

二、电动势分析

(1) 主磁通感应电动势

令: $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$

$$\mathbb{P}[: e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = \omega N_1 \Phi_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = E_{1m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

$$= \sqrt{2} E_1 \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

$$\stackrel{\dot{E}_2}{\neq} \dot{\Phi}_m$$

$$\stackrel{\dot{E}_2}{\neq} \dot{E}_1$$

相量表示: $\dot{E}_{\rm l} = -j4.44\,fN_{\rm l}\dot{\Phi}_{\rm m}$ 同理: $\dot{E}_{\rm 2} = -j4.44\,fN_{\rm 2}\dot{\Phi}_{\rm m}$

第二章 变压器的运行分析

(2) 漏磁通感应电动势

 \diamondsuit : $Φ_{\sigma l} = Φ_{\sigma lm} \sin ωt$

$$[\Phi]: e_{\sigma 1} = -N_1 \frac{d\Phi_{\sigma 1}}{dt} = \sqrt{2}E_{\sigma 1}\sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

則:
$$e_{\sigma 1} = -N_1 \frac{d\Phi_{\sigma 1}}{dt} = \sqrt{2}E_{\sigma 1}\sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

相量表示: $\dot{E}_{\sigma 1} = -j\frac{\omega N_1\dot{\Phi}_{\sigma 1m}}{\sqrt{2}} = -j\frac{\omega N_1\dot{\Phi}_{\sigma 1m}}{\sqrt{2}} \times \frac{\dot{I}_0}{\dot{I}_0}$

其中, x_1 为原绕组的漏电抗,简称**漏抗。**

$$\mathbf{x}_1 = \omega L_{\sigma 1} = \omega \frac{N_1 \Phi_{\sigma 1m}}{\sqrt{2} I_0} = \omega \frac{N_1 (\sqrt{2} I_0 N_1) \Lambda_{\sigma 1}}{\sqrt{2} I_0} = \omega N_1^2 \Lambda_{\sigma 1}$$

注: ①漏磁感应电动势可以表示为电流在漏电抗上的压降; ②漏磁路是线性的,漏磁导是常数,漏抗x,为常数。

第二章 变压器的运行分析

(3) 电动势平衡方程

原边 $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_0 r_1$ (绕组电阻未标出)

由于
$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_{0}x_{1}$$

则有 $\dot{U}_{1} = -\dot{E}_{1} + j\dot{I}_{0}x_{1} + \dot{I}_{0}r_{1}$
 $= -\dot{E}_{1} + \dot{I}_{0}Z_{1}$
 \ddot{V}_{1}

其中 $Z_1 = r_1 + jx_1$ 称为原边绕组的漏阻抗

额定电压下, $I_0 \le 0.1 I_{1N}$ 很小, 可近似认为 $U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$

结论: 当频率和原绕组匝数一定时, 主磁通的大小决定 于所加电压的大小,而与磁路的材料、尺寸无关。

副边 $\dot{U}_{20} = \dot{E}_2$

第二章 变压器的运行分析

三、空载电流分析

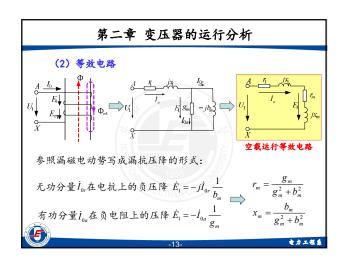
(1) 空载电流的构成

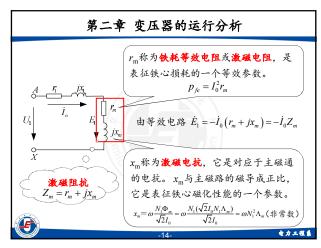
1) 磁化分量 i_{0r} : 它的作用是产生主 磁通, 是空载电流的无功分量, 与 主磁通同相位。

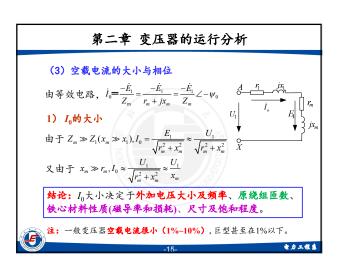
2) **铁耗分量i_{0a}**: 它和电动势相互作 用产生的有功功率供给铁耗, 是空 载电流的有功分量,与电压降 $(-E_1)$ 同相位。

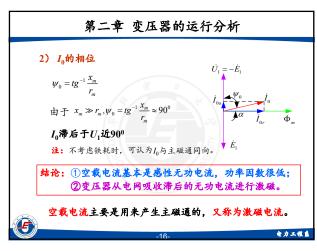
 $I_{0r} = I_0 \sin \psi_0$ $I_{0a} = I_0 \cos \psi_0$ $I_0 = \sqrt{I_{0r}^2 + I_{0a}^2}$

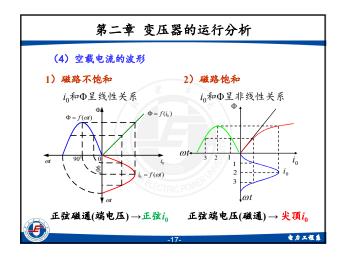
电力工程系

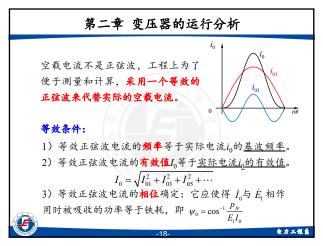


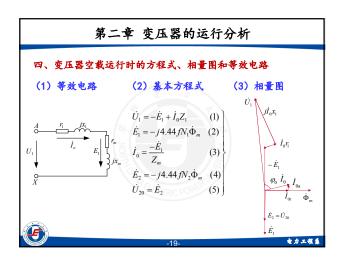












五、几点结论

- 1) 忽略漏阻抗压降时,变压器**主磁通①_m的大小取决于电源电压、频率和原绕组匝数**,与磁路所用材料性质和尺寸无关。
- 2) 磁路材料性质、尺寸只决定产生 Φ_m 所需激磁电流 I_0 的 \star 小。
- 3) 磁路的饱和程度同时影响激磁电流I₀的大小和波形。 磁路愈饱和,则激磁电流愈大,波形愈尖。
- 4) 铁心变压器由于有铁耗, $\dot{\Phi}_{m}$ \dot{D}_{0} 不同相位,它们之间的夹角主要决定于铁耗的大小。

中力工程系

电力工程系

第二章 变压器的运行分析

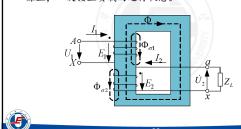
5)"场化路"的等效过程中,主磁路为非线性、有损等效,漏磁路为线性、无损等效。

$$6) 电源电压变化对激磁参数Zm和激磁电流I0的影响
$$U_1 \uparrow \Longrightarrow \Phi_m \uparrow \Longrightarrow \left\{ \begin{array}{c} B_m \uparrow \Longrightarrow \left\{ \begin{array}{c} \mu_{fe} \downarrow \Longrightarrow x_m \downarrow \\ p_{fe} \uparrow \varpropto B_m^2 \varpropto \Phi^2 \end{array} \right\} \Longrightarrow r_m \downarrow \\ U_1 \uparrow \Longrightarrow \Phi_m \uparrow \Longrightarrow \left\{ \begin{array}{c} E_1 \uparrow \\ Z_m \downarrow \end{array} \right\} \Longrightarrow I_0 \uparrow \hookleftarrow F_0 \uparrow \hookleftarrow \Phi_m \uparrow \frac{l}{\mu_{fe} \downarrow S} \end{array}$$$$

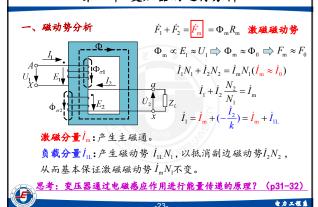
第二章 变压器的运行分析

§2.3 变压器的负载运行

负载:变压器一次侧接在额定频率、额定电压的交流电源上,二次接上负载的运行状态。

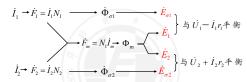


第二章 变压器的运行分析



第二章 变压器的运行分析

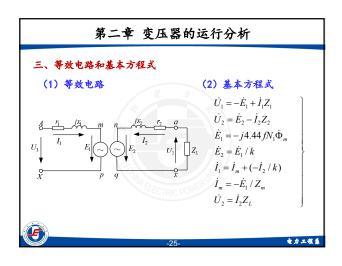
二、电动势分析

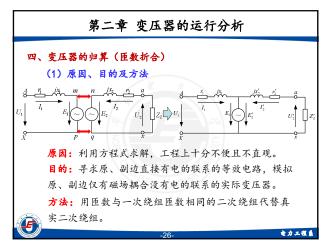


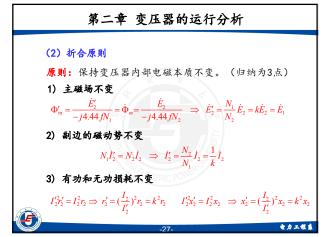
按习惯的规定正方向, 电动势平衡关系式如下:

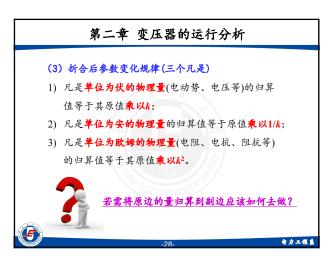
$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\left(\dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1}\right) + \dot{I}_1 r_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 x_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{U}_2 &= \left(\dot{E}_2 + \frac{\dot{E}_{\sigma 2}}{c_{\sigma 2}}\right) - \dot{I}_2 r_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 r_2 - j \dot{I}_2 x_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \\ \dot{U}_2 &= \dot{I}_2 Z_1 \end{aligned}$$

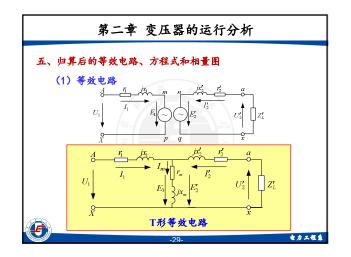
电力工程系

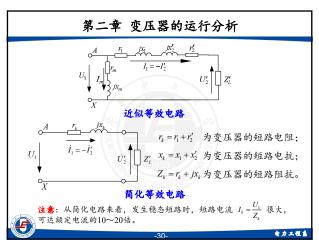


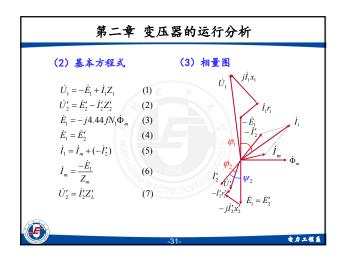


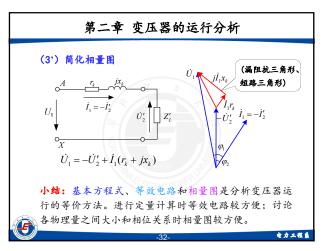


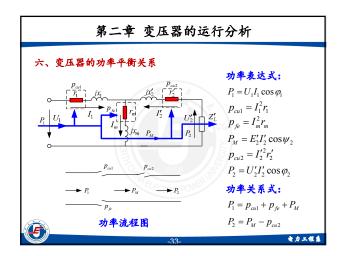


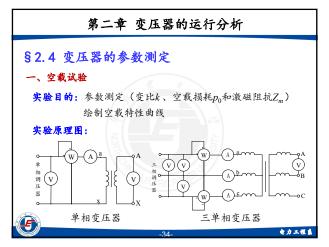


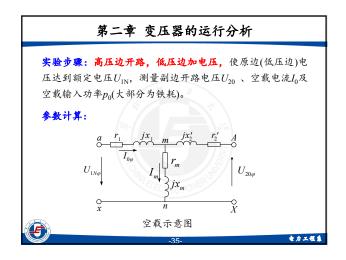


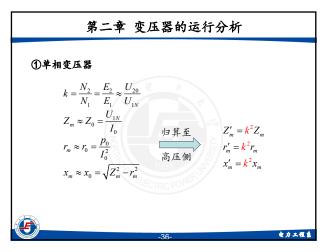


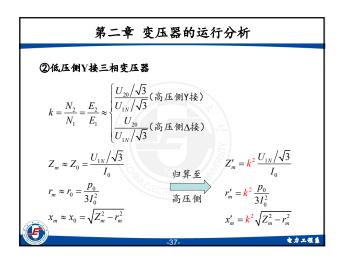


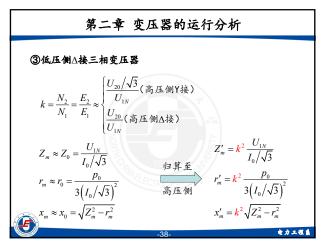


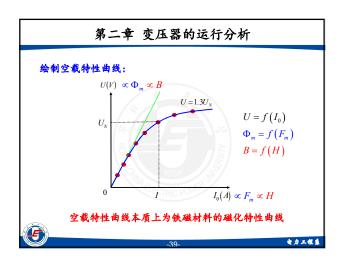


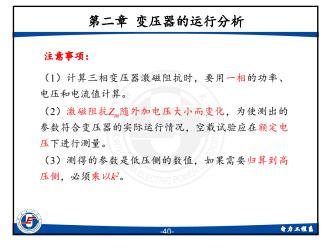


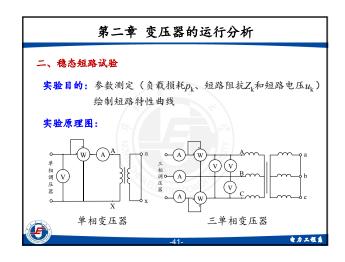


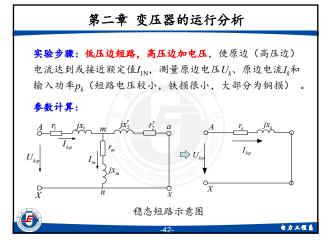












$$z_k = \frac{U_k}{I_k} \quad r_k = \frac{p_k}{I_k^2} \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}$$

②高压侧Y接三相变压器
$$z_k = \frac{U_k/\sqrt{3}}{I_k}$$
 $r_k = \frac{p_k}{3I_k^2}$ $x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}$

③高压侧
$$\Delta$$
接三相变压器 $z_k = \frac{U_k}{I_k/\sqrt{3}}$ $r_k = \frac{p_k}{3(I_k/\sqrt{3})^2}$ $x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}$

因绕组电阻随温度变化而变化, 根据国家标准需换算到基 准工作温度75℃,换算式如下:

$$r_{k75^{\circ}C} = \frac{235 + 75}{235 + \theta} r_{k}$$
 进而: $z_{k75^{\circ}C} = \sqrt{r_{k75^{\circ}C}^2 + x_{k}^2}$ 材料系数(铜) 试验环境温度

试验环境温度

第二章 变压器的运行分析

阻抗电压(短路电压): 短路阻抗与原边额定电流的乘积 用原边额定电压的百分数表示。

$$u_k = \frac{I_{1N\phi} z_{k75^0C}}{U_{1N\phi}} \times 100\%$$

有功分量ukr无功分量ukx分别为:

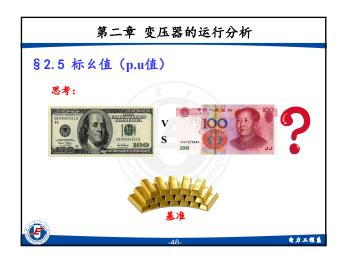
$$u_{kr} = \frac{I_{1N} r_{k75^{\circ} C}}{U_{1N}} \times 100\%$$

$$U_{1N} = \frac{I_{1N} x_{k}}{U_{1N}} \times 1000\%$$

$$u_{kx} = \frac{I_{1N}x_k}{U_{1N}} \times 100\%$$

 $u_k = \sqrt{u_{kr}^2 + u_{kx}^2} \times 100\%$

第二章 变压器的运行分析 绘制短路特性曲线: $I = 1.2I_{N}$ 为何短路特性曲线是直线? $Z_2' << Z_m \Rightarrow$ 认为 Z_m 支路开路 $Z_k = (r_1 + r_2') + j(x_1 + x_2')$ 为常数 F



第二章 变压器的运行分析

定义:标幺值=实际值

表示方法: 物理量原符号右上角加上*号, 如 U^* 、 I^* 、 Z^* 等 计算标幺值应注意:

- 1) 在电机和变压器中, 常取额定值作为基值;
- 2) 实际值和基值应同为线值或相值;
- 3) 实际值与基值的单位必须相同;
- 4) 基值可以任意选取, 但对于存在制约关系的几个物理
- 量(U、I、Z和S)只能任意选取其中的两个量的基值, 其他基值由计算获得;
- 5) 归算值的基值应取被归算到所在边的基值。

电力工程系

第二章 变压器的运行分析

变压器标幺值的计算

1) 选用电压、电流额定值为基值时, 原、副边电压、电 流的标幺值:

$$U_1^* = \frac{U_1}{U_{1N}}, \quad U_2^* = \frac{U_2}{U_{2N}}, \quad I_1^* = \frac{I_1}{I_{1N}}, \quad I_2^* = \frac{I_2}{I_{2N}}$$

2) 原、副绕组阻抗的基值:

$$z_{1N} = U_{1N\varphi} \, / \, I_{1N\varphi} \qquad z_{2N} = U_{2N\varphi} \, / \, I_{2N\varphi}$$

原、副绕组漏阻抗的标幺值为:

$$z_{1}^{*} = \frac{z_{1}}{z_{1N}} = \frac{I_{1N\varphi}z_{1}}{U_{1N\varphi}} \qquad z_{2}^{*} = \frac{z_{2}}{z_{2N}} = \frac{I_{2N\varphi}z_{2}}{U_{2N\varphi}}$$

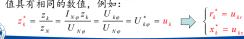
阻抗的标幺值等于额定相电流在阻抗上电压降的标幺值

标幺值的优点

- 1) 用标幺值表示的参数及性能数据变化范围很小, 便 于对不同容量的变压器进行比较。
- 2) 在三相变压器中,线值和相值的标幺值是相等的。
- 3) 用标幺值表示时, 原副边各物理量不需归算。例如:

$$r_2^* = \frac{I_{2N\varphi}r_2}{U_{2N\varphi}} = \frac{kI_{1N\varphi}r_2}{U_{1N\varphi}/k} = \frac{I_{1N\varphi}(k^2r_2)}{U_{1N}} = \frac{I_{1N\varphi}r_2'}{U_{1N\varphi}} = r_2'^*$$

4) 采用标幺值后各物理量的数值简化了, 各物理量额 定值的标幺值等于1, 计算更加简便。某些物理量标幺 值具有相同的数值,例如:





第二章 变压器的运行分析

标幺值的缺点

- 1) 没有单位, 因而物理概念不明确;
- 2) 无法利用量纲关系来检查某些计算是否正确。



问题:一台变压器, 铭牌数据显示 $u_k=4\%$, $u_{kr}=0.8\%$, $u_{kx}=3.9\%$, 问其进 行短路试验时测得的P*1~=?

第二章 变压器的运行分析

§ 2.6 变压器的运行性能

一、变压器的电压调整率

电压调整率: 原边接在额定频率、额定电压的电网上, 副边空载电压 U_{20} 与负载时副边电压 U_2 的算数差,相对 二次侧额定电压 U_{2N} 的百分数。

$$\Delta U = \frac{U_{20} - U_2}{U_{2N}} \times 100\% = \frac{U_{2N}' - U_2'}{U_{2N}'} \times 100\% = \frac{U_{1N} - U_2'}{U_{1N}} \times 100\%$$

电压调整率是变压器运行性能的重要参数之一,表示副 边电压的变化程度,反映了变压器供电电压的稳定性。



第二章 变压器的运行分析

$$\Delta U = \frac{U_{1N} - U_2'}{U_{1N}} \times 100\% = \frac{\overline{CD}}{U_{1N}} \times 100\%$$
$$= \frac{I_1 r_k \cos \varphi_2 + I_1 x_k \sin \varphi_2}{U_{1N}} \times 100\%$$

 $= (\frac{I_1}{I_{1N}} \frac{I_{1N} r_k}{U_{1N}} \cos \varphi_2 + \frac{I_1}{I_{1N}} \frac{I_{1N} x_k}{U_{1N}} \sin \varphi_2) \times 100\%$ $= (\beta u_{kr} \cos \varphi_2 + \beta u_{kx} \sin \varphi_2) \times 100\%$

 $= \beta(r_k^* \cos \varphi_2 + x_k^* \sin \varphi_2) \times 100\%$

其中: $\beta = \frac{I_1}{I_{1N}} = \frac{I_2}{I_{2N}}$ 称为负载系数,额定负载 $\beta = 1$

可见。电压调整率随着负载电流的增加正比增加。此外 还与短路阻抗和负载的功率因数有关。

电力工程系

第二章 变压器的运行分析

 $\Delta U = (\beta u_{kr} \cos \varphi_2 + \beta u_{kx} \sin \varphi_2) \times 100\%$

实际变压器的 $x_i^* >> r_i^*$

- a) 在纯电阻负载时, 电压调整率很小。
- b) 在感性负载时, ΔU 为正值。
- c) 负载为容性, 在 $|x_k^* \sin \varphi_2| > r_k^* \cos \varphi_2$ 时, ΔU 为负值, 即副边电压反而比空载电压高。
- d) 变压器负载功率因数为0.8(感性)时, 额定负载的 ΔU 约为5%, 故在变压器高压线圈设置±5%抽头, 便于电 压调节。



电力工程系

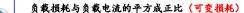
第二章 变压器的运行分析

二、变压器的损耗与效率

(1) 变压器损耗分类

变压器的损耗可分为负载损耗和铁耗,每一类又包 括基本损耗和附加损耗。

- 1) 负载损耗
- (a) 基本负载损耗:线圈电流的电阻损耗。
- (b) 附加负载损耗:漏磁场引起的电流集肤效应,使有 效电阻和铜耗增大的损耗, 漏磁场在结构部件中引起的 涡流损耗等。 (难以计算,一般是电阻乘一个系数)



电力工程系

- 2) 铁耗
- (a) 基本铁耗:铁芯中的磁滞、涡流损耗。
- (b) 附加铁耗:包括叠片间由于绝缘损伤所引起的局部 涡流损耗、主磁通在结构部件中引起的涡流损耗以及 高压变压器中的介质损耗等。

铁耗近似正比于 B_m^2 ,已制成的变压器中近似正比于 $U_{
m I}^2$,变压器原边电压一般保持为 $U_{
m I}{=}U_{
m IN}$ (不变损耗)

(2) 变压器的效率

输出功率和输入功率之比就是效率,即: $\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$



•

第二章 变压器的运行分析

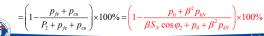
变压器效率计算的几个假定:

1) 忽略负载时 U_2 的变化:

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 \approx U_{2N} I_{2N} (\frac{I_2}{I_{2N}}) \cos \varphi_2 = \beta S_N \cos \varphi_2$$

- 2) 负载铁耗等于额定电压下的空载损耗: $P_{fe} \approx P_0 = \%$ 数
- 3) 任意负载时的负载损耗:

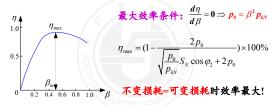
$$\begin{aligned} p_{ca} &= I_1^2 r_k = \left(\frac{I_1}{I_{1N}}\right)^2 I_{1N}^2 r_k = \beta^2 p_{kN} \\ \eta &= \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \left(\frac{P_1 - \sum p}{P_1}\right) \times 100\% = \left(1 - \frac{\sum p}{P_2 + \sum p}\right) \times 100\% \end{aligned}$$



电力工程系

第二章 变压器的运行分析

效率特性: 在一定性质的负载下,效率随负载系数而变化的 $\eta=f(\beta)$ 曲线。



变压器铁耗基本不变,负载损耗随负载变化而变化。— 般变压器的最大效率发生在β=0.5~0.6左右。

E

力工程集