

第3章

三相电路及其应用

本章要点：

本章从三相电压的特点出发,首先介绍三相电源的星形、三角形联接;其次介绍对称三相电路的构成及分析方法;最后介绍工业企业配电、高压输电及安全用电知识。读者学习本章应重点理解三相电压的形式及其特点、三相电路星形联接、三角形联接的特点,能对简单的三相电路进行计算,了解工业企业配电及安全用电知识。



仿真包

在应用实践中,一般将多个正弦电源组合应用。世界各国电力系统中电能的生产、传输和供电方式一般采用三相制。三相电路是电力工业电子电路的基本形式,日常生活的单相电路只是三相电路的一部分。

3.1 三相电路概述

三相电路主要由三相电源和三相负载两部分组成。三相电源由三相交流发电机产生,以电压的形式输出。三相负载则可根据应用需要选择合适的联接方式。

3.1.1 三相电压的形式及其特点



三相电压由三相交流发电机产生,理解三相交流发电机是理解三相电压的基础。

三相交流发电机的原理如图 3.1.1 所示。从图中可看出,三相交流发电机主要由定子与转子两部分组成。转子是一个磁极,它以角速度 ω 旋转。定子是不动的,在定子的槽中嵌有三组同样的绕组(线圈),即 AX、BY、CZ,每组称为一相,分别称为 A 相、B 相和 C 相。它们的始端标以 A、B、C,末端标以 X、Y、Z,要求绕组的始端之间或末端之间彼此相隔 120° 。同时,工艺上保证定子与转子之间磁感应强度沿定子内表面按正弦规律分布。最大值在转子磁极的北极 N 和南极 S 处。这样,当转子以角速度 ω 顺时针旋转时,将在各相绕组的始端和末端间产生随时间按正弦规律变化的感应电压。

这些电压的频率、幅值均相同,彼此间的相位相差 120° ,相当于三个独立的正弦电源。三相电源的各相电压分别为

$$\left. \begin{aligned} u_A &= \sqrt{2}U \sin \omega t \\ u_B &= \sqrt{2}U \sin(\omega t - 120^\circ) \\ u_C &= \sqrt{2}U \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (3.1.1)$$

在式(3.1.1)中,以 A 相电压 u_A 作为参考相量,则它们相量为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= U \angle 0^\circ \\ \dot{U}_B &= U \angle -120^\circ = U \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \\ \dot{U}_C &= U \angle 120^\circ = U \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3.1.2)$$

三个频率、幅值相同,彼此间相位相差 120° 的电压,称为对称三相电压。其相量图及波形如图 3.1.2、图 3.1.3 所示。

上述三相电压到达正幅值(或相应零值)的先后次序称为相序。图 3.1.2 所示三相

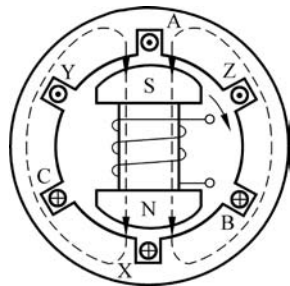


图 3.1.1 三相交流发电机的原理图

电压的相序为 $A \rightarrow B \rightarrow C$, 称为正序或顺序。与此相反, 如 B 相超前 A 相 120° , C 相超前 B 相 120° , 这种相序称为负序或逆序。今后如无特殊声明, 均按正序处理。

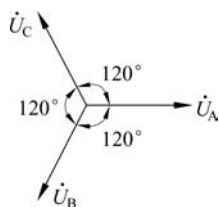


图 3.1.2 对称三相电压相量图

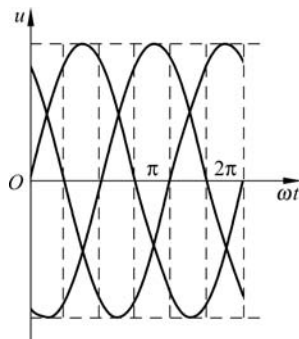


图 3.1.3 对称三相电压的波形

对称三相电压的一个特点是

$$\left. \begin{aligned} u_A + u_B + u_C &= 0 \\ \dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.1.3)$$

3.1.2 三相电源的联接方式



直流电路常使用单电源为电路提供动力, 可通过串接直流电压源提高电路的工作电源电压。

三相电路中的电源有 3 个, 可当作三个独立的正弦电源使用。为更好地满足应用要求, 在实践应用中, 一般将三相发电机的三相绕组按某种方式联接成一个整体后再对外供电。三相绕组有星形联接(简称 Y 形联接)与三角形联接(简称 Δ 形联接)的两种联接方式。

1. 星形联接

如果把发电机的三个定子绕组的末端联接在一起, 对外形成 A、B、C、N 四个端, 称为星形联接。中点 N 引出的导线称为中线或零线。A、B、C 三端分别向外引出三根导线, 这三根导线称为端线, 俗称火线。如图 3.1.4 所示。

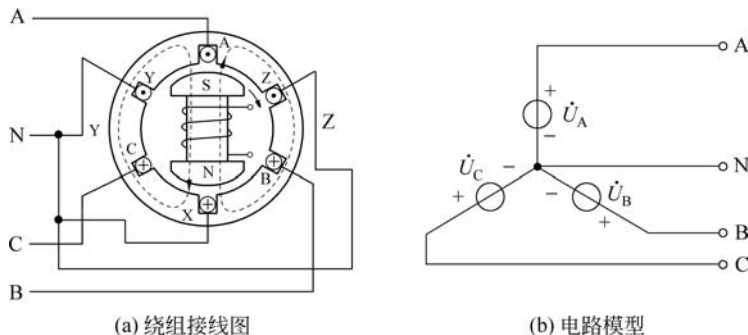


图 3.1.4 三相绕组的星形联接

星形联接的三相电源(简称星形电源)的每相电压(火线与零线间的电压)称为相电压,其有效值用 U_A 、 U_B 、 U_C 表示,一般通用 U_P 表示。相电压的定义见式(3.1.1),相量图如图 3.1.2 所示。端线 A、B、C 之间的电压(火线与火线之间的电压)称为线电压,其有效值用 U_{AB} 、 U_{BC} 、 U_{CA} 表示,一般通用 U_l 表示。

根据基尔霍夫电压定律的相量形式,有

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A \end{aligned} \right\} \quad (3.1.4)$$

由式(3.1.4),可做出星形联接三相电源的相量图如图 3.1.5(a)所示(MATLAB 仿真分析图,图中假定相电压有效值为 220V)。从相量图可得出

$$\frac{U_{AB}}{2} = U_A \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} U_A,$$

又 $\dot{U}_{AB}$ 超前 $\dot{U}_A$ 30° ,由此得

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \sqrt{3} \dot{U}_A / 30^\circ \\ \dot{U}_{BC} &= \sqrt{3} \dot{U}_B / 30^\circ \\ \dot{U}_{CA} &= \sqrt{3} \dot{U}_C / 30^\circ \end{aligned} \right\} \quad (3.1.5)$$

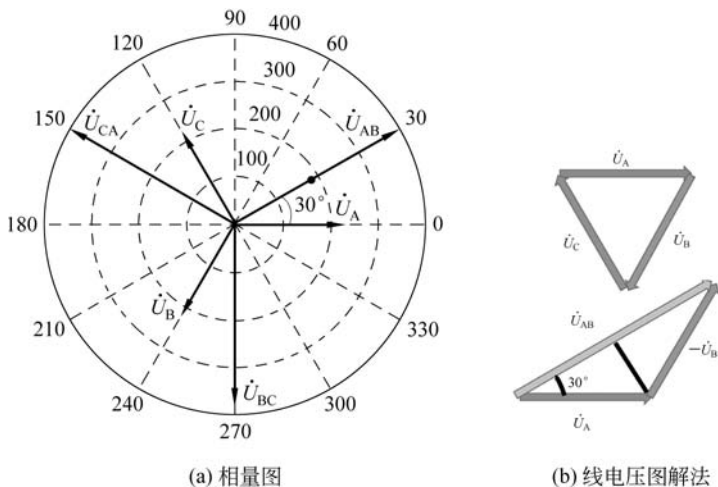


图 3.1.5 星形联接的相量图

可用图形法求出线电压 $\dot{U}_{AB}$ 。三相电压 $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ 构成一个等边三角形。基于 $\dot{U}_A$ 的末端点绘制 $-\dot{U}_B$,从 $\dot{U}_A$ 的始端点向 $\dot{U}_B$ 的末端点绘制的相量即为 $\dot{U}_{AB}$ 。

(1) 先求 $\dot{U}_{AB}$ 的相位。

等边三角形的夹角为 60° ,可见 $\dot{U}_A$ 、 $-\dot{U}_B$ 夹角为 120° 。 $\dot{U}_A$ 、 $-\dot{U}_B$ 模值相等,因此,

$\dot{U}_A$ 、 $-\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_{AB}$ 为等腰三角形, $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_{AB}$ 的夹角和 $-\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_{AB}$ 的夹角相等。因此, $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_{AB}$ 夹角为 30° 。可见, 相位上, $\dot{U}_{AB}$ 超前 $\dot{U}_A$ 30° 。

(2) 继续求 $\dot{U}_{AB}$ 的模值。

从 $\dot{U}_A$ 的末端点向底边做一条垂直线, 对应点底边中点, 因此, 有

$$\frac{U_{AB}}{2} = U_A \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} U_A$$

由上式可见, 三相线电压也是一组对称正弦量, 线电压超前相电压 30° , 线电压的有效值为相电压的有效值的 $\sqrt{3}$ 倍, 即

$$U_l = \sqrt{3} U_p \quad (3.1.6)$$

式中, U_l 、 U_p 分别代表线电压、相电压的有效值。

星形电源向外引出了四根导线, 可给负载提供线电压、相电压两种电压。通常低压配电系统中的相电压为 220V, 线电压为 380V。

2. 三角形联接

如果将发电机的三个定子绕组的始端, 末端顺次相接再从各联接点向外引出三根导线, 称为三角形联接。三角形接法没有中点, 对外只有三个端子, 如图 3.1.6 所示。

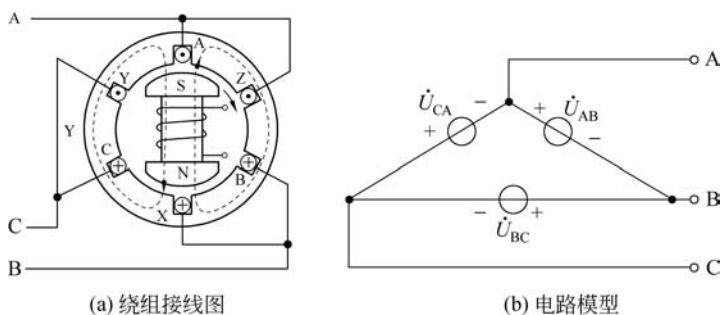


图 3.1.6 三角形联接

三相交流发电机产生的三相电压总是对称的(不对称时找厂家退货即可), 所以, 回路电压相量之和为零, 即

$$\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0 \quad (3.1.7)$$

当然, 三相电源各绕组作三角形联接时, 若联接不正确, 则会改变某相电压的方向, 使三个相电压之和不为零, 在回路内将形成很大的电流, 从而烧坏绕组。

三角形联接下三相电压相量图如图 3.1.7 所示, 其线电压有效值等于相电压的有效值, 而且相位相同, 即

$$\dot{U}_l = \dot{U}_p \quad (3.1.8)$$

若三相电源的相电压为 220V, 则其线电压也为 220V。

综上所述, 三相电源做星形联接时, 线电压为相电压的 $\sqrt{3}$ 倍, 可通过星形联接提高三

相电源的驱动电压；三相电源做三角形联接时，三相电源的电压驱动能力不变，其电流驱动能力却能得到很大的提高。

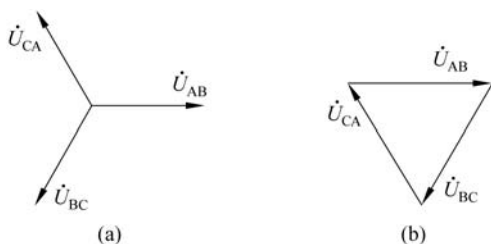


图 3.1.7 三角形联接相量图

思考与练习

3.1.1 对称三相电源做三角形联接时，若未接负载，电源回路中是否有电流？如果一相电源电压极性接反，电源回路中是否有电流通过？

3.1.2 已知对称三相电源每相电压为 220V，请分别求出三相绕组做星形联接、三角形联接两种情况下的线电压。

3.2 对称三相电路的特点

三相电源与负载之间的联接方式有 Y-Y、 Δ - Δ 、Y- Δ 、 Δ -Y 联接方式。若每相负载都相同，称为对称负载。三相电源和对称三相负载相联接，称为对称三相电路（一般情况下，三相电源由三相发电机产生，总是对称的）。

3.2.1 对称 Y-Y 联接三相电路的特点



对称 Y-Y 联接三相电路包括三相四线制（有中线）与三相三线制（无中线）两种类型。对称 Y-Y 联接的三相四线制电路如图 3.2.1 所示。

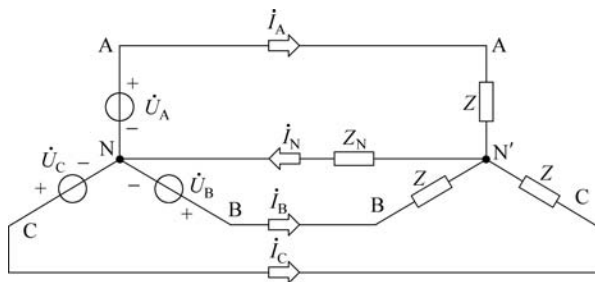


图 3.2.1 对称 Y-Y 联接的三相电路

设每相负载阻抗都为 $Z = |Z| \angle \varphi$, 电源中点 N 与负载中点 N' 的联接线称为中线, 图中电源中点与负载中点之间接入中线阻抗 Z_N 。各相负载的电流称为相电流, 端线中的电流称为线电流。显然 Y-Y 三相电路中, 每根端线的线电流就是该线所联接的电源或负载的相电流, 即

$$\dot{I}_l = \dot{I}_p \quad (3.2.1)$$

三相电路实际上是正弦交流电路的一种特殊类型。因此, 前面对正弦电路的分析方法完全适用于三相电路。也就是先画出相量模型, 然后应用电路的基本定律和分析方法求出电压和电流, 再确定三相功率。对于对称三相电路来说还可使分析计算得以简化。

先用结点电压法求出负载中点 N' 与电源中点 N 之间的电压 $\dot{U}_{N'N}$, 根据结点电压公式 (1.5.2), 可列出下面结点电压方程

$$\dot{U}_{N'N} = \frac{\frac{1}{Z}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C)}{\frac{1}{Z_N} + \frac{3}{Z}}$$

由于 $\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0$, 所以 $\dot{U}_{N'N} = 0$ 。即负载中点与电源中点是等电位点, 因此, 每相电源及负载与其他各相电源及负载相互独立的。各相电源和负载中的电流等于线电流, 它们是

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{\dot{U}_A}{Z} \\ \dot{I}_B &= \frac{\dot{U}_B}{Z} = \frac{\dot{U}_A \angle -120^\circ}{Z} = \dot{I}_A \angle -120^\circ \\ \dot{I}_C &= \frac{\dot{U}_C}{Z} = \frac{\dot{U}_A \angle 120^\circ}{Z} = \dot{I}_A \angle 120^\circ \end{aligned}$$

中线的电流为

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0 \quad (3.2.2)$$

所以, 在对称 Y-Y 电路中, 中线如同开路。

由以上看出, 由于 $\dot{U}_{N'N} = 0$, 各相电路相互独立; 又由于三相电源与负载对称, 所以三相电流也对称。因此, 对称 Y-Y 三相电路可归结为单相 (通常为 A 相) 计算的方法。算出 $\dot{I}_A$ 后, 根据对称性可推知其他两相电流 $\dot{I}_B$ 和 $\dot{I}_C$ 。注意在单相计算电路中, $\dot{U}_{N'N} = 0$ 且与中线阻抗无关。

由于 $\dot{U}_{N'N} = 0$, 所以负载的线电压、相电压的关系与电源的线电压、相电压关系相同。

综上所述, 在对称 Y-Y 三相电路中, 负载中点与电源中点是等电位点, 流过中线的电流为零, 每相电路相互独立, 对称 Y-Y 三相电路可归结为单相的计算。线电流、相电流、线电压和相电压都分别是一组对称量。线电流等于相电流; 线电压超前相电压 30° , 有效值为相电压的 $\sqrt{3}$ 倍。

中性线中既然没有电流通过,中性线在许多场合下可以不要。电路如图 3.2.2 所示。从图中可以看出:对称的三相发电机与对称的三相负载之间只有三根线相联,这就是三相三线制电路。

三相三线制电路在生产上应用极为广泛,因为生产上的三相负载(通常所见的是三相电动机)一般都是对称的。

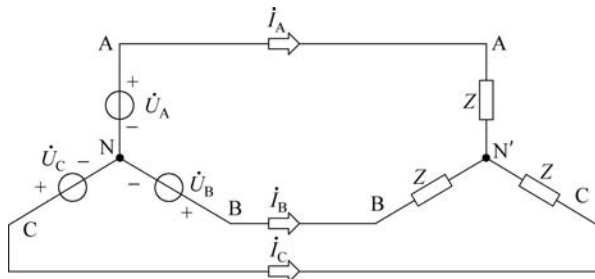


图 3.2.2 三相三线制的三相电路

对于对称 Δ - Y 联接三相电路,只要把三角形电源等效为星形电源;对称 Y - Δ 联接三相电路,只要把三角形负载等效为星形负载,化成对称 Y - Y 联接电路,然后用归结为单相的计算方法计算。

3.2.2 对称 Δ - Δ 联接三相电路的特点



对称 Δ - Δ 联接三相电路如图 3.2.3 所示。每相负载阻抗为 $Z = |Z| \angle \varphi$ 。由于每相负载直接联接在每相电源的两端线之间,所以三角形联接的线电压等于相电压,即

$$\dot{U}_l = \dot{U}_p$$

但线电流并不等于相电流。根据基尔霍夫电流定律的相量形式可以写出

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} \end{aligned} \right\} \quad (3.2.3)$$

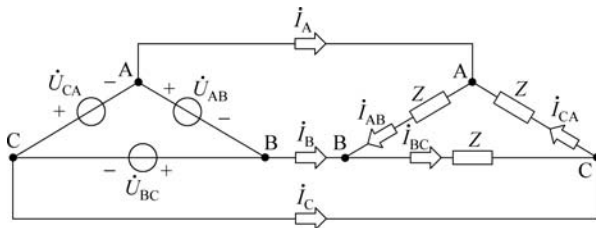


图 3.2.3 对称 Δ - Δ 联接三相电路

相电流相量可由相电压相量求出,由式(3.2.3),可做出相量图如图3.2.4所示。

从相量图3.2.4可得出

$$\frac{I_A}{2} = I_{AB} \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{AB}, \text{ 又 } \dot{I}_A \text{ 滞后 } \dot{I}_{AB} 30^\circ. \text{ 由此得}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \sqrt{3} \dot{I}_{AB} \angle -30^\circ \\ \dot{I}_B &= \sqrt{3} \dot{I}_{BC} \angle -30^\circ \\ \dot{I}_C &= \sqrt{3} \dot{I}_{CA} \angle -30^\circ \end{aligned} \right\} \quad (3.2.4)$$

由式(3.2.4)可以看出,三个线电流也是一组对称正弦量。线电流滞后相电流 30° , 线电流的有效值为相电流有效值的 $\sqrt{3}$ 倍。即

$$I_l = \sqrt{3} I_p \quad (3.2.5)$$

式中, I_l 、 I_p 分别代表线电流、相电流的有效值。

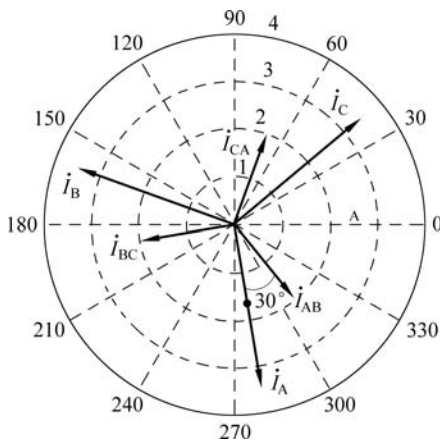


图 3.2.4 电流向量图

综上所述,对称 Δ - Δ 三相电路中,线电压等于相电压,线电流滞后相电流 30° ,线电流的有效值等于相电流的 $\sqrt{3}$ 倍。线电压、相电压、线电流和相电流都是一组对称正弦量。

注意: 在三相电路中,三相负载的联接方式取决于负载每相的额定电压和电源的线电压。例如,三相电动机的额定相电压等于三相电源的线电压,应接成三角形。如果二者不相等,额定相电压为 220V 的三相电动机与线电压为 380V 的三相电源联接,应接成星形。

3.2.3 对称三相电路的平均功率



正弦交流电路中功率的守恒性也适用于三相交流电路。即:一个三相负载吸收的有功功率应等于其各相所吸收的有功功率之和,一个三相电源发出的有功功率等于其各相所发出的有功功率之和,即

$$P = P_A + P_B + P_C$$

由于对称三相电路中每组响应都是与激励同相序的对称量,所以,每相不但相电压有效值相等,相电流有效值相等,而且每相电压与电流的相位差也相等,从而每相的有功功率相等,三相总有功功率就是一相有功功率的三倍,则三相总有功功率

$$P = 3P_P = 3U_P I_P \cos\varphi \quad (3.2.6)$$

在实际应用中,式(3.2.6)通常用线电压 U_l 和线电流 I_l 的乘积形式来表示。

对于对称星形接法,有

$$U_P = \frac{1}{\sqrt{3}} U_l, \quad I_P = I_l$$

对于对称三角形接法,有

$$U_l = U_P, \quad I_P = \frac{1}{\sqrt{3}} I_l$$

因此,无论对称星形接法或对称三角形接法,三相电路总有功功率为

$$P = \sqrt{3} U_l I_l \cos\varphi \quad (3.2.7)$$

必须注意, φ 是某相电压与相电流间的相位差。

无功功率、视在功率守恒性也适用于三相电路。无功功率可表示为

$$Q = 3U_P I_P \sin\varphi = \sqrt{3} U_l I_l \sin\varphi \quad (3.2.8)$$

视在功率可表达为

$$S = 3U_P I_P = \sqrt{3} U_l I_l \quad (3.2.9)$$

思考与练习

3.2.1 三相四线制电路中,电源线的中线规定不得加装保险丝,这是为什么?

3.3 三相电路的计算

对于对称三相电路,可取一相来计算。单相的计算电路图,就是基本元件组成的串联交流电路。

【例 3.3.1】 有一星形负载接到线电压为 380V 的三相星形电源上,如图 3.3.1 所示。每相负载阻抗 $Z = 8 + j6\Omega$ 。分别求有中线、无中线情况下各相电流相量、中线电流相量和三相负载吸收的有功功率。

解:

(1) 有中线时,每相负载相电压为

$$U_P = \frac{U_l}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220\text{V}$$

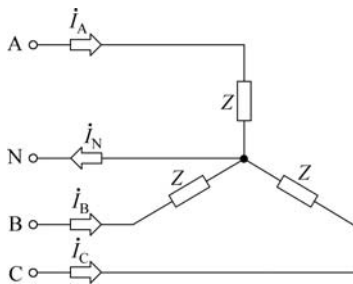


图 3.3.1 例 3.3.1 的图

(2) 设参考相量

$$\dot{U}_A = U_P \angle 0^\circ = 220 \angle 0^\circ \text{ V}$$

则

$$\dot{U}_B = \dot{U}_A \angle -120^\circ = 220 \angle -120^\circ \text{ V}, \dot{U}_C = \dot{U}_A \angle -120^\circ = 220 \angle -120^\circ \text{ V}$$

(3) 计算电流相量。显然, A 相电流相量为

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z} = \frac{220 \angle 0^\circ}{8 + j6} = \frac{220 \angle 0^\circ}{10 \angle 36.87^\circ} = 22 \angle -36.87^\circ \text{ A}$$

由于阻抗相等, 据 A 相电流相量, 可推算出其余两相电流相量为

$$\dot{I}_B = \dot{I}_A \angle -120^\circ = 22 \angle -156.87^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_A \angle 120^\circ = 22 \angle 83.13^\circ \text{ A}$$

中线电流相量为

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0 \quad (\text{因为各相电流对称})$$

(4) 负载吸收的有功功率

$$P = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 22 \times \cos[0^\circ - (-36.87^\circ)] = 11.6 \text{ kW}$$

仿真结果如图 3.3.2 所示。

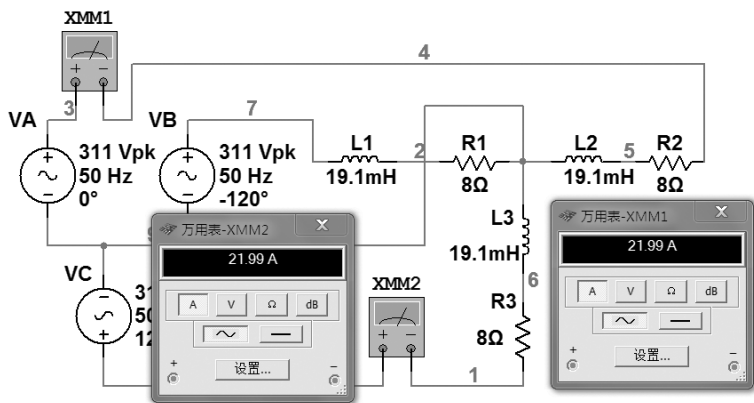


图 3.3.2 例 3.3.1 的仿真结果

(5) 无中线时的计算。由于对称三相电路的线电流相电流对称, 中线电流为零, 所以中线断开后, 整个电路不受影响, 各电流、有功功率与有

【例 3.3.2】 有一三角形负载接到电压对称的三角形电源上, 电路如图 3.3.3 所示。每相负载阻抗 $Z = 8 + j6 \Omega$, 设 $u_{AB} = 380 \sqrt{2} \sin(314t + 30^\circ) \text{ V}$ 。(1) 求各相电流、线电流相量; (2) 求三相负载吸收的功率。

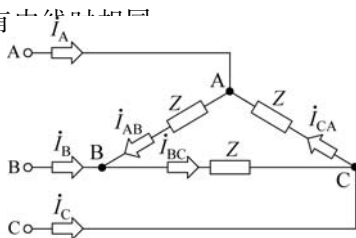


图 3.3.3 例 3.3.2 的图

解:

(1) 对 $\triangle$ - $\triangle$ 电路,各负载相电压即各负载线电压,有

$$\dot{U}_{AB} = 380 \angle 30^\circ \text{V}$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_{AB} \angle -120^\circ = 380 \angle -90^\circ \text{V}$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_{AB} \angle 120^\circ = 380 \angle 150^\circ \text{V}$$

(2) 各相电流相量为

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z} = \frac{380 \angle 30^\circ}{8 + j6} = \frac{380 \angle 30^\circ}{10 \angle 36.87^\circ} = 38 \angle -6.87^\circ \text{A}$$

$$\dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z} = \frac{\dot{U}_{AB} \angle -120^\circ}{Z} = \frac{380 \angle -90^\circ}{10 \angle 36.87^\circ} = 38 \angle -126.87^\circ \text{A}$$

$$\dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z} = \frac{\dot{U}_{AB} \angle 120^\circ}{Z} = \frac{380 \angle 150^\circ}{10 \angle 36.87^\circ} = 38 \angle 113.13^\circ \text{A}$$

(3) 求线电流。由于电路对称,各线电流相量为

$$\dot{I}_A = \sqrt{3} \dot{I}_{AB} \angle -30^\circ = \sqrt{3} \times 38 \angle -6.87^\circ \times \angle -30^\circ = 65.82 \angle -36.87^\circ \text{A}$$

$$\dot{I}_B = \sqrt{3} \dot{I}_{BC} \angle -30^\circ = \sqrt{3} \times 38 \angle -126.87^\circ \times \angle -30^\circ = 65.82 \angle -156.87^\circ \text{A}$$

$$\dot{I}_C = \sqrt{3} \dot{I}_{CA} \angle -30^\circ = \sqrt{3} \times 38 \times \angle 113.13^\circ \times \angle -30^\circ = 65.82 \angle 83.13^\circ \text{A}$$

(4) 求三相负载吸收的功率,即

$$P = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 65.82 \times \cos[30^\circ - (-6.87^\circ)] = 34.66 \text{kW}$$

本例与例 3.3.1 比较可见,在三相电源不变、负载阻抗不变条件下,负载由星形接法改为三角形接法时,三角形接法的相电压增加为星形接法时的 $\sqrt{3}$ 倍,相电流也增加为星形接法的 $\sqrt{3}$ 倍;线电流则增加为星形接法的三倍,功率也增加为星形接法的三倍。

【例 3.3.3】 对称三相电路如图 3.3.4(a)所示。已知三相电源的线电压为 380V, γ 形负载每相阻抗 $Z_1 = 30 + j40\Omega$, $\triangle$ 形负载每相阻抗 $Z_2 = 120 + j90\Omega$ 。(1)求负载端的相电流和线电流相量;(2)求每组负载的功率、三相电源的总功率。

解:

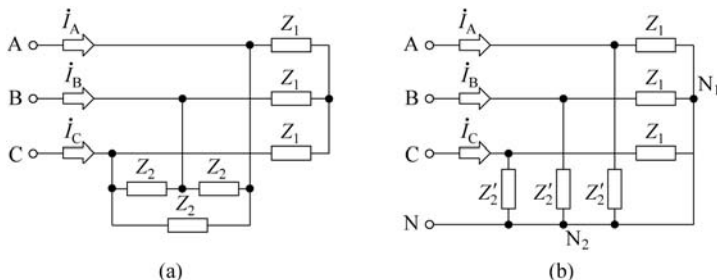


图 3.3.4 例 3.3.3 的图 1

(1) 把三相电源看成星形电源, Δ 形负载化为等效Y形负载, 该电路可变换为对称的Y-Y电路, 如图 3.3.4(b)所示(虚设了中线三个联接点 N 、 N_1 、 N_2)。

(2) 求等效Y形负载。下面不加证明地给出 Δ 形负载化为等效Y形负载的阻抗关系:

$$Z_Y = \frac{1}{3} Z_{\Delta} \quad (3.3.1)$$

由式(3.3.1), 有

$$Z'_2 = \frac{Z_2}{3} = \frac{120 + j90}{3} = 40 + j30 \Omega$$

(3) 单相计算。

• 求Y形负载相电流和线电流。

由对称三相电路性质, 计算一相即可。A相电路如图 3.3.5 所示。

先求相电压

$$U_A = \frac{U_1}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{V}$$

Z_1 与 Z'_2 并联的等效阻抗 Z_{12} 为

$$Z_{12} = \frac{Z_1 Z'_2}{Z_1 + Z'_2} = \frac{(30 + j40)(40 + j30)}{(30 + j40) + (40 + j30)} = 25.25 \angle 45^\circ \Omega$$

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z_{12}} = \frac{220 \angle 0^\circ}{25.25 \angle 45^\circ} = 8.71 \angle -45^\circ \text{A}$$

根据并联分流公式

$$\dot{I}_{A1} = \dot{I}_A \times \frac{Z'_2}{Z_1 + Z'_2} = 8.71 \angle -45^\circ \times \frac{40 + j30}{30 + j40 + 40 + j30} = 4.4 \angle -53.1^\circ \text{A}$$

根据对称性可写出

$$\dot{I}_B = \dot{I}_A \angle -120^\circ = 8.71 \angle -165^\circ \text{A}, \quad \dot{I}_C = \dot{I}_A \angle 120^\circ = 8.71 \angle 75^\circ \text{A}$$

$$\dot{I}_{B1} = \dot{I}_{A1} \angle -120^\circ = 4.4 \angle -173.1^\circ \text{A}, \quad \dot{I}_{C1} = \dot{I}_{A1} \angle 120^\circ = 4.4 \angle 66.9^\circ \text{A}$$

Y形负载相电流和线电流求解完毕。

• 求 Δ 形负载相电流和线电流。

等效Y形负载阻抗 Z'_2 的相电流为

$$\dot{I}'_{A2} = \dot{I}_A \frac{Z_1}{Z'_2 + Z_1} = 8.71 \angle -45^\circ \times \frac{30 + j40}{40 + j30 + 30 + j40} = 4.4 \angle -36.9^\circ \text{A}$$

Δ 形负载阻抗 Z_2 的相电流(等效Y形负载的相电流事实上等同于 Δ 形负载的线电流)

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{I}'_{A2}}{\sqrt{3} \angle -30^\circ} = \frac{4.4 \angle -36.9^\circ}{\sqrt{3} \angle -30^\circ} = 2.54 \angle -6.9^\circ \text{A}$$

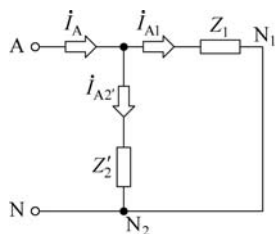


图 3.3.5 例 3.3.3 的图 2

根据对称性可得

$$\dot{I}_{BC} = \dot{I}_{AB} \angle -120^\circ = 2.54 \angle -126.9^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_{CA} = \dot{I}_{AB} \angle 120^\circ = 2.54 \angle 113.1^\circ \text{ A}$$

(4) 功率计算。

Y形负载吸收的功率(也可用式(3.2.6)求解)

$$P = 3P_{P1} = 3I_{A1}^2 R_1 = 3 \times 4.4^2 \times 30 = 1742 \text{ W}$$

△形负载吸收的功率

$$P_2 = 3P_{P2} = 3I_{AB}^2 R_2 = 3 \times 2.54^2 \times 120 = 2323 \text{ W}$$

三相电源的总有功功率

$$P = 3P_P = 3U_P I_P \cos \varphi = 3 \times 220 \times 8.71 \times \cos 45^\circ = 4064 \text{ W}$$

或

$$P = P_1 + P_2 = 1742 + 2323 = 4065 \text{ W}$$

当三相电路的电源或负载不对称时,称为**不对称三相电路**。一般而言,三相电源总是对称的,不对称是指负载不对称。限于篇幅,有兴趣的读者请参考专门的书籍学习负载不对称时三相电路的计算。

思考与练习

3.3.1 三相四线制电路中,中线阻抗为零。若星形负载不对称,则负载相电压是否对称?如果中线断开,负载电压是否对称?

3.3.2 对称三相电路的线电压为 380V,线电流为 6.1A,三相负载吸收的功率为 3.31kW,求每相负载阻抗。

3.4 发电、输电、变压器及工业企业配电

三相电路在工业生产、日常生活中应用十分广泛,了解发电、输电及工业企业配电的基本知识有利于更好地理解三相电路及其应用。

3.4.1 发电与输电概述



目前,世界各国建造的水力发电厂和火力发电厂十分普遍,建造的核电站也不断增多。除了水力、火力、核能发电厂外,还有用风力、太阳能、沼气为能源的风力、太阳能和沼气发电厂。

各种发电机一般都是三相同步发电机。图 3.4.1 是同步发电机的示意图。从图可看出,一台发电机主要由定子与转子两部分组成。图中转子是一个磁极,它可以由永久磁铁或电磁铁加工而成,以一定的角速度旋转。磁极有显极与隐极两种。显

极式磁极凸出,显而易见,在磁极上绕有励磁绕组。隐极式磁极呈圆柱形,其大半个表面的槽中分布励磁绕组。励磁电流经电刷和滑环流入励磁绕组。目前已采用半导体励磁系统,该系统是用三相发电机产生三相交流电经三相半导体整流器整流变换为直流作为励磁之用。同步发电机的定子是不动的,常称为电枢。在定子的槽中嵌有绕组,定子由机座、铁芯和三相绕组等组成。

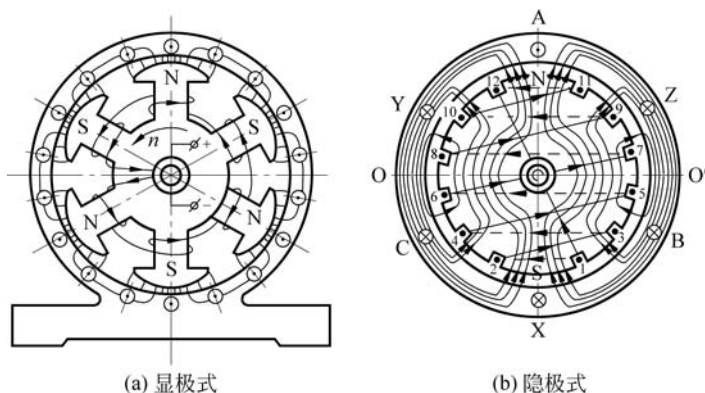


图 3.4.1 同步发电机示意图

同步发电机的转速在 1000r/min 以下的称为低速,用于低速的发电机是显极式发电机,这因为它的机械强度不高。用于高速的发电机是隐极式发电机。因其机械强度较高,其转速为 3000r/min 或 1500r/min 。

同步发电机产生三相对称电压,国产三相同步发电机的电压等级有 $400/230\text{V}$ 和 3.15 、 6.3 、 10.5 、 11.8 、 15.75 和 18kV 等多种。

发电厂生产的电能往往需通过电力网(输电导线系统)输送到远距离的用电地区。例如,黄河三门峡水电站的电能,长江三峡水电站的电能都需输送到远距离的用电地区(如上海市)。发电厂生产的电能要用高压输电线输送到用电地区,然后再降压分配到用户。之所以采用这种方式输电,是因为在同输电功率的情况下,电压越高电流就越小,这样高压输电就能减少输电时的电流,从而降低因电流产生的热损耗。

根据输送电能距离的远近,一般采用不同的高电压。从我国的电力情况来看,送电距离在 $200\sim 300\text{km}$ 时采用 220kV 的电压输电;在 100km 左右时采用 110kV 的电压输电;在 50km 左右时采用 35kV 或 66kV 的电压输电;在 $15\sim 20\text{km}$ 时采用 10kV 或 12kV 的电压输电,有时也采用 6300V 的电压输电。输电电压为 110kV 、 220kV 的线路,称为高压输电线路;输电电压为 330kV 、 550kV 以及 750kV 的线路,称为超高压输电线路;而输电电压为 1000kV 的线路,则称为特高压输电线路。

必须指出的是,生产生活中的绝大多数设备均无法承受数十千伏、数百千伏的高压。一般情况下,发电机也无法直接产生数十千伏、数百千伏的高压。高压输电是用变压器将发电机输出的电压升压后传输的一种输电方式。电能输送到各变电站后,再利用变压器将高压降压后送给各用户。

3.4.2 变压器

电机是一种利用电磁感应原理进行机电能量转换或信号传递的电气设备(或机电元件),包括发电机、变压器、电动机三种类型。发电机在前面做过简要介绍,电动机将在后面的章节介绍,本节介绍变压器。

变压器是一种将一种形式的电能转换为另一种形式的电能的电气设备,具有变换电压、变换电流和变换阻抗的功能,在电工电子技术中获得广泛应用。实际变压器种类较多,按照铁芯与绕组的相互配置形式,可分为芯式变压器和壳式变压器;按照相数可分为单相变压器和多相变压器;按照绕组数可分为二绕组变压器和多绕组变压器;按照绝缘散热方式可分为油浸式变压器、气体绝缘变压器和干式变压器等。

不管何种类型变压器,其主体结构是相似的,它主要由构成磁路的铁芯以及绕在铁芯上的构成电路的原绕组(也叫初级绕组、一次绕组)和副绕组(也叫次级绕组、二次绕组)组成(不包括空心变压器)。铁芯是变压器磁路的主体部分,担负着变压器原、副边的电磁耦合任务。绕组是变压器电路的主体部分,与电源相连的绕组称为原绕组,与负载相连的绕组称为副绕组。通常,原、副绕组匝数不同,匝数多的绕组电压较高,因此也称为高压绕组;匝数少的绕组电压较低,因此也称为低压绕组。另外,变压器运行时绕组和铁芯中要分别产生铜损和铁损,使它们发热。为防止变压器因过热损坏,变压器必须采用一定的冷却方式和散热装置。

理想变压器模型如图 3.4.2 所示,主要的理想化条件如下:

- 绕组的电阻可以忽略;
- 磁通全部通过铁芯,不存在铁芯外的漏磁通;
- 产生初始磁通的励磁电流、铁损、铜损均可忽略。

图 3.4.2 中, e_1 、 e_2 为磁通 Φ 在初级绕组和次级绕组上产生的感应电动势, N_1 、 N_2 为初级、次级绕组匝数。根据理想变压器的特点,在初级,电能全部转换为磁能,将在初级绕组产生感应电动势,有

$$e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} = u_1$$

在次级,磁能全部转换为电能,有

$$e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} = u_2$$

所以,有

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = K \quad (3.4.1)$$

即理想变压器的输入、输出电压比等于初级、次级绕组匝数比。

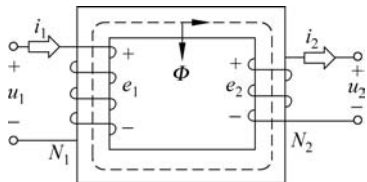


图 3.4.2 理想变压器模型

理想变压器铁芯中主磁通 Φ_m 基本保持不变,具有恒磁通特性,其磁通 Φ 由输入电压 u_1 确定。下面,不加证明地给出磁通 Φ 与输入电压 u_1 的关系:

$$U_1 = 4.44fN_1\phi_m = 4.44fN_1B_mS \quad (3.4.2)$$

式中, U_1 为 u_1 的有效值(V); Φ_m 为磁通 Φ 的最大值(Wb); S 为铁芯的截面积; f 为电源频率; B_m 为磁通密度的最大值(T),通常,在采用热轧硅钢片时取 $1.1 \sim 1.475$ T,在采用冷轧硅钢片时取 $1.5 \sim 1.7$ T。

式(3.4.2)也可改写为

$$N_1 = \frac{U_1}{4.44fB_mS} \quad (3.4.3)$$

通常在设计制作变压器时,电源电压 U_1 、电源频率 f 为已知,根据铁系芯材料可决定 B_m ,再选取一定的铁芯的截面积 S ,可根据上式计算出初级绕组的匝数;再根据变压器应用要求,可确定次级匝数,从而最终设计出变压器。

也可这样初步理解理想变压器的恒磁通特性。

理想变压器是理想的电磁感应设备,可用参数为无穷大的电感模型来模拟初次、次级及 2 个绕组相互间的感应特性。对于无穷大的电感,微小的励磁电流将产生无穷大的磁通。当然,任何设备不可能具有无穷大的磁通,励磁电流产生的磁通将是设备可达到的极限值,这个值由式(3.4.2)确定。

由变压器的恒磁通特性,可进一步推导出初级、次级间的电流关系。

当次级绕组联接有负载时将产生负载电流 i_2 ,因此,将产生新的磁通势 N_2i_2 ,使铁芯中磁通 Φ 发生变化。但磁通 Φ 由 U_1 决定,为了克服磁通势 N_2i_2 的作用,将在初级产生一个新的磁通势 N_1i_1 ,以保持磁通 Φ 的不变,故有

$$N_2i_2 = N_1i_1$$

或

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K} \quad (3.4.4)$$

即理想变压器有载工作的输入、输出电流比等于初级、次级绕组匝数比的反比。

显然,上面假设的理想变压器是不存在的。实际变压器总是存在绕组电阻、漏磁通和励磁电流。

在绝大多数情况下,由于铁芯材料的磁导率远远大于周边空气的磁导率,励磁电流产生的磁通几乎全部由铁芯中通过,漏磁通总是可以忽略;虽然励磁电流不为零,但有载工作时,它与变压器的输入电流相比(励磁电流不是变压器输入电流),它总是非常小,在大多数场合下是可以忽略的。同理,绕组电阻在大多数场合下也是可以忽略的。因此,对于实际变压器,在大多数场合下,可以比照理想变压器分析。

变压器应用十分广泛,可完成电压变换、电流变换及阻抗变换等作用。对于变压器的电压、电流变换作用,实际变压器可以比照理想变压器分析,即:输入、输出电压比近似等于初级、次级绕组匝数比;有载工作时的输入、输出电流比近似等于初级、次级绕组匝数比的反比。对于变压器的阻抗变换功能,可结合图 3.4.3 理解。

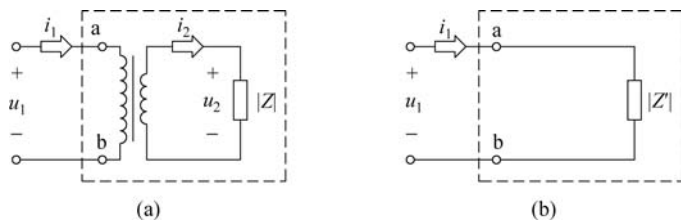


图 3.4.3 变压器的阻抗变换作用

图 3.4.3 中,图(a)为变压器有载工作的模型,将虚框内部视为二端网络,若图(a)、(b)中 u_1 、 i_1 相同,则两个二端网络等效。对图(b)应用欧姆定律,并将变压器变压、变流关系代入式中,有

$$|Z'| = \frac{U_1}{I_1} = \frac{\frac{n_1}{n_2} U_2}{\frac{n_2}{n_1} I_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \frac{U_2}{I_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 |Z| = K^2 |Z| \quad (3.4.5)$$

即对变压器的输入电路来说,变压器的负载阻抗的模折算到输入电路的等效阻抗的模为其原始值的匝数比的平方。因此,可选择合适的匝数比将负载变换到所需要的、比较合适的数值,这便是变压器的阻抗变换功能,这种做法通常称为阻抗匹配。

【例 3.4.1】 如图 3.4.4 所示电路中,交流信号源电动势 $E = 128\text{V}$,内阻 $R_0 = 640\Omega$,负载电阻 $R_L = 10\Omega$ 。(1)当负载电阻 R_L 折算到初级的等效电阻 R'_L 为信号源内阻 R_0 时,求变压器的匝数比和信号源输出功率。(2)当将负载直接与信号源联接时,信号源输出功率为多少?

解:

(1) 先求匝数比,由式(3.4.5),有

$$\frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{R'_L}{R_L}} = \sqrt{\frac{640}{10}} = 8$$

信号源输出功率为

$$P = \left(\frac{E}{R'_L + R_0}\right)^2 R'_L = \left(\frac{128}{640 + 640}\right)^2 640 = 6.4\text{W}$$

(2) 负载直接与信号源联接时

$$P = \left(\frac{E}{R_L + R_0}\right)^2 R_L = \left(\frac{128}{640 + 10}\right)^2 10 = 0.388\text{W}$$

变压器是高压输电线路中的核心设备,正确联接与使用变压器首先应理解变压器绕组的极性。变压器绕组的极性是指绕组在任意瞬时两端产生的感应电动势的极性,它总是从绕组的相对瞬时电位的低电位端(用符号“-”表示),指向高电位端(用符号“+”表示)。两个磁耦合联系起来的绕组(如变压器的初级、次级绕组),当某一瞬时初级绕组某一端点的瞬时电位为正时,次级绕组必定有一个对应的端点,其瞬时电位也为正。把初级、次级绕组中瞬时极性相同的端点称为同名端,也称为同极性端,用符号“•”表示,具体如图 3.4.5 所示。图中,AX 表示初级绕组,ax 表示次级绕组。

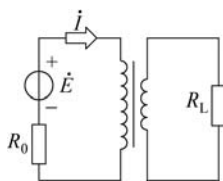


图 3.4.4 例 3.4.1 的图

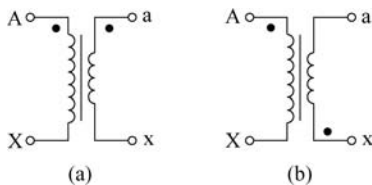


图 3.4.5 变压器绕组极性的表示

变压器绕组极性与绕组绕向有关。图 3.4.6(a)所示绕组绕向相同,绕在同一铁柱上。当磁通 Φ 变化时,将在初级、次级绕组中感应出电动势, A 与 a 或 X 与 x 的瞬时电位必然相同,为同名端。图中感应电动势极性为某一瞬时磁通 Φ 按图中方向正向增大时的感应电动势极性。图 3.4.6(b)所示绕组绕向相反,则 A 与 x(或 X 与 a)为同名端。

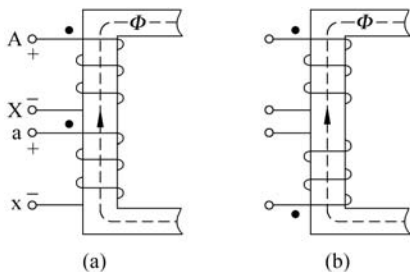
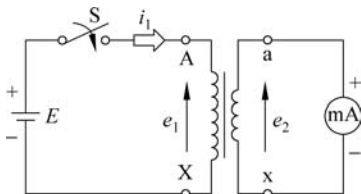
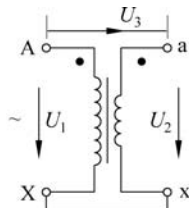


图 3.4.6 绕组极性与绕组绕向的关系

当从外观上无法看出绕组绕向时,可通过实验方法测定同名端。通过实验测定变压器绕组极性有直流感应法和交流感应法两种方法。

直流感应法测定变压器绕组极性实验电路如图 3.4.7 所示。图中,将变压器一个绕组通过开关接电池,一个绕组接毫安表。在开关接通瞬间,若毫安表正偏,则其在两边绕组感应电动势实际方向如图所示,由感应电动势方向可知, A 与 a 为同名端;可类似分析出毫安表反偏时, A 与 x 为同名端。

交流感应法测定变压器绕组极性实验电路如图 3.4.8 所示,方法如下:将变压器两个绕组中的任一对端点相互联接(图示电路为 Xx),在一个绕组两端加上一个较低的、适合于测量的交流电压 U_1 ,再用交流电压表测量 U_2 、 U_3 的值。如果 $U_3 = |U_1 - U_2|$,则被相互联接的端点 X 与 x 为同名端;如果 $U_3 = |U_1 + U_2|$,则被相互联接的端点 X 与 x 为非同名端。

图 3.4.7 绕组极性测定一个
直流感应法实验电路图 3.4.8 绕组极性测定一个
交流感应法实验电路

如图 3.4.2 所示模型中画出了绕组的绕向,可通过绕组绕向判断出变压器绕组的极性。实际变压器绕组的绕向一般是不可见的,一般通过标注同名端来表示变压器的极性。理解变压器的同名端是正确联接与使用变压器的基础。

此外,变压器作为一个实际电工设备,其工作电压、电流、功率都是有一定限度的。用户在使用电气设备时,应以其额定值为依据。

变压器的额定值标注在铭牌上或书写在使用说明书中,主要有

(1) 额定电压。额定电压是根据变压器的绝缘强度和允许温升而规定的电压值,以伏或千伏为单位,变压器的额定电压有初级额定电压 U_{1N} 和次级额定电压 U_{2N} 。 U_{1N} 是指初级应加的电源电压, U_{2N} 是指初级加上 U_{1N} 以后次级的空载输出电压^①。对三相变压器而言,额定电压都指线电压。

(2) 额定电流。额定电流是根据变压器允许温升而规定的电流值。变压器的额定电流有初级额定电流 I_{1N} 和次级额定电流 I_{2N} 。对三相变压器而言,额定电流都指线电流。

(3) 额定容量。变压器额定容量是指变压器次级的额定视在功率 S_N 。变压器额定容量反映了变压器传送电功率的能力。 S_N 、 U_{2N} 、 I_{2N} 间的关系,对单相变压器为

$$S_N = U_{2N} I_{2N} \quad (3.4.6)$$

对三相变压器为

$$S_N = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N} \quad (3.4.7)$$

【例 3.4.2】 有一三相变压器,其额定值为 $S_N = 120 \text{ kVA}$, $U_{1N} = 10 \text{ kV}$, $U_{2N} = 400 \text{ V}$, 计算初级、次级额定电流。

解:

$$I_2 = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{2N}} = \frac{120 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 0.4 \times 10^3} = 173 \text{ A}$$

$$I_1 \approx \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{1N}} = \frac{120 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 10 \times 10^3} = 6.9 \text{ A} \quad (\text{也可通过变压器的变压变流关系求得类似结果})$$

【例 3.4.3】 有一机床照明变压器,其额定值为 $B_{mN} = 1.1 \text{ T}$, $S_N = 50 \text{ VA}$, $U_{1N} = 380 \text{ V}$, $U_{2N} = 36 \text{ V}$,其绕组现已毁坏,需要重绕,测得铁芯截面积为 $21 \text{ mm} \times 41 \text{ mm}$,铁芯叠片存在间隙(有效系数为 0.94),计算初级、次级绕组匝数及导线直径(电压变化率取 5%)。

解:

(1) 计算有效截面积,即

$$S = 2.1 \times 4.1 \times 0.94 = 8.1 \text{ cm}^2$$

(2) 由式(3.4.3)可求初级绕组匝数,即

$$N_1 = \frac{U_1}{4.44 f B_m S} = \frac{380}{4.44 \times 50 \times 1.1 \times 8.1 \times 10^{-4}} \approx 1921$$

① 许多应用场合下, U_{2N} 也用于表示额定负载下的输出电压。

(3) 求次级绕组匝数,即

$$N_2 = N_1 \frac{1.05U_{2N}}{U_1} = 1921 \times \frac{1.05 \times 36}{380} \approx 191$$

(4) 求导线直径。先求初级、次级电流,即

$$I_2 = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{50}{36} = 1.39 \text{ A} \quad I_1 \approx \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{50}{380} = 0.13 \text{ A}$$

导线直径可按下式确定:

$$d = \sqrt{\frac{4I}{\pi J}}$$

式中, J 为电流密度,一般取 $J = 2.5 \text{ A/mm}^2$, 所以

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \times 0.13}{3.14 \times 2.5}} = 0.257 \text{ mm} \quad (\text{取 } 0.25 \text{ mm})$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \times 1.39}{3.14 \times 2.5}} = 0.84 \text{ mm} \quad (\text{取 } 0.9 \text{ mm})$$

3.4.3 工业企业配电的基本知识

工业企业设有中央变电所和车间变电所。中央变电所将输电线末端的变电所送来的电能分配到各车间。车间变电所(或配电箱)将电能分配给各用电设备。车间配电箱一般是地面上靠墙的一个金属柜,柜中装有闸刀开关和管状熔断器等,可配出4个或5个线路。

从车间配电所(或配电箱)到各用电设备一般采用低压配电线路。低压配电线的额定电压是380/220V。低压配电线路常用联接方式有树干式与放射式两种。

1. 树干式配电线路

(1) 如图3.4.9所示为树干式配电线路,干线一般采用母线槽直接从变电所经开关到车间。支线再从干线经过出线盒到用电设备。这种配电线路适用于比较均匀地分布在一条线上的负载。



图 3.4.9 树干式配电线路图 1

(2) 如图3.4.10所示为树干式的另一种配电线路。通过总配电箱或分配电箱联接各组用电设备。用电设备既可独立接到配电箱上,也可联接成链状接到配电箱,如图3.4.11所示。

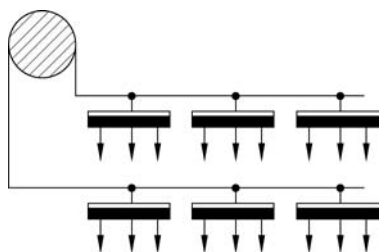


图 3.4.10 树干式配电线路图 2

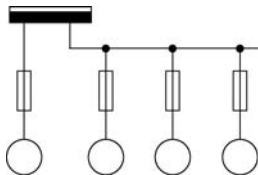


图 3.4.11 用电设备接在配电箱上

同一链条上用电设备一般不得超过三个。

2. 放射式配电线路

如图 3.4.12 所示为放射式配电线路。常通过总配电箱或分配电箱联接到各用电设备。用电设备可独立或联成链状接配电箱。这种线路适用于负载点比较分散而各负载点又具有相当大的集中负载的线路。

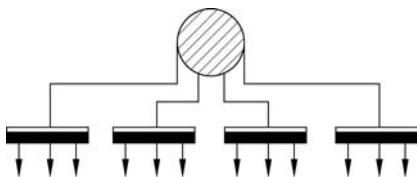


图 3.4.12 放射式配电线路

放射式供电线路的供电可靠、总线路长,导线细,但敷设投资较高。

思考与练习

3.4.1 为什么远距离输电要采用高电压?

3.4.2 在例 3.4.3 中,如果直接用额定次级电压计算次级绕组匝数,与原题中设计的变压器有何不同?

3.5 安全用电



三相电压幅值相对较高,若直接作用于人体将对人体产生伤害,应树立良好的安全用电意识。

3.5.1 触电

人体因触电可能受到不同程度的伤害,这种伤害可分为电击和电伤两种。

电击造成的伤害程度最严重,使内部器官受伤,甚至造成死亡。分析与研究证实,人体因触电造成的伤害程度与以下几个主要因素有关。

(1) 人体电阻的大小。人体电阻越大,伤害程度就越轻。电阻越小,在一定电压作用下其电流就越大。大量实验表明,完好干燥的皮肤角质外层人体电阻为 $10\sim 100\text{k}\Omega$,受破坏的皮质外层人体电阻为 $0.8\sim 11\text{k}\Omega$ 。

(2) 电流的大小。当通过人体的电流大于 50mA 时,将会有生命危险。一般情况下,人体接触 36V 电压时,通过人体的电流不会超过 50mA 。把 36V 及以下的电压称为安全电压。如果环境潮湿,其安全电压值规定为正常环境安全电压的 $2/3$ 或 $1/3$ 。达到或超过安全电压,人体就会有危险。

(3) 通过人体电流的时间越长,伤害程度就越大。

另一种伤害是在电弧作用下或熔丝熔断时,人体外部受到的伤害,称为电伤。如烧伤、金属溅伤等。

人体触电方式常见为单相触电,有以下两种情况。

(1) 接触正常带电体的单相触电。

一种情况是电源中点未接地。人手触及电源任一根端线引起的触电。表面上看,电源中点未接地,似乎不能构成电流通过人体的回路。其实不然,由于端线与地面间可能绝缘不良,形成绝缘电阻;或交流情况下导线与地面间形成分布电容。当人站在地面时,人体电阻与绝缘电阻并联而组成并联回路,使人体通过电流,对人体造成危害。

另一种情况是电源中点接地,人站在地面上当手触及端线时,有电流通过人体到达中点。

(2) 接触正常不带电的金属体的触电。如电机绕组绝缘损坏而使外壳带电,人手触及外壳,相当于单相触电而造成的事故。这种事故最为常见,为防止这种事故,对电气设备常采用保护接地和接零。

3.5.2 接地

将与电力系统的中点或电气设备金属外壳联接的金属导体埋入地中,并直接与大地接触,称为接地。

在中点不接地的低压系统中,将电气设备不带电的金属外壳接地,称为保护接地,具体如图 3.5.1 所示。

人体接触不带电金属而触电时,因存在保护接地,人体电阻与接地电阻并联,而通常人体电阻远大于接地电阻,所以通过人体的电流很小,不会有危险。

若没有实施保护接地,那么人体触及外壳时,人体电阻与绝缘电阻串联,故障点流入地的电流大小决定于这一串联电路。当绝缘下降时,其绝缘电阻减小,就有触电的危险。

出于运行及安全的需要,常将电力系统的中点接地,这种接地方式称为工作接地,具体如图 3.5.2 所示。

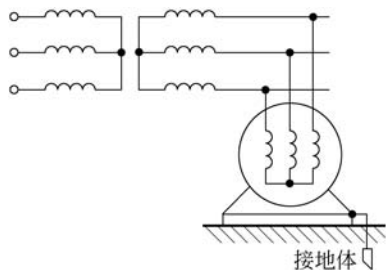


图 3.5.1 保护接地

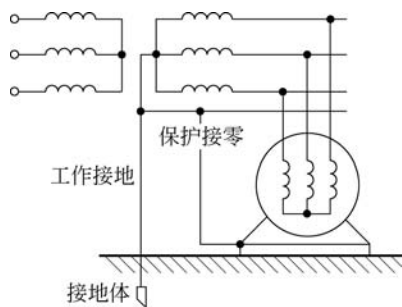


图 3.5.2 工作接地

工作接地的目的是当一相接地而人体接触另一相时,触电电压降低到相电压(不接地的系统中是相电压的 $\sqrt{3}$ 倍),从而可降低电气设备和输电线的绝缘水平。当单相短路时,接地电流较大,保险装置断开。

在中点接地的系统中,不宜采用保护接地,其理由如下:当电气设备绝缘损坏时,接地电流

$$I_e = \frac{U_P}{R_0 + R'_0} \quad (3.5.1)$$

式中, U_P 为系统的相电压; $R_0 + R'_0$ 分别为保护接地、工作接地的接地电阻。

为了保证保护装置可靠地动作,接地电流应为保护装置动作电流的 1.5 倍,或熔丝电流的三倍。由式(3.5.1)知,采用保护接地后,当电气设备绝缘损坏时,将增大接地电阻,若电气设备功率较大,可能使电气设备得不到保护。

由式(3.5.1)知,外壳对地电压为

$$U_e = \frac{U_P}{R_0 + R'_0} R_0$$

如果 $U_P = 220\text{V}$, $R_0 = R'_0 = 4\Omega$, 则 $U_e = 110\text{V}$, 大于人体安全电压,对人体是不安全的。

3.5.3 保护接零

在低压系统中,将电气设备的金属外壳接到零线(中线)上,称为保护接零。如图 3.5.3 所示。

当正常不带电的电气设备金属外壳带电时,将形成单相短路将熔丝熔断,因而外壳不带电。即使熔丝熔断前人体触及外壳前,流过人体电流很微弱(这因为人体电阻远大于线路电阻)。

此外,在工作接地系统中还常常同时采用保护接零与重复接地(将零线相隔一定距离多处进行接地),具体如图 3.5.3 所示。由于多处重复接地的重复接地电阻并联,使外壳对地电压大大降低,更加安全。在三相四线制系统中为了确保设备外壳对地电压为零而专设一根保护零线。工作零线在进入建筑物入口处要接地,进户后再另专设一根保护零线。这样三相四线制就成为三相五线制,以确保设备外壳不带电,如图 3.5.4 所示。

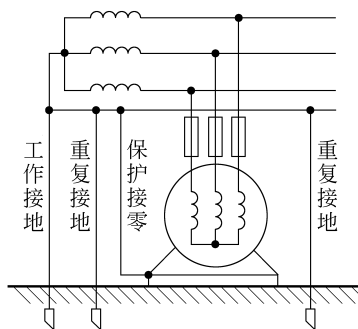


图 3.5.3 工作接地、保护接零和重复接地

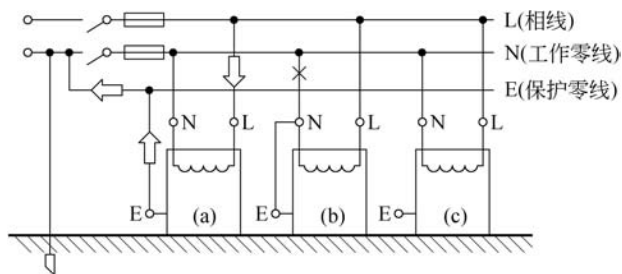


图 3.5.4 工作零线与保护零线

图 3.5.4 中画出了三种保护接零情况。图(a)为正确联接,当因绝缘损坏引起外壳带电时,保护零线流过短路电流,将熔丝熔断,切断电源,消除触电事故。图(b)是不正确联接,如在 $\times$ 处断开,绝缘损坏后外壳带电,将会发生触电事故。图(c)外壳不接零,绝缘损坏后外壳带电,十分不安全,容易发生触电事故。

思考与练习

3.5.1 为什么机床、金属工作台上的照明灯规定 36V 为额定电压?

3.5.2 保护接地和保护接零有什么作用? 它们有什么区别? 为什么同一供电系统中只采用一种保护措施?

3.5.3 (1)在三相三线制低压供电系统中,应采取哪种保护接线措施?(2)在三相四线制低压供电系统中,应采取哪种接线措施?

3.5.4 为什么在中点接地系统中,除采用保护接零外,还要采用重复接地?

3.5.5 图 3.5.5 所示系统中,导线和地的电阻可忽略不计,当电动机 M 的机壳与 C 相接触时,中线对地电压是多少?

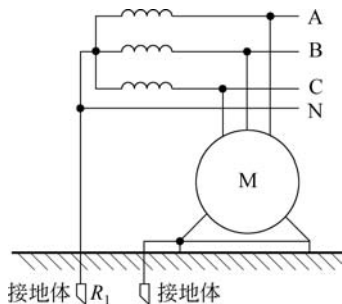


图 3.5.5 思考题 3.5.5 的图

习题

3.1 填空题

1. 三相电压一般由三相交流发电机产生,这些电压的频率、幅值均相同,彼此间的相位相差 120° ,相当于_____,称为_____。

2. 在实践应用中,三相发电机的三相绕组一般都要按某种方式联接成一个_____后再对外供电,有_____与_____两种联接方式。如果把发电机的三个定子绕组的_____联接在一起,对外形成 A、B、C、N 四个端,称为_____。将发电机的三个定子绕组的_____顺次相接再从各联接点向外引出三根导线,称为_____。

3. 星形联接的三相电源的每相电压(_____)称为_____,其有效值用 U_A 、 U_B 、 U_C 表示,一般通用_____表示。端线 A、B、C 之间的电压(_____)称为_____,其有效值用 U_{AB} 、 U_{BC} 、 U_{CA} 表示,一般通用_____表示。

4. 在对称 Y-Y 三相电路中,负载中点与电源中点是_____,流过中线的电流为_____,每相电路_____。在对称 Y-Y 三相电路中,线电流_____相电流,线电压_____相电压 30° ,有效值为相电压的_____倍。在对称 Δ - Δ 三相电路中,线电压_____相电压,线电流_____相电流 30° ,线电流的有效值等于相电流的_____倍。

5. 在如图 3.1 所示变压器的示意图中,左边为_____,右边为_____,中间部分为用磁性材料制作的闭合铁芯,磁通的绝大部分经过铁芯而形成一個闭合的通路称为_____,产生磁场的电流 i 称为_____。

6. 在如图 3.1 所示变压器的示意图中,若_____的电阻可以忽略,磁通全部通过_____,励磁电流很小,可以忽略,_____和_____可以忽略,则该变压器称为_____。

7. 如图 3.2 所示理想变压器的输入、输出_____等于初级、次级绕组匝数比;有载工作的输入、输出_____等于初级、次级绕组匝数比的反比;负载阻抗的模折算到输入电路的等效阻抗的模为其_____的平方。

8. 当如图 3.2 所示变压器的次级绕组联接有负载时将产生负载电流 i_2 ,同时将产生新的_____,并使铁芯中_____发生变化。但_____由 U_1 决定,为了克服_____的作用,将在初级产生一个新的_____,以保持_____的不变,这种性质称为变压器的_____特性。

9. 变压器绕组的_____是指绕组在任意瞬时两端产生的感应电动势的极性,它总是从绕组的相对瞬时电位的_____,指向_____。两个磁耦合联系起来的绕组,当某一瞬时初级绕组某一端点的瞬时电位为正时,次级绕组必定有一个对应的端点,其瞬时电位也为_____。把初级、次级绕组中瞬时极性相同的端点称为_____,用符号“•”表示。

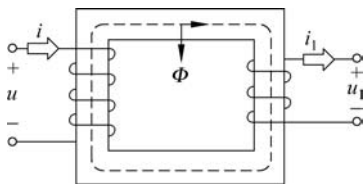


图 3.1 磁路示意图

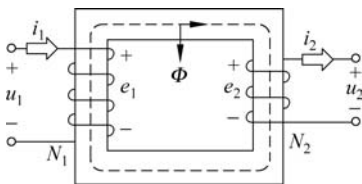


图 3.2 理想变压器模型

10. 将与电力系统的中点或电气设备金属外壳联接的金属导体埋入地中,并直接与大地接触,称为_____。在_____的低压系统中,将电气设备不带电的金属外壳接地,称为_____。出于运行及安全的需要,常将电力系统的中点接地,这种接地方式称为_____。将电气设备的金属外壳接到零线(中线)上,称为_____。

3.2 分析计算题(基础部分)

1. 对称三相电源的三相绕组做星形联接时,设线电压 $u_{AB}=380\sin(\omega t+30^\circ)$,试写出相电压 u_B 的三角函数式。

2. 已知对称Y-Y三相电路的线电压为 380V,相电流为 4.4A,负载为纯电阻,求每相负载的电阻值。

3. 已知对称三角形联接三相电路 A 相负载线电流 $\dot{I}_A=3\angle 0^\circ\text{A}$,试写出其余各相线电流与相电流。

4. 已知对称 Δ - Δ 联接三相电路每相电源有效值为 220V,每相负载阻抗角为 50° ,试写出各相电压、线电流及相电流相量。

5. 对称三相电路的相电压 $u_A=220\sqrt{2}\sin(314t+60^\circ)\text{V}$,相电流 $i_A=5\sqrt{2}\sin(314t+60^\circ)\text{A}$,求三相负载的有功功率和无功功率。

6. 已知 $P=1.25\text{kW}$, $\lambda=0.6$ 的对称三相感性负载与线电压 380V 的电源相接。(1)求线电流。(2)求负载星形联接时的每相阻抗。(3)求负载三角形联接时的每相阻抗。

7. 三相四线制电路的 A 相电压 $\dot{U}_A=220\angle 0^\circ\text{V}$,负载阻抗 $Z_A=10\Omega$, $Z_B=5+j5\Omega$, $Z_C=5-j5\Omega$,求各电流相量 $\dot{I}_A$ 、 $\dot{I}_B$ 和 $\dot{I}_C$ 和 $\dot{I}_N$ 。

8. 对称三相电路的线电压为 380V,每相负载阻抗为电阻,其阻值为 8.68Ω ,求负载分别为Y形和 Δ 形接法时吸收的功率。

9. 有一台空载变压器,测得初级绕组电阻为 11Ω ,初级加额定电压 220V,问初级电流是否为 20A?

10. 在如图 3.2 所示理想变压器中初级绕组为 500 匝,次级为 100 匝,测得初级电流 $i_1=\sqrt{2}\times 20\sin(\omega t-30^\circ)\text{mA}$,求 i_2 。

11. 某理想变压器,初级绕组为 500 匝,具有两个次级绕组,绕组 1 为 50 匝,绕组 2 为 25 匝,初级加上 220V 市电,变压器未接负载,求初级电流和次级电压。

12. 如图 3.4.4 所示变压器中,交流信号源电动势 $E=10\text{V}$,内阻 $R_0=200\Omega$,负载电

阻 $R_L=8\Omega$, 变压器的初级、次级绕组匝数比为 500/100。求:

- (1) 求负载电阻 R_L 折算到初级的等效电阻 R'_L 和信号源输出功率。
- (2) 当将负载直接与信号源联接时, 信号源输出功率为多少?

13. 某单相变压器额定容量为 50VA, 额定电压为 220V/36V, 求初级、次级绕组的额定电流。

3.3 分析计算题(提高部分)

1. 如图 3.3 所示电路中, 三相电源线电压为 6000V, 线路阻抗 $Z_1=1+j1.5\Omega$, 每相负载阻抗 $Z=30+j20\Omega$, 求每相负载线电压及每相负载吸收的功率。

2. 在如图 3.4 所示电路中, 已知三相电源线电压 $U_1=380V$, 星形负载有功功率 $P_1=10kW$, 功率因数 $\lambda_1=0.85$, 三角形负载有功功率 $P_2=20kW$, 功率因数 $\lambda_2=0.8$, 求负载总的线电流的有效值。

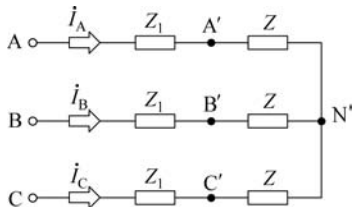


图 3.3 习题 3.3 1 的图

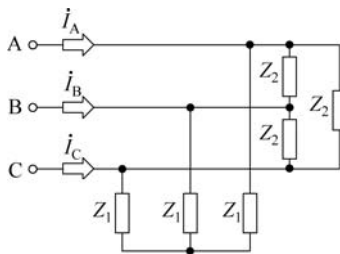


图 3.4 习题 3.3 2 的图

3. 在如图 3.5 所示电路中, 已知三相电源线电压为 380V, 线路阻抗 $Z_1=1+j1\Omega$, Y 形负载阻抗 $Z_Y=4-j3\Omega$, Δ 负载阻抗 $Z_\Delta=12+j9\Omega$, 中线阻抗 $Z_N=3+j1\Omega$, 求线电流 $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$ 和 $\dot{I}_C$ (A 相相电压初相位为零)。

4. 如图 3.6 所示电路中, 已知线电压为 380V, 每相负载阻抗 $Z=3-j4\Omega$, 求下列情况下三相负载吸收的总功率。(1) 线路电阻 $R_1=0$ 。(2) 线路电阻 $R_1=0.2\Omega$ 。

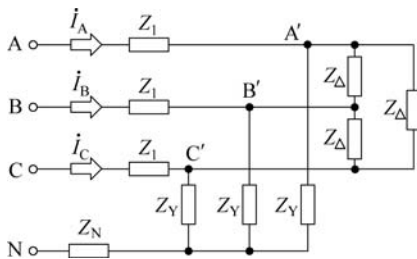


图 3.5 习题 3.3 3 的图

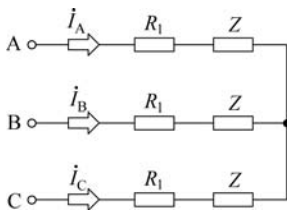


图 3.6 习题 3.3 4 的图

5. 如图 3.7 所示电路中负载线电压为 380V。三角形负载有功功率 $P=10kW$, $\lambda=0.8$; 星形负载有功功率 $P=5.25kW$, $\lambda=0.855$, 线路阻抗 $Z_1=0.1+j0.2\Omega$, 试求电源的线电压的有效值。

6. 如图 3.8 所示电路接在线电压为 380V 的工频三相四线制电源上。(1)求各相负载相电流和中线电流。(2)求三相负载的平均功率。

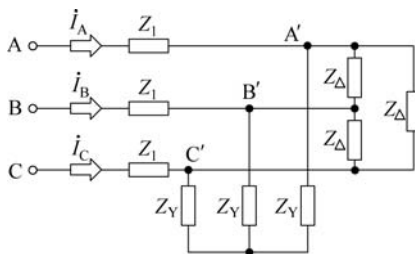


图 3.7 习题 3.3 5 的图

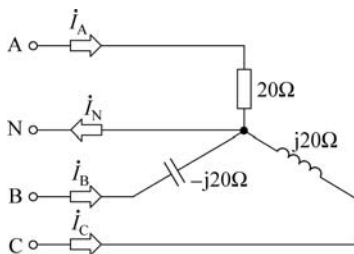


图 3.8 习题 3.3 6 的图

7. 对称 Y-Y 三相电路中,电源线电压为 380V, 每相负载阻抗 $Z = 38.5/\underline{36.8^\circ} \Omega$, 求三相负载的视在功率 S 、平均功率 P 、无功功率 Q 和功率因数 λ 。

8. 已知三角形负载电路的线电压为 380V, 负载阻抗 $Z = 15/\underline{36.8^\circ} \Omega$, 求每相负载的视在功率和平均功率。

9. 如图 3.9 所示变压器次级绕组中间有抽头, 当 1、3 间接 16Ω 喇叭时阻抗匹配, 1、2 间接 4Ω 喇叭时阻抗也匹配, 求次级线圈两部分匝数比。

10. 如图 3.10 所示电路已达稳态, 变压器非理想, 求电流表读数。若开关断开瞬间电流表正偏, 请判断变压器绕组同名端。

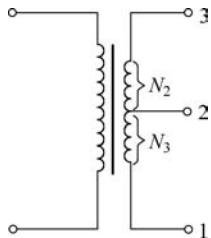


图 3.9 习题 3.3 9 的图

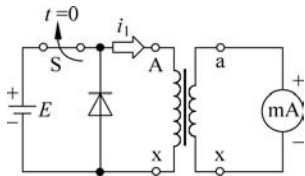


图 3.10 习题 3.3 10 的图

3.4 应用题

1. 对称三相电路的相电压为 220V, 感性负载电流为 10A, 功率因数为 0.6。为使功率因数提高到 0.9, 需接入星形联接电容电路或三角形联接电容电路。试分别求星形联接和三角形联接时的电容值。

2. 有人为了安全, 将电炉烤箱的外壳接在 220V 交流电源进线的中线上, 这样安全吗?

3. 某单位要选用一台 Y/Y₀-12 型三相电力变压器, 将 10kV 交流电压变换到 400V, 供动力和照明。已知该单位三相负载总功率为 320kW, 额定功率因数为 0.8。(1)请计算所需三相变压器的额定容量和初级、次级的额定电流。(2)该变压器可带

100W 的灯泡多少个?

4. 有两台变压器正在运行,测得第一台变压器初级电流为 16A,第二台变压器的初级电流为 12A,由此可以得出,第一台变压器的励磁电流大于第二台变压器。这种说法是否正确?为什么?

5. 变压器的电压比等于匝数比,现有一台 2000/500 匝的变压器需要重绕,根据上面的理论,为节省成本,改绕为 200/50 匝,它能取代原先的变压器吗?为什么?

6. 某单相变压器,其额定容量为 50VA,额定电压为 220/36V,若运行时接反,会出现什么情况?