



电机与拖动**课件**之四

变 压 器

胡梦月、韩谷静

纺大电子电气



章节目录

3.1 变压器的基本工作原理和结构

3.2 单相变压器的空载运行

3.3 单相变压器的负载运行

3.4 变压器的参数测定

3.5 标么值

3.6 变压器的运行特性

3.7 三相变压器

3.8 变压器的并联特性

3.9 特种变压器

一、定义

➤ 标么值，某一物理量的实际值与选定的同一单位的基准值的比值，即

$$\text{标么值} = \frac{\text{实际值}}{\text{基准值}}$$

二、基准值的确定

1、通常以**额定值**为基准值。

2、各侧的物理量以各自侧的额定值为基准；

线值以额定线值为基准值，相值以额定相值为基准值；

单相值以额定单相值为基准值，三相值以额定三相值为基准值；

3、 U 和 E 的基准值 U_B 。 R ， X 和 Z 的基准值为 Z_B 。 P ， Q 和 S 的基准值为 S_B 。



三、优点

- 1、便于比较，额定值的标么值为1；
- 2、可以直观反映变压器的运行情况百分值=标么值×100%；
- 3、折算前、后的标么值相等。线值的标么值=相值的标么值；单相值的标么值=三相值的标么值；
- 4、某些意义不同的物理量标么值相等。

$$Z_m^* = \frac{1}{I_0^*} \quad R_m^* = \frac{P_0^*}{I_0^{*2}} \quad Z_s^* = U_{SN}^* \quad R_s^* = P_{SN}^* \quad P_N^* = \cos \varphi_N \quad Q_N^* = \sin \varphi_N$$

四、缺点

标么值没有单位，物理意义不明确。





章节目录

3.1 变压器的基本工作原理和结构

3.2 单相变压器的空载运行

3.3 单相变压器的负载运行

3.4 变压器的参数测定

3.5 标么值

3.6 变压器的运行特性

3.7 三相变压器

3.8 变压器的并联特性

3.9 特种变压器

➤ 定义：是指一次侧加50Hz额定电压、二次空载电压与带负载后在某功率因数下的二次电压之差，与二次额定电压的比值，即

$$\Delta U = \frac{U_{20} - U_2}{U_{2N}} = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}}$$

电压变化率是表征变压器运行性能的重要指标之一,它大小反映了供电电压的稳定性。

用相量图可以推导出电压变化率的表达式：

式中 $\beta = \frac{I_2}{I_{2N}}$ 称为负载系数

$$\begin{aligned} \Delta U &= \left(\frac{I_1 R_K \cos \varphi_2 + I_1 X_K \sin \varphi_2}{U_{1N}} \right) \\ &= \beta (R_s^* \cos \varphi_2 + X_s^* \sin \varphi_2) \end{aligned}$$

由表达式可知，电压变化率的大小与负载大小、性质及变压器的本身参数有关。



电压变化率计算公式的讨论

$$\Delta u = \beta \left(\frac{I_{1N} R_K \cos \varphi_2 + I_{1N} X_K \sin \varphi_2}{U_{1N}} \right)$$

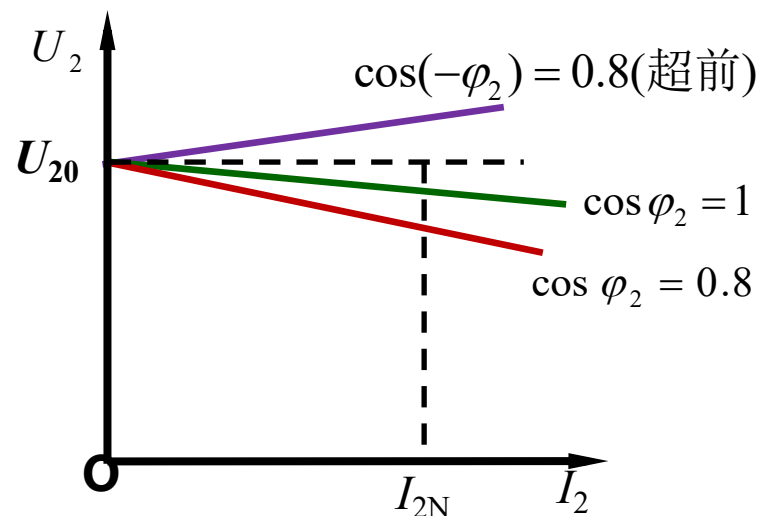
$$\Delta u = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100\% \Rightarrow U_2 = U_{20} - \Delta u U_{20}$$

电压变化率取决于负载系数、短路阻抗和负载的功率因数。（一般， $X_K \gg R_K$ ）

①当负载为**纯电阻性负载**时， $\varphi_2 = 0$ ， $\sin \varphi_2 = 0$ ， Δu 很小且为正值，故外特性稍向下倾斜

②当负载为**电感性负载**时， $\varphi_2 > 0$ ， $\cos \varphi_2$ 与 $\sin \varphi_2$ 均为正值， Δu 均为正值且较大，故外特性向下倾斜较大。

③当负载为**电容性负载**时， $\varphi_2 < 0$ ， $\cos \varphi_2 > 0$ ， $\sin \varphi_2 < 0$ 。若 $I_{1N} R_K \cos \varphi_2 < |I_{1N} X_K \sin \varphi_2|$ ， Δu 为负值，外特性上翘。



外特性



为了保证二次端电压在允许范围之内,通常在变压器的高压侧设置抽头,并装设分接开关,调节变压器高压绕组的工作匝数,来调节变压器的二次电压。

中、小型电力变压器一般有三个分接头,记作 $U_N \pm 5\%$ 。大型电力变压器采用五个或多个分接头,例 $U_N \pm 2 \times 2.5\%$ 或 $U_N \pm 8 \times 1.5\%$ 。

- 分接开关有两种形式:
- 一种只能在断电情况下进行调节,称为无载分接开关——这种调压方式称为无载调压;
- 一种可以在带负荷的情况下进行调节,称为有载分接开关——这种调压方式称为有载调压。



例：一台三相变压器， $S_N=60\text{kV}\cdot\text{A}$ ， $U_{1N}/U_{2N}=10/0.4\text{kV}$ ， YY_0 接法， $Z_K=(2+j5)\Omega$ ，在一次侧接额定电压，二次侧带额定负载运行时，分别求 $\cos\varphi_2=0.8$ (滞后)、 $\cos\varphi_2=0.8$ (超前)、 $\cos\varphi_2=1$ 的电压变化率及二次端电压 U_2 。

解：首先求一次绕组的额定电流为：

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{600 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 10 \times 10^3} \text{ A} = 34.64 \text{ A}$$

当 $\cos\varphi_2=0.8$ (滞后)时， $\sin\varphi_2=0.6$

$$\begin{aligned} \Delta u &= \beta \left(\frac{I_{1N} R_K \cos\varphi_2 + I_{1N} X_K \sin\varphi_2}{U_{1N}} \right) \times 100\% \\ &= 1 \times \left[\frac{34.46 \times (2 \times 0.8 + 5 \times 0.6)}{10 \times 10^3 / \sqrt{3}} \right] \times 100\% = 2.75\% \end{aligned}$$

$$U_2 = (1 - \Delta u) U_{2N} = (1 - 0.0275) \times 400 \text{ V} = 389 \text{ V}$$

当 $\cos\varphi_2=0.8$ (超前)时， $\sin\varphi_2=-0.6$

$$\Delta u = 1 \times \left[\frac{34.46 \times (2 \times 0.8 - 5 \times 0.6)}{10 \times 10^3 / \sqrt{3}} \right] \times 100\% = -0.84\%$$

$$U_2 = (1 - \Delta u) U_{2N} = (1 + 0.0084) \times 400 \text{ V} = 403.36 \text{ V}$$

当 $\cos\varphi_2=1$ 时， $\sin\varphi_2=0$

$$\Delta u = 1 \times \left[\frac{34.46 \times 2 \times 1}{10 \times 10^3 / \sqrt{3}} \right] \times 100\% = 1.2\%$$

$$U_2 = (1 - \Delta u) U_{2N} = (1 - 0.012) \times 400 \text{ V} = 395 \text{ V}$$



一、变压器的损耗

变压器的损耗主要是**铁损耗**和**铜损耗**两种。

铁损耗

- 基本铁损耗：磁滞损耗和涡流损耗
- 附加铁损耗：由铁心叠片间绝缘损伤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等。

可通过空载试验求得，即 $P_{Fe} = P_0$ 。

铁损耗与外加电压大小有关，而与负载大小基本无关，故也称**不变损耗**。

铜损耗

- 基本铜损耗：电流在一、二次绕组直流电阻上的损耗
- 附加铜损耗：因集肤效应引起的损耗以及漏磁场在结构部件中引起的涡流损耗等。

$$P_{Cu} = P_{Cu1} + P_{Cu2} = (R_1 + R_2')^2 I_1^2 = R_K I_1^2$$

① 变压器带额定负载时 $P_{KN} = I_{1N}^2 R_K$

② 当负载不为额定负载时

$$P_{Cu} = I_1^2 R_K = (\beta I_{1N})^2 R_K = \beta^2 I_{1N}^2 R_K = \beta^2 P_{KN}$$

铜损耗大小与负载电流平方成正比，故也称为**可变损耗**。



二、效率及效率特性

效率是指变压器的输出功率与输入功率的比值。

$$P_1 = P_2 + P_{\text{Fe}} + P_{\text{Cu}} = P_2 + P_0 + \beta^2 P_{\text{KN}} \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

➤ 效率大小反映变压器运行的经济性能的好坏，是表征变压器运行性能的重要指标之一。

1、单相变压器：

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

2、三相变压器：

$$P_2 = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2 \approx \sqrt{3} U_{2\text{N}} (\beta I_{2\text{N}}) \cos \varphi_2 = \beta (\sqrt{3} U_{2\text{N}} I_{2\text{N}}) \cos \varphi_2 = \beta S_{\text{N}} \cos \varphi_2$$

综上，无论是单相变压器还是三相变压器： $P_2 = \beta S_{\text{N}} \cos \varphi_2$

3、变压器效率的表达式为：

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P} = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{\text{KN}}}{\beta S_{\text{N}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{\text{KN}}}$$



二、效率及效率特性

4、效率特性：效率随负载的变化规律，即 $\eta = f(\beta)$ 。

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{KN}}{\beta S_N \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{KN}}$$

①最大效率

$$\text{令 } \frac{d\eta}{d\beta} = 0 \text{ , 则 } \beta_m^2 P_{SN} = P_0 \text{ 或 } \beta_m = \sqrt{\frac{P_0}{P_{SN}}}$$

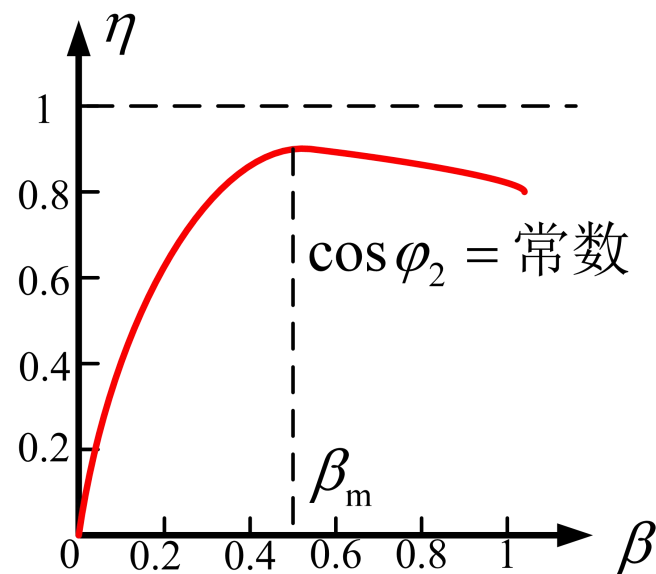
即当铜损耗等于铁损耗(可变损耗等于不变损耗)时,变压器效率最大

$$\eta_{max} = \left(1 - \frac{2P_0}{\beta_m S_N \cos \varphi_2 + 2P_0}\right) \times 100\%$$

②变压器效率 η 的相关讨论

对于某变压器， P_0 和 P_{KN} 一定，可通过空载试验和短路试验求取。

η 只与负载大小和功率因数有关。负载一定，即 β 为常数时， $\cos \varphi_2$ 越大， η 越大； $\cos \varphi_2$ 一定时， η 就随 β 而变。



变压器的效率特性



小结

标么值

定义 标么值 = $\frac{\text{实际值}}{\text{基准值}}$

通常以**额定值**为基准值。

各侧的物理量以各自侧的额定值为基准；

基准值确定

线值以额定线值为基准值，相值以额定相值为基准值；

单相值以额定单相值为基准值，三相值以额定三相值为基准值；

U 和 E 的基准值 U_B 。 R 、 X 和 Z 的基准值为 Z_B 。 P 、 Q 和 S 的基准值为 S_B 。

外特性与电压变化率

$$\Delta U = \frac{U_{20} - U_2}{U_{2N}} = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}}$$

$$\Delta U = \left(\frac{I_1 R_K \cos \varphi_2 + I_1 X_K \sin \varphi_2}{U_{1N}} \right) \quad \text{式中 } \beta = \frac{I_2}{I_{2N}} \text{ 称为负载系数}$$

$$= \beta (R_s^* \cos \varphi_2 + X_s^* \sin \varphi_2)$$

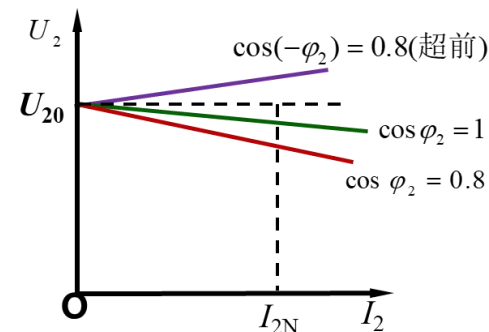
电压调整：分接开关

损耗、效率及效率特性

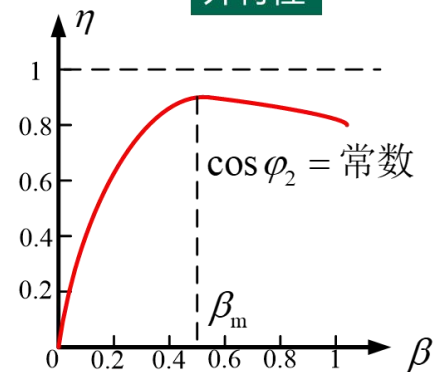
$$P_1 = P_2 + P_{Fe} + P_{Cu} = P_2 + P_0 + \beta^2 P_{KN}$$

$$P_2 = \beta S_N \cos \varphi_2$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P} = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{KN}}{\beta S_N \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{KN}}$$



外特性



变压器的效率特性