将线路的电容看作是系统的无功电源。

## 三、输电线路圆图

输电线路可用一个无源二端口网络来表示, 如图8-7所示。与图相对应的线路始端和末端的电压、电流的关系可用下列方程描述

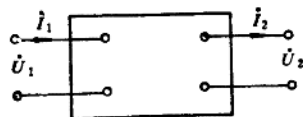


图 8-7 无源二端口网络

$$\left. \begin{aligned} \tilde{U}_1 &= A\tilde{U}_2 + B\tilde{I}_2 \\ \tilde{I}_1 &= C\tilde{U}_2 + D\tilde{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (8-39)$$

式中  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ ——二端口网络的通用常数, 且有 $AD-BC=1$ 。

由方程式(8-39)的第一式可求得线路末端电流为

$$\tilde{I}_2 = \frac{\tilde{U}_1 - A\tilde{U}_2}{B} \quad (8-40)$$

将式中的各量写成极坐标形式, 并取线路末端电压 $\tilde{U}_2$ 为参考相量, 故有

$$A = |A|/\alpha, \quad B = |B|/\beta, \quad \tilde{U}_2 = U_2/\underline{0^\circ}, \quad \tilde{U}_1 = U_1/\delta$$

将上述各量代入式(8-40), 则得

$$\tilde{I}_2 = \frac{U_1}{|B|} \frac{1}{\delta - \beta} - \frac{|A|U_2}{|B|} \frac{1}{\alpha - \beta} \quad (8-41)$$

线路末端的负荷功率为

$$\begin{aligned} S_2 &= \tilde{U}_2 \tilde{I}_2^* = \frac{U_1 U_2}{|B|} \frac{1}{\beta - \delta} - \frac{|A|U_2^2}{|B|} \frac{1}{\beta - \alpha} \\ &= P_2 + jQ_2 \end{aligned} \quad (8-42)$$

因此, 线路末端负荷的有功功率和无功功率分别为

$$P_2 = \frac{U_1 U_2}{|B|} \cos(\beta - \delta) - \frac{|A|U_2^2}{|B|} \cos(\beta - \alpha) \quad (8-43)$$

$$Q_2 = \frac{U_1 U_2}{|B|} \sin(\beta - \delta) - \frac{|A|U_2^2}{|B|} \sin(\beta - \alpha) \quad (8-44)$$

图8-8示出了式(8-42)的相量关系。线段 $\overline{AO}$ 为 $\frac{1}{|B|} \frac{|A|U_1^2}{\beta-\alpha}$ , 线段 $\overline{AB}$ 为 $\frac{U_1 U_2}{|B|}$

$1/\beta-\delta$ , 线路末端功率 $S_2$ 等于线段 $\overline{AB}$ 与线段 $\overline{AO}$ 的相量差, 即图中的线段 $\overline{OB}$ , 当线路始端与末端电压的相位差 $\delta$ 变化时, 若维持线路始端电压 $U_1$ 和末端电压 $U_2$ 为恒定值, 则线段 $\overline{AB}$ 的大小不变, 而相角要随之变化, 其轨迹是一个圆, 而线路末端功率 $S_2$ 就在这轨迹上相应移动, 这个图称为输电线路的末端功率圆图。应用圆图可以方便地分析线路的各种运行情况。

例如, 输电线路初始的运行状态为 $S_2 = P_2 + jQ_2$ , 在图8-8对应为 $\triangle OBH$ 。当线路始、末端电压的相位差 $\delta$ 增大时, 表征负荷功率 $S_2$ 的线段 $\overline{OB}$ 的B点沿着圆的轨迹向C点方向移动, 这意味着线路传输的有功功率 $P_2$ 增大、无功功率 $Q_2$ 却减少。由C点一直抵达D点, 此时有功功率为 $P'_2$ , 无功功率为0, 即 $S'_2 = P'_2 + j0$ 。若要使线路输送的有功功率超过 $P'_2$ , 就必须在线路末端装设无功补偿装置。设线路末端负荷 $S''_2 = P''_2 + jQ''_2$ , 有功功率 $P''_2$ 与线段 $\overline{OE}$ 相对应, 无功功率 $Q''_2$ 与线段 $\overline{EF}$ 相对应, 这时线路末端应装有无功补偿设备, 容量为 $Q_c$ , 由线段 $\overline{FG}$ 所决定, 其中一部份无功功率, 对应线段 $\overline{EF}$ , 供给负荷 $Q''_2$ 所消耗, 另一部份, 对应线段 $\overline{EG}$ , 供给线路所需。

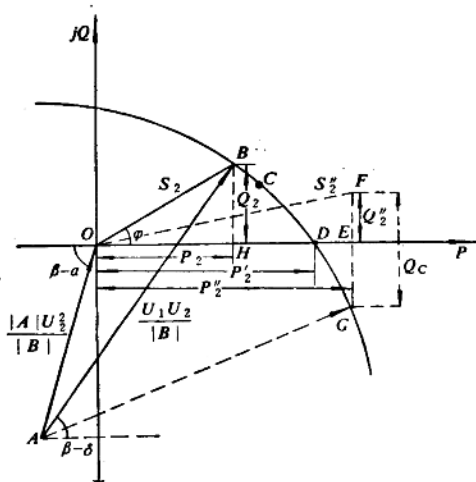


图8-8 输电线路的末端功率圆图

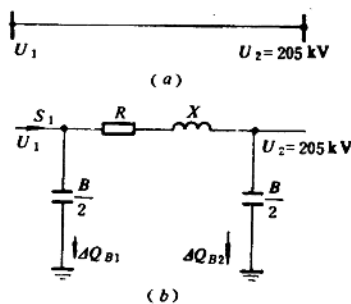


图8-9 例8-2的接线图及其等值电路  
(a)接线图; (b)等值电路

**例 8-2** 某输电线路长300km, 用LGJ-400导线敷设, 水平排列, 线间距离为6.5m, 线路空载运行, 末端电压为205kV, 试计算送入线路的始端功率和始端电压。线路参数如下:  $r_s = 0.08 \Omega/\text{km}$ ,  $x_s = 0.417 \Omega/\text{km}$ ,  $b_s = 2.727 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$ ,  $g_s = 0$ 。

**解**

1. 计算线路参数, 并作等值电路图

线路的阻抗和电纳分别为

$$R = 0.08 \times 300 = 24 \quad \Omega$$

$$X = 0.417 \times 300 = 125.1 \Omega$$

$$\frac{B}{2} = \frac{1}{2} \times 2.727 \times 300 \times 10^{-6} = 409.05 \times 10^{-6} \text{ S}$$

线路的等值电路如图8-9(b)所示。

2. 计算功率分布和电压

线路末端电纳的无功功率为

$$\Delta Q_{B_2} = -U_2^2 \frac{B}{2} = -205^2 \times 409.05 \times 10^{-6} = -17.19 \text{ Mvar}$$

线路始端电压为

$$\begin{aligned} U_1 &= U_2 + \frac{\Delta Q_{B_2} X}{U_2} \\ &= 205 + \frac{(-17.19) \times 125.1}{205} = 194.51 \text{ kV} \end{aligned}$$

因此, 线路空载时, 线路末端电压升高的百分值为

$$\Delta U\% = \frac{205 - 194.51}{205} \times 100 = 5.12\%$$

线路功率损耗为

$$\begin{aligned} \Delta S &= \left( \frac{\Delta Q_{B_2}}{U_1} \right)^2 R + j \left( \frac{\Delta Q_{B_2}}{U_1} \right)^2 X \\ &= \left( \frac{-17.19}{205} \right)^2 \times 24 + j \left( \frac{-17.19}{205} \right)^2 \times 125.1 \\ &= 0.17 + j0.88 \text{ MVA} \end{aligned}$$

线路始端电纳的无功功率为

$$\Delta Q_{B_1} = -U_1^2 \frac{B}{2} = -194.51^2 \times 409.05 \times 10^{-6} = -15.48 \text{ Mvar}$$

送入线路的始端功率为

$$\begin{aligned} S_1 &= \Delta Q_{B_1} + \Delta Q_{B_2} + \Delta S \\ &= (-j15.48) + (-j17.19) + (0.17 + j0.88) \\ &= 0.17 - j31.79 \text{ MVA} \end{aligned}$$

计算结果表明: 当线路空载时, 线路电容产生的无功功率除抵销了线路电抗消耗的小部分无功功率之外, 绝大部分的无功功率将倒送到电源中去。

例 8-3 试计算例 8-2 中输电线路的通用常数 A、B、C、D。

解

1. 由线路空载求 A 和 C

当线路空载时,  $\dot{I}_2 = 0$ , 由式 (8-39) 可得

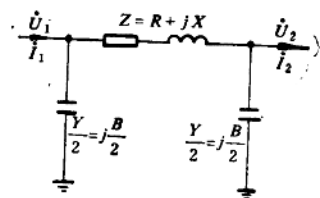


图 8-10 例8-3的等值电路

$$A = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2}, \quad C = \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2}$$

由图8-10可得线路的始端电压和电流分别为

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \dot{U}_2 + \dot{U}_2 \frac{Y}{2} \times Z = \dot{U}_2 \left( 1 + \frac{Y}{2} \times Z \right) \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_2 + \dot{U}_2 \frac{Y}{2} = \dot{U}_2 \left( 1 + \frac{Y}{2} Z \right) \frac{Y}{2} + \dot{U}_2 \frac{Y}{2} \\ &= \dot{U}_2 Y \left( 1 + \frac{YZ}{4} \right)\end{aligned}$$

比较上述各式, 则有

$$\begin{aligned}A &= 1 + \frac{Y}{2} Z = 1 + (j409.05 \times 10^{-6}) \times (24 + j125.1) \\ &= 0.95 + j9.82 \times 10^{-3} = 0.95 / 0.59^\circ \\ C &= Y \left( 1 + \frac{YZ}{4} \right) = j409.05 \times 10^{-6} \times \left[ 1 + \frac{j409.05 \times 10^{-6} \times (24 + j125.1)}{4} \right] \\ &= (-4.02 + j793.56) \times 10^{-6} = -793.56 \times 10^{-6} / -89.71^\circ \text{ S}\end{aligned}$$

2. 由线路短路求B和D

当线路短路时,  $\dot{U}_2 = 0$ , 由式(8-39)可得

$$B = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1}, \quad D = \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2}$$

由图(8-10)可得线路的始端电压和电流分别为

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \dot{I}_2 Z \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_2 + \dot{U}_1 \frac{Y}{2} = \dot{I}_2 + \dot{I}_2 Z \frac{Y}{2} = \dot{I}_2 \left( 1 + \frac{ZY}{2} \right)\end{aligned}$$

比较上述各式, 则有

$$B = Z = 24 + j125.1 = 127.38 / 79.14^\circ \quad \Omega$$

$$D = 1 + \frac{ZY}{2} = A = 0.95 / 0.59^\circ$$

应该指出: A和D是无量纲的系数, B的量纲是阻抗, C的量纲是导纳。

检验

$$\begin{aligned}AD - BC &= (0.95 / 0.59^\circ)^2 - 127.38 / 79.14^\circ \times (-793.57 \times 10^{-6}) / -89.71^\circ \\ &= 0.902 / 1.18^\circ + 0.101 / -10.57^\circ \\ &= 0.901 + j0.018 + 0.099 - j0.018 = 1\end{aligned}$$

**例 8-4** 对例8-2的输电线路, 当线路末端电压为205kV时, 试作出始端电压分别为190、200、210、220、230和240kV时的线路末端功率圆图族。若线路空载与线路末端负荷  $P_2 = 125\text{MW}$ 、 $\cos\varphi_2 = 1$ 时, 试从圆图族中分别求出线路的始端电压。

解

1. 作出线路末端功率圆图族

由式(8-42)知: 当线路末端电压 $U_2$ 为恒定值, 而始端电压 $U_1$ 变化时, 则线路末端功率圆图族是一组同心圆。它的圆心坐标为

$$\begin{aligned} -\frac{|A|U_2^2}{|B|} / \beta - \alpha &= -\frac{|A|U_2^2}{|B|} \cos(\beta - \alpha) - j \frac{|A|U_2^2}{|B|} \sin(\beta - \alpha) \\ &= -\frac{0.95 \times 205^2}{127.38} \cos(79.14^\circ - 0.59^\circ) - j \frac{0.95 \times 205^2}{127.38} \sin(79.14^\circ - 0.59^\circ) \\ &= -62.22 - j307.18 \text{ MVA} \end{aligned}$$

圆的半径  $r$  为

$$r = \frac{U_1 U_2}{|B|} = \frac{205}{127.38} U_1 \text{ MVA}$$

给定不同的始端电压 $U_1$ , 可计算出对应不同的半径  $r$ , 计算结果如下:

| $U_1$ (kV) | 190    | 200    | 210    | 220    | 230    | 240    |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $r$ (MVA)  | 305.78 | 321.87 | 337.96 | 354.06 | 370.15 | 386.24 |

根据圆心坐标和不同的圆半径可作出输电线路的末端功率圆图族, 如图8-11所示。

2. 计算线路始端电压

(1) 当线路空载时, 即  $P=0$ 、 $Q=0$ , 在图8-11中功率点落在坐标原点, 线路始端电压处在 $U_1=190\text{kV}$ 与 $U_1=200\text{kV}$ 的圆图之间, 用插入法可求得始端电压 $U_1=194.5\text{kV}$ 。这与例8-2的计算结果是完全一致的。

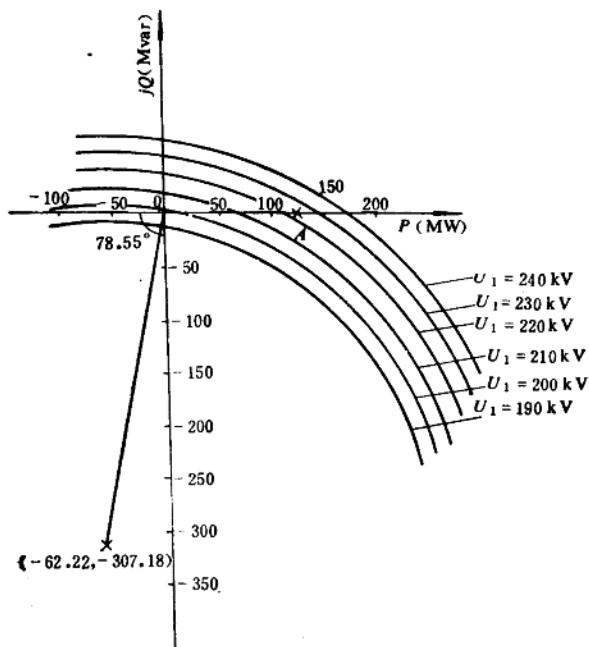


图 8-11 输电线路末端功率圆图族

(2) 当线路末端负荷  $P_2 = 125\text{MW}$ 、 $\cos\varphi_2 = 1$  时, 功率点落在有功功率正向的横坐标轴上的 A 点, 同理可用插入法求得线路的始端电压  $U_1 = 225\text{kV}$ 。

### 第三节 变压器的电压降落和功率损耗

变压器的电压降落和功率损耗的计算方法与输电线路相似, 下面以双绕组变压器为例进行分析讨论。

图 8-12(a) 示出了双绕组变压器的  $\Gamma$  型等值电路图。实际计算时常将励磁导纳支路用一等值的励磁功率  $\Delta S_0$  来表示, 如图 8-12(b) 所示。

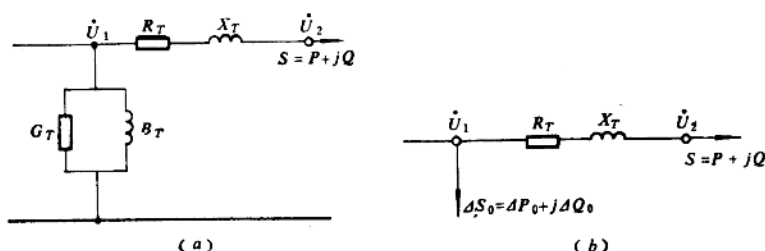


图 8-12 双绕组变压器的等值电路

变压器阻抗上的电压降落的计算公式仍可应用在输电线路中所推导得到的通式(8-32)和(8-33)来计算。但应该注意: 由于变压器的阻抗参数是归算到某一电压侧的数值, 例如高压侧, 则所求得的电压降落纵分量  $\Delta U$  和横分量  $\delta U$  以及两侧的电压值  $U_1$  和  $U_2$  都应是归算到高压侧的数值。若要求算出低压侧的实际电压值, 就应用变压器的变比将这些数值归算到低压侧去。此外, 由计算得知, 变压器两侧电压  $\vec{U}_1$  和  $\vec{U}_2$  的相位差不大, 故电压降落也不大, 因此, 通常将电压降落横分量  $\delta U$  略去不计。

变压器的有功功率损耗  $\Delta P_T$  由铜耗  $\Delta P_i$  和铁耗  $\Delta P_0$  两部份组成

$$\begin{aligned}\Delta P_T &= \Delta P_i + \Delta P_0 \\ &= \frac{P^2 + Q^2}{U_1^2} R_T + U_1^2 G_T\end{aligned}\quad (8-45)$$

实际计算时, 通常不必先求出变压器的参数  $R_T$  和  $G_T$ , 而直接从变压器铭牌参数的额定铜耗  $\Delta P_{iN}$  和铁耗  $\Delta P_0$  来计算。当变压器带额定负荷  $S_N$  时, 额定铜耗为

$$\Delta P_{iN} = \frac{S_N^2}{U_1^2} R_T \quad (8-46)$$

而带负荷  $S$  时的变压器铜耗为  $\Delta P_i = \frac{S^2}{U_1^2} R_T$  [见式(8-45)], 因而有

$$\Delta P_i = \Delta P_{iN} \left( \frac{S}{S_N} \right)^2 \quad (8-47)$$

故可得变压器有功功率损耗另一常用的计算公式为