

# 电网络理论

● 原理、分析和应用

黄慕义 主编

华中工学院出版社



**电网络理论 (下册)**

黄慕义主编

责任编辑 李 德

•

华中工学院出版社出版发行

(武昌洪山)

新华书店湖北发行所经销

华中工学院出版社印刷厂印刷

•

开本: 787×1092 1/16 印张: 12.75 字数: 291,000

1987年2月第1版 1987年2月第1次印刷

印数1—5,000

ISBN 7-5609-0019-4/TM·1

统一书号 15255-090 定价: 2.15 元

# 目 录

## 第九章 三相电路

§9-1 对称三相电压的产生 .....	( 1 )
§9-2 三相电路的星形联接 .....	( 3 )
§9-3 三相电路的三角形联接 .....	( 5 )
§9-4 对称三相电路的计算 .....	( 6 )
9-4-1 Y—Y对称三相电路的计算 .....	( 7 )
9-4-2 $\Delta$ —Y对称三相电路的计算 .....	( 8 )
9-4-3 $\Delta$ — $\Delta$ 对称三相电路的计算 .....	( 8 )
9-4-4 复杂对称三相电路的计算 .....	( 10 )
§9-5 不对称三相电路及其计算 .....	( 10 )
§9-6 位形相量图 .....	( 11 )
§9-7 不对称Y—Y三相电路的中性点位移 .....	( 13 )
§9-8 三相电路的功率 .....	( 15 )
9-8-1 三相电路的瞬时功率 .....	( 15 )
9-8-2 三相电路的平均功率 .....	( 15 )
9-8-3 三相电路的无功功率 .....	( 16 )
§9-9 三相功率的测量 .....	( 16 )
习 题 .....	( 18 )

## 第十章 非正弦周期电流电路

§10-1 非正弦周期函数展开为傅里叶级数 .....	( 21 )
§10-2 几种对称周期函数的谐波分析 .....	( 24 )
§10-3 傅里叶级数的指数形式, 周期函数的频谱 .....	( 27 )
10-3-1 傅里叶级数的指数形式 .....	( 27 )
10-3-2 周期函数的频谱 .....	( 28 )
§10-4 非正弦周期电量的有效值和平均值 .....	( 32 )
10-4-1 有效值 .....	( 32 )
10-4-2 平均值和均值 .....	( 33 )
10-4-3 波形因数和波顶因数 .....	( 33 )
§10-5 非正弦周期电流电路的计算 .....	( 35 )
10-5-1 非正弦周期电流电路的计算方法 .....	( 35 )
10-5-2 谐波阻抗 .....	( 36 )
§10-6 非正弦周期电流电路的功率 .....	( 38 )
10-6-1 有功功率 .....	( 38 )

10-6-2 视在功率	(39)
10-6-3 等效正弦波	(40)
§10-7 对称三相非正弦周期电流电路	(40)
10-7-1 对称三相非正弦电量的分解	(40)
10-7-2 对称三相非正弦周期电流电路中的零序谐波	(42)
习 题	(44)

## 第十一章 网络的复频域分析法

§11-1 从傅里叶级数到傅里叶变换	(48)
§11-2 从傅里叶变换到拉普拉斯变换	(50)
§11-3 拉氏变换的基本性质	(53)
§11-4 部分分式展开式	(55)
§11-5 运算法	(58)
11-5-1 网络方程的运算形式	(58)
11-5-2 运算电路	(59)
§11-6 网络函数	(62)
11-6-1 网络函数的定义和分类	(62)
11-6-2 网络函数的确定	(64)
11-6-3 网络函数的一般性质	(66)
§11-7 极点、零点和频率响应	(67)
§11-8 极点和网络的稳定性	(71)
§11-9 零点和零传输	(74)
§11-10 网络的方框图	(75)
习 题	(80)

## 第十二章 网络的状态变量分析法

§12-1 状态变量	(86)
§12-2 状态方程与输出方程	(87)
§12-3 状态空间和状态轨迹	(89)
§12-4 由网络方程导出状态方程	(91)
§12-5 状态方程的列写	(92)
12-5-1 观察法	(93)
12-5-2 叠加法	(94)
12-5-3 系统法	(94)
§12-6 状态方程的解	(97)
12-6-1 状态方程的复频域解法	(97)
12-6-2 状态方程的时域解法	(99)
§12-7 网络综合示例——有源滤波器	(102)
12-7-1 寻找网络函数的方框图的方法	(103)
12-7-2 通过状态变量直接实现的方法	(105)
12-7-3 级联实现的方法	(106)

§12-8	关于灵敏度问题·伴随网络	(107)
§12-9	非线性动态网络简述	(113)
§12-10	相平面法分析非线性二阶自治网络	(117)
12-10-1	数值法	(118)
12-10-2	等倾线法	(118)
习 题		(120)

### 第十三章 多端网络

§13-1	双口网络及其 $Z$ 、 $Y$ 、 $H$ 、 $T$ 参数	(125)
13-1-1	双口网络	(125)
13-1-2	双口网络的 $Y$ 参数	(126)
13-1-3	双口网络的 $Z$ 参数	(128)
13-1-4	双口网络的 $H$ 参数 (混合参数)	(129)
13-1-5	双口网络的 $T$ 参数 (传输参数)	(130)
13-1-6	含独立电源的线性时不变双口网络的描述	(131)
§13-2	双口网络的等效电路	(134)
13-2-1	用 $Y$ 参数表示的等效电路	(134)
13-2-2	用 $Z$ 参数表示的等效电路	(134)
13-2-3	用 $H$ 参数表示的等效电路	(135)
13-2-4	互易双口网络等效电路元件的参数与传输参数的关系	(135)
§13-3	双口网络的相互联接	(136)
13-3-1	双口网络的串联	(136)
13-3-2	双口网络的并联	(137)
13-3-3	双口网络的级联	(138)
§13-4	接负载的双口网络	(139)
13-4-1	有载双口网络的工作状态	(139)
13-4-2	有载双口网络的输入阻抗和特性阻抗	(140)
13-4-3	正弦稳态下对称双口网络的传播系数	(141)
13-4-4	用传播系数表示的对称双口网络方程	(142)
§13-5	多端网络的不定导纳矩阵	(142)
§13-6	模拟电路故障诊断简单示例	(149)
习 题		(150)

### 第十四章 均匀传输线

§14-1	均匀长线的偏微分方程	(154)
§14-2	正弦电源作用下, 传输线方程的稳态解	(155)
§14-3	行波	(158)
§14-4	均匀长线的传播特性	(162)
14-4-1	传播系数	(162)
14-4-2	特性阻抗	(163)

§14-5	无畸变线	(164)
§14-6	波的反射系数	(165)
14-6-1	反射系数	(165)
14-6-2	匹配负载	(167)
14-6-3	终端开路	(168)
14-6-4	终端短接	(168)
§14-7	均匀长线的入端阻抗	(169)
§14-8	无损耗线	(170)
§14-9	驻波	(174)
14-9-1	终端开路	(174)
14-9-2	终端短接	(175)
14-9-3	终端接纯电抗	(176)
§14-10	无损耗线的一些应用	(177)
14-10-1	用作电抗元件和绝缘支柱	(177)
14-10-2	用作阻抗变换器	(178)
§14-11	均匀长线的等效电路	(180)
14-11-1	均匀长线与对称二端口网络的等效	(180)
14-11-2	链型等效电路	(181)
§14-12	过渡过程与无损耗线方程的解	(183)
14-12-1	无损耗线方程的复频域解	(183)
14-12-2	无损变线的过渡过程	(184)
§14-13	无损耗线方程的通解和行波	(185)
§14-14	矩形波在传输线上的发出和传播	(186)
§14-15	由边界条件确定无损耗线方程的复频域解	(187)
§14-16	研究长线过渡过程的另一种方法——补德生法则	(189)
§14-17	大气放电引起的过渡行波	(193)
	习 题	(194)

## 第九章 三相电路

在电力系统中广泛采用三相供电系统，此系统又叫三相制。这是因为三相供电系统比单相供电系统有较多的优点。例如，发电方面，相同尺寸的三相发电机比单相发电机发出的功率大；输电方面，在相同的电气技术指标下，三相供电系统比单相供电系统可以节约大量的金属材料；用电方面，三相电动机性能比单相电动机性能好，运行平稳，结构简单，价格低廉等等。

三相供电系统简称三相电路，它是一种在电气上和结构上具有特点的正弦电路。在三相电路中，三相电源是由三个具有相同频率但相位不同的电压，按照特定方式联接而成的电源系统，其中每个电源叫做三相电源的一个相；三相负载是由三个按照特定方式联接而成的负载，其中每个部分叫做三相负载的一相。由于三相电路是正弦电路，因此第八章关于正弦稳态电路分析的各种方法，无疑适用于三相电路的稳态分析。但是，根据其电气和结构上的特点，可以得出简便的分析计算方法。

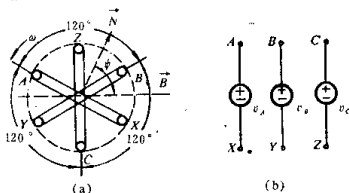
本章着重讨论对称三相电路，不对称三相电路的分析计算只作简略的介绍；此外，还引进了位形相量图来分析不对称三相电路和中性点位移；最后介绍三相功率的测量。

### §9-1 对称三相电压的产生

图 9-1-1(a) 表示具有一对磁极的三相发电机的原理图。图中，AX、BY 和 CZ 表示三相发电机的三个绕组，它们在空间位置上彼此相隔  $120^\circ$  的角度，A、B、C 叫做绕组的首端，X、Y、Z 叫做绕组的末端； $\vec{N}$  表示绕组 AX 所界定平面的法线。三个绕组处于同一均匀磁场  $\vec{B}$  之中。当绕组以  $\omega$  的角速度按反时针方向旋转时，各绕组的导线将切割磁力线而在绕组中产生正弦波形的感应电压。如果在  $t=0$  时刻， $\vec{N}$  与  $\vec{B}$  的夹角为  $\psi$ ，假定各绕组中感应电压的参考方向均指定首端为正，末端为负，如图 9-1-1(b) 所示，则在绕组 AX 中的感应电压为

$$v_A = V_m \sin(\omega t + \psi) \quad (9-1-1a)$$

由于各绕组是以同一角速度  $\omega$  旋转的，因此，感应的正弦电压的角频率是相同的。又由于电机结构上的对称性，则在三个绕组中感应的正弦电压的最大值相等，而最大值或零值的出现按 A、B、C 的次序依次滞后  $120^\circ$  的电气角度。因此，BY、CZ 这两个绕组中的正弦电压为



(a) 三相发电机原理图； (b) 三相发电机的电路模型  
图 9-1-1 三相发电机的原理图和电路模型

$$v_B = V_m \sin(\omega t + \psi - 120^\circ) \quad (9-1-1b)$$

$$v_C = V_m \sin(\omega t + \psi - 240^\circ) = V_m \sin(\omega t + \psi + 120^\circ) \quad (9-1-1c)$$

在电力系统中，凡最大值相等、角频率相同、相位彼此相差相同角度的三相电压，均称为对称三相电压。式(9-1-1a、b、c)表示的三相电压的最大值相等、角频率相同、相位彼此相差 $120^\circ$ 角，故是对称三相电压，它的波形图如图9-1-2所示。这组三相电压的有效值相量可表示为

$$\begin{aligned} \dot{V}_A &= \frac{V_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j\psi} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \angle \psi \\ \dot{V}_B &= \frac{V_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j(\psi - 120^\circ)} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \angle \psi - 120^\circ \\ \dot{V}_C &= \frac{V_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j(\psi + 120^\circ)} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \angle \psi + 120^\circ \end{aligned} \quad (9-1-2)$$

为方便起见，令

$$a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

称为旋转算子。显然，某相量乘以 $a$ ，相当于将该相量按逆时针方向旋转 $120^\circ$ 。由于

$$a^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

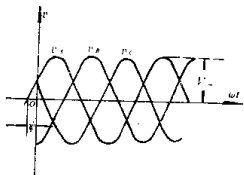


图 9-1-2 对称三相电压波形图

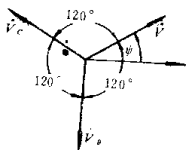


图 9-1-3 对称三相电压的相量图

因此，某相量乘以 $a^2$ ，相当于将该相量按逆时针方向旋转 $240^\circ$ ，或按顺时针方向旋转 $120^\circ$ 。这时，显然有

$$1 + a + a^2 = 0.$$

引进旋转因子 $a$ 以后，式(9-1-2)可改写为

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_A &= V_m e^{j\psi} \\ \dot{V}_B &= a^2 \dot{V}_A \\ \dot{V}_C &= a \dot{V}_A \end{aligned} \right\} \quad (9-1-3)$$

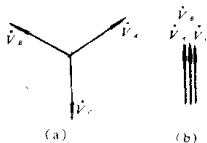
这组对称三相电压的相量图如图9-1-3所示。由于

$$\dot{V}_A + \dot{V}_B + \dot{V}_C = \dot{V}_A + a^2 \dot{V}_A + a \dot{V}_A = (1 + a^2 + a) \dot{V}_A = 0 \quad (9-1-4)$$

因此，在相量图上，若相量的首末相接，则对称三相相量必构成一闭合三角形。就瞬时值而言，有 $v_A + v_B + v_C = 0$ 。



各相电压经过同一数值(例如正的最大值或零)的先后次序称为三相电源的相序。如果A相电压超前B相电压, B相电压又超前C相电压(但超前的角度不超过 $180^\circ$ ), 这种按A—B—C次序的相序叫做正序或顺序。图9-1-3中三相电压的相序就是正序。反之, 如果C相电压超前B相电压, B相电压又超前A相电压, 这种按C—B—A次序的相序叫做负序或逆序。其相量图如图9-1-4(a)所示。如果三相电压彼此的相位差为 $n \times 2\pi$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ), 则它们同时达到最大值或零, 这种相序叫做零序, 其相量图如图9-1-4(b)所示。今后, 如果没有特殊说明, 三相电量的相序均是正序。



(a) 负序相量图 (b) 零序相量图  
图9-1-4 负序和零序的相量图

## §9-2 三相电路的星形联接

三相电源和三相负载最简单的联接方式是将电源的每相分别和一相负载相联, 如图9-2-1所示。这样形成的三个不相联的单相电路, 输电线需要六根导线, 不能发挥三相制的优越性。通常都是将三相电源联接成一个整体, 然后向外供电。负载一般也联接成一个整体。它们有两种基本的联接方式, 即星形联接(或Y形联接)和三角形联接(或 $\Delta$ 联接)。下面先介绍星形联接。

如果将电源的三个末端X、Y和Z联在一起, 标以O, 负载的三个末端X'、Y'和Z'也联在一起, 标以O', 这样, 三根回线XX'、YY'和ZZ'便只需一根线如图9-2-2所示。这就是Y—Y联接的三相四线制电路。

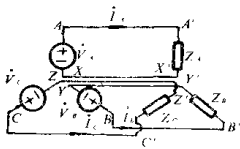


图9-2-1 不联接的三相电路

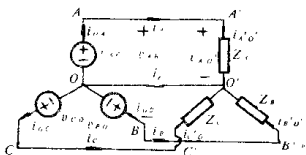


图9-2-2 Y—Y联接的三相电路

电源的星形联接, 通常是将电源的三个末端X、Y、Z联在一起, 三个首端引向负载, 如图9-2-2所示。也可将三个首端A、B、C联在一起, 而三个末端X、Y、Z引向负载。在这种情况下, 其公共点O叫做三相电源的中性点(或叫中点)。三相负载星形联接的公共点O', 叫做负载的中性点。联接电源中性点O和负载中性点O'的导线OO'叫做中性线(或中线)。由于低压配线电路中电源的中性点常是接地的, 故中线又叫地线。而电源各相的首端A、B、C和负载的三个端钮A'、B'、C'相联的线AA', BB', CC'叫做端线, 又常叫做火线。除图9-2-2所示的三相四线制外, 有时不接中线, 只有三条端线, 叫做三相三线制。

我们把端线上的电流叫做线电流, 如  $i_A, i_B, i_C$ ; 电源内每相的电流叫做电源的相电流, 如  $i_{OA}, i_{OB}, i_{OC}$ ; 负载内每相的电流叫做负载的相电流, 如  $i_{A'O'}, i_{B'O'}, i_{C'O'}$ 。把端线与端线之间的电压叫做线电压, 如  $v_{AB}, v_{BC}, v_{CA}$ ; 每相电源的电压叫做电源的相电压, 如  $v_{AO}$  等; 每相负载的电压叫做负载的相电压, 如  $v_{A'O'}$  等。

在星形联接的三相电路中, 不管有无中线存在, 电源和负载中的相电流恒等于对应的线电流, 在图示参考方向下, 有

$$\left. \begin{aligned} i_{OA} &= i_A = i_{A'O'} \\ i_{OB} &= i_B = i_{B'O'} \\ i_{OC} &= i_C = i_{C'O'} \end{aligned} \right\} \quad (9-2-1a)$$

用有效值相量表示为

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{OA} &= \dot{I}_A = \dot{I}_{A'O'} \\ \dot{I}_{OB} &= \dot{I}_B = \dot{I}_{B'O'} \\ \dot{I}_{OC} &= \dot{I}_C = \dot{I}_{C'O'} \end{aligned} \right\} \quad (9-2-1b)$$

如果有中线, 则中线电流为

$$i_O = i_A + i_B + i_C \quad (9-2-2a)$$

用相量表示为

$$\dot{I}_O = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C \quad (9-2-2b)$$

如果没有中线, 则有

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad (9-2-3a)$$

用相量表示为

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0 \quad (9-2-3b)$$

这是基尔霍夫电流定律的直接结果。若三相电流为对称, 令相电流有效值为  $I_{PA}$ , 线电流有效值为  $I_l$ , 则有

$$I_l = I_{PA} \quad (9-2-4)$$

且三相电流之和为零, 即中线电流为零。

在图示参考方向下, 线电压等于相关两个相电压之差, 即

$$\left. \begin{aligned} v_{AB} &= v_{AO} - v_{BO} \\ v_{BC} &= v_{BO} - v_{CO} \\ v_{CA} &= v_{CO} - v_{AO} \end{aligned} \right\} \quad (9-2-5a)$$

用相量表示为

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{AB} &= \dot{V}_{AO} - \dot{V}_{BO} \\ \dot{V}_{BC} &= \dot{V}_{BO} - \dot{V}_{CO} \\ \dot{V}_{CA} &= \dot{V}_{CO} - \dot{V}_{AO} \end{aligned} \right\} \quad (9-2-5b)$$

图 9-2-3 为一对称三相电压的相量图。三角形  $AOB$  为等腰三角形, 相量  $\dot{V}_{AO}$  与相量  $\dot{V}_{BO}$  的夹角为  $120^\circ$ , 故线电压相量为

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{AB} &= \sqrt{3} \dot{V}_{AO} \angle 30^\circ \\ \dot{V}_{BC} &= \sqrt{3} \dot{V}_{BO} \angle 30^\circ \\ \dot{V}_{CA} &= \sqrt{3} \dot{V}_{CO} \angle 30^\circ \end{aligned} \right\} \quad (9-2-6)$$

由上面结果可以看出, 在相电压对称的情况下, 线电压也是对称的, 而且线电压的有效值为相电压有效值的  $\sqrt{3}$  倍。在星形联接的负载端, 也有完全相似的情况。设相电压的有效值为  $V_{PA}$ , 线电压的有效值为  $V_l$ , 则有

$$V_l = \sqrt{3} V_{ph}$$

(9-2-7)

同时,在图示参考方向下,线电压在相位上超前于相关两相中的先行相(例如,对A、B两线间的电压 $\dot{V}_{AB}$ 而言,A相为先行相)的相电压 $30^\circ$ 。

在日常用电中,相电压为220V的三相电源,其线电压为

$$V_l = \sqrt{3} \times 220 = 380\text{V}$$

一般工程上发电机的额定电压或输电线的电压指的是线电压,如220kV,10kV等。

在星形联接的三相电路中,不论有无中线存在,也不管各线电压是否对称,从(9-2-5)式可以看到,各线电压相量的和恒为零,即

$$\dot{V}_{AB} + \dot{V}_{BC} + \dot{V}_{CA} = 0 \quad (9-2-8)$$

这是基尔霍夫电压定律的直接结果。

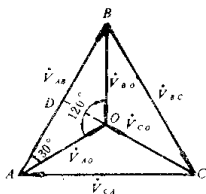


图9-2-3 星形联接对称三相电压的相量图

### §9-3 三相电路的三角形联接

如果我们将三相电源绕组的始端和末端顺次联接,即X与B, Y与C, Z与A相联,再从各个联接点引出三条端线,便得到三相电源的三角形联接。如果三相负载也接成三角形,并将电源和负载的顶点A与A', B与B', C与C'分别用导线相联,便成为图9-3-1所示的 $\Delta$ - $\Delta$ 联接的三相电路。

必须注意的是,三相电源作三角形联接时,必须使三角形回路中没有环流,这就要求回路中三相电源的电压之和为零。否则,由于发电机内部阻抗很小,即使回路电压之和不大也会产生较大的环行电流。通常,发电机三相电压是对称的,只要将每相电源的首末端依次联接如图9-3-2(a)所示,则回路电压之和为零,即

$$\dot{V}_A + \dot{V}_B + \dot{V}_C = 0 \quad (9-3-1)$$

其相量图如图9-3-2(b)所示。但是,如果不慎将一相(例如C相)的首末端接错了,如图9-3-3(a),其相量图如图9-3-3(b)所示,则三角形回路中的总电压为

$$\dot{V}_A + \dot{V}_B - \dot{V}_C = -2\dot{V}_C \quad (9-3-2)$$

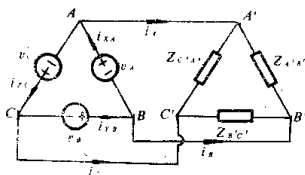


图9-3-1  $\Delta$ - $\Delta$ 联接的三相电路

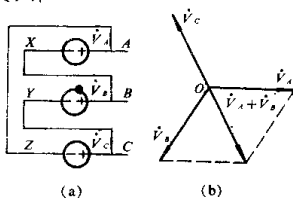


图9-3-2 正确联接的三角形电源及其相量图

在这样一个数值等于电源相电压两倍的电压作用下，三角形电源回路中将产生很大的环形电流，这显然是很危险的。一般三相发电机绕组不接成三角形。

在三角形联接中，线电压就是相电压。如果电源是对称的，则各相电压的有效值和各线电压的有效值相等。若用  $V_{\phi}$  表示相电压有效值， $V_l$  表示线电压有效值，则

$$V_l = V_{\phi} \quad (9-3-3)$$

但是，线电流和相电流是不同的。无论是电源端还是负载端，各线电流是相关两个相电流之差，即

$$\left. \begin{aligned} i_A &= i_{XA} - i_{ZC} \\ i_B &= i_{YB} - i_{XA} \\ i_C &= i_{ZC} - i_{YB} \end{aligned} \right\} \quad (9-3-4a)$$

用相量表示为

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{XA} - \dot{I}_{ZC} \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{YB} - \dot{I}_{XA} \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{ZC} - \dot{I}_{YB} \end{aligned} \right\} \quad (9-3-4b)$$

如果三个相电流是对称的，从图 9-3-4 所示的电流相量图可以看到，由于三角形  $OAN$  为等腰三角形，相量  $\dot{I}_{XA}$  与相量  $-\dot{I}_{ZC}$  的夹角为  $120^\circ$ ，故可求得线电流相量为

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \sqrt{3} \dot{I}_{XA} \angle -30^\circ \\ \dot{I}_B &= \sqrt{3} \dot{I}_{YB} \angle -30^\circ \\ \dot{I}_C &= \sqrt{3} \dot{I}_{ZC} \angle -30^\circ \end{aligned} \right\} \quad (9-3-5)$$

由此可见，在相电流对称的情况下，线电流也是对称的，而且线电流的有效值为相电流有效值的  $\sqrt{3}$  倍。若令相电流的有效值为  $I_{\phi}$ ，线电流的有效值为  $I_l$ ，则

$$I_l = \sqrt{3} I_{\phi} \quad (9-3-6)$$

在图示参考方向下，线电流  $\dot{I}_A$  滞后相电流  $\dot{I}_{XA} 30^\circ$ ， $\dot{I}_B$  滞后  $\dot{I}_{YB} 30^\circ$ ， $\dot{I}_C$  滞后  $\dot{I}_{ZC} 30^\circ$ 。

三角形联接的三相电路，不管线电流是否对称，由 (9-3-4) 式可以看到，三相电流之和等于零，即

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0 \quad (9-3-7)$$

这是基尔霍夫电流定律的直接结果。

## §9-4 对称三相电路的计算

三相电压对称，三相内阻抗也对称的电源，叫做对称三相电源。而各相阻抗都相同的负载就叫做对称三相负载。由对称三相电源、对称三相负载和线路阻抗相同的联接线组成的三相电路，叫做对称三相电路。

由于对称Y-Y三相电路的分析计算,反映了对称三相电路分析计算的基本特点,故其它形式的对称三相电路都可以转换成Y-Y电路来计算。所以,下面首先讨论Y-Y联接的对称三相电路的计算。

#### 9-4-1 Y-Y对称三相电路的计算

Y-Y联接的对称三相电路如图9-4-1所示。在电路参数已知的情况下,要求各支路电流,可以采用支路电流法、回路电流法、节点电位法等。但根据电路结构具有节点少的特点,以采用节点电位法为宜。

设电源的中性点O为参考点,则只需求出O'点对O点的电压就行了。根据节点电位法,可得

$$\left(\frac{1}{Z} + \frac{1}{Z} + \frac{1}{Z} + \frac{1}{Z_N}\right) \dot{V}_{O'O} = \frac{1}{Z} \dot{V}_A + \frac{1}{Z} \dot{V}_B + \frac{1}{Z} \dot{V}_C$$

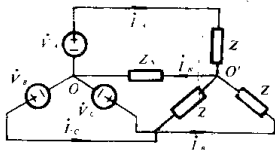


图9-4-1 Y-Y联接的对称三相电路

中线电流为

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{\dot{V}_A - \dot{V}_{O'O}}{Z} = \frac{\dot{V}_A}{Z} \\ \dot{I}_B &= \frac{\dot{V}_B - \dot{V}_{O'O}}{Z} = \frac{a^2 \dot{V}_A}{Z} = a^2 \dot{I}_A \\ \dot{I}_C &= \frac{\dot{V}_C - \dot{V}_{O'O}}{Z} = \frac{a \dot{V}_A}{Z} = a \dot{I}_A \end{aligned} \right\} \quad (9-4-3)$$

负载各相电压为

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = (1 + a^2 + a) \dot{I}_A = 0 \quad (9-4-4)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{A'O'} &= Z \dot{I}_A \\ \dot{V}_{B'O'} &= Z \dot{I}_B = a^2 Z \dot{I}_A = a^2 \dot{V}_{A'O'} \\ \dot{V}_{C'O'} &= Z \dot{I}_C = a Z \dot{I}_A = a \dot{V}_{A'O'} \end{aligned} \right\} \quad (9-4-5)$$

它们也是对称的。

由  $\dot{V}_{O'O} = 0$  可知,负载中性点O'和电源中性点O是等位点,中线内没有电流。因此,不论有无中线,以及中线阻抗为多少,中性点O和O'间可以用一条没有阻抗的导线联接起来而不影响电路的工作情况,从而各相电流仅由本相的电压和本相的阻抗所决定。由于三相是对称的,计算时,可以任取其中一相(例如A相)作为计算的参考相,单独画出该相的电路,如图9-4-2所示,并计算这一相的电流和电压。在参考相的电流和电压计算

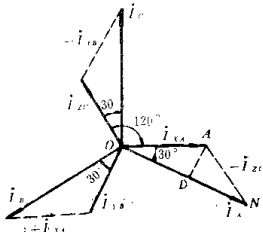


图9-4-2 三角形联接对称三相电流的相量图

$$\dot{V}_{O'O} = \frac{1}{\frac{3}{Z} + \frac{1}{Z_N}} (\dot{V}_A + \dot{V}_B + \dot{V}_C) \quad (9-4-1)$$

由于三相电源电压对称,  $\dot{V}_A + \dot{V}_B + \dot{V}_C = 0$ , 故有

$$\dot{V}_{O'O} = 0 \quad (9-4-2)$$

而对称的三相电流为

出来以后，其它两相的电流和电压根据对称关系就可以直接写出来。这样，对称三相电路的计算便归结为单相电路的计算了。

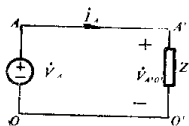


图9-4-2 一相计算电路

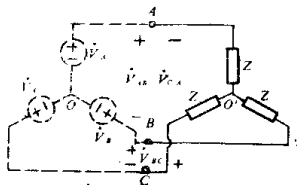


图9-4-3 对称星形负载接到对称线电压上的三相电路

### 9-4-2 \$\Delta\$-Y对称三相电路的计算

图9-4-3是一组Y形联接的对称负载接到对称三相线电压 \$\dot{V}\_{AB}, \dot{V}\_{BC}, \dot{V}\_{CA}\$ 上，这可看作是 \$\Delta\$-Y 联接的对称三相电路。

由于线电压是对称的，故可假想一Y形联接的对称三相电源，各相电压为 \$\dot{V}\_A, \dot{V}\_B\$ 和 \$\dot{V}\_C\$，根据(9-2-6)式可以求得

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_A &= \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{V}_{AB} \angle -30^\circ \\ \dot{V}_B &= a^2 \dot{V}_A \\ \dot{V}_C &= a \dot{V}_A \end{aligned} \right\} \quad (9-4-6)$$

这样，便得一Y-Y联接的对称三相电路，计算方法就与9-4-1节的情况一样了。

### 9-4-3 \$\Delta\$-Y对称三相电路的计算

电路如图9-4-4所示。\$Z\_l\$为输电线的阻抗。按图9-2-3的相量图，将三相线电压转换成Y形对称三相电压，三角形负载转换成Y形对称负载，从而得图9-4-5所示的Y-Y联接的对称三相电路。这样，可求得各线电流为

$$\begin{aligned} i_A &= \frac{\dot{V}_A}{Z_l + \frac{1}{3}Z} = \frac{\frac{1}{\sqrt{3}} \dot{V}_{AB} \angle -30^\circ}{Z_l + \frac{1}{3}Z} \\ i_B &= a^2 i_A = i_A \angle -120^\circ \\ i_C &= a i_A = i_A \angle -240^\circ \end{aligned}$$

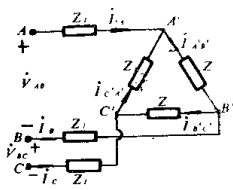


图9-4-4 \$\Delta\$形对称负载接到对称线电压上的三相电路

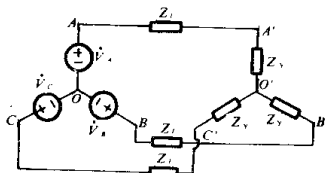


图9-4-5 等效的Y-Y形三相电路

按图 9-4-4 选取的电流参考方向, 根据 (9-3-5) 式,  $\Delta$  形各相负载的电流为

$$\dot{i}_{A'B'} = \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{i}_A \angle 30^\circ$$

$$\dot{i}_{B'C'} = a^2 \dot{i}_{A'B'}$$

$$\dot{i}_{C'A'} = a \dot{i}_{A'B'}$$

$\Delta$  形负载各相电压为

$$\dot{V}_{A'B'} = Z \dot{i}_{A'B'}$$

$$\dot{V}_{B'C'} = Z \dot{i}_{B'C'} = a^2 \dot{V}_{A'B'}$$

$$\dot{V}_{C'A'} = Z \dot{i}_{C'A'} = a \dot{V}_{A'B'}$$

**例** 在图 9-4-6(a) 所示的  $\Delta$  形联接对称负载中, 已知每相阻抗  $Z = 19.2 + j14.4 \Omega$ , 线路阻抗  $z_l = 3 + j4 \Omega$ , 电源方的线电压为 380V 的对称三相电源, 求负载每相的电流和电压。

**解** 由于电路为对称三相电路, 故可将电源化为  $Y$  形联接的对称三相电源, 其电压为

$$V_A = V_B = V_C = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220V$$

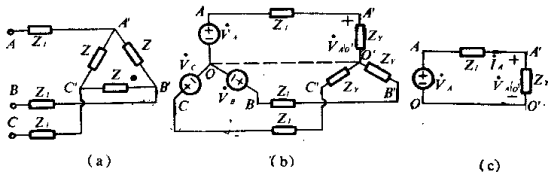


图 9-4-6  $\Delta$ - $\Delta$  联接的对称三相电路的计算

将负载化成等值  $Y$  形联接, 其等值阻抗为

$$Z_Y = \frac{1}{3} Z = 6.4 + j4.8 \Omega$$

电路化成为图 9-4-6(b) 所示的等值  $Y$ - $Y$  联接的对称三相电路。中性点  $O$  与  $O'$  为等位点, 用一条无阻抗的导线连起来, 取其中一相 (例如  $A$  相) 来进行计算, 如图 9-4-6(c) 所示。并取  $A$  相的电源电压  $\dot{V}_A$  为参考正弦量, 即  $\dot{V}_A = 220 \angle 0^\circ V$ , 则

$$\dot{i}_A = \frac{\dot{V}_A}{Z_l + Z_Y} = \frac{220 \angle 0^\circ}{3 + j4 + 6.4 + j4.8} = 17.1 \angle -43.2^\circ A$$

根据对称关系, 其它两个线电流为

$$\dot{i}_B = a^2 \dot{i}_A = 17.1 \angle -163.2^\circ A$$

$$\dot{i}_C = a \dot{i}_A = 17.1 \angle 76.8^\circ A$$

根据选取的参考方向和三角形的相电流和线电流的关系, 可以求得原三角形负载的相电流为

$$\dot{i}_{A'B'} = \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{i}_A \angle 30^\circ = 9.87 \angle -13.2^\circ A$$

$$\dot{i}_{B'C'} = a^2 \dot{i}_{A'B'} = 9.87 \angle -133.2^\circ A$$

$$\dot{i}_{C'A'} = a \dot{i}_{A'B'} = 9.87 \angle 106.8^\circ A$$

三角形负载的相电压 (也就是负载端的线电压) 为

$$\dot{V}_{A'B'} = Z \dot{i}_{A'B'} = (19.2 + j14.4) \times 9.87 \angle -13.2^\circ = 236 \angle 23.8^\circ V$$

$$\dot{V}_{B'C'} = a^2 \dot{V}_{A'B'} = 236 \angle -96.2^\circ V$$

$$\dot{V}_{C'A'} = a \dot{V}_{A'B'} = 236 \angle 143.8^\circ V$$

#### 9-4-4 复杂对称三相电路的计算

图 9-4-7 (a) 为一较复杂的对称三相电路。为计算此电路，首先将电源和三角形负载都转换成等效的星形联接的电源和负载，如图 9-4-7 (b) 所示，其中  $\dot{V}_A = \frac{\sqrt{3} \dot{V}_{AB}}{\sqrt{3}} \angle -30^\circ \text{ V}$ ， $Z'_1 = \frac{1}{3} Z_4$ 。在此电路中，由于电源和各负载均为对称，故电源中性点  $O$  和各负载中性点  $O_1$ 、 $O_2$  为等电位点，可用一根无阻抗的导线联结起来，如图中虚线所示。这样，便可从中取出一相来进行计算，如图 9-4-7 (c) 所示。计算出这个电路中各支路的电流后，再返回原电路。根据三角形线电流和相电流的关系，便可求出原电路中三角形联接负载中各相的电流，从而就可以计算出各部分的电压。

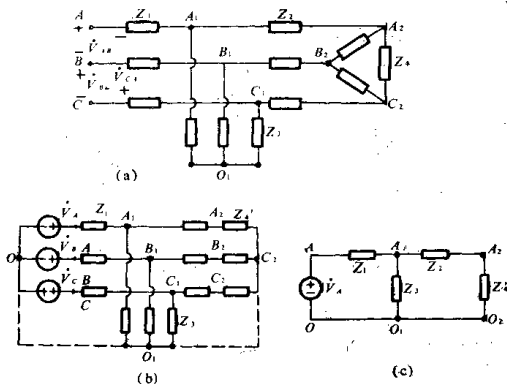


图9-4-7 复杂对称三相电路的计算

综上所述，可归纳出计算对称三相电路的一般步骤如下：

- (1) 将所有三角形联接的电源和负载转换成等效的星形联接；
- (2) 将电源中性点和各负载中性点用一根无阻抗的导线连接起来；
- (3) 任取其中一相进行计算，求出这一相的电流、电压后，根据对称关系，写出其它两相的电流和电压；
- (4) 根据选取的参考方向和星形与三角形联接的线电流(或电压)和相电流(或电压)的关系，求出原电路中各部分的电流和电压。

#### §9-5 不对称三相电路及其计算

在三相电路中，如果三相电源的电压不对称，或者三相负载的阻抗不相等，或者三相输电线的阻抗不相同，电路中各相的电流一般是不对称的。这种三相电路，叫做不对称三



相电路。不对称三相电路显然不能转化为单相电路来计算，而应根据电路的具体情况，在第八章所讨论的各种方法中选取较为方便的方法进行计算。

在电力系统中，电源的电压一般是对称的，但各相负载可能不相同，这就构成了不对称三相电路，如图 9-5-1 所示。图中， $Z_A \neq Z_B \neq Z_C$ ，中线阻抗为  $Z_N$ 。由于图示电路的节点少，故用节点分析法比较方便。选择 O 点为电位参考点，则

$$\dot{V}_{O'O} = \frac{\frac{1}{Z_A} \dot{V}_A + \frac{1}{Z_B} \dot{V}_B + \frac{1}{Z_C} \dot{V}_C}{\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C} + \frac{1}{Z_N}} \quad (9-5-1)$$

从而可求出各线电流为

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= (\dot{V}_A - \dot{V}_{O'O}) \frac{1}{Z_A} \\ \dot{I}_B &= (\dot{V}_B - \dot{V}_{O'O}) \frac{1}{Z_B} \\ \dot{I}_C &= (\dot{V}_C - \dot{V}_{O'O}) \frac{1}{Z_C} \end{aligned} \right\} \quad (9-5-2)$$

再由  $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$ ，可求出中线电流。

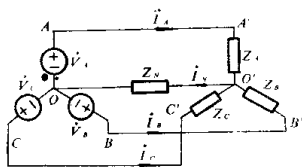


图9-5-1 不对称三相电路示例

## §9-6 位形相量图

结合位形相量图(简称位形图)来分析三相电路的工作状态往往是比较方便的。位形相量图，是一种特殊形式的电压相量图。在位形图中，电路各元件的电压相量是按元件在电路中联接的顺序排列的，位形图中各相量的起点和终点与电路中相应的点是一一对应的；电路后一个元件的电压相量一定与前一个元件的电压相量相衔接。因此，在位形图中，各电压相量是不能作平行移动的。而在一般的电压相量图中，任何一个相量都可以平行地移动到图中的任何位置。下面以图 9-6-1(a) 所示的电路为例来说明位形图的含义和作法。

假设在电路上加电压  $\dot{V}_{AB}$ ，电路中产生电流  $\dot{I}$ ，则各元件上的电压为  $\dot{V}_R = R\dot{I}$ ， $\dot{V}_L = R'\dot{I} + jX_L\dot{I}$ ， $\dot{V}_C = -jX_C\dot{I}$ 。选择电流  $\dot{I}$  作为参考相量，相量  $\dot{V}_R$  与  $\dot{I}$  方向一致。由电路图知，它起始于 A 点，终止于 E 点。在选定的电压比例尺下，当在相量  $\dot{I}$  上取一段长度等于  $\dot{V}_R$  时，便可确定位形图上 A、E 两点。接着根据电路中各元件电压和电流的关系以及元件在电路图中的位置，在位形图中，用相同的电压比例依次做出它们的相量，便得到图 9-6-1 (b) 所示的位形图。利用位形图可以很方便地确定电路上任何两点间的电压相量。如电路中 A、D 两点间的电压  $\dot{V}_{AD}$ ，在位形图中，就是 A、D 两点间连线所决定的相量，如图中虚线所示。

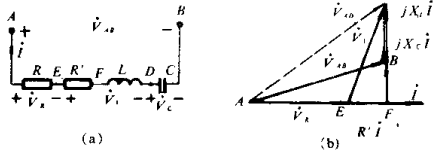


图9-6-1 电路及其对应的位形图