



第1篇 变压器

第1篇 变压器

第1章 变压器的用途、分类、基本结构、额定值

▼ 学习目标

- 熟悉变压器的用途与主要分类
- 掌握变压器的基本结构
- 熟练掌握变压器的额定值

2

第1章 变压器的用途、分类、基本结构、额定值

1.1 变压器的用途和分类

1. 变压器的定义

- 变压器是一种静止的电磁装置；
- 基于电磁感应作用原理工作；
- 可实现相同频率的交流电能间的变换。

☑ 可以变电压、电流、阻抗、相位；

☒ 不能变频率！

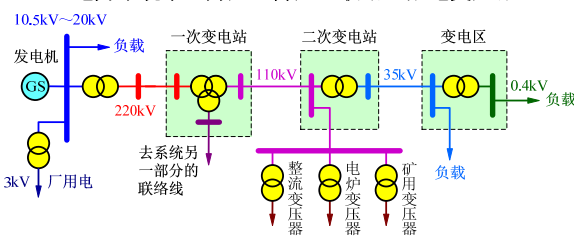
3

1.1 变压器的用途和分类

2. 变压器的用途

(1) 用于电力系统


电力系统中：升压、降压、联络、配电变压器。



电力系统构成示意图

4

(1) 电力变压器



大容量电力变压器

5

2. 变压器的用途

(2) 特殊场合专用

用于变流（整流或换流）、电炉、高压试验、矿井、牵引等的变压器。

(3) 用于交流电能测量

测量交流电压（电压互感器）、交流电流（电流互感器）。

(4) 用作控制电源

为控制设备、测量设备、电子仪器提供电源。

6

1.1 变压器的用途和分类

3. 变压器的主要分类

(1) 按用途分类

- 电力变压器
升压变压器、降压变压器、联络变压器、配电变压器
- 特种变压器
整流变压器、电炉变压器、电源变压器等
- 仪用互感器
电压互感器、电流互感器

(2) 按相数分类

单相变压器、三相变压器、多相变压器（如：六相、十二相）。

3. 变压器的主要分类

(3) 按绕组数目分类

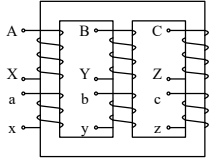
- 双绕组变压器
- 三绕组变压器
- 多绕组变压器
- 自耦变压器

(4) 按绝缘和冷却介质分类

- 油浸式变压器
- 干式变压器

(5) 按铁心结构分类

- 心式变压器
- 壳式变压器



三相双绕组变压器示意图

3. 变压器的主要分类



油浸式变压器



干式变压器

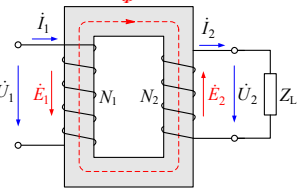
第1章 变压器的用途、分类、基本结构、额定值

1.2 变压器的基本结构

1. 变压器的基本工作原理

- 两个（或多个）绕组套在同一个铁心上；
- 铁心回路中存在交变磁通；
- 交变磁通在各绕组中感应的电动势 E 与其匝数 N 成正比。

图中， $E_1 / E_2 = N_1 / N_2$ 。



绕组的名称：

一次绕组：接电源

二次绕组：接负载

高压绕组：接高压

低压绕组：接低压

1.2 变压器的基本结构

2. 变压器的基本结构

核心部分：器身=铁心+绕组

铁心

- 变压器的主磁路部分（高导磁），兼做机械骨架；
- 用冷轧硅钢片或非晶合金片叠压而成。

绕组

- 变压器的电路部分（高导电），套装在铁心上；
- 用包有绝缘材料的扁导线或圆导线绕制而成。



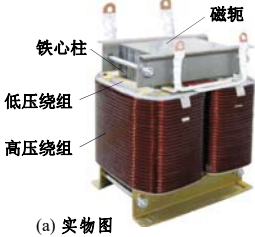
三相变压器的器身

2. 变压器的基本结构

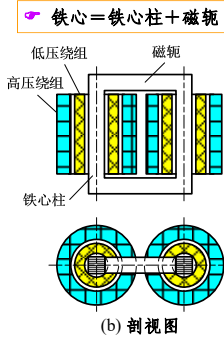
心式变压器

铁心=铁心柱+磁轭

磁轭靠着绕组的顶面和底面，但不围绕绕组的侧面。



(a) 实物图



(b) 剖视图

单相心式变压器

2. 变压器的基本结构

■ 壳式变压器

磁轭包围绕组的顶面、底面和侧面，如同绕组的外壳。

(a) 实物图

(b) 剖视图

单相壳式变压器

13

第1章 变压器的用途、分类、基本结构、额定值

1.3 变压器的额定值

1. 额定值的含义

- 表示变压器在一定工作条件下运行时一些典型量的规定值，通常标在铭牌上。
- 在符合额定值要求的额定工况下，变压器可以长期可靠运行，并具有优良的性能。
- 额定值是变压器设计、试验和运行中的重要依据。
- 主要额定值：额定容量、额定电压、额定电流、额定频率。

14

1.3 变压器的额定值

2. 主要额定值的定义

(1) 额定容量 S_N (V · A, kV · A, MV · A)

输出视在功率的保证值。规定一次、二次额定容量相等。

☞ 对于三相变压器， S_N 为三相的总容量。

(2) 一次、二次额定电压 U_{1N}/U_{2N} (V, kV)

- 一次额定电压 U_{1N} ：正常运行时一次绕组线路端子间外施电压的有效值。
- 二次额定电压 U_{2N} ：一次绕组外施额定电压、二次绕组开路时，二次绕组线路端子间电压的有效值。

☞ 对于三相变压器，额定电压指线电压。

15

2. 主要额定值的定义

(3) 一次、二次额定电流 I_{1N}/I_{2N} (A)

- 正常运行时一次、二次绕组分别能承担的电流有效值。
- 可根据额定容量和额定电压求得。

☞ 对于三相变压器，额定电流指线电流。

(4) 额定频率 f_N (Hz)

我国规定标准工频为50Hz。

(5) 其他额定值

铭牌上还标有相数、短路电压、额定效率、额定温升等等，也属额定值。

16

1.3 变压器的额定值

3. 额定容量、额定电压、额定电流间的关系

■ 单相变压器

$$S_N = U_{1N} I_{1N} = U_{2N} I_{2N}$$
$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}}, \quad I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}}$$

■ 三相变压器

$$S_N = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N}$$
$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{1N}}, \quad I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{2N}}$$

17

1.3 变压器的额定值

4. 额定运行的含义

- 当变压器一次绕组接到额定频率、额定电压的交流电网上，二次电流 I_2 达到其额定值 I_{2N} 时，一次电流 I_1 也达到其额定值 I_{1N} 。此时，变压器运行于**额定工况**，或称**额定运行**。
- 额定运行时的负载称为**额定负载**，也称**满载**。

☞ 变压器在一次电压、频率为额定值时，其负载大小以二次电流来衡量，与二次电压无关。 $I_2 = I_{2N}$ 时为额定负载（满载），此时 U_2 并不一定等于 U_{2N} 。

☞ 变压器实际运行时， U_2 和 I_2 是随负载变化而变化的，二次侧实际输出的视在功率常常与额定容量不同。

18

第1章 变压器的用途、分类、基本结构、额定值

小结

✓ 变压器用途和主要分类。

✓ 变压器的基本工作原理和基本结构。

✓ 变压器的额定值；额定值间的关系；额定工况与额定负载的含义。

✓ 主要概念

变压器：升压、降压变压器；心式、壳式变压器；

一次绕组、二次绕组；高压绕组、低压绕组；

额定值；额定容量，额定频率，

一次/二次额定电压，一次/二次额定电流；

额定运行/额定工况，额定负载（满载）。

19

第1篇 变压器

第2章 变压器的运行分析

学习目标

○ 参考方向规定（惯例、变式）

○ 磁动势平衡关系与电动势平衡关系

○ 折合算法

○ 基本方程式、相量图、等效电路（T型、简化）

○ 参数测定（短路试验、空载试验）

○ 标么值

○ 电压调整特性，电压调整率计算公式

○ 效率特性，效率计算公式

20

第2章 变压器的运行分析

引言

以单相变压器为例（也适用于三相变压器对称运行时的任一相）。

■ 核心内容

● 基于电磁感应定律，分析变压器稳态运行时内部的电磁关系。

● 基本方程式、相量图、等效电路。

■ 分析思路

从简单到复杂。（空载⇌负载，线性⇌非线性）

■ 分析过程

电⇌磁⇌电

■ 分析结果的应用

稳态运行特性分析。

21

第2章 变压器的运行分析

2.1 变压器各物理量的参考方向

1. 概述

● 在表示有方向的物理量时，必须先规定参考方向。

● 参考方向可以任意选取，但参考方向规定不同，则表达式或方程式中有关物理量的正、负号也不同。

● 各物理量的瞬时实际方向不会因参考方向规定的变化而改变，应根据参考方向来判断。

22

2.1 变压器各物理量的参考方向

2. 电路端口的参考方向

■ 一次绕组的电压、电流

按电动机惯例：向绕组方向看，电压与电流的参考方向一致。

■ 二次绕组的电压、电流

按发电机惯例：向绕组外部（向负载侧）看，电压与电流的参考方向一致。

特征：相对于电网，变压器呈现负载性质。

23

2.1 变压器各物理量的参考方向

3. 关于电磁相互作用的参考方向

■ 电流与磁通（电→磁）

满足右手螺旋定则。

电流是因，磁通是果。

■ 磁通与电动势（磁→电）

满足右手螺旋定则。

磁通是因，电动势是果。

⇨ 电动势与电流参考方向相同。

公共磁通将一次、二次电流关联起来。

24

4

第2章 变压器的运行分析

2.2 变压器的空载运行

空载运行的定义

- 一次绕组**通电**（接电压、频率均额定的交流电源，有电流）；
- 二次绕组**开路**（二次电流即负载电流为零）。

一次绕组中的电流 i_0 称为**空载电流**。

单相变压器的空载运行

2.2 变压器的空载运行

1. 磁动势、磁通

(1) 磁动势

- 空载时，仅一次绕组有交变电流 i_0 。
- i_0 产生交变磁动势 $F_0 = N_1 i_0$ ，作用于主磁路（铁心）上，产生交变磁通。
- i_0 和 F_0 分别称为**励磁电流**和**励磁磁动势**。

电磁关系示意（电→磁）

$i_0 \rightarrow F_0 = N_1 i_0 \rightarrow \dot{\phi}_m$

1. 磁动势、磁通

(2) 磁通

磁通分类

- 主磁通** $\dot{\phi}_m$
同时交链一次、二次绕组，是能量传递的媒介。
- 一次绕组漏磁通** $\dot{\phi}_{\sigma 1m}$
只交链一次绕组自身。

路径特征

主磁通：铁心；

漏磁通：铁心和非铁磁材料（空气、油、气体等）。

数量特征

空载时，漏磁通仅占总磁通的0.1%~0.2%。

2.2 变压器的空载运行

2. 感应电动势

(1) 电磁关系（磁→电）

- 主磁通 $\dot{\phi}_m$ 在一次、二次绕组中分别产生电动势 \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 。
- 漏磁通 $\dot{\phi}_{\sigma 1m}$ 在一次绕组产生**漏磁电动势** $\dot{E}_{\sigma 1}$ 。

各电动势参考方向相同

电 ⇌ 磁 磁 ⇌ 电

电磁关系示意（电→磁→电）

$\dot{U}_1 \rightarrow i_0 \rightarrow F_0 = N_1 i_0 \rightarrow \begin{cases} \dot{\phi}_{\sigma 1m} \rightarrow \dot{E}_{\sigma 1} \\ \dot{\phi}_m \rightarrow \begin{cases} \dot{E}_1 \\ \dot{E}_2 \end{cases} \end{cases}$

2. 感应电动势

(2) 定量关系——电动势表达式

设变压器**磁路线性**（磁导为常数）。
则正弦交变的励磁电流 i_0 产生按同样规律交变的磁通。

磁通表达式

主磁通： $\phi = \Phi_m \sin \omega t$ （设 $i_0 = \sqrt{2} I_0 \sin \omega t$ ）

一次绕组漏磁通： $\phi_{\sigma 1} = \Phi_{\sigma 1m} \sin \omega t$

其中：

Φ_m 、 $\Phi_{\sigma 1m}$ ——主磁通、漏磁通的**最大值**（Wb）；

ω ——角频率， $\omega = 2\pi f$ （rad/s）；

f ——交流电源的频率（Hz）。

(2) 定量关系——电动势表达式

电动势表达式

主磁通感应的电动势 $(\phi = \Phi_m \sin \omega t)$

按照规定的参考方向，有： $e = -N \frac{d\phi}{dt}$ （ N 为匝数）

一次、二次绕组感应电动势

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} = -\omega N_1 \Phi_m \cos \omega t = E_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

同理 $e_2 = E_{2m} \sin(\omega t - 90^\circ)$

其中：

$$E_{1m} = \omega N_1 \Phi_m, \quad E_{2m} = \omega N_2 \Phi_m$$

(2) 定量关系——电动势表达式

电动势表达式 (续)

主磁通感应电动势的相量表达式

$$\dot{E}_1 = -j \frac{1}{\sqrt{2}} \omega N_1 \dot{\Phi}_m = -j \sqrt{2} \pi f N_1 \dot{\Phi}_m = -j 4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m$$
$$\dot{E}_2 = -j 4.44 f N_2 \dot{\Phi}_m$$

注意: $\dot{\Phi}_m$ 为主磁通最大值相量。

结论

- 主磁通产生的感应电动势有效值与频率 f 、绕组匝数、主磁通最大值 Φ_m 成正比。

$E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m, \quad E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m$

- 感应电动势滞后于产生它们的主磁通 90° 。

$\Phi = \Phi_m \sin \omega t$
$$e_1 = -\omega N_1 \Phi_m \cos \omega t = E_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

(2) 定量关系——电动势表达式

电动势表达式 (续)

一次绕组漏磁通感应电动势

一次绕组漏磁通 $\phi_{\sigma 1}$ 在一次绕组感应漏磁电动势 $e_{\sigma 1}$

瞬时值表达式

$$e_{\sigma 1} = -N_1 \frac{d\phi_{\sigma 1}}{dt}$$

$\phi_{\sigma 1} = \Phi_{\sigma 1m} \sin \omega t$

$$= -\omega N_1 \Phi_{\sigma 1m} \cos \omega t = E_{\sigma 1m} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

相量表达式 $\dot{E}_{\sigma 1} = -j 4.44 f N_1 \dot{\Phi}_{\sigma 1m}$ ($\dot{\Phi}_{\sigma 1m}$ 为最大值相量)

有效值 $E_{\sigma 1} = 4.44 f N_1 \Phi_{\sigma 1m}$

2.2 变压器的空载运行

3. 电压方程式

(1) 电压方程式

参考方向 + 基尔霍夫定律

- 一次侧

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_0 R_1$$
$$R_1 \text{ 为一次绕组的电阻。}$$

- 二次侧

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2$$

电压方程式中的各量均为一相的。

(1) 电压方程式

电压方程式中的数量关系

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_0 R_1$$

变压器在额定电压下空载运行时，

- $\Phi_m \gg \Phi_{\sigma 1m} \Rightarrow E_1 \gg E_{\sigma 1}$
- 空载电流 I_0 很小 (R_1 也很小) \Rightarrow 压降 $I_0 R_1 \ll U_1$

$$\Rightarrow U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

结论: 变压器空载运行时，若频率和绕组匝数一定，则主磁通幅值取决于一次绕组外施电压的大小。

3. 电压方程式

(2) 变比

定义

一次、二次绕组相电动势有效值之比，称为变比。

$$k = \frac{E_1}{E_2}$$

计算

可通过匝数或额定相电压求出:

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_{1N\phi}}{U_{2N\phi}} = \frac{U_{1N\phi}}{U_{20}}$$

下标 ϕ 表示“相”

其中: $U_{1N\phi}$ 、 $U_{2N\phi}$ 分别为一次、二次绕组的额定相电压， U_{20} 为二次绕组空载相电压。

2.2 变压器的空载运行

空载运行电磁关系小结

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_0 R_1$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2$$

- 既有电路的问题，也有磁路的问题；
- 电与磁之间又有密切联系。

6

2.2 变压器的空载运行

4. 励磁电流

④ 问题：如何确定励磁电流（大小、波形）

励磁电流 i_0 的大小和波形取决于外施交流电压和磁路饱和程度。

(1) 主磁通的确定

- 幅值
由一次绕组外施电压决定。
 $U_1 \approx E_1 = 4.44fN_1\Phi_m$
- 波形
当外施电压 u_1 为正弦波时，和 u_1 相平衡的 e_1 及相应的主磁通 ϕ 均为正弦波。

$U_1 \approx E_1$

$\dot{U}_1 \rightarrow \dot{I}_0 \rightarrow \dot{F}_0 = N_1 \dot{I}_0 \rightarrow \dot{\Phi}_m \rightarrow \dot{E}_1$

弧线箭头表示数量和波形的决定关系
(交流磁路)

4. 励磁电流

(2) 励磁电流的求取

思路：
主磁通 ϕ $\xrightarrow{\text{铁心磁路特性}}$ 励磁电流 i_0 （大小与波形）

➤ 铁心磁路的磁化特性

- 理想线性
- 非线性（饱和）
- 有损非线性（饱和+铁耗）

④ 思考：磁路磁化特性与铁磁材料磁化曲线 $B=f(H)$ 的关系

铁心磁路基本磁化特性

(2) 励磁电流的求取

➤ 磁化特性为理想线性时

磁路线性，没有铁耗（涡流、磁滞损耗）。

磁化特征：

- 主磁通与励磁电流呈线性关系；
- 励磁电流和主磁通为同相的正弦波。

➤ 磁化特性为非线性时（饱和）

磁路非线性（饱和），没有铁耗。

磁化特征：

- 励磁电流 i_0 因饱和而畸变为尖顶波，含有基波和奇次谐波（主要为3次谐波）；
- 励磁电流 i_0 的基波 i_{01} 与 ϕ 同相。

(2) 励磁电流的求取

➤ 非线性磁化特性（饱和）下的励磁电流波形

磁路饱和、无铁耗。 励磁电流为“左右对称的尖顶波”

(2) 励磁电流的求取

➤ 磁化特性为有损非线性时（饱和+铁耗）

磁路非线性（饱和），有铁耗（涡流损耗+磁滞损耗）。

磁化特征：

- 励磁电流 i_0 为一个扭曲的尖顶波，含有基波和奇次谐波；
- 励磁电流 i_0 的基波超前主磁通一个小角度 α （对应磁滞损耗）；
- 再计及涡流损耗，则励磁电流超前的角度要更大一些。

有铁耗时，基波励磁电流超前主磁通；因铁耗通常较小，故超前的角度也很小。

(2) 励磁电流的求取

➤ 非线性磁化特性（磁滞回线）下的励磁电流波形

磁路饱和、有铁耗。 励磁电流为“歪头尖顶波”

4. 励磁电流

(3) 非正弦励磁电流的处理

非理想磁路带来的困难：非正弦 + 相位差。

工程处理方法

用一个等效正弦波电流 i_0 代替上述非正弦励磁电流 i_0 。

等效原则

- 角频率：基波角频率 ω ；
- 有效值： $I_0 = \sqrt{I_{01}^2 + I_{03}^2 + I_{05}^2 + \dots}$ ；
- 相位角： i_0 超前 ϕ_m 的角度为 α_{Fe} 。

4. 励磁电流

(4) 相量图

用相量图表示等效基波励磁电流与主磁通的相位关系。

励磁电流的分解

以主磁通 ϕ_m 为基准。

- 无功分量 i_{0r} 与 ϕ_m 同相（励磁）。
- 有功分量 i_{0a} 超前 ϕ_m 90° （对应铁耗）。

2.2 变压器的空载运行

5. 等效电路

问题：引入电路参数来等效表示“电—磁—电”关系。

(1) 漏磁电动势的等效

漏磁电动势与电流的关系

- 漏磁路的磁导 $A_{\sigma 1}$ 取决于非铁磁材料，可视为常数。
- 不计漏磁通引起的损耗，则 $E_{\sigma 1} \propto I_0$ ，且 $\dot{E}_{\sigma 1}$ 滞后 \dot{I}_0 90° 。

(1) 漏磁电动势的等效

一次绕组漏电抗

引入表征漏磁通作用的常数 $X_{\sigma 1}$ ——一次绕组漏电抗，

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j \dot{I}_0 X_{\sigma 1}$$

- 表达式
$$X_{\sigma 1} = \frac{E_{\sigma 1}}{I_0} = \frac{\sqrt{2} \pi f N_1 \phi_{\sigma 1m}}{I_0} = 2 \pi f N_1^2 \frac{\phi_{\sigma 1m}}{\sqrt{2} N_1 I_0} = \omega N_1^2 A_{\sigma 1} = \omega L_{\sigma 1}$$

$$L_{\sigma 1} = N_1^2 A_{\sigma 1}$$
，是一次绕组漏电感。
- 数值特征
 - 对于已制成的变压器，在频率 f 一定时， $X_{\sigma 1}$ 为常数（通常认为漏磁导 $A_{\sigma 1}$ 不变）。
 - $X_{\sigma 1}$ 很小（因漏磁导 $A_{\sigma 1}$ 很小）。

5. 等效电路

(2) 主磁通感应电动势的等效

电动势与电流的关系

- 考虑主磁通在铁心中引起的损耗时， i_0 超前 ϕ_m ， E_1 滞后 i_0 的角度大于 90° 。
- 应采用阻抗降压来表示 E_1 与 i_0 的关系。

(2) 主磁通感应电动势的等效

励磁阻抗

引入表征主磁通产生电动势及铁耗作用的等效阻抗 Z_m ，

$$\dot{E}_1 = -\dot{I}_0 Z_m = -\dot{I}_0 (R_m + jX_m)$$

其中 $Z_m = R_m + jX_m$

- Z_m ——励磁阻抗；
- X_m ——励磁电抗，反映铁心磁路磁化特性；
- R_m ——励磁电阻，对应于铁耗 p_{Fe} 的等效电阻。

- 数值特征
 - R_m 、 X_m 为等效参数，随主磁路饱和程度变化而变化。
 - X_m 很大（因主磁路磁导 A_m 大）， R_m 很小（相对 X_m ）。

5. 等效电路

(3) 空载运行时的等效电路

一次侧电压方程式

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_0 R_1$$
$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_0 X_{\sigma 1}$$
$$\dot{E}_1 = -\dot{I}_0 (R_m + jX_m)$$
$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 (Z_m + Z_1)$$

其中, Z_1 为一次绕组漏阻抗,
 $Z_1 = R_1 + jX_{\sigma 1}$

空载运行时的等效电路

等效电路中各量均为一相的。

49

5. 等效电路

(4) 有关等效电路的讨论

- 空载运行的变压器, 可等效为励磁阻抗 Z_m 和一次绕组漏阻抗 Z_1 的串联电路。
- $Z_1 = R_1 + jX_{\sigma 1}$ 。 $X_{\sigma 1}$ 反映了一次电流产生漏磁通并感应电动势的作用。由于漏磁路是线性的, 所以 $X_{\sigma 1}$ 是常数。
- $Z_m = R_m + jX_m$ 。 X_m 反映了励磁电流 i_0 产生主磁通并感应电动势 e_1 的作用, R_m 反映了 i_0 产生主磁通时在铁心中引起的铁耗。
- 铁心磁路是非线性的, 所以 X_m 和 R_m 不是常数, 都随铁心磁路饱和程度的变化而变化。
- 实际变压器外施额定电压正常运行时, 由于 $U_1 \approx E_1 \propto \Phi_m$, 因此 Φ_m 基本不变, 从而可认为 X_m 和 R_m 是常数。

50

5. 等效电路

(4) 有关等效电路的讨论 (续)

- 由于主磁路磁导 Λ_m 远大于一次绕组漏磁路磁导 $\Lambda_{\sigma 1}$, 因此, $X_m \gg X_{\sigma 1}$ 。
- 在额定电压下空载运行时, 铁耗通常远大于一次绕组铜耗 (电阻 R_1 上的损耗), 因此通常 $R_m \gg R_1$ 。

$\Rightarrow |Z_m| \gg |Z_1| \Rightarrow E_1 \approx U_1$

- $|Z_m|$ 大、 I_0 小, 是对电力变压器的要求, 这样可以减小变压器的损耗和电网的无功负担。

51

5. 等效电路

(4) 有关等效电路的讨论 (续)

问题:

- 为什么漏磁路的磁化特性基本上是线性的, 而主磁路的磁化特性是非线性的?
- 励磁电抗 X_m 和励磁电阻 R_m 哪一个更大? 为什么?
- 若一次电压 U_1 升高, 则励磁电抗 X_m 会如何变化?
- 怎样降低变压器空载运行时的损耗?

52

2.2 变压器的空载运行

6. 相量图

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_0 X_{\sigma 1} + \dot{I}_0 R_1$$

表示电磁关系, 除了用电压方程式、等效电路外, 还可用相量图。

- 相量图的画法
通常以 ϕ_m 为基准 (在水平位置)。
相量图中的各量也是一相的。
- 有关相量图的讨论
 - i_0 滞后 \dot{U}_1 的角度 $\varphi_0 > 0$, $U_1 I_0 \sin \varphi_0 > 0$, 表明一次侧从电网吸收感性无功功率, 以产生主磁通。
 - φ_0 接近 90° , 表明 i_0 中主要是无功分量, 空载时功率因数很低。

空载运行时的相量图 (φ_0 为 i_0 与 \dot{U}_1 的夹角)

53

第2章 变压器的运行分析

2.3 变压器的负载运行

负载运行的定义

- 一次绕组通电 (接电压、频率均额定的交流电源, 有电流, 但不再是 I_0) ;
- 二次绕组接用电负载 (负载阻抗为 Z_L , 二次绕组有电流流通) 。

单相变压器的负载运行

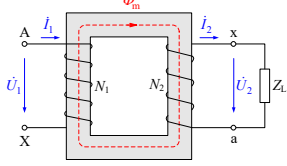
54

2.3 变压器的负载运行

1. 磁动势、磁通

(1) 磁动势与主磁通

- 一次、二次电流分别产生磁动势：
 $\dot{F}_1 = N_1 \dot{I}_1$, $\dot{F}_2 = N_2 \dot{I}_2$
- 作用在主磁路上的总磁动势为二者之和，
 $\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_m$
- 合成磁动势 \dot{F}_m 产生负载运行时的主磁通，是励磁磁动势。



一次、二次绕组在电路上没有直接联系，二者通过其磁动势、共同产生主磁通而建立联系。

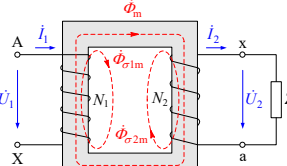
重要概念：变压器的主磁通是一次、二次绕组磁动势共同作用的结果。作用于主磁路的励磁磁动势是合成磁动势。

55

1. 磁动势、磁通

(2) 磁动势与漏磁通

- 一次、二次电流产生的磁动势 \dot{F}_1 、 \dot{F}_2 分别作用在一次、二次绕组漏磁路上，分别产生相应的漏磁通。
- 重要概念：**变压器一次、二次绕组漏磁路之间不存在耦合。
- 电磁关系示意（电→磁）



$\dot{\Phi}_{\sigma 1m}$ 、 $\dot{\Phi}_{\sigma 2m}$ 分别为一次、二次绕组漏磁通。

$\dot{I}_1 \rightarrow \dot{F}_1 = N_1 \dot{I}_1 \rightarrow \dot{\Phi}_{\sigma 1m}$
 $\dot{I}_2 \rightarrow \dot{F}_2 = N_2 \dot{I}_2 \rightarrow \dot{\Phi}_{\sigma 2m}$

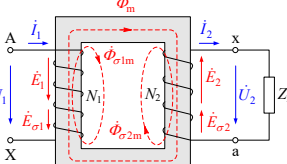
56

2.3 变压器的负载运行

2. 感应电动势

(1) 电磁关系（磁→电）

- 主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 在一次、二次绕组中分别产生电动势 \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 。
- 漏磁通 $\dot{\Phi}_{\sigma 1m}$ 、 $\dot{\Phi}_{\sigma 2m}$ 分别在一次、二次绕组产生漏磁电动势 $\dot{E}_{\sigma 1}$ 、 $\dot{E}_{\sigma 2}$ 。
- 电磁关系示意（电→磁→电）



电→磁 磁→电

$\dot{I}_1 \rightarrow \dot{F}_1 = N_1 \dot{I}_1 \rightarrow \dot{\Phi}_{\sigma 1m} \rightarrow \dot{E}_{\sigma 1}$
 $\dot{I}_2 \rightarrow \dot{F}_2 = N_2 \dot{I}_2 \rightarrow \dot{\Phi}_{\sigma 2m} \rightarrow \dot{E}_{\sigma 2}$

57

2. 感应电动势

(2) 定量关系——电动势表达式

主磁通感应电动势

- 一次绕组 $\dot{E}_1 = -j4.44fN_1\dot{\Phi}_m$
- 二次绕组 $\dot{E}_2 = -j4.44fN_2\dot{\Phi}_m$

$$\frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

结论：一次、二次绕组中主磁通感应电动势的相位相同（在所规定的参考方向下），有效值之比等于变比。

上述关系与空载时的相同。

58

(2) 定量关系——电动势表达式

漏磁电动势

- 漏磁电动势表达式
 - 一次绕组 $\dot{E}_{\sigma 1} = -j4.44fN_1\dot{\Phi}_{\sigma 1m}$ ($\dot{\Phi}_{\sigma 1m}$ 、 $\dot{\Phi}_{\sigma 2m}$ 均为最大值相量)
 - 二次绕组 $\dot{E}_{\sigma 2} = -j4.44fN_2\dot{\Phi}_{\sigma 2m}$
- 漏磁电动势的等效表示
 - 一次绕组 $\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 X_{\sigma 1}$ $X_{\sigma 2}$ 为二次绕组漏电抗
 - 二次绕组 $\dot{E}_{\sigma 2} = -j\dot{I}_2 X_{\sigma 2}$ $L_{\sigma 2}$ 为二次绕组漏电感

其中： $X_{\sigma 1} = \omega L_{\sigma 1}$, $X_{\sigma 2} = \omega L_{\sigma 2}$
 $L_{\sigma 1} = N_1^2 A_{\sigma 1}$, $L_{\sigma 2} = N_2^2 A_{\sigma 2}$ $A_{\sigma 2}$ 为二次绕组漏磁路的磁导

上述关系与空载时的类似。

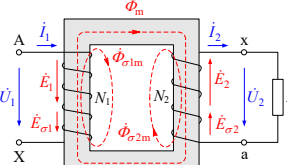
59

2.3 变压器的负载运行

3. 电压方程式

电压方程式

- 一次侧
 - $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_1 R_1$
 $= -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 X_{\sigma 1} + \dot{I}_1 R_1$
 $= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$
- 二次侧
 - 二次绕组 $\dot{U}_2 = \dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 1} - \dot{I}_2 R_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 X_{\sigma 2} - \dot{I}_2 R_2$
 $= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$ Z_2 为二次绕组漏阻抗
 - 负载 $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_L$



电压方程式中的各量均为一相的。

60

3. 电压方程式

电压方程式中的数量关系

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_{\sigma 1}) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$$

变压器在额定电压下正常负载运行时，

- 虽然 $I_1 > I_0$ ，但因 $|Z_1|$ 较小，仍有 $|I_1| |Z_1| \ll U_1$ 。
- 正常负载运行时，仍有 $U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$ 。

结论：变压器负载运行时，主磁通 Φ_m 仍取决于一次绕组外施电压，近似等于空载运行时的主磁通。因此，从空载到额定负载，主磁通和产生它所需的励磁磁动势都基本不变。

以后不再区分符号 F_m 与 F_0 ，都用 F_0 表示励磁磁动势。

61

2.3 变压器的负载运行

4. 磁动势平衡关系

将 $\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_0$ 改写为磁动势平衡方程式：

$$\dot{F}_1 = \dot{F}_0 + (-\dot{F}_2) \quad \text{或} \quad N_1 \dot{I}_1 = N_1 \dot{I}_0 + (-N_2 \dot{I}_2)$$
$$\Rightarrow \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2\right) = \dot{I}_0 + \left(-\frac{1}{k} \dot{I}_2\right)$$

励磁分量 负载分量

结论

- 一次绕组电流及其产生的磁动势都可看作由励磁和负载两个分量组成。励磁分量产生主磁通，负载分量用来平衡（抵消）二次绕组磁动势，以维持主磁通幅值不变。
- 负载分量表明了二次电流即负载电流对一次电流的作用，反映了变压器的功率平衡关系。

62

2.3 变压器的负载运行

5. 基本方程式

将上述关系归纳为如下的基本方程式：

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \\ \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = k \\ \dot{I}_1 + \frac{\dot{I}_2}{k} = \dot{I}_0 \\ \dot{E}_1 = -\dot{I}_0 Z_m \\ \dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_L \end{cases}$$

- 基本方程式是变压器电磁关系的综合数学表达形式。
- 变压器稳态运行时须同时满足这6个方程式。
- 在已知变比 k 、参数 $(Z_1、Z_2、Z_m、Z_L)$ 和一次电压 U_1 时，可联立求解。

63

5. 基本方程式

基本方程式使用要点

- 基本方程式是按照规定的参考方向写出的，其中的电压、电动势、电流、阻抗均是一相的量。
- 基本方程式适用于单相变压器的各种稳态运行工况（包括空载和负载运行）。
- 基本方程式也可用于分析三相变压器的对称稳态运行，但此时方程式中各量均是同一相的量。
- 变压器正常运行时，若保持一次电压为额定值，则主磁通 Φ_m 基本不变，可近似看作常数；励磁电流 I_0 、电动势 E_1 与 E_2 、励磁电抗 X_m 与励磁电阻 R_m 都基本不变。此外，漏阻抗 $Z_1、Z_2$ 均为常数。

64

5. 基本方程式

电磁关系总结

二次电流取决于 Z_L ，一次电流中的负载分量随二次电流而变。

65

2.3 变压器的负载运行

6. 折合算法

为得到包含一、二次侧的等效电路，需采用折合算法。

(1) 折合算法的依据

依据

思路：若能使变比 $k=1$ ，即 $N_2=N_1$ ，就可使电磁作用关系从形式上转换为纯电路量之间的关系。

$$\frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$
$$\dot{I}_1 + \frac{\dot{I}_2}{k} = \dot{I}_0$$

- 二次绕组通过其磁动势与一次绕组建立联系；
- 在改变二次绕组匝数时，只要保持二次绕组磁动势不变，就可保持变压器的电磁关系和运行状况不变。

66

(1) 折合算法的依据

➤ 折合方法

- **折合算法**：保持一个绕组的磁动势不变，而把其电量换算到另一个匝数基础上的方法（简称**折合**或**折算**）。
- 可将二次绕组折合到一次侧：匝数 $N_2 \rightarrow N_1$ ；
或将一次绕组折合到二次侧：匝数 $N_1 \rightarrow N_2$ 。
- 折合后，变压器的等效变比变为 1。

➤ 折合原则

保持被等效替代的绕组的**磁动势（幅值、相位）不变**。

➤ 遵循该原则进行折合后，**电磁关系**不变，被等效代替的绕组的**功率关系**也不变。

67

6. 折合算法

(2) 折合关系

➤ 折合的术语与表示

- **实际值**：实际绕组的各物理量的值称为实际值或折合前的值。
- **折合值**：一个绕组折合后各物理量的值称为折合到另一绕组的折合值。
- **折合值表示**：在物理量原来符号的右上角加“'”。

➤ 折合关系（以二次绕组折合为例）

$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$

- 二次电流的折合关系

$$N_2 I_2 = N_1 I'_2 \Rightarrow I'_2 = \frac{1}{k} I_2 \quad (\text{实际值除以变比})$$

68

(2) 折合关系

➤ 折合关系（以二次绕组的折合为例）（续）

- 二次电动势、电压的折合关系

$$\begin{aligned} \dot{E}'_2 &= k \dot{E}_2 \\ \dot{U}'_2 &= k \dot{U}_2 \end{aligned} \quad (\text{实际值乘变比})$$

- 二次阻抗的折合关系

$$Z'_2 + Z'_L = \frac{\dot{E}'_2}{\dot{I}'_2} = \frac{k \dot{E}_2}{\frac{1}{k} \dot{I}_2} = k^2 \frac{\dot{E}_2}{\dot{I}_2} = k^2 (Z_2 + Z_L)$$

$$\Rightarrow \begin{aligned} R'_2 &= k^2 R_2, & X'_{\sigma 2} &= k^2 X_{\sigma 2} \\ R'_L &= k^2 R_L, & X'_L &= k^2 X_L \end{aligned} \quad (\text{实际值乘变比的平方})$$

结论：折合前后，二次阻抗的阻抗角不变。

69

2.3 变压器的负载运行

7. 等效电路

(1) T型等效电路

折合后的基本方程式

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2 \\ \dot{E}_1 = \dot{E}'_2 \\ \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0 \\ \dot{E}_1 = -\dot{I}_0 Z_m \\ \dot{U}'_2 = \dot{I}'_2 Z'_L \end{cases}$$

T型等效电路

➤ 前面所述的电压方程式中的数量关系和基本方程式使用要点也适用于T型等效电路。

70

7. 等效电路

(2) 简化等效电路

T型等效电路含有串、并联支路，参数较多，计算稍嫌复杂。

➤ 简化条件

负载运行，且 $I_0 \ll I_1$ 时，可忽略励磁支路。

➤ 使用场合

- 励磁电流通常远小于额定电流，因此，在负载不是很小时，一般都可采用。
- 空载时不能用！

简化等效电路

71

(2) 简化等效电路

➤ 短路阻抗

在简化等效电路中，将 Z_1 、 Z'_2 合并，得

$$Z_k = Z_1 + Z'_2 = R_k + jX_k$$

其中，

$$\begin{aligned} R_k &= R_1 + R'_2 \\ X_k &= X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2} \end{aligned}$$

- Z_k 、 R_k 、 X_k 分别称为**短路阻抗**、**短路电阻**和**短路电抗**。
- Z_k 是二次短路时从简化等效电路一次端口看入的阻抗。

72

2.3 变压器的负载运行

8. 相量图

相量图（感性负载时）

- 相量图与基本方程式、T型等效电路相对应。
- 视图要点
 - 一次电压环
 - 二次电压环
 - 电流平行四边形
 - 三个角度： φ_1 、 φ_2 、 ψ_2 。

8. 相量图

作图步骤

- 已知条件
 - U_2 、 I_2 、 $\cos\varphi_2$ 、 k 、 R_1 、 $X_{\sigma 1}$ 、 R_2 、 $X_{\sigma 2}$ 、 R_m 、 X_m
- 步骤
 - 将二次物理量折合到一次；
 - 根据已知条件，先画出二次电压环，得 $\dot{E}_2' = \dot{E}_1$ ；
 - 画 $\dot{\Phi}_m$ 和 \dot{I}_0 ，再画电流平行四边形，得 \dot{I}_1 ；
 - 画一次电压环，得 \dot{U}_1 。

2.3 变压器的负载运行

9. 功率平衡关系

将能量传递过程用功率平衡关系表示。

功率与损耗（单相）

- 一次绕组铜耗 $p_{Cu1} = I_1^2 R_1$
- 二次绕组铜耗 $p_{Cu2} = I_2^2 R_2'$
- 铁耗 $p_{Fe} = I_0^2 R_m$
- 输入功率 $P_1 = U_1 I_1 \cos\varphi_1$
- 输出功率 $P_2 = U_2' I_2' \cos\varphi_2 = U_2 I_2 \cos\varphi_2$
- 电磁功率 $P_{em} = E_2' I_2' \cos\psi_2 = E_2 I_2 \cos\psi_2$ （通过磁场从一次传递到二次的电功率）

9. 功率平衡关系

功率平衡方程式、功率流程图

用来表示有功功率的平衡关系。

功率平衡方程式

$$P_{em} = P_1 - (p_{Cu1} + p_{Fe})$$
$$P_{em} = P_2 + p_{Cu2}$$

功率流程图

符号

功率： P （大写）

损耗： p （小写）

效率 $\eta = \frac{P_2}{P_1} < 1$

电磁功率 P_{em} 将一次、二次侧的有功功率联系起来。

问题：无功功率的平衡关系

第2章 变压器的运行分析

2.4 变压器参数的测定

变压器参数

指等效电路中的参数，包括短路阻抗和励磁阻抗。

获取变压器参数的方法

- 计算法：由设计计算得到。
- 试验法：制成后，通过试验方法测定。

试验方法：

- 短路试验
- 空载试验

2.4 变压器参数的测定

1. 短路试验

(1) 试验原理、方法

- 二次侧短路时，从一次端口看入的阻抗就是短路阻抗。
- 试验线路（单相）
 - Ⓐ 电流表
 - Ⓥ 电压表
 - Ⓜ 功率表
- 低压侧短路；将高压侧电压逐渐升高，使电流至额定值，测取电压、电流和有功功率（短路损耗），并记录室温。

1. 短路试验

(2) 参数求取

- 由相电压、相电流，求短路阻抗的模： $|Z_k| = \frac{U_k}{I_k}$
- 由一相输入功率和相电流，求短路电阻和短路电抗： $R_k = \frac{P_k}{I_k^2}, X_k = \sqrt{|Z_k|^2 - R_k^2}$
- 将室温 θ 下测得的短路电阻和短路阻抗值换算到 75°C 下： $R_{k(75^\circ\text{C})} = \frac{234.5 + 75}{234.5 + \theta} R_k, |Z_{k(75^\circ\text{C})}| = \sqrt{R_{k(75^\circ\text{C})}^2 + X_k^2}$
电抗不需温度换算！

79

1. 短路试验

(3) 相关术语

- 负载损耗 p_{kN}**
短路电流等于额定值时的短路损耗。
- 阻抗电压 u_k**
短路电流等于额定电流时，一次电压与其额定值之比。 $u_k = \frac{I_{1N\phi} |Z_{k(75^\circ\text{C})}|}{U_{1N\phi}} \times 100\%$

问题讨论

- 三相变压器如何进行短路试验？
- 为什么短路试验通常在高压侧做（即在高压侧加电压）？
- 通过短路试验可得到一、二次绕组的漏电抗值吗？

80

2.4 变压器参数的测定

2. 空载试验

(1) 试验原理、方法

- 二次侧开路时，从一次端口看入的阻抗是励磁阻抗与一次绕组漏阻抗之和。
- 试验线路（单相）
- 高压侧开路；将低压侧电压升至额定值，测取一次的电压、电流、有功功率（空载损耗）和二次电压。

单相变压器空载试验线路

81

2. 空载试验

(2) 参数求取

- 由相电压、相电流，求励磁阻抗的模： $|Z_m| \approx |Z_m + Z_1| = \frac{U_1}{I_0}$
- 由一相输入功率（空载损耗）和相电流，求励磁电阻和励磁电抗： $R_m \approx R_m + R_1 = \frac{p_0}{I_0^2}, X_m = \sqrt{|Z_m|^2 - R_m^2}$
- 由一次、二次相电压，求变比： $k = \frac{U_1}{U_{20}}$

问题讨论

- 三相变压器如何进行空载试验？
- 为什么空载试验通常在低压侧做（即在低压侧加电压）？

82

第2章 变压器的运行分析

2.5 标么值

1. 标么值的概念

- 定义
一个物理量的**实际值**与某个选定的同单位的**基值**之比，称为该物理量的**标么值**。
$$\text{标么值} = \frac{\text{实际值（任意单位）}}{\text{基值（与实际值同单位）}}$$
- 表示法
在物理量符号下面加一短横线来表示其标么值。
例：以220V为基值，当 $U_1 = 110\text{V}$ 时， $\underline{U}_1 = 110/220 = 0.5$
当 $U_1 = 220\text{V}$ 时， $\underline{U}_1 = 220/220 = 1$

83

2.5 标么值

2. 基值的选取

(1) 一般原则

- 使用标么值之前，须先选定基值。
- 为了使标么值具有一定的意义，通常选取**额定值**作为各物理量的基值。
- 四个基本物理量**——电压、电流、阻抗、功率的基值
 - 基值之间应**满足电路定律**，不能任意选取。
 - 一旦选定了其中**两个量**的基值，则余下两个量的基值就应根据选定量的基值计算出来。

84

2. 基值的选取

(2) 单相变压器基值的选取

物理量	基 值	
	一次侧	二次侧
电压	U_{1N}	U_{2N}
电流	I_{1N}	I_{2N}
阻抗	Z_{1N}	Z_{2N}
功率	S_N	

基值间的关联

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}}$$
$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}}$$
$$Z_{1N} = \frac{U_{1N}}{I_{1N}}$$
$$Z_{2N} = \frac{U_{2N}}{I_{2N}}$$

85

2. 基值的选取

(3) 三相变压器基值的选取

物理量	一次侧	
	线基值	相基值
电压	U_{1N}	$U_{1N\phi}$
电流	I_{1N}	$I_{1N\phi}$
阻抗	—	Z_{1N}
功率	三相基值为 S_N ，一相基值为 $S_{N\phi}=S_N/3$	

基值间的关联

- $I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}}, I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}}; Z_{1N} = \frac{U_{1N\phi}}{I_{1N\phi}}, Z_{2N} = \frac{U_{2N\phi}}{I_{2N\phi}}$
- 线、相基值之间的关系（星型/三角形联结）

86

2. 基值的选取

(3) 三相变压器基值的选取（续）

线基值与相基值之间的关系

- 线值用线基值，相值用相基值。
- 当三相绕组为星形联结时，线、相电流基值相同，线电压基值是相电压基值的 $\sqrt{3}$ 倍。
- 当三相绕组为三角形联结时，线、相电压基值相同，线电流基值是相电流基值的 $\sqrt{3}$ 倍。

结论

- 电压或电流线值的标么值等于其相值的标么值。
- 三相功率的标么值等于一相功率的标么值。

87

2. 基值的选取

(4) 标么值的优点

- 不论变压器的额定容量相差多大，用标么值表示的参数和性能数据通常都在很小的范围内，容易记忆，便于比较。
例：空载电流标么值 $I_0=0.02\sim0.1$
短路阻抗标么值 $|Z_k|=0.04\sim0.18$
- 便于判断变压器的运行状况。
例： $I_2=1$ ，满载； $I_2=1.1$ ，过载。
- 用标么值表示时，正弦交流量的最大值与有效值相等，三相线值的标么值等于其相值的标么值，三相功率与一相功率相等。

88

2. 基值的选取

(4) 标么值的优点（续）

- 物理量折合前后的标么值相等，因此用标么值表示时不需折合，可使计算简化。

例：

$$R'_2 = \frac{I_{1N\phi} R'_2}{U_{1N\phi}} = \frac{I_{1N\phi} k^2 R_2}{U_{1N\phi}} = \frac{k I_{1N\phi} R_2}{U_{1N\phi} / k}$$

$\frac{I_{1N\phi}}{I_{2N\phi}} = \frac{1}{k}$

$$= \frac{I_{2N\phi} R_2}{U_{2N\phi}} = R_2$$
$$R_k = R_1 + R_2, X_k = X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}, Z_k = Z_1 + Z_2$$
$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$$

89

2. 基值的选取

(4) 标么值的优点（续）

- 用标么值表示时，某些不同的物理量可具有相同的值。
 - 例：短路阻抗标么值等于阻抗电压
 $|Z_k| = \frac{I_{1N\phi} |Z_k|}{U_{1N\phi}} = \frac{U_k}{U_{1N\phi}} = U_k = u_k$

U_k 为额定电流时的短路电压。
 - 例：绕组电阻与其额定电流时铜耗的标么值相等
 $R_1 = \frac{I_{1N\phi} R_1}{U_{1N\phi}} = \frac{I_{1N\phi}^2 R_1}{U_{1N\phi} I_{1N\phi}} = \frac{p_{Cu1}}{U_{1N\phi} I_{1N\phi}} = \frac{p_{Cu1}}{S_N}$

p_{Cu1} 为额定电流时的铜耗。

标么值的缺点

各物理量均无量纲，因此无法用量纲关系来检查方程式或公式的正确性。

90

第2章 变压器的运行分析

2.6 变压器的运行特性

概述

使用变压器时必须考虑的两个问题

- 二次电压是否随负载变化？
- 在不同负载下，变压器的效率如何？

用运行特性来定量描述

- 电压调整特性（外特性）
- 效率特性

91

2.6 变压器的运行特性

1. 电压调整率与电压调整特性

(1) 定义

条件：变压器一次侧接在额定频率和额定电压的电网上，负载功率因数 $\cos\varphi_2$ 一定。

- 电压调整特性（外特性）
二次电压 U_2 与负载电流 I_2 的关系曲线 $U_2=f(I_2)$ 。
- 电压调整率 ΔU
从额定负载到空载时二次电压的变化量与二次额定电压的比值。
$$\Delta U = \frac{U_{20}-U_2}{U_{2N}} \times 100\% = \frac{U_{1N}-U_2'}{U_{1N}} \times 100\% = (1-U_2') \times 100\%$$

92

1. 电压调整率与电压调整特性

(2) 电压调整率计算公式

推导（利用简化等效电路）

电压方程： $\dot{U}_1 = -\dot{U}_2 + \dot{I}_1 Z_k$

$$\Delta U = \overline{AP} \approx \overline{AE}$$
$$= \overline{AD} + \overline{DE}$$
$$\overline{AD} = I_2 R_k \cos\varphi_2$$
$$\overline{DE} = I_2 X_k \sin\varphi_2$$
$$\Delta U = \beta(R_k \cos\varphi_2 + X_k \sin\varphi_2) \times 100\%$$

其中， $\beta=I_2=I_1$ ，称为**负载因数**（反映负载大小）。

93

(2) 电压调整率计算公式

$$\Delta U = \beta(R_k \cos\varphi_2 + X_k \sin\varphi_2) \times 100\%$$

结论：电压调整率不但与负载有关，还与短路阻抗有关。

讨论

- 产生 ΔU 的原因
- 内因： Z_k ；
- 外因：负载 { 大小 (β)
性质 ($\cos\varphi_2$) }
- ΔU 与短路阻抗标幺值正相关
在负载的大小和功率因数一定时，短路阻抗标幺值 $|Z_k|$ 大的变压器，其 ΔU 也大。
- ΔU 与负载因数 β 成正比。

94

1. 电压调整率与电压调整特性

(3) 电压调整特性

- 与负载性质有关
 - 负载为电阻或电感性时， $\varphi_2 \geq 0$ ， ΔU 总为正值。
 - 负载为电容性时， $\varphi_2 < 0$ ， ΔU 可能为负值。

结论：电容性负载有抬高变压器二次电压的作用。

额定电压调整率 ΔU_N

定义：额定负载、 $\cos\varphi_2$ 为指定值（通常为0.8滞后）时的 ΔU 。

意义：反映变压器供电电压的稳定性。

95

2.6 变压器的运行特性

2. 效率与效率特性

(1) 定义

条件：变压器一次侧接在额定频率和额定电压的电网上，负载功率因数 $\cos\varphi_2$ 一定。

- 效率
变压器输出有功功率与输入有功功率的百分比。
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \left(1 - \frac{\Sigma p}{P_2 + \Sigma p} \right) \times 100\%$$

其中， Σp 为变压器的总损耗。

96

2. 效率与效率特性

(2) 变压器的损耗

变压器的损耗有两类：磁路中的**铁耗** + 电路中的**铜耗**。

■ 铁耗 p_{Fe}

- 起因：交变磁通在铁心中引起的涡流与磁滞损耗。
- 特征：**不变损耗**。

在额定电压下正常运行时，负载电流虽然变化，但主磁通幅值基本不变，可认为铁耗基本不随负载变化。

■ 铜耗 p_{Cu}

- 起因：一次、二次绕组电阻上的损耗。
- 特征：**可变损耗**。

不计励磁电流时，铜耗与负载电流的平方成正比。

97

2. 效率与效率特性

(3) 效率计算公式

$$\eta = \left(1 - \frac{\Sigma p}{P_2 + \Sigma p}\right) \times 100\% = \left(1 - \frac{p_{Fe} + p_{Cu}}{P_2 + p_{Fe} + p_{Cu}}\right) \times 100\%$$

假定：负载运行时（以单相为例）

- 二次电压不变，则 $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 \approx U_{2N} I_2 \cos \varphi_2 = \beta U_{2N} I_{2N} \cos \varphi_2 = \beta S_N \cos \varphi_2$
- 铁耗 p_{Fe} 不变，且等于空载损耗 p_0 ；
- 铜耗 $p_{Cu} \propto I_2^2$ ，且在额定负载时等于负载损耗 p_{kN} ，即 $p_{Cu} = p_k = (I_2 / I_{2N})^2 p_{kN} = \beta^2 p_{kN}$

代入上式，得
$$\eta = \left(1 - \frac{p_0 + \beta^2 p_{kN}}{\beta S_N \cos \varphi_2 + p_0 + \beta^2 p_{kN}}\right) \times 100\%$$

98

2. 效率与效率特性

(4) 效率特性

- 定义： $\cos \varphi_2$ 一定时，效率 η 与负载因数 β 的关系曲线 $\eta = f(\beta)$ 。
- η 的变化与负载及损耗的变化有关：
 - β 较小时， $p_{Cu} < p_{Fe}$ ， Σp 增速慢于 P_2 ， $\beta \uparrow \Rightarrow \eta \uparrow$ 。
 - β 较大时， $p_{Cu} > p_{Fe}$ ， Σp 增速快于 P_2 ， $\beta \uparrow \Rightarrow \eta \downarrow$ 。
- $\cos \varphi_2$ 一定时，随着负载增加， η 出现一个最大值 η_m 。此时， $p_0 = \beta_m^2 p_{kN}$ 或 $\beta_m = \sqrt{\frac{p_0}{p_{kN}}}$

效率特性

结论：可变损耗等于不变损耗时，变压器有最高效率。

99

第2章 变压器的运行分析

小结

- ✓ 参考方向惯例及其变式；基于参考方向的功率流向判断。
- ✓ 变压器稳态运行的电磁关系（空载为负载的特例）。
- ✓ 三个平衡关系：磁动势平衡关系、电动势平衡关系（电压方程式）、功率平衡关系。
- ✓ 三个分析工具：基本方程式、等效电路（T型、简化）、相量图。
- ✓ 主磁通与漏磁通的作用及其通过电路参数的等效表示；参数的物理意义和数值特点，影响参数值的主要因素。
- ✓ 折合算法（原则，二次或一次绕组的折合关系）。
- ✓ 短路试验、空载试验的原理、方法与参数求取。

100

第2章 变压器的运行分析

小结（续）

- ✓ 标么值，基值的选取，标么值的应用。
- ✓ 电压调整特性，电压调整率计算公式。
- ✓ 效率特性，效率计算公式，最高效率的产生条件。
- ✓ 主要概念
 - 参考方向（发电机、电动机惯例，右手螺旋定则）；
 - 空载（运行），负载运行；变比；
 - 励磁电流，励磁磁动势，合成磁动势；磁动势平衡；
 - 主磁通，漏磁通；主、漏磁路磁导；
 - 主磁通感应电动势，漏磁电动势；

101

第2章 变压器的运行分析

小结（续）

- ✓ 主要概念（续）
 - 漏电抗、漏阻抗；励磁阻抗、励磁电抗、励磁电阻；
 - 折合算法，折合值；
 - 基本方程式；T型等效电路，简化等效电路；
 - 短路试验，短路阻抗，阻抗电压，负载损耗；
 - 空载试验，空载损耗；
 - 标么值，基值；
 - 电压调整特性，电压调整率，负载因数；
 - 效率特性，不变损耗，可变损耗。

102

17

第1篇 变压器

第3章 三相变压器

▼ 学习目标

- 掌握三相变压器两种磁路系统的构成和特点
- 熟练掌握三相变压器的绕组联结方式
- 熟练掌握利用电动势相量图分析三相变压器联结组问题的方法
- 理解三相变压器空载电动势波形与其磁路、电路系统的关系
- 掌握变压器并联运行的理想条件及其负载分配关系

103

第3章 三相变压器

引言

三相变压器在对称稳态运行时，只取其中一相进行分析，第2章中的分析方法和结论都适用。

■ 本章讨论的问题

- 三相变压器中特有或有特殊性的问题
 - 与铁心结构相关的磁路系统
 - 电路系统——绕组联结方式和相应的联结组
 - 空载电动势波形
- 并联运行

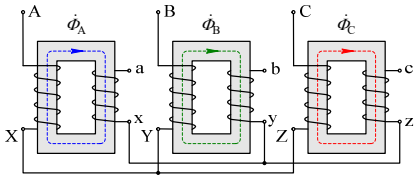
104

第3章 三相变压器

3.1 三相变压器的磁路系统

1. 三相变压器组

- 磁路构成：由三台相同的单相变压器的铁心组成。
- 磁路特点：三相磁路彼此无关（每相磁通有独立的回路）。



三相变压器组的磁路系统

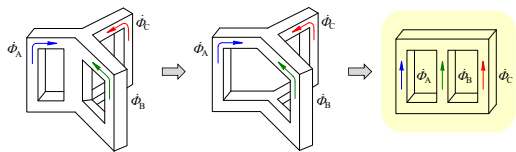
105

第3章 三相变压器

3.1 三相变压器的磁路系统

2. 三相心式变压器

- 磁路构成：三相磁路组合在一起，并利用三相磁通的对称关系简化磁路。
- 磁路特点：
 - 三相磁路彼此相关，每相主磁通都以另两相磁路作为回路。
 - 三相磁路长度不等（中间的较短）。⇒ 三相空载电流不等



三相心式变压器磁路系统的演变

106

第3章 三相变压器

3.2 三相变压器的电路系统——绕组联结方式和联结组

概述

- 变压器不仅可以变换电压、电流、阻抗，而且可以变换相位。
- 三相变压器变相位的作用通过绕组联结来实现；一次、二次绕组可有不同的联结方式组合，得到不同的联结组。
- 变压器联结组的核心问题是高、低压侧对应线电动势之间的相位差。

107

第3章 三相变压器

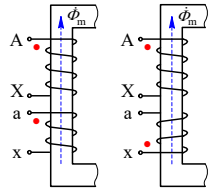
3.2 三相变压器的电路系统——绕组联结方式和联结组

1. 单相变压器的电动势相位关系

单相变压器高、低压绕组的电动势相位关系也是三相变压器一个铁心柱上高、低压绕组的电动势相位关系。

(1) 同名端与首末端

- 同名端
 - 可根据楞次定律判断。
 - 同名端用“•”标记。
 - 同名端与绕组的绕向有关。
- 首、末端
 - 每个绕组的两个出线端分别规定为首、末端；
 - 高、低压绕组的首末端标志分别用大、小写字母。



108

1. 单相变压器的电动势相位关系

(2) 电动势相位关系

高、低压绕组之间的首末端标记方式

- 同名端标为首端。
- 非同名端标为首端。

高、低压绕组电动势参考方向的规定

- 统一规定为：从首端指向末端。

高、低压绕组电动势的相位关系

统一规定电动势参考方向后，高、低压绕组电动势的相位关系取决于首末端标记方式：

- 同名端标记为首端时：电动势同相。
- 非同名端标记为首端时：电动势反相。

109

(2) 电动势相位关系

同名端标为首端

电动势同相

非同名端标为首端

电动势反相

110

1. 单相变压器的电动势相位关系

(3) 单相变压器的联结组标号

相位关系的时钟序数表示法

- 以高压绕组电动势相量作为时钟的长针，且永远指向钟面上“12”位置；
- 以低压绕组电动势相量作为短针，短针在钟面上所指的数字就是时钟序数（特例：指向“12”时，时钟序数记为0）。

联结组标号

110和116。

- 两个罗马数字I表示高、低压绕组都是单相，数字0、6是时钟序数。
- 单相变压器只有这两种联结组。

111

3.2 三相变压器的电路系统——绕组联结方式和联结组

2. 三相变压器的联结组

三相变压器电路联结的多样性

- 同一铁心柱上的高、低压绕组的同名端与首、末端的规定；
- 同一铁心柱上的高、低压绕组是否属于同一相；
- 高、低压三相绕组的联结方式（星形/三角形）。

联结组的定义

三相变压器的高、低压绕组的联结方式有多种不同的组合，每种组合称为一种联结组。

问题：如何表示如此复杂的三相变压器联结组？

112

2. 三相变压器的联结组

(1) 三相绕组的标志与联结方式

同名端与首末端标志

- 三相绕组的同名端仍用“·”表示。
- 同一铁心柱上高、低压绕组之间的极性关系与单相变压器同名端标注方式相同。
- 同一侧的三相绕组之间的极性关系如果分别从三相绕组的某个出线端流入电流，在各相铁心柱中产生的磁通方向都能指向同一磁路节点，则这三个出线端为同名端。

113

(1) 三相绕组的标志与联结方式

同名端与首末端标志（续）

三相绕组的首末端标志

- 三相高压绕组用大写字母表示：首端分别为A、B、C，末端分别为X、Y、Z；
- 三相低压绕组用小写字母表示：首端分别为a、b、c，末端分别为x、y、z。
- 规定首端A、B、C和a、b、c分别为高、低压侧三相绕组的引出端子；若中性点有引出线，则其端子以“N”（高压侧）或“n”（低压侧）标记。

114

19

(1) 三相绕组的标志与联结方式

▶ 三相绕组的联结方式

以高压绕组为例。

■ 星形联结
简称 Y 联结

■ 三角形联结（两种）
简称 D 联结

(a) Y 联结

(b) 第一种 D 联结

(c) 第二种 D 联结

三相绕组联结图

115

2. 三相变压器的联结组

(2) 联结组

高、低压侧绕组联结方式 + 电动势相位差 \Rightarrow 联结组。
电动势相位差可通过相量图来分析。

▶ 电动势相量三角形

■ 星形联结（Y 联结）

绕组联结图

相量图

相量三角形

116

(2) 联结组

▶ 电动势相量三角形（续）

■ 三角形联结（D 联结）

绕组联结图
(第一种 D 联结)

相量图

相量三角形

对于第二种 D 联结方式，也可得到类似的相量三角形。

117

(2) 联结组

▶ 电动势相量三角形（续）

■ 相量三角形的特点

① 是一个以首端 A、B、C 为顶点的等边三角形；

② 三个顶点 A、B、C 按相序（正序）顺时针排列；

③ 重合在一起的点是等电位点；

④ 任意两点之间的有向线段表示这两点之间的电动势相量。

根据上述特点，可快速画出高、低压侧的电动势相量三角形。

Y 联结

第一种 D 联结

118

(2) 联结组

▶ 联结组标号

关注高、低压侧对应线电动势间的相位差（如 \dot{E}_{AB} 与 \dot{E}_{ab} ）。

■ 电动势相位差的时钟序数表示法

● Y 或 D 联结时，对应线电动势的相位差总是 30° 的整数倍。

● 钟面上相邻时数刻度的夹角是 30° ，故也用时钟序数表示法。

■ 三相变压器的联结组标号

● 表示绕组联结方式的英文字母和时钟序数构成联结组标号。

● 书写形式：

高压绕组联结方式

低压绕组联结方式

时钟序数

大写字母 Y 或 D 小写字母 y 或 d 数字 0~11

(中性点引出时后加 N) (中性点引出时后加 n)

例：Yy0、YNy0、Yd11、Dyn1。

119

(2) 联结组

▶ 联结组标号分析举例之一：Yy 联结

已知绕组联结方式，通过画相量图来确定联结组标号。

■ 绕组联结图

● 高、低压绕组分别画在上、下面，且均按相序从左向右排列；

● 三相高、低压绕组分别上下对齐，且上下对齐的高、低压绕组是绕在同一铁心柱上的；

● 画出高、低压绕组的联结方式；

● 标明同名端和首、末端（首端在上）；

● 标明各相电动势、对应线电动势及其参考方向。

120

(2) 联结组

▶ 联结组标号分析举例之一：Yy联结（续）

■ 电动势相量图

先画出高压侧电动势相量图；

可按电动势相量三角形的特点画图。

习惯上将顶点A置于左下方。

(2) 联结组

▶ 联结组标号分析举例之一：Yy联结（续）

■ 电动势相量图

再画低压侧电动势相量图；

根据同一铁心柱上高、低压绕组电动势的相位关系，画出 \dot{E}_a 。

将顶点a与A重合

(2) 联结组

▶ 联结组标号分析举例之一：Yy联结（续）

■ 电动势相量图

判断时钟序数，确定联结组标号。

联结组标号为Yy6

长针指向12点

短针指向6点

(2) 联结组

▶ 联结组标号分析举例之二：Dy联结

已知绕组联结方式，通过画相量图来确定联结组标号。

联结组标号为Dy3

长针指向12点

短针指向3点

(2) 联结组

▶ 联结组构成的基本规律

高、低压绕组的联结方式相同和不同时，分别可以得到时钟序数为偶数、奇数的联结组。

Yy联结可得到的联结组标号为Yy0、Yy4、Yy8和Yy6、Yy10、Yy2；

Dy联结可得到的联结组标号为Dy1、Dy5、Dy9和Dy7、Dy11、Dy3联结组标号。

Dd联结与Yy联结可以有相同的时钟序数；Yd联结与Dy联结可以有相同的时钟序数。

第3章 三相变压器

3.3 三相变压器的空载电动势波形

1. 问题的产生

为提高材料利用率，变压器运行时铁心通常是饱和的。

铁心饱和引起波形问题

正弦波磁通 \Rightarrow 尖顶波励磁电流（含3次谐波）

正弦波励磁电流 \Rightarrow 平顶波磁通 \Rightarrow 尖顶波电动势（含3次谐波）（含3次谐波）

电力系统要求：变压器出线端的电压、电流均为正弦波。

解决矛盾的思路？
磁路中：抑制3次谐波磁通
电路中：提供3次谐波电流通路

3.3 三相变压器的空载电动势波形

2. Yy联结的三相变压器

特征：各相励磁电流均为正弦波（因3次谐波电流无法流通）。

(1) 三相变压器组

- 各相磁路独立，3次谐波磁通 ϕ_3 可经铁心闭合。
- 产生尖顶波相电动势，对绝缘材料构成威胁。

结论：三相变压器组不采用Yy联结。

平顶波主磁通产生的电动势波形

127

2. Yy联结的三相变压器

(2) 三相心式变压器

- 三相3次谐波磁通同相，无法在铁心中闭合，只能经铁心外部非铁磁材料（绝缘介质）和变压器箱壁闭合。
- 该磁路的磁阻很大 \Rightarrow 3次谐波磁通幅值很小。
- 主磁通及相电动势都接近正弦波。

3次谐波磁通路径示意图

结论：三相心式变压器可采用Yy联结。但附加损耗较大，不宜做大容量变压器。

128

3.3 三相变压器的空载电动势波形

3. Yd和Dy联结的三相变压器

特征：线电流中无3次谐波；3次谐波相电流可在三角形联结回路中流通，起励磁电流作用。

Yd联结低压绕组中的3次谐波电流

- 主磁通和电动势都接近正弦波（ e_3 、 i_3 很小）。
- 线电动势和线电流中没有3次谐波。

结论：不论是三相心式变压器还是三相变压器组，都希望至少有一侧的绕组为三角形联结。

129

第3章 三相变压器

3.4 变压器的并联运行

1. 概述

定义

几台变压器一次、二次绕组相同标志的出线端分别并联接到一次、二次侧的公共母线上，共同对负载供电。

交流电网母线

负载供电母线

130

1. 概述

■ 并联运行的优点

- 可切除有故障或检修中的变压器，其他变压器仍正常运行，从而提高供电的可靠性；
- 可根据负载大小来调整投运变压器数量，使投运变压器都接近满载，以提高效率和功率因数；
- 可减小备用变压器容量，节约投资；
- 随着负载的需求增加变压器的台数，更为经济。

并联运行变压器的数量不宜过多

否则，单台容量过小，效率低、费材料、成本高、占地面积大、维护不便，反而不经济。

131

3.4 变压器的并联运行

2. 并联运行的理想条件

■ 并联运行的理想状况

- 空载时，各变压器之间没有环流；
- 负载时，各变压器按其额定容量成比例地分担负载；
- 负载时，各变压器同一相的负载电流的相位相同。

■ 并联运行的理想条件

为达到上述理想状况，并联运行的变压器应满足：

- 一次、二次额定电压分别相等，即额定电压比相等；
- 二次对一次线电压的相位差相同；
- 短路阻抗标幺值相等（大小和阻抗角都相等）。

132

3.4 变压器的并联运行

3. 非理想条件下的并联运行

(1) 额定电压比不等时

以两台变压器并联为例。
额定电压比不等时，一次电压的折合值不等。
即使不带负载，变压器之间也存在**环流**：
$$j_a = -j_\beta = \frac{\dot{U}'_{1N\phi\alpha} - \dot{U}'_{1N\phi\beta}}{Z'_{ka} + Z'_{k\beta}}$$

折合到二次侧的简化等效电路

- **危害**：环流占用变压器的容量，增加损耗。
- **对策**：额定电压比相差须小于0.5%。

3. 非理想条件下的并联运行

(2) 联结组标号不同时

三相变压器在联结组标号不同时，二次侧线电压的相位差至少为30°。

- 两台变压器二次侧线电压大小相等、相位差为30°时，
$$\Delta U_2 = 2U_{20} \sin 15^\circ = 0.5176U_{20}$$
- 该电压差产生的环流已是额定电流的几倍。

结论：不同联结组标号的变压器**绝对不允许**并联运行。

3. 非理想条件下的并联运行

(3) 短路阻抗标么值不等时

设理想条件的第1、2个都满足，仅第3个条件不满足。

▶ 并联运行时的负载分配

以三台变压器 α 、 β 、 γ 为例。
$$j_a Z_{ka} = j_\beta Z_{k\beta} = j_\gamma Z_{k\gamma} = \dot{U}_{AB}$$
$$I_a |Z_{ka}| = I_\beta |Z_{k\beta}| = I_\gamma |Z_{k\gamma}| = \frac{U_{AB}}{U_{1N\phi}}$$
$$I_a : I_\beta : I_\gamma = \frac{1}{|Z_{ka}|} : \frac{1}{|Z_{k\beta}|} : \frac{1}{|Z_{k\gamma}|}$$

三台变压器并联运行时的简化等效电路

(3) 短路阻抗标么值不等时

▶ 并联运行时的负载分配（续）

$$\beta_a : \beta_\beta : \beta_\gamma = I_a : I_\beta : I_\gamma = \frac{1}{|Z_{ka}|} : \frac{1}{|Z_{k\beta}|} : \frac{1}{|Z_{k\gamma}|}$$

结论

- 并联运行的各变压器的负载因数与其短路阻抗模的标么值成反比。
- 短路阻抗标么值小的变压器先达到满载。
- 若各变压器的短路阻抗标么值相等，则它们的负载因数相等，可按照其额定容量成比例地分担负载，并能同时达到满载。
- ▶ 按容量比例均流条件：通常要求各变压器的短路阻抗标么值相差不超过10%，容量比不超过3:1。

第3章 三相变压器

小结


- ✓ 三相变压器两种磁路系统的构成和特点。
- ✓ 三相绕组的联结方式，同名端、首末端及其标记方式。
- ✓ 同一铁心柱上高、低压绕组电动势的相位关系。
- ✓ 三相变压器的绕组联结图、电动势相量三角形的特点。
- ✓ 利用相量图分析三相变压器的联结组问题（已知绕组联结图时确定联结组标号，或反之）。
- ✓ 三相变压器空载电动势波形问题的起因；磁路结构、电路联结对空载电动势波形的影响。
- ✓ 变压器并联运行的理想条件；短路阻抗标么值不同时的负载分配关系。

第3章 三相变压器

小结（续）

- ✓ 主要概念
- 三相变压器组，三相心式变压器；
- 星形联结（Y联结），三角形联结（D联结）；
- 同名端；首、末端；绕组联结图；
- 联结组标号，时钟序数；
- 并联运行。

23



第1篇 变压器

总结

1. 对称稳态运行时的电磁关系（重点：磁动势平衡关系、电动势平衡关系）。


2. 折合算法（折合原则、折合关系）。

3. 等效电路（T型、简化）；等效电路参数的物理意义和数值特点，影响参数值的主要因素。

4. 运用电磁关系和分析工具（基本方程式、等效电路、相量图）分析功率平衡关系和有关量的变化情况。[如： ϕ_m 与外部量（ U_1 、 f 、负载）和内部量（匝数、参数）的关系]

5. 等效电路参数的测取（短路试验、空载试验）。

139



第1篇 变压器

总结（续）

6. 运行特性（电压调整特性和效率特性）；电压调整率和效率计算。[能定性解释运行特性的变化规律]

7. 三相变压器的联结组（绕组首末端标志方式，同一铁心柱上高、低压绕组电动势的相位关系；用电动势相量图分析联结组问题）。

8. 三相变压器磁路、电路系统对空载电动势波形的影响。

9. 并联运行的理想条件和负载分配关系。

10. 额定值及其关系；标么值及其对计算的简化。

11. 参考方向惯例及其变式；基于参考方向判断功率流向。

140