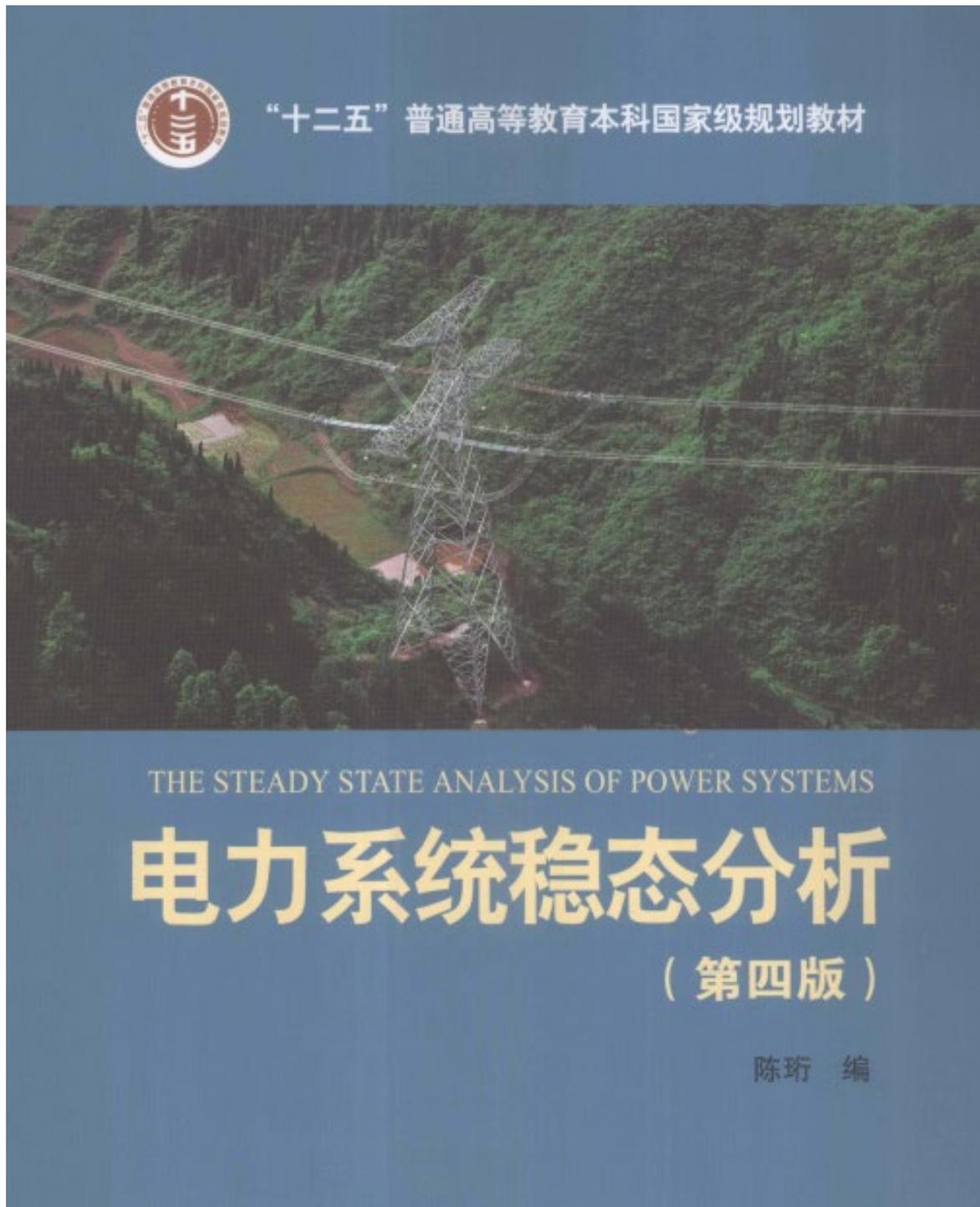


1、教材封面



2、教材目录

目 录

前言	
第一版前言	
第二版前言	
第三版前言	
第一章 电力系统的基本概念	1
第一节 电力系统概述	1
第二节 电力系统运行应满足的基本要求	4
第三节 电力系统的接线方式和电压等级	7
第四节 电力系统及其自动化学科和电力系统分析课程	11
小结	13
第二章 电力系统各元件的特性和数学模型	14
第一节 发电机组的运行特性和数学模型	14
第二节 变压器的参数和数学模型	19
第三节 电力线路的参数和数学模型	25
第四节 负荷的运行特性和数学模型	52
第五节 电力网络的数学模型	58
小结	69
第三章 简单电力网络的计算和分析	71
第一节 电力线路和变压器运行状况的计算与分析	71
第二节 辐射形和环形网络中的潮流分布	81
第三节 配电网潮流计算的特点	97
第四节 电力网络潮流的调整控制	102
小结	107
第四章 复杂电力系统潮流的计算机算法	109
第一节 电力网络方程	109
第二节 功率方程及其迭代解法	121
第三节 牛顿—拉夫逊法潮流计算	127
第四节 PQ分解法潮流计算	139
* 第五节 潮流计算中稀疏技术的运用	147
* 第六节 电力系统状态估计与最优潮流简介	163
小结	169
第五章 电力系统的有功功率和频率调整	171
第一节 电力系统中有功功率的平衡	171
第二节 电力系统中有功功率的最优分配	174
第三节 电力系统的频率调整	199
小结	215
第六章 电力系统的无功功率和电压调整	217
第一节 电力系统中无功功率的平衡	217
第二节 电力系统中无功功率的最优分布	223
第三节 电力系统的电压调整——电压管理和借发电机、变压器调压	231
第四节 电力系统的电压调整——借补偿设备调压和组合调压	240
小结	256
参考文献	258

3、试讲内容（内容是说一节课（40分钟））

第三章 简单电力网络的计算和分析

3.1 电力线路运行状况的计算

3.1.1 电力线路上的电压降落和功率损耗

第三章 简单电力网络的计算和分析

本章和下一章阐述的都是电力系统正常运行状况的分析和计算，重点在电压、电流、功率的分布，即潮流分布。本章侧重于物理现象的分析和简单网络潮流分布的手算方法和控制，下一章则侧重于复杂系统潮流分布的计算机算法。但应指出，简单网络和复杂系统之间并没有明显的界限。目前，计算机的运用已十分广泛，这里仍适当介绍某些手算方法，一则是通过手算可加深对物理概念的理解，再则在运用计算机计算前仍需以手算求取某些原始数据。

本章主要阐述两个问题：电力线路和变压器运行状况的计算和分析，简单电力网络的潮流分布和控制。因此，和上一章讨论的电力系统的数学模型不同，这两章将主要讨论电力系统的运行状况。

第一节 电力线路和变压器运行状况的计算与分析

一、电力线路运行状况的计算

1. 电力线路上的电压降落和功率损耗

对以II形等值电路表示的电力线路，既可运用式(2-38)在已知两个变量(如末端电流、电压)的情况下，求取另外两个变量(即始端电流、电压)；也可运用节点电压法或回路电流法等列出方程式组后进行联立求解。另外，因为这种电路简单，也可运用欧姆定律、基尔霍夫定律等直接写出有关的计算公式。但所有这些方法都不免要进行复数运算，不利于手算，而手算时应采用尽可能避免复数运算的方法。

图3-1中，设末端电压为 \dot{U}_2 ，末端功率为 $\bar{S}_2 = P_2 + jQ_2$ ，则末端导纳支路的功率 $\Delta\bar{S}_{g2}$ 为

$$\begin{aligned}\Delta\bar{S}_{g2} &= \left(\frac{Y}{2}\dot{U}_2\right)^* \dot{U}_2 = \frac{Y}{2}\dot{U}_2\dot{U}_2 = \frac{1}{2}(G-jB)U_2^2 = \frac{1}{2}GU_2^2 - \frac{1}{2}jBU_2^2 \\ &= \Delta P_{g2} - j\Delta Q_{g2}\end{aligned}\quad (3-1)$$

阻抗支路末端的功率 \bar{S}'_2 为

$$\begin{aligned}\bar{S}'_2 &= \bar{S}_2 + \Delta\bar{S}_{g2} = (P_2 + jQ_2) + (\Delta P_{g2} - j\Delta Q_{g2}) \\ &= (P_2 + \Delta P_{g2}) + j(Q_2 - \Delta Q_{g2}) = P'_2 + jQ'_2\end{aligned}$$

阻抗支路中损耗的功率 $\Delta\bar{S}_s$ 为

$$\begin{aligned}\Delta\bar{S}_s &= \left(\frac{\bar{S}'_2}{U_2}\right)^2 Z = \frac{P'^2_2 + Q'^2_2}{U_2^2}(R + jX) \\ &= \frac{P'^2_2 + Q'^2_2}{U_2^2}R + j\frac{P'^2_2 + Q'^2_2}{U_2^2}X = \Delta P_s + j\Delta Q_s\end{aligned}\quad (3-2)$$

阻抗支路始端的功率 \bar{S}'_1 为

$$\begin{aligned}\bar{S}'_1 &= \bar{S}'_2 + \Delta\bar{S}_s = (P'_2 + jQ'_2) + (\Delta P_s + j\Delta Q_s) \\ &= (P'_2 + \Delta P_s) + j(Q'_2 + \Delta Q_s) = P'_1 + jQ'_1\end{aligned}$$

始端导纳支路的功率 $\Delta\bar{S}_{y1}$ 为

$$\begin{aligned}\Delta\bar{S}_{y1} &= \left(\frac{Y}{2}\dot{U}_1\right)^* \dot{U}_1 = \frac{Y}{2}\dot{U}_1\dot{U}_1 = \frac{1}{2}(G-jB)U_1^2 \\ &= \frac{1}{2}GU_1^2 - \frac{1}{2}jBU_1^2 = \Delta P_{y1} - j\Delta Q_{y1}\end{aligned}\quad (3-3)$$

始端功率 \bar{S}_1 为

$$\begin{aligned}\bar{S}_1 &= \bar{S}'_1 + \Delta\bar{S}_{y1} = (P'_1 + jQ'_1) + (\Delta P_{y1} - j\Delta Q_{y1}) \\ &= (P'_1 + \Delta P_{y1}) + j(Q'_1 - \Delta Q_{y1}) = P_1 + jQ_1\end{aligned}$$

这就是电力线路功率计算的全部内容。

但在实际计算时,始端导纳支路功率 $\Delta\bar{S}_{y1}$ 和始端功率 \bar{S}_1 都必须在求得始端电压 \dot{U}_1 后方能求取。求取始端电压 \dot{U}_1 的方法如下。

取 \dot{U}_2 与实轴重合,如图 3-2 所示,则由

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \left(\frac{\bar{S}'_2}{\dot{U}_2}\right)^* Z$$

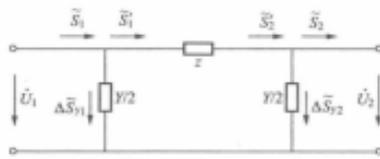


图 3-1 电力线路的电压和功率

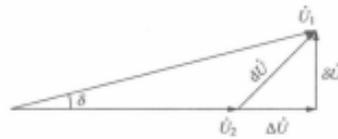


图 3-2 电力线路的电压相量图

可得

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \frac{P'_2 - jQ'_2}{U_2}(R + jX) = \left(U_2 + \frac{P'_2 R + Q'_2 X}{U_2}\right) + j\left(\frac{P'_2 X - Q'_2 R}{U_2}\right)\quad (3-4)$$

再令

$$\frac{P'_2 R + Q'_2 X}{U_2} = \Delta U, \quad \frac{P'_2 X - Q'_2 R}{U_2} = \delta U$$

将式 (3-4) 改写为

$$\dot{U}_1 = (U_2 + \Delta U) + j\delta U$$

则又可得

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U)^2 + (\delta U)^2}\quad (3-5)$$

而图 3-2 中的相位角,或所谓功率角则为

$$\delta = \tan^{-1} \frac{\delta U}{U_2 + \Delta U}\quad (3-6)$$

由于一般情况下, $U_2 + \Delta U \gg \delta U$, 可将式 (3-5) 按二项式定理展开, 取其前两项, 得

$$U_1 \approx (U_2 + \Delta U) + \frac{(\delta U)^2}{2(U_2 + \Delta U)}$$

又由于上式中第三项本身不大, 可略去其分母上的 ΔU , 得

$$U_1 \approx (U_2 + \Delta U) + \frac{(\delta U)^2}{2U_2}\quad (3-7)$$

对于一般线路，上式已足够精确。如需进一步简化，还可略去其中第三项，即略去 δU ，得

$$U_1 \approx U_2 + \Delta U = U_2 + \frac{P'_2 R + Q'_2 X}{U_2} \quad (3-8)$$

这就是电力线路电压计算的全部内容。

纵观式 (3-1)~式 (3-8) 可见，所有计算都已避免了复数乘除。

式 (3-1)~式 (3-8) 既可用于标幺制，也可用于有名制。用有名制计算时，每相阻抗、导纳的单位为 Ω 、S；功率和电压的单位可为以 MVA、MW、Mvar 表示的三相功率和以 kV 表示的线电压；也可为以 MVA、MW、Mvar 表示的单相功率和以 kV 表示的相电压。

附带指出，采用标幺制时，功率角 δ 应以 rad 表示，因以 rad 表示的角度实际上已是标幺值。

类似于这种推导，还可获得从始端电压 \dot{U}_1 、始端功率 \bar{S}_1 求取末端电压 \dot{U}_2 、末端功率 \bar{S}_2 的计算公式。其中，计算功率的部分与式 (3-1)~式 (3-3) 并无原则区别，计算电压的部分则应改写为

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= (U_1 - \Delta U') - j\delta U' \\ \Delta U' &= \frac{P'_1 R + Q'_1 X}{U_1}; \quad \delta U' = \frac{P'_1 X - Q'_1 R}{U_1} \end{aligned} \quad (3-9)$$

$$U_2 = \sqrt{(U_1 - \Delta U')^2 + (\delta U')^2} \quad (3-10)$$

$$\delta = \tan^{-1} \frac{-\delta U'}{U_1 - \Delta U'} \quad (3-11)$$

且需注意，由于推导式 (3-4)~式 (3-6) 时系取 \dot{U}_2 与实轴重合，而推导式 (3-9)~式 (3-11) 时则取 \dot{U}_1 与实轴重合，按式 (3-4) 求得的 ΔU 、 δU 与按式 (3-9) 求得的 $\Delta U'$ 、 $\delta U'$ 不同，虽然 $(\Delta U + j\delta U)$ 和 $(\Delta U' + j\delta U')$ 的模数 dU ，如同功率角 δ 的绝对值一样，两种计算结果没有差别。这两种电压计算的异同示于图 3-3。

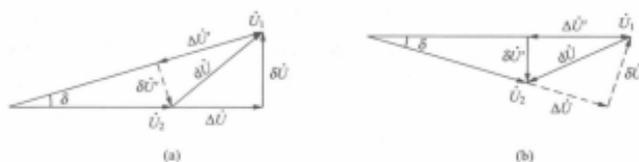


图 3-3 计算电压的两种方法
(a) 自末端起算；(b) 自始端起算

还应指出，所有这些计算公式都是在 $\bar{S}_2 = P_2 + jQ_2$ ，即线路末端负荷以滞后功率因数运行的假设下推导出的。如负荷以超前功率因数运行，则有关公式中的无功功率应变号。例如，设 $\bar{S}_2 = P_2 - jQ_2$ ，则由 $\bar{S}'_2 = (P_2 + \Delta P_{\text{线}}) - j(Q_2 + \Delta Q_{\text{线}}) = P'_2 - jQ'_2$ ，将得

$$\Delta U = \frac{P'_2 R - Q'_2 X}{U_2}; \quad \delta U = \frac{P'_2 X + Q'_2 R}{U_2}$$

ΔU 可能具有负值，线路末端电压可能高于始端。

求得线路两端电压后，就可计算某些标志电压质量的指标，如电压降落、电压损耗、电压偏移、电压调整等。

求得线路两端电压后，就可计算某些标志电压质量的指标，如电压降落、电压损耗、电压偏移、电压调整等。

所谓电压降落或线路阻抗中的电压降落,是指线路始末两端电压的相量差 $\dot{U}_1 - \dot{U}_2$ 或 $d\dot{U}$ 。电压降落也是相量。它有两个分量 $\Delta\dot{U}$ 和 $\delta\dot{U}$, 分别称电压降落的纵分量和横分量。

所谓电压损耗,是指线路始末两端电压的数值差 $U_1 - U_2$ 。电压损耗仅有数值。而由式(3-8)或图 3-3 可见,电压损耗近似等于电压降落的纵分量。电压损耗常以百分值表示,即

$$\text{电压损耗 \%} = \frac{U_1 - U_2}{U_N} \times 100\%$$

式中 U_N ——线路额定电压。

所谓电压偏移,是指线路始端或末端电压与线路额定电压的数值差 $U_1 - U_N$ 或 $U_2 - U_N$ 。电压偏移也仅有数值。电压偏移也常以百分值表示,即

$$\text{始端电压偏移 \%} = \frac{U_1 - U_N}{U_N} \times 100\%$$

$$\text{末端电压偏移 \%} = \frac{U_2 - U_N}{U_N} \times 100\%$$

所谓电压调整,是指线路末端空载与负载时电压的数值差 $U_{20} - U_2$ 。电压调整也仅有数值。不计线路对地电纳时, $U_{20} = U_1$, 电压调整也就等于电压损耗,即 $U_{20} - U_2 = U_1 - U_2$ 。电压调整也常以百分值表示,即

$$\text{电压调整 \%} = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100\%$$

式中 U_{20} ——线路末端空载时电压。

求得线路两端功率,就可计算某些标志经济性能的指标,如输电效率。所谓输电效率是指线路末端输出有功功率 P_2 与线路始端输入有功功率 P_1 的比值,常以百分值表示,即

$$\text{输电效率 \%} = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

因线路始端有功功率 P_1 总大于末端有功功率 P_2 , 输电效率总小于 100%。

虽然 P_1 总大于 P_2 , 但线路始端输入的无功功率 Q_1 却未必大于末端输出的无功功率 Q_2 。因线路对地电纳吸取容性无功功率,即发出感性无功功率,线路轻载时,电纳中发出的感性无功功率可能大于电抗中消耗的感性无功功率,以致从端点条件看,线路末端输出的无功功率 Q_2 可能大于线路始端输入的无功功率 Q_1 。

3.2 变压器运行状况的计算

3.2.1 变压器中的电压降落、功率损耗和电能损耗

三、变压器运行状况的计算

1. 变压器中的电压降落、功率损耗和电能损耗

推导出线路的功率计算和电压计算公式后,就可将它们套用于变压器的功率计算和电压计算。

类似式(3-2),可列出变压器阻抗支路中损耗的功率 ΔS_{zT} 为

$$\begin{aligned} \Delta \bar{S}_{zT} &= \left(\frac{S_2'}{U_2} \right)^2 Z_T = \frac{P_2'^2 + Q_2'^2}{U_2^2} (R_T + jX_T) \\ &= \frac{P_2'^2 + Q_2'^2}{U_2^2} R_T + j \frac{P_2'^2 + Q_2'^2}{U_2^2} X_T = \Delta P_{zT} + j\Delta Q_{zT} \end{aligned} \quad (3-17)$$

类似式(3-3),可列出变压器励磁支路功率 $\Delta \bar{S}_{yT}$ 为

$$\begin{aligned} \Delta \bar{S}_{yT} &= (Y_T \dot{U}_1)^* \dot{U}_1 = \dot{Y}_T \dot{U}_1 \dot{U}_1 = (G_T + jB_T) U_1^2 \\ &= G_T U_1^2 + jB_T U_1^2 = \Delta P_{yT} + j\Delta Q_{yT} \end{aligned} \quad (3-18)$$

类似式(3-4),可列出变压器阻抗中电压降落的纵、横分量为

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_T &= \frac{P_2' R_T + Q_2' X_T}{U_2} \\ \delta U_T &= \frac{P_2' X_T - Q_2' R_T}{U_2} \end{aligned} \right\} \quad (3-19)$$

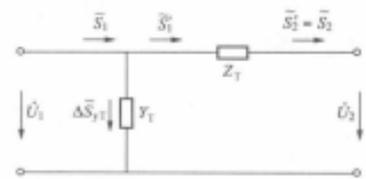


图 3-7 变压器中的电压和功率

类似式 (3-5), 可列出变压器电源端的电压 U_1 为

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_T)^2 + (\delta U_T)^2} \quad (3-20)$$

而类似式 (3-6), 又可列出变压器电源端和负荷端电压间的相位角 δ_T 为

$$\delta_T = \tan^{-1} \frac{\delta U_T}{U_2 + \Delta U_T} \quad (3-21)$$

希望注意, 变压器励磁支路的无功功率与线路导纳支路的无功功率符号相反。

实际上, 上列公式是用以计算变电站变压器中的功率和电压的。这是因为对变电站, 经常是负荷侧的功率为已知。而对于发电厂, 因经常是电源侧的功率为已知, 它的变压器应从电源侧起算。这时, 计算电压的公式相似于式 (3-9)~式 (3-11), 即

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_T' &= \frac{P_1' R_T + Q_1' X_T}{U_1} \\ \delta U_T' &= \frac{P_1' X_T - Q_1' R_T}{U_1} \end{aligned} \right\} \quad (3-22)$$

$$U_2 = \sqrt{(U_1 - \Delta U_T')^2 + (\delta U_T')^2} \quad (3-23)$$

$$\delta_T = \tan^{-1} \frac{-\delta U_T'}{U_1 - \Delta U_T'} \quad (3-24)$$

至于变压器中的电能损耗, 电阻中损耗即铜损耗部分可完全套用式 (3-12)~式 (3-16) 计算; 电导中损耗即铁损耗部分则可近似取变压器空载损耗 P_0 与变压器运行小时数的乘积。变压器运行小时数等于一年 8760h 减去因检修等而退出运行的小时数。

如不必求取变压器内部的电压降落, 可不制定变压器的等值电路而直接由制造厂提供的试验数据计算其功率损耗。为此, 将式 (2-6)~式 (2-9) 代入式 (3-17)、式 (3-18), 整理后得

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{\pi} &= \frac{P_k U_k^2 S_2'^2}{1000 U_2^2 S_N^2} \\ \Delta Q_{\pi} &= \frac{U_k \% U_k^2 S_2'^2}{100 U_2^2 S_N} \end{aligned} \right\} \quad (3-25)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{yT} &= \frac{P_0 U_1^2}{1000 U_k^2} \\ \Delta Q_{yT} &= \frac{I_0 \% S_N U_1^2}{100 U_k^2} \end{aligned} \right\} \quad (3-26)$$

对于发电厂的变压器, 则应有

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{\pi} &= \frac{P_k U_k^2 S_1'^2}{1000 U_1^2 S_N^2} \\ \Delta Q_{\pi} &= \frac{U_k \% U_k^2 S_1'^2}{100 U_1^2 S_N} \end{aligned} \right\} \quad (3-25a)$$

这些都是精确计算公式。如计及 $S_1 = S_2'$, 并取 $S_1 \approx S_1'$, $U_1 \approx U_2 \approx U_N$, 它们又可简化为

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{\pi} &= \frac{P_k S_2^c}{1000 S_N^2} \\ \Delta Q_{\pi} &= \frac{U_k \% S_N}{100} \cdot \frac{S_2^c}{S_N^2} \end{aligned} \right\} \quad (3-27)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{\text{r}} &= \frac{P_{\text{k}} S_{\text{N}}^2}{1000 S_{\text{N}}^2} \\ \Delta Q_{\text{r}} &= \frac{U_{\text{k}} \% S_{\text{N}}}{100} \cdot \frac{S_{\text{I}}^2}{S_{\text{N}}^2} \end{aligned} \right\} \quad (3-27\text{a})$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{\text{yT}} &= \frac{P_0}{1000} \\ \Delta Q_{\text{yT}} &= \frac{I_0 \% S_{\text{N}}}{100} \end{aligned} \right\} \quad (3-28)$$

由式 (3-27)、式 (3-27a)、式 (3-28) 可见, 额定条件下运行时, 变压器电抗中损耗的无功功率就等于以标么值表示的短路电压乘以额定功率; 电纳中损耗的无功功率则等于以标么值表示的空载电流乘以额定功率。计算电阻和电导中损耗的有功功率时, 要注意制造厂原提供的单位 (kW) 与电力系统计算中常取的单位 (MW) 之间的换算。

3.2.2 节点注入功率、运算负荷和运算功率

2. 节点注入功率、运算负荷和运算功率

求得变压器中的功率损耗后, 可将变电站负荷侧的负荷功率 P_2 、 Q_2 与按式 (3-25)、式 (3-26) 求得的功率损耗相加, 得直接连接在变电站电源侧母线上的等值负荷功率 P_1 、 Q_1 ; 或从发电厂电源侧的电源功率 P_1 、 Q_1 中减去按式 (3-25a)、式 (3-26) 求得的功率损耗, 得直接连接在发电厂负荷侧母线上的等值电源功率 P_2 、 Q_2 。

等值电源功率, 在运用计算机计算并将发电厂负荷侧母线看作为一个节点时, 又称该节点的注入功率, 即电源向网络注入的功率, 而与之相对应的电流则称注入电流。注入功率或注入电流总以流入网络为正。因此, 等值负荷功率, 即负荷从网络吸取的功率, 就可看作为具有负值的变电站 (电源侧母线) 节点注入功率。

手算时, 往往还将变电站或发电厂母线上所连线路对地电纳中无功功率的一半也并入等值负荷或等值电源功率, 并分别称之为运算负荷 (功率) 或运算 (电源) 功率。显然, 在计算运算负荷时, 如等值负荷功率属感性, 应在等值负荷的无功功率中减去这部分容性电纳中的无功功率; 在计算运算功率时, 如等值电源功率属感性, 应在等值电源的无功功率中加入这部分容性电纳中的无功功率。显然, 这时的运算功率和运算负荷也可分别看作为具有正值和负值的注入功率。负荷功率、等值负荷功率、运算负荷以及电源功率、等值电源功率、运算功率之间的关系如图 3-8 所示。

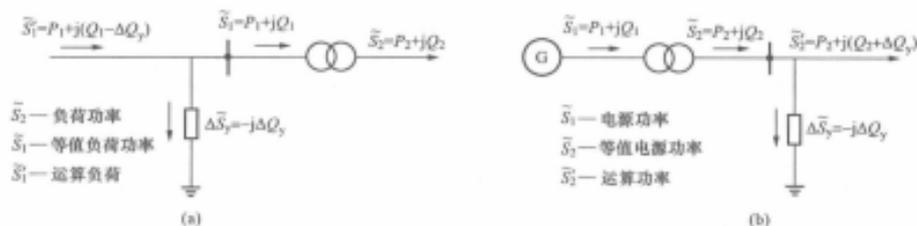


图 3-8 几种负荷功率、电源功率之间的关系
(a) 变电站变压器; (b) 发电厂变压器

以上的讨论同样适用于其他型式的变压器, 如三绕组变压器、自耦变压器等。

4、教材的封底

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

电工与电子技术基础	彭臻蓉
信号分析与处理(第二版)	崔翔
电机学(第三版)	胡敏强
电机学习题解析(第二版)	胡彦生
电机学(第二版)	戈宝军
走进电世界(第二版)	孙元章
电气工程基础(第二版)上册	陈慈萱
电气工程基础(第二版)下册	陈慈萱
电力系统稳态分析(第四版)	陈珩
电力系统暂态分析(第四版)	方万良
电力系统分析(第二版)	夏道止
发电厂电气部分(第五版)	苗世洪
发电厂变电所电气部分(第二版)	刘宝贵
电力系统规划(第二版)	程浩忠
电力系统继电保护原理(第四版)	贺家李
电力系统自动装置原理(第五版)	杨冠城
高电压工程(第二版)	林福昌
现代供电技术(第二版)	王福忠
现代供电技术学习指导	王福忠
架空输电线路设计(第二版)	孟遂民



中国电力出版社教材中心
教材网址 <http://jc.cepp.sgcc.com.cn>
服务热线 010-63412548 63412523

