

中等专业学校教材



电力工程基础

第二册

武汉电力学校 孙瑞璋 主编



中等专业学校教材

电力工程基础

第二册

武汉电力学校 孙瑞璋 主编

中国电力出版社

内 容 提 要

《电力工程基础》共分三册，计十四章，第一册为总论部分，第二册为电力系统部分，第三册为继电保护与自动装置部分。第二册的主要内容有：电力网的基本计算、电力系统的频率调整与电压调整、电力系统运行的稳定性与远距离输电等。每章后均设有小结以及思考题与习题，可供读者参考、选用。

本套教材为模块式教材，第一册为通用模块，第二、第三册为专用模块，可供集控、继电保护、高压、远动、载波通信、仪表与计量、计算机应用等专业选用，也可作为电力、动力类其它专业的教学参考书，并可供从事电力系统运行、检修、施工等方面的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力工程基础 第二册/孙瑞璋主编. -北京: 中国电力出版社, 1995

中等专业学校教材

ISBN 7-80125-011-7

I. 电… I. 孙… III. 电力工程-专业学校-教材

IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 06783 号

中国电力出版社出版

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

北京市地矿局印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

1996 年 5 月第一版 1996 年 5 月北京第一次印刷

787×1092 毫米 16 开本 7.5 印张 165 千字

印数 0001—4880 册 定价 6.10 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

本套教材是根据中国电力企业联合会教职字[1990]6号文《电力中等专业学校教材建设规划》中的有关规定而编写的。在广泛征求有关学校意见的基础上,编写人员先后召开过两次讨论会,对编写大纲进行审定,以便满足集控、继电保护、高压、远动、载波通信、仪表与计量、计算机应用等七个专业对本门课程的不同要求。

本套教材为模块式教材,共分三册计十四章,第一册为总论部分,第二册为电力系统部分,第三册为继电保护与自动装置部分。其中第一册为通用模块,第二、三册为专用模块。全书以介绍运行知识为主,注重理论联系实际,文字通俗易懂,便于教学,各册内容既相对独立又相互联系,书中的图形符号、文字符号和计量单位均已采用新国标。

本套教材的主要内容有:第一册,电力系统的基本知识、电力系统中性点的接地方式、电力网的参数及等值电路、高低压开关电器、电气主接线、电气设备的接地、防雷保护;第二册,电力网的潮流及电能损耗计算、电力系统的调频与调压、电力系统运行的稳定性、远距离输电;第三册,短路电流计算、发电厂和变电所的二次回路、继电保护与自动装置等。本书为第二册。

本套教材第一、十、十一、十二章由西安电力学校周振山老师编写,第二、四、五、七章由重庆电力学校艾荣华老师编写,第三、十三、十四章由武汉电力学校孙瑞璋老师编写,第六、八、九章由武汉电力学校向铁元老师编写。孙瑞璋为本套教材主编,主审为南京电力高等专科学校王义和。

由于电力中专模块式教材刚刚起步,尚无成熟经验,加之编者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳切希望各校师生和广大读者批评指正。

编 者

1995年1月

目 录

前 言

第八章 电力网的潮流及电能损耗计算	1
第一节 概述	1
第二节 开式电力网的潮流计算	9
第三节 简单闭式电力网的潮流计算	14
第四节 电力网的电能损耗计算	27
第五节 降低电能损耗的主要技术措施	31
小结	35
思考题与习题	35
第九章 电力系统的频率调整与电压调整	38
第一节 概述	38
第二节 电力系统的有功功率平衡	38
第三节 电力系统的频率静态特性	40
第四节 电力系统的频率调整	43
第五节 电力系统有功功率的经济分配准则	45
第六节 电力系统的电压静态特性	47
第七节 电力系统的无功功率平衡	49
第八节 电力系统的无功电源	51
第九节 电压中枢点的电压管理	54
第十节 电力系统的电压调整	55
小结	66
思考题与习题	67
第十章 电力系统运行的稳定性	68
第一节 概述	68
第二节 简单电力系统的功-角特性	69
第三节 电力系统运行的静态稳定性	72
第四节 电力系统运行的暂态稳定性	80
第五节 电力系统振荡	90
小结	94
思考题与习题	95
第十一章 远距离输电	96
第一节 概述	96
第二节 交流长线路的稳态方程	97
第三节 沿交流长线路的功率传送	99

第四节 交流长线路的参数补偿 102

第五节 直流输电的基本概念 106

小结 111

思考题与习题 112

参考文献 113

第八章 电力网的潮流及电能损耗计算

第一节 概 述

潮流计算和电能损耗计算是电力网基本计算中很重要的一部分。

潮流计算包括电力网的功率分布计算和电压计算,是电力网其它计算的基础和前提。它针对具体的电力系统,根据给定的负荷功率和电源母线电压,计算网络中各节点的电压和各支路中的功率及功率损耗。潮流计算方法分经典手算法和计算机算法两种,后者在本教材中不作介绍。有了潮流计算的结果,就可进行其它计算。例如,规划设计时,可用它选择导线截面和电气设备,确定电力网主接线方案,计算网络的电能损耗和运行费用,进行方案的经济比较;电力系统运行时,可用它制订检修计划,校验电能质量,采取调频和调压措施,确定最佳运行方式,整定继电保护和自动装置等。

电能损耗计算主要是讨论电力线路和变压器的能量损耗计算。其目的是为了有针对性地采取降低电能损耗的措施,提高电能在生产、输送和分配过程中的效率和电力系统运行的经济性。另外,也为输电成本和电能成本的计算提供依据。

一、负荷表示法

电力系统中的负荷是一个很重要的运行参数,通常用复数功率或电流来表示。

设已知某电力线路的相电压为 $\dot{U}_P$, 相电流为 $\dot{I}_P$, 电压和电流之间的相量关系如图 8-1 所示。应用电工基础课程的知识, 可得通过线路的单相复数功率 $\tilde{S}_P$ 为

$$\tilde{S}_P = \dot{U}_P \dot{I}_P = U_P I_P \angle \alpha - \beta = U_P I_P \angle \varphi = P_P + jQ_P$$

相应的三相复数功率 $\tilde{S}$ 为

$$\begin{aligned} \tilde{S} &= 3\tilde{S}_P = 3U_P I_P \angle \varphi = \sqrt{3} UI \angle \varphi \\ &= \sqrt{3} U I \cos \varphi + j \sqrt{3} U I \sin \varphi = P + jQ \end{aligned} \quad (8-1)$$

式中 P ——三相有功功率;

Q ——三相无功功率;

U ——电力线路的线电压;

I ——电力线路的线电流。

式 (8-1) 适用于感性负荷, 若为容性负荷, 同理可导出

$$\tilde{S} = \sqrt{3} UI \angle -\varphi = P - jQ \quad (8-2)$$

有功功率 P 的单位用 kW 或 MW 表示, 无功功率 Q 的单位用 kvar 或 Mvar 表示, 视在功率 S 的单位用 kVA 或 MVA 表示, S 的表达式为

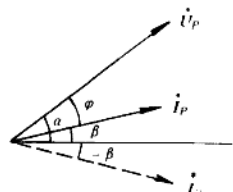


图 8-1 电压、电流相量图

$$S = |\tilde{S}| = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3}UI$$

二、电力网环节首、末端功率与电压的平衡关系

电力网的等值电路由线路和变压器的等值电路所组成，线路和变压器的等值电路中都有一个环节。所谓环节，是指电力网等值电路中由同一个电流通过的阻抗单元。当电流（或功率）通过环节时，环节的阻抗上就有电压降，并产生功率损耗，使环节首、末端的电压不等，功率也不相同。

（一）线路功率损耗的计算

线路一般用 II 型等值电路表示，如图 8-2 所示。图 8-2 (b) 中的点 1 和点 2 之间的阻抗单元就是一个环节。其中 $\tilde{S}_{LD}$ 为负荷功率，也称为线路末端功率， $\tilde{S}_2$ 称为环节末端功率， $\tilde{S}_1$ 称为环节首端功率， $\tilde{S}'_1$ 称为线路首端功率。

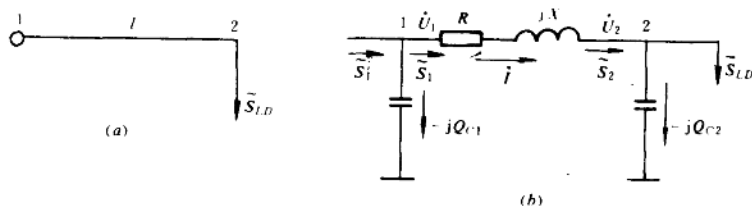


图 8-2 线路原理图及等值电路

(a) 线路原理图；(b) 线路 II 型等值电路

线路阻抗中的功率损耗包含有功功率损耗和无功功率损耗，它们的大小随电流（或功率）的变化而变化，称为变动损耗。

若已知通过线路的线电流为 I ，则阻抗中的功率损耗为

$$\Delta P = 3I^2 R \times 10^{-3} \quad (8-3)$$

$$\Delta Q = 3I^2 X \times 10^{-3} \quad (8-4)$$

式中 ΔP ——线路电阻中的有功功率损耗 (kW)；

ΔQ ——线路电抗中的无功功率损耗 (kvar)；

I ——通过线路的电流 (A)；

R ——线路一相的电阻 (Ω)；

X ——线路一相的电抗 (Ω)。

若已知通过线路环节的三相视在功率为 S ，线路运行电压为 U ，根据 $I = \frac{S}{\sqrt{3}U}$ 代入式 (8-3) 和式 (8-4) 可得

$$\Delta P = \frac{S^2}{U^2} R \times 10^{-3} = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R \times 10^{-3} \quad (8-5)$$

$$\Delta Q = \frac{S^2}{U^2} X \times 10^{-3} = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} X \times 10^{-3} \quad (8-6)$$

式中， P 的单位为 kW， Q 的单位为 kvar， U 的单位为 kV。

应该指出，式 (8-5) 和式 (8-6) 中的功率和电压应为环节中同一点的值。如图 8-2

(b) 所示, 若功率是环节末端视在功率 S_2 , 电压就应是环节末端电压 U_2 ; 若功率是环节首端视在功率 S_1 , 电压就应是环节首端电压 U_1 。当 U_2 (或 U_1) 未知时, 对式 (8-5) 和式 (8-6), 一般可用线路额定电压 U_N 代替 U_2 (或 U_1) 作近似计算。

电力线路上除了阻抗环节中的变动功率损耗外, 导纳支路中还会消耗与负荷无关的固定电容功率 (也称充电功率), 它和阻抗环节中的无功功率损耗互为补偿。若已知线路首、末端的运行电压分别为 U_1 和 U_2 , 则

$$Q_{c1} = \frac{1}{2} B U_1^2 \quad (8-7)$$

$$Q_{c2} = \frac{1}{2} B U_2^2 \quad (8-8)$$

式中 Q_{c1} ——靠近线路首端的一半线路所消耗的容性无功功率 (Mvar);

Q_{c2} ——靠近线路末端的一半线路所消耗的容性无功功率 (Mvar);

B ——全线的电纳 (S);

U_1 ——线路首端线电压 (kV);

U_2 ——线路末端线电压 (kV)。

由于电压 U_1 和 U_2 与线路额定电压 U_N 的差值一般不大, 所以在手算中通常按 U_N 近似计算线路的充电功率, 即

$$Q_{c1} \approx Q_{c2} = \frac{1}{2} B U_N^2 = \frac{1}{2} Q_c \quad (8-9)$$

式中, Q_c 为全线的充电功率。

(二) 变压器功率损耗的计算

变压器功率损耗的计算与线路类似, 由第三章第二节变压器的等值电路可知, 变压器的功率损耗包括阻抗支路中的变动损耗和导纳支路中的固定损耗两部分。

1. 双绕组变压器功率损耗的计算

$$\Delta P_T = \frac{S^2}{U^2} R_T + \Delta P_0 = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R_T + \Delta P_0 \quad (8-10)$$

$$\Delta Q_T = \frac{S^2}{U^2} X_T + \Delta Q_0 = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} X_T + \Delta Q_0 \quad (8-11)$$

式中 ΔP_T ——变压器总的有功功率损耗 (MW);

ΔQ_T ——变压器总的无功功率损耗 (Mvar);

S ——通过变压器阻抗支路的视在功率 (MVA);

U ——与 S 对应的变压器运行电压 (kV);

R_T ——变压器一相的电阻 (Ω);

X_T ——变压器一相的电抗 (Ω);

ΔP_0 ——变压器的空载功率损耗 (MW);

ΔQ_0 ——变压器的励磁功率损耗 (Mvar)。

如果以第三章中的 R_T 、 X_T 和 ΔQ_0 的计算公式代入式 (8-10) 和式 (8-11), 则可得用变压器铭牌数据计算其功率损耗的公式

$$\Delta P_T = \Delta P_s \frac{U_N^2 S^2}{U^2 S_N^2} + \Delta P_0 \quad (8-12)$$

$$\Delta Q_T = \frac{U_s \% U_N^2 S^2}{100 U^2 S_N} + \frac{I_0 \% S_N}{100} \quad (8-13)$$

以上式中 ΔP_s ——变压器的负载损耗 (MW);

S_N ——变压器的额定容量 (MVA);

$U_s \%$ ——变压器负载电压的百分数;

$I_0 \%$ ——变压器空载电流的百分数;

U_N ——变压器的额定电压 (kV);

其它符号含义同式 (8-10) ~ (8-11)。

工程计算中,一般可认为变压器的运行电压 U 与变压器的额定电压 U_N 相等,即 $U = U_N$,则式 (8-12) 和式 (8-13) 可简化为

$$\Delta P_T = \Delta P_s \left(\frac{S}{S_N} \right)^2 + \Delta P_0 \quad (8-14)$$

$$\Delta Q_T = \frac{U_s \% S^2}{100 S_N} + \frac{I_0 \% S_N}{100} \quad (8-15)$$

2. 三绕组变压器功率损耗的计算

根据三绕组变压器的等值电路,以三绕组降压变压器为例,同理可得其功率损耗的计算公式

$$\Delta P_T = \frac{S_1^2}{U_1^2} R_{T1} + \frac{S_2^2}{U_2^2} R_{T2} + \frac{S_3^2}{U_3^2} R_{T3} + \Delta P_0 \quad (8-16)$$

$$\Delta Q_T = \frac{S_1^2}{U_1^2} X_{T1} + \frac{S_2^2}{U_2^2} X_{T2} + \frac{S_3^2}{U_3^2} X_{T3} + \Delta Q_0 \quad (8-17)$$

式中 S_1, S_2, S_3 ——通过变压器高、中、低压阻抗支路的视在功率 (MVA);

U_1, U_2, U_3 ——与 S_1, S_2, S_3 相对应的变压器运行电压 (kV);

R_{T1}, R_{T2}, R_{T3} ——变压器高、中、低压绕组的电阻 (Ω);

X_{T1}, X_{T2}, X_{T3} ——变压器高、中、低压绕组的电抗 (Ω)。

对于三绕组变压器,同样可以用其铭牌数据计算功率损耗

$$\Delta P_T = \Delta P_{S1} \left(\frac{S_1}{S_N} \right)^2 + \Delta P_{S2} \left(\frac{S_2}{S_N} \right)^2 + \Delta P_{S3} \left(\frac{S_3}{S_N} \right)^2 + \Delta P_0 \quad (8-18)$$

$$\Delta Q_T = \Delta Q_{S1} \left(\frac{S_1}{S_N} \right)^2 + \Delta Q_{S2} \left(\frac{S_2}{S_N} \right)^2 + \Delta Q_{S3} \left(\frac{S_3}{S_N} \right)^2 + \Delta Q_0 \quad (8-19)$$

以上式中 $\Delta P_{S1}, \Delta P_{S2}, \Delta P_{S3}$ ——变压器高、中、低压绕组归算至额定容量后的等效负载损耗 (MW);

$\Delta Q_{S1}, \Delta Q_{S2}, \Delta Q_{S3}$ ——变压器高、中、低压绕组归算至额定容量后的等效漏磁损耗 (Mvar)。

注意,当变压器的实际运行电压未知时,也可用其额定电压代替,近似计算功率损耗。

(三) 电压降落、电压损耗和电压偏移的计算

1. 电压降落

电力网中任意两点电压的相量差,称为电压降落,用 $d\dot{U}$ 表示。由图 8-2 (b) 可见,当环节中有功率传输时,阻抗两端就会产生电压降落,其相电压降落的表达式为

$$\begin{aligned} d\dot{U}_P &= \dot{U}_{1P} - \dot{U}_{2P} = \dot{I} (R + jX) = \frac{\dot{S}_P}{\dot{U}_P} (R + jX) \\ &= \frac{P_P - jQ_P}{\dot{U}_P} (R + jX) = \frac{P_P R + Q_P X}{\dot{U}_P} + j \frac{P_P X - Q_P R}{\dot{U}_P} \end{aligned}$$

式中 $\dot{U}_{1P}$ 、 $\dot{U}_{2P}$ ——环节首、末端的相电压;

$\dot{I}$ ——通过环节的负荷电流;

$\dot{S}_P$ ——通过环节的单相复数功率 $\tilde{S}_P$ 的共轭复数;

P_P 、 Q_P ——通过环节的单相有功功率和单相无功功率;

$\dot{U}_P$ ——相电压相量 $\dot{U}_P$ 的共轭复数。

工程计算中,一般采用三相功率和线电压,用三相功率 $\tilde{S}$ 和线电压 $\dot{U}$ 代入上式,经过适当演算,可得线电压降落的计算式

$$d\dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \frac{PR + QX}{\dot{U}} + j \frac{PX - QR}{\dot{U}} \quad (8-20)$$

式中 $d\dot{U}$ ——环节上的线电压降落 (kV);

U_1 、 U_2 ——环节首、末端的线电压 (kV);

P 、 Q ——通过环节的三相有功功率 (MW)、三相无功功率 (Mvar);

$\dot{U}$ ——线电压相量 $\dot{U}$ 的共轭复数 (kV)。

若选 $\dot{U} = U \angle 0^\circ$ 作为参考相量,则式 (8-20) 可用下式表示

$$d\dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \frac{PR + QX}{U} + j \frac{PX - QR}{U} = \Delta U + j\delta U \quad (8-21)$$

上式中, ΔU 称为电压降落的纵分量, δU 称为电压降落的横分量,和式 (8-5) 和式 (8-6) 一样,功率、电压必须是同一点的值。

若已知环节末端三相功率 $\tilde{S}_2$ 和线电压 $\dot{U}_2 = U_2 \angle 0^\circ$, 则可得线路电压相量图,如图 8-3 所示。由相量图可知

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \Delta \dot{U}_2 + j\delta \dot{U}_2 = U_1 \angle \delta \quad (8-22)$$

$$\text{因此} \quad U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_2)^2 + (\delta U_2)^2} \quad (8-23)$$

首、末端线电压的相位差为

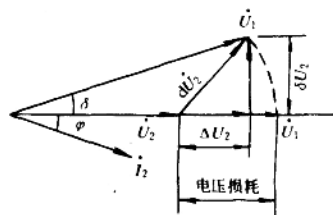


图 8-3 线路电压相量图

$$\delta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\delta U_2}{U_2 + \Delta U_2} \quad (8-24)$$

其中, 电压降落纵分量 $\Delta U_2 = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2}$, 电压降落横分量 $\delta U_2 = \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2}$ 。

若已知环节首端三相功率 $\vec{S}_1$ 和环节首端线电压 $\vec{U}_1 = U_1 \angle 0^\circ$, 同理可得如图 8-4 所示的电压相量图。由相量图可知

$$\vec{U}_2 = U_1 - \Delta U_1 - j\delta U_1 \quad (8-25)$$

$$U_2 = \sqrt{(U_1 - \Delta U_1)^2 + (\delta U_1)^2} \quad (8-26)$$

$$\delta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\delta U_1}{U_1 - \Delta U_1} \quad (8-27)$$

其中, 电压降落纵分量 $\Delta U_1 = \frac{P_1 R + Q_1 X}{U_1}$, 电压降落横分量 $\delta U_1 = \frac{P_1 X - Q_1 R}{U_1}$ 。

综上所述可知, 对于同一线路环节, 它的电压降落是一定的, 即 $d\vec{U}_1 = d\vec{U}_2$ 。但电压降落的纵分量和横分量则随计算条件的不同而异, 即 $\Delta U_1 \neq \Delta U_2, \delta U_1 \neq \delta U_2$, 如图 8-5 所示。

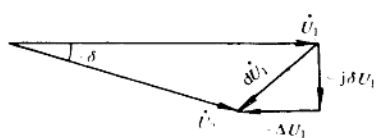


图 8-4 线路电压相量图

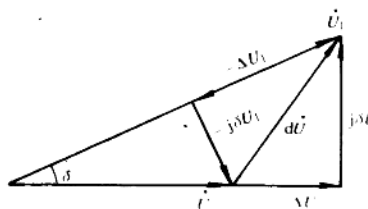


图 8-5 电压降落相量的两种分解

如果通过线路环节的是容性功率, 则需将 Q 取负值代入式 (8-21) 计算电压降落。

2. 电压损耗

电网中任意两点电压的代数差, 称为电压损耗。对于图 8-2 (b) 所示的线路环节, 其电压损耗为 $U_1 - U_2$, 如图 8-3 所示。

应用二项式定理展开式 (8-23), 取前两项可得电压损耗的计算公式为

$$U_1 - U_2 = \Delta U_2 + \frac{(\delta U_2)^2}{2(U_2 + \Delta U_2)}$$

由于 $\Delta U_2 \ll U_2$, 故上式可简化为

$$U_1 - U_2 = \Delta U_2 + \frac{(\delta U_2)^2}{2U_2} \quad (8-28)$$

式 (8-28) 可用于所有电力网电压损耗的工程计算。对于 110kV 及以下电压等级的电力网, 电压降落横分量 δU_2 可忽略不计, 电压损耗的计算公式可进一步简化为

$$U_1 - U_2 = \Delta U_2 \quad (8-29)$$

由式 (8-29) 可见, 在近似计算中, 由压损耗就等于电压降落的纵分量。

同理, 根据式 (8-26) 可得

$$U_1 - U_2 = \Delta U_1 - \frac{(\delta U_1)^2}{2(U_1 - \Delta U_1)}$$

简化,得

$$U_1 - U_2 = \Delta U_1 - \frac{(\delta U_1)^2}{2U_1} \quad (8-30)$$

$$U_1 - U_2 = \Delta U_1 \quad (8-31)$$

电压损耗常用百分数表示,即

$$\Delta U\% = \frac{U_1 - U_2}{U_N} \times 100 \quad (8-32)$$

式中 $\Delta U\%$ ——线路电压损耗的百分数;

U_N ——线路的额定电压。

电压损耗百分数的大小直接反映了首端和末端电压偏差的大小。规程规定:电力网正常运行时的最大电压损耗一般不应超过10%。

3. 电压偏移

电压损耗的存在,使得电力网中各点的电压值不相等。电力网中任意点的实际电压同线路额定电压的数值差称为电压偏移。电压偏移常用百分数表示,即

$$m = \frac{U - U_N}{U_N} \times 100\% \quad (8-33)$$

式中 m ——电网任意点电压偏移的百分数(%);

U ——该点的实际运行电压。

电压偏移的大小,直接反映了供电电压的质量。当电压偏移为负值时,说明 $U < U_N$;反之,说明 $U > U_N$ 。一般来说,网络中的电压损耗愈大,各点的电压偏移也就愈大。

(四) 环节首、末端功率及电压的平衡关系

1. 已知末端负荷功率 $\tilde{S}_{LD}$ 和电压 $\dot{U}_2$

(1) 功率平衡 仍以图 8-2 (b) 为例,应用式 (8-5)、式 (8-6) 和式 (8-9) 可得功率平衡关系为

$$\begin{aligned} \tilde{S}_2 &= \tilde{S}_{LD} + (-jQ_{C2}) = (P_{LD} + jQ_{LD}) + (-jQ_{C2}) \\ &= P_{LD} + j(Q_{LD} - Q_{C2}) = P_2 + jQ_2 \end{aligned}$$

$$\Delta \tilde{S} = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} (R + jX) = \Delta P + j\Delta Q$$

$$\tilde{S}_1 = \tilde{S}_2 + \Delta \tilde{S} = (P_2 + \Delta P) + j(Q_2 + \Delta Q) = P_1 + jQ_1$$

$$\begin{aligned} \tilde{S}_1 &= \tilde{S}_1 + (-jQ_{C1}) = (P_1 + jQ_1) + (-jQ_{C1}) = P_1 + j(Q_1 - Q_{C1}) \\ &= P_1 + jQ_1' \end{aligned}$$

(2) 电压平衡 选 $\dot{U}_2 = U_2 \angle 0^\circ$ 为参考相量,应用式 (8-21) 可得电压平衡关系为

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= U_2 + \Delta U_2 + j\delta U_2 \\ &= U_2 + \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} + j \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2} \end{aligned}$$

2. 已知线路首端功率 $\tilde{S}_1$ 和电压 $\dot{U}_1$

这种情况下的功率平衡与电压平衡关系可按第一种情况进行类似分析。

3. 已知线路末端负荷功率 $\bar{S}_{LD}$ 和线路首端电压 $\dot{U}_1$

工程计算中的多数情况都是已知用户负荷功率和供电点的电压，待求量为供电点送出的功率和用户端的电压。此时的功率平衡和电压平衡可分两步进行：首先，根据 $\bar{S}_{LD}$ 并用线路额定电压代替各点的实际运行电压从线路末端到首端逐段进行功率平衡计算，直至求出供电点线路首端送出的功率 $\bar{S}_1$ ；其次，根据由给定的 $\dot{U}_1$ 和功率平衡计算中求出的功率，从首端到末端逐段进行电压平衡计算，直至求出用户端电压 $\dot{U}_2$ 。

对于图 8-2 (b) 所示的线路环节，上述两步的具体步骤如下。

(1) 功率平衡

$$\bar{S}_2 = \bar{S}_{LD} + (-jQ_{C2}) = P_{LD} + j(Q_{LD} - Q_{C2}) = P_2 + jQ_2$$

$$\Delta \bar{S} = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_N^2} (R + jX) = \Delta P + j\Delta Q$$

$$\bar{S}_1 = \bar{S}_2 + \Delta \bar{S} = (P_2 + \Delta P) + j(Q_2 + \Delta Q) = P_1 + jQ_1$$

$$\bar{S}'_1 = \bar{S}_1 + (-jQ_{C1}) = P_1 + j(Q_1 - Q_{C1}) = P_1 + jQ'_1$$

(2) 电压平衡 选 $\dot{U}_1 = U_1 \angle 0^\circ$ 为参考相量，则有

$$\dot{U}_2 = U_1 - \Delta U_1 - j\delta U_1 = U_1 - \frac{P_1 R + Q_1 X}{U_1} - j \frac{P_1 X - Q_1 R}{U_1}$$

上述平衡关系中，由于采用线路的额定电压代替实际电压计算功率分布，因而是一种近似计算方法，但其精确度一般能满足工程上的要求。如果要进行精确计算，则应采用迭代法。迭代法的基本步骤是：应用假设的末端电压和已知的末端功率逐段向首端推算，求出首端功率。再用给定的首端电压和求得的首端功率向末端逐段推算，求出末端电压；然后再用已知的首端功率和计算得出的末端电压向首端推算，如此类推，逐步逼近，直至求出的首端电压和末端功率同已知值相等或接近相等时为止。利用计算机进行迭代很方便，手算时经过一、二次往返一般也可获得较为精确的结果。

掌握了电力网环节的潮流计算方法，复杂电力网的潮流计算就可以按环节逐个进行。

(五) 环节中潮流的方向和线路的空载运行

在高压电力网中， $X \gg R$ ，为了分析问题方便，可令 $R=0$ ，式 (8-22) 可写成

$$\dot{U}_1 = U_2 + \frac{Q_2 X}{U_2} + j \frac{P_2 X}{U_2} \quad (8-34)$$

由图 8-5 可见， $\sin \delta = \frac{\delta U_2}{U_1}$ ，将式 (8-34) 中的 $\delta U_2 = \frac{P_2 X}{U_2}$ 代入此式，可得

$$\begin{aligned} \sin \delta &= \frac{P_2 X}{U_1 U_2} \\ P_2 &= \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta \end{aligned} \quad (8-35)$$

式 (8-35) 表明，高压电力网环节首、末端电压的相位移 δ 主要决定于通过电力网环节的有功功率，而与无功功率几乎无关。当 $\dot{U}_1$ 超前 $\dot{U}_2$ 时， $\sin \delta > 0$ ， P_2 为正值，这就说明有功功

率是从电压超前的一端向电压滞后的一端输送。

由图 8-5 还可见, 当不计 δU_2 分量时, 则有

$$U_1 \approx U_2 + \frac{Q_2 X}{U_2}$$

$$Q_2 \approx \frac{U_1 U_2 - U_2^2}{X} \quad (8-36)$$

式 (8-36) 表明, 高压电力网环节中的电压值主要决定于通过电力网环节的无功功率, 而与有功功率几乎无关。当 $U_1 > U_2$ 时, Q_2 为正值, 这就说明感性无功功率是从电压高的一端向电压低的一端输送。同理可知, 容性无功功率是从电压低的一端向电压高的一端输送。

当线路空载运行时, 负荷的有功功率和无功功率均为零, 只有末端电容功率 Q_{C2} 通过线路环节。若用下标 “0” 表示空载, 则式 (8-22) 就可改写成

$$\dot{U}_{10} = U_{20} - \frac{Q_{C2} X}{U_{20}} + j \frac{Q_{C2} R}{U_{20}} \quad (8-37)$$

相应的相量图如图 8-6 所示。

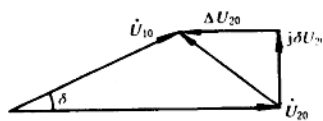


图 8-6 线路空载运行时的电压相量图

由式 (8-37) 和图 8-6 可见, 线路空载运行时, 其末端电压高于首端电压。这种由线路电容功率使其末端产生工频过电压的现象称为费兰地效应。在远距离输电线路中, 这种现象尤为明显, 应采取特殊措施, 使之尽量避免发生。

第二节 开式电力网的潮流计算

一、开式区域电力网的潮流计算

开式区域电力网的潮流计算过程, 实际上是环节中功率与电压平衡公式的反复应用。下面通过例 8-1 来介绍开式区域电力网的潮流计算。

【例 8-1】 有一额定电压为 110kV 的开式区域电力网, 如图 8-7 (a) 所示, 其 A 点电压及 B、C 点的负荷功率示于图上, 导线间的几何均距 $D_{eq} = 5\text{m}$, 试作潮流计算。

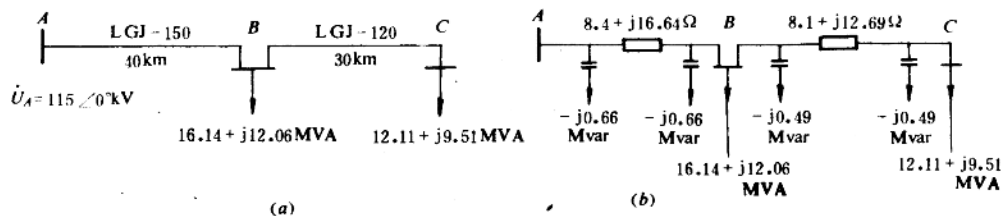


图 8-7 例 8-1 图

(a) 开式电力网原理图; (b) 等值电路图

解 1. 计算网络元件参数和作等值电路

按给定的条件, 查第一册附录 A 计算网络参数, 如表 8-1 所示, 等值电路如图 8-7 (b) 所示。

表 8-1

网 络 参 数

导线型号	单位长度参数	网络参数
LGJ-150	$r_0=0.21\Omega/\text{km}$	$R_{AB}=0.21\times 40=8.4\ (\Omega)$
	$x_0=0.416\Omega/\text{km}$	$X_{AB}=0.416\times 40=16.64\ (\Omega)$
	$b_0=2.74\times 10^{-6}\text{S}/\text{km}$	$Q_{C,AB}=2.74\times 10^{-6}\times 40\times 110^2=1.32\ (\text{Mvar})$
LGJ-120	$r_0=0.27\Omega/\text{km}$	$R_{BC}=0.27\times 30=8.1\ (\Omega)$
	$x_0=0.423\Omega/\text{km}$	$X_{BC}=0.423\times 30=12.69\ (\Omega)$
	$b_0=2.69\times 10^{-6}\text{S}/\text{km}$	$Q_{C,BC}=2.69\times 10^{-6}\times 30\times 110^2=0.98\ (\text{Mvar})$

2. 用线路额定电压代替各点实际运行电压，由末端向首端逐段计算功率分布
功率分布的具体计算如表 8-2 所示。

表 8-2

功率分布的计算

计算内容	有功功率 (MW)	无功功率 (Mvar)
C 点负荷功率	12.11	9.51
BC 线路末端电容功率		-0.49
BC 线路环节末端功率	12.11	$9.51-0.49=9.02$
BC 线路阻抗中的功率损耗	$\frac{12.11^2+9.02^2}{110^2}\times 8.1=0.15$	$\frac{12.11^2+9.02^2}{110^2}\times 12.69=0.24$
BC 线路环节首端功率	$12.11+0.15=12.26$	$9.02+0.24=9.26$
BC 线路首端电容功率		-0.49
B 点负荷功率	16.14	12.06
AB 线路末端电容功率		-0.66
AB 线路环节末端功率	$12.26+16.14=28.40$	$9.26+12.06-0.49-0.66=20.17$
AB 线路阻抗中的功率损耗	$\frac{28.40^2+20.17^2}{110^2}\times 8.4=0.84$	$\frac{28.40^2+20.17^2}{110^2}\times 16.64=1.67$
AB 线路环节首端功率	$28.40+0.84=29.24$	$20.17+1.67=21.84$
AB 线路首端电容功率		-0.66
电源点 A 送出的功率	29.24	$21.84-0.66=21.18$

3. 根据电源点 A 的电压和功率分布的计算结果，计算各点电压
电压的计算如表 8-3 所示。

表 8-3

电压的计算

(kV)

计算内容	计算结果
电源点 A 的电压	$\dot{U}_A = 115 \angle 0^\circ$
AB 线路阻抗中的电压降落	$\Delta U_{AB} = \frac{29.24 \times 8.4 + 21.84 \times 16.64}{115} = 5.3$ $\delta U_{AB} = \frac{29.24 \times 16.64 - 21.84 \times 8.4}{115} = 2.64$
B 点电压	
① 计及 δU_{AB} 的影响	$\dot{U}_B = 115 - 5.3 - j2.64 = 109.73 \angle -1.38^\circ$
② 不计 δU_{AB} 的影响	$U_B = 115 - 5.3 = 109.70$
BC 线路阻抗中的电压降落	$\Delta U_{BC} = \frac{12.26 \times 8.1 + 9.26 \times 12.69}{109.73} = 1.98$ $\delta U_{BC} = \frac{12.26 \times 12.69 - 9.26 \times 8.1}{109.73} = 0.73$
C 点电压	
① 计及 δU_{BC} 的影响	$\dot{U}_C = 109.70 - j2.64 - 1.98 - j0.73 = 107.77 \angle -1.79^\circ$
② 不计 δU_{BC} 的影响	$U_C = 109.70 - 1.98 = 107.72$

由电压计算结果可见, 110kV 电网中忽略电压降落横分量, 对电压计算结果影响很小, 却使计算大为简化。

实际电力系统中, 负荷点给出的往往不是负荷功率, 而是降压变电所或带固定负荷运行的发电厂。为了简化计算, 常将变电所处理为一个等值负荷, 称为变电所的运算负荷。将固定出力的发电厂处理为一个等值功率, 称为发电厂的运算功率。

变电所的运算负荷等于它的低压母线负荷加上主变压器中的总功率损耗, 再加上高压母线上的负荷和与其高压母线相连的所有线路电容功率的一半。发电厂的运算功率等于它发出的总功率减去厂用电及地方负荷, 再减去升压变压器中的总功率损耗和与其高压母线相连的所有线路电容功率的一半。

下面应用运算负荷和运算功率的概念化简如图 8-8 (a) 所示的简单电力系统。图中 A 为电源点, B 点接一降压变电所, C 点接一固定出力的发电厂, 相应的等值电路如图 8-8 (b) 所示。

由图 8-8 (b) 可知, 变电所 B 的运算负荷 $\bar{S}_B$ 为

$$\begin{aligned}
 \bar{S}_B &= \bar{S}_{LD} + \Delta \bar{S}_{T1} + \Delta \bar{S}_{0.T1} + (-j \frac{1}{2} Q_{C.AB} - j \frac{1}{2} Q_{C.BC}) \\
 &= (P_{LD} + \Delta P_{T1} + \Delta P_{0.T1}) + j(Q_{LD} + \Delta Q_{T1} + \Delta Q_{0.T1} - \frac{1}{2} Q_{C.AB} - \frac{1}{2} Q_{C.BC}) \\
 &= P_B + jQ_B
 \end{aligned} \tag{8-38}$$