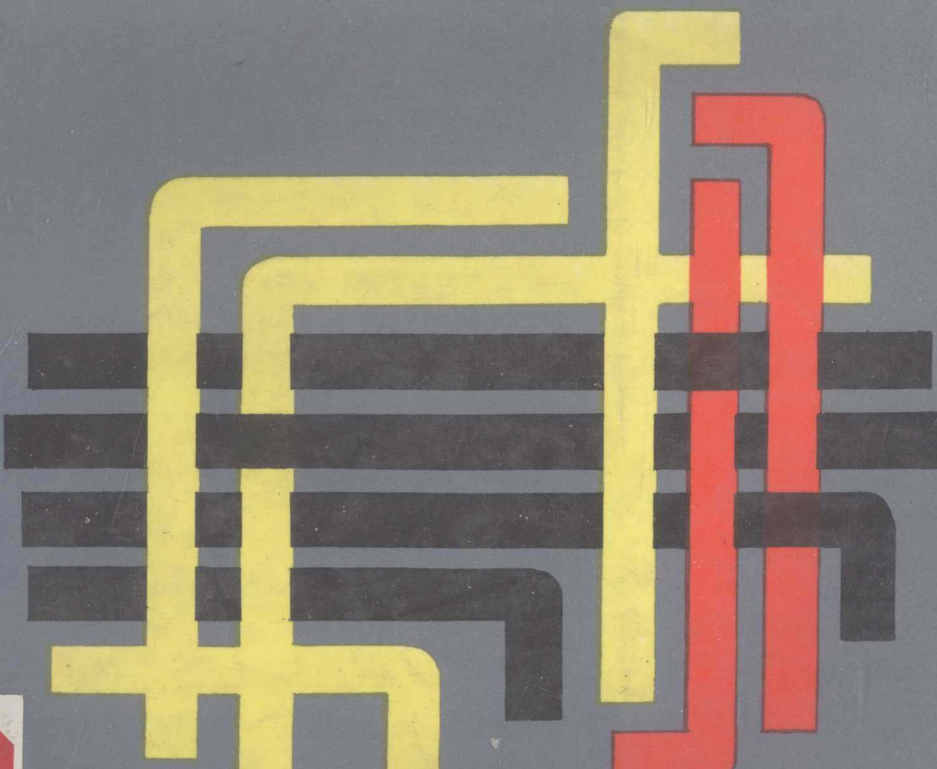
XXDWLFX

线性电网络分析

下 册

汪 建

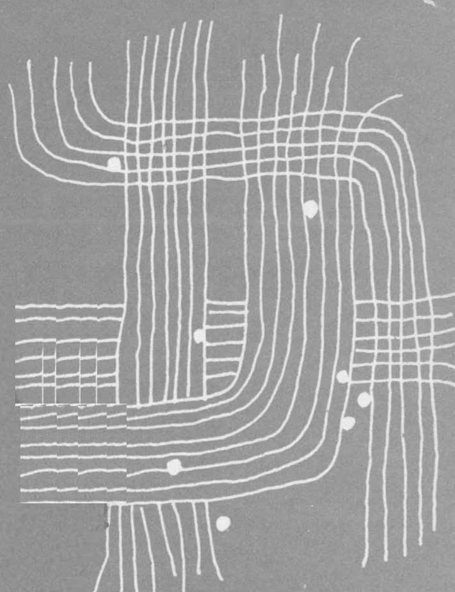


湖北教育出版社

下　册

线性电网络分析

汪　建



湖北教育出版社

线 性 电 网 络 分 析

下　　册

汪　建

湖北教育出版社出版、发行
新华书店湖北发行所经销
湖北省京山县印刷厂印刷

●

850×1168毫米32开本　13.375印张　2插页　347000字
1992年1月第1版　　1992年1月第1次印刷
印数：1—3000

ISBN7—5351—0804—0/T·3
定价：4.80元

内容提要

本书以线性电路为对象。系统地讲述电路理论的基本概念，基本原理和基本分析方法。通过对电路分析课程中重点、难点内容及解题方法的详细讨论，刻意于基本内容的叙述与学习方法指导的有机结合，本书十分适宜于自学。

全书共十二章，分上、下两册出版。上册内容包括：电路和电路元件；网络分析方法之一——等效变换法；网络分析方法之二——网络方程法；网络分析方法之三——运用网络定理法；正弦稳态电路分析；谐振电路与互感耦合电路。下册内容包括：三相电路及其计算；非正弦周期性稳态电路分析；双口网络；暂态分析方法之一——经典分析法；暂态分析方法之二——复频域分析法；暂态分析方法之三——状态变量分析法。

本书可作为高等学校电类专业本科和大专电路理论课程的教学用书，也可供有关科技人员参考。

目　录

第七章　三相电路及其计算 ……………………………（1）

§7—1　三相电路的基本概念 …………………………（1）

§7—2　三相电路的两种基本联接方式 ………………（5）

§7—3　对称三相电路的计算 …………………………（13）

§7—4　不对称三相电路的计算 ………………………（24）

§7—5　三相电路的功率 ………………………………（28）

§7—6　例题分析 ………………………………………（37）

习题七 ……………………………………………………（48）

第八章　非正弦周期性稳态电路分析 ……………（51）

§8—1　非正弦周期性稳态电路的一些概念 ………（51）

§8—2　非正弦周期函数的谐波分析 ………………（53）

§8—3　非正弦周期函数的频谱图 …………………（66）

§8—4　非正弦周期性电压、电流的有效值与平均值 ……………………………………………（72）

§8—5　非正弦周期性稳态电路的功率 ……………（77）

§8—6　非正弦周期性稳态电路的计算方法 ………（82）

§8—7　非正弦对称三相电路的稳态分析 …………（90）

§8—8　例题分析 ………………………………………（99）

习题八 ……………………………………………………（109）

第九章　双口网络 ……………………………………（117）

§9—1　双口网络及其特性方程 ……………………（117）

§ 9—2 双口网络的参数……………………………………(119)
§ 9—3 双口网络参数间的关系…………………………(138)
§ 9—4 双口网络的等效电路……………………………(143)
§ 9—5 复合双口网络……………………………………(147)
§ 9—6 有载双口网络……………………………………(157)
§ 9—7 例题分析…………………………………………(163)
习题九……………………………………………………(180)
第十章 暂态分析方法之一——经典分析法……………………………………(185)
§10—1 动态电路暂态过程的一些概念………………(185)
§10—2 动态电路初始值的确定………………………(190)
§10—3 关于动态电路初始状态的突变………………(197)
§10—4 一阶电路的响应………………………………(207)
§10—5 二阶电路和高阶电路…………………………(230)
§10—6 阶跃响应和冲激响应…………………………(247)
§10—7 线性时不变网络的线性时不变特性…………(257)
§10—8 卷积……………………………………………(261)
§10—9 例题分析………………………………………(273)
习题十……………………………………………………(298)
第十一章 暂态分析方法之二——复频域分析法……………………………(309)
§11—1 拉普拉斯变换…………………………………(309)
§11—2 拉普拉斯变换的基本性质……………………(314)
§11—、 用部分分式展开法求拉氏反变换……………(319)
§11—4 用运算法求解暂态过程………………………(328)
§11—5 网络函数………………………………………(339)
§11—6 例题分析………………………………………(347)

习题十一……………………………………………………(358)

第十二章 暂态分析方法之三——状态变量分析法……………………………………(363)

§12—1 状态变量、状态方程及输出方程…………(363)
§12—2 状态方程的编写方法……………………(368)
§12—3 输出方程的编写方法……………………(383)
§12—4 状态方程的和输出方程的解法……………(386)
§12—5 例题分析………………………………(396)
习题十二……………………………………………(404)
习题答案…………………………………………(408)

第七章　三相电路及其计算

动力用电及日常生活用电大多取自三相供电系统，三相供电系统又称为三相电路，它是实际中最常见的一种正弦电路。这种电路最基本的结构特点是具有一组或多组电源，每组电源由三个振幅相等、频率相同、彼此间相位差一样的正弦电源构成，且电源和负载采用特定的联接方式。由于这些电路结构上的特点，致使三相电路具有电气性能上的许多特殊性。对三相电路的分析计算，不仅可采用在一般正弦电路中所应用的方法，而且在特定的条件下可采用简便方法。

§7—1　三相电路的基本概念

一、对称三相电源

1．对称三相电压的产生

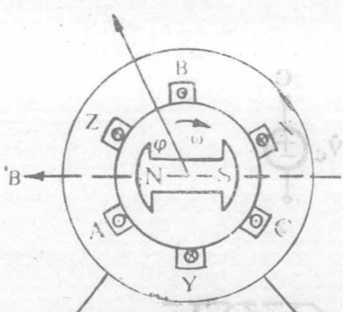


图7-1-1　三相发电机原理示意图

三相电路中的电源称为三相电源，三相电源的电势由三相发电机产生。图7-1-1所示为三相发电机的原理示意图，其主要的特征是具有三个结构相同的绕组Ax、By和Cz（A、B、C称为绕组的首端，x、y、z称为绕组的末端），每一绕组称为三相发电机的一相。Ax绕组称为A相，By绕组称为B相，Cz绕组称为C相。这三个绕组在空间上处于对称的位置，即彼此相隔$\frac{2}{3}\pi$弧度（120°）。当发电机转子（磁极）以恒定的角速度ω依顺时针方向旋转时，将在三个

绕组中同时感应正弦电压。显然，发电机的磁极经过三个绕组的顺序是$Ax—By—Cz$。由于三个绕组在空间位置上彼此相差120°，于是三个绕组的感应电压在相位上必彼此相差120°。若设每绕组中感应电压的参考方向是首端为正，末端为负，则三个绕组中的电压表达式分别为

$$v_A(t)=\sqrt{2}\,V\sin(\omega t+\varphi) \tag{7-1-1}$$

$$v_B(t)=\sqrt{2}\,V\sin(\omega t+\varphi-120^\circ) \tag{7-1-2}$$

$$\begin{aligned} v_C(t)&=\sqrt{2}\,V\sin(\omega t+\varphi-240^\circ) \quad -360^\circ+120^\circ \\ &=\sqrt{2}\,V\sin(\omega t+\varphi+120^\circ) \end{aligned} \tag{7-1-3}$$

式中的下标A、B、C分别表示A、B、C三相。

各电压的相量表达式为

$$\dot{V}_A=V\angle\varphi \quad \dot{V}_B=V\angle\varphi-120^\circ \quad \dot{V}_C=V\angle\varphi+120^\circ \tag{7-1-4}$$

这样的一组有效值相等、频率相同且在相位上彼此相差相同角度的三个电压称为对称三相电压。对称三相电源的相量模型及其电压波形如图 7-1-2 所示。

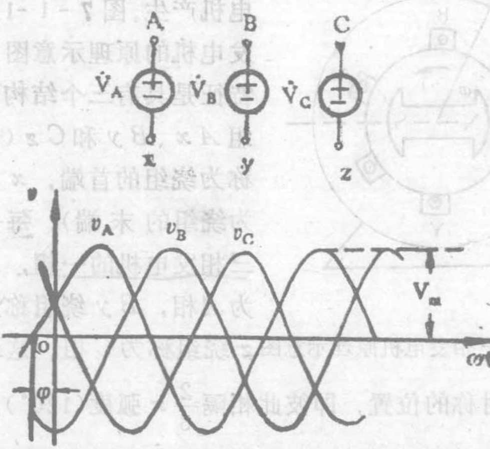


图7-1-2　对称三相电源的相量模型及电压波形图

2. 关于对称三相电压的说明

(1) 若将对称三相电压的瞬时值相加，即

$$v_A+v_B+v_C=\sqrt{2}V[\sin(\omega t+\varphi)+\sin(\omega t+\varphi-120^\circ)+\sin(\omega t+\varphi+120^\circ)]$$

利用三角函数的和差化积公式运算，可得

$$v_A+v_B+v_C=0 \qquad (7\text{-}1\text{-}5)$$

这表明在任一时刻，对称三相电源的瞬时值之和为零，对应于（7-1-5）式的相量表达式为

$$\dot{V}_A+\dot{V}_B+\dot{V}_C=0 \qquad (7\text{-}1\text{-}6)$$

(2) 对称三相电压相量常用相量算子 a 表示。相量算子为一复数，其定义式为

$$a\overset{\triangle}{=}\angle 120^\circ=\cos 120^\circ+j\sin 120^\circ=-\frac{1}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2} \qquad (7\text{-}1\text{-}7)$$

则 $$a^2=\angle 240^\circ=\angle -120^\circ=-\frac{1}{2}-j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

这样，对称三相电压的相量式可写为

$$\dot{V}_A=V_A\angle\varphi \qquad \dot{V}_B=\dot{V}_A\angle -120^\circ=a^2\dot{V}_A$$

$$\dot{V}_C=\dot{V}_A\angle 120^\circ=a\dot{V}_A$$

由于 $$1+a^2+a=0$$

故 $$\dot{V}_A+\dot{V}_B+\dot{V}_C=(1+a^2+a)\dot{V}_A=0$$

(3) 三相电压被称为“对称”的条件为有效值相等、频率相同、彼此间的相位差角一样。上述条件中只要有一个不满足，就称为是不对称的三相电压。这一概念也适用于电流。

二、对称三相电源的相序

把三相电源的各相电压到达同一数值（譬如正的最大值或负

Football Association

的最大值）的先后次序称为相序。对称三相电源的相序有正序、逆序和零序三种情况。

1．正序

在前面所讨论的那组对称三相电压中，各相电压到达同一数值的先后次序是A相、B相及C相。这种相序称为正序或顺序。显然，相序可由各相电压相互之间超前、滞后的关系予以确定（超前或滞后的角度不超过180°）。对正序情况而言，A相超前于B相，B相超前于C相，而C相又超前于A相（超前的角度均为120°）。具有正序电源的三相电路也称为正序系统。正序对称三相电压的相量图如图7-1-3(a)所示。

在本书中，若不加以说明，相序均为正序。

2．逆序

和正序的情况相反，称依$A-C-B$次序的相序为逆序或负序。逆序对称三相电压的相量表示式为

$$\dot{V}_A=V\angle\varphi \qquad \dot{V}_B=V\angle\varphi+120^\circ \qquad \dot{V}_C=V\angle\varphi-120^\circ$$

其相量图如图7-1-3(b)所示。

3．零序

若三相电压在同一时刻到达同一数值，则称这种相序为零序。零序的情况下，各相电压间的相位差为零。零序对称三相电压的相量表示式为

$$\dot{V}_A=\dot{V}_B=\dot{V}_C=V\angle\varphi$$

其相量图如图7-1-3（c）所示

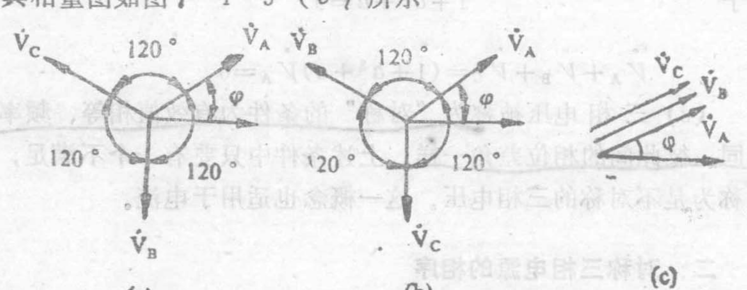


图7－1－3 三种相序的电压相量图

三、三相电路中电源和负载的联接方式

1．三相电路的负载

三相电路中的负载一般由三部分组成，合称为三相负载，其中的每一部分称作一相负载。当每一相负载的复阻抗均相同时，称之为对称三相负载，否则称为不对称三相负载。应注意对称三相电源和对称三相负载"对称"二字含义上的不同。

2．三相电源及三相负载的联接方式

在三相电路中，三相电源和三相负载采用两种基本的联接方式，即星形联接（Y联接）和三角形联接（△联接）．这两种联接方式在结构和电气上的特性将在下一节详细讨论。

§7—2　三相电路的两种基本联接方式

一、三相电路的星形联接

1．三相电源的星形联接

（1）三相电源的星形联接方式

若把三相电源的三个末端x、y、z联在一起，形成一个公共点O（称为电源的中性点），把三个始端A、B、C引出和外部电路相接，便得到三相电源的星形（Y形）联接方式，如图7-2-1(a)所示。若将三相电源的三个始端联在一起，将三个末端引

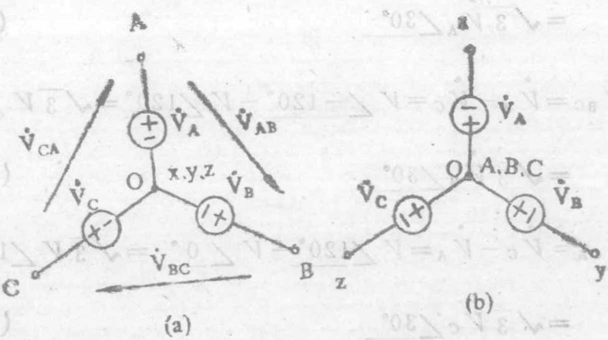


图7-2-1　三相电源的星形联接

出，亦可得到三相电源的星形联接方式，如图7-2-1(b)所示。习惯上采用图(a)的联接方式。星形联接的三相电源称为星形电源。

（2）三相电源在星形联接时线电压和相电压间的关系

通常将三相电源的每相始端和末端之间的电压称作该相的相电压，把任意两相始端间的电压称作线电压。在图7-2-1(a)中，$\dot{V}_A$、$\dot{V}_B$和$\dot{V}_C$为相电压，$\dot{V}_{AB}$、$\dot{V}_{BC}$和$\dot{V}_{CA}$为线电压。下面分析对称三相电源在星形联接方式下线电压和相电压之间的关系。

在图7-2-1(a)中，三个线电压分别为相应的两相电压之差，即

$$\dot{V}_{AB}=\dot{V}_A-\dot{V}_B \qquad \dot{V}_{BC}=\dot{V}_B-\dot{V}_C \qquad \dot{V}_{CA}=\dot{V}_C-\dot{V}_A$$

若以$\dot{V}_A$为参考相量，即$\dot{V}_A=V\angle 0^\circ$，则$\dot{V}_B=V\angle -120^\circ$，$\dot{V}_C=V\angle 120^\circ$，于是各线电压为

$$\dot{V}_{AB}=\dot{V}_A-\dot{V}_B=V\angle 0^\circ-V\angle -120^\circ=\sqrt{3}V\angle 30^\circ$$

$$=\sqrt{3}\dot{V}_A\angle 30^\circ \qquad (7\text{-}2\text{-}1)$$

$$\dot{V}_{BC}=\dot{V}_B-\dot{V}_C=V\angle -120^\circ-V\angle 120^\circ=\sqrt{3}V\angle -90^\circ$$

$$=\sqrt{3}\dot{V}_B\angle 30^\circ \qquad (7\text{-}2\text{-}2)$$

$$\dot{V}_{CA}=\dot{V}_C-\dot{V}_A=V\angle 120^\circ-V\angle 0^\circ=\sqrt{3}V\angle 150^\circ$$

$$=\sqrt{3}\dot{V}_C\angle 30^\circ \qquad (7\text{-}2\text{-}3)$$

可作出相电压、线电压的相量图和位形图分别如图7-2-2

(*a*)、(*b*)所示。

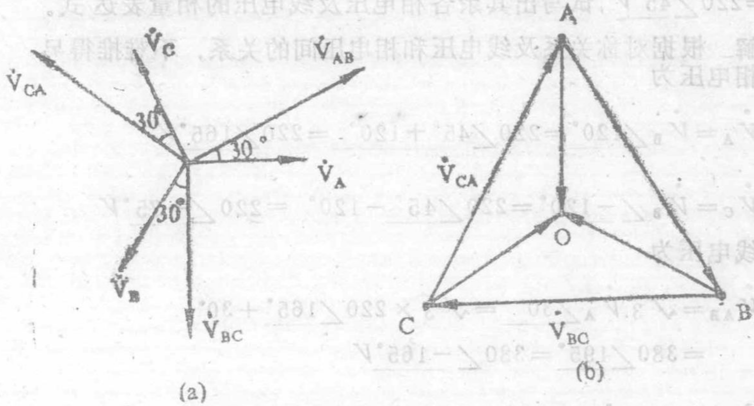


图7-2-2 星形电源的电压相量图和位形图

根据以上分析，可得出如下的重要结论：在星形联接的对称三相电源中，各线电压的有效值相等，且为相电压有效值的$\sqrt{3}$倍。每一线电压均超前于相应的相电压30°；三个线电压也构成一组对称电压。

在星形联接的对称三相电源中

$I=\frac{V\angle -30^\circ}{R}$

应特别注意，仅在三相电源对称的情况下，上述结论才成立。

上述线电压和相电压有效值之间的关系可用数学式表示为

$$V_l=\sqrt{3}\,V_{ph} \qquad (7\text{-}2\text{-}4)$$

其中V_l表示线电压有效值（下标 *l* 为*line*的缩写），V_{ph}表示相电压有效值（下标 *p h* 为*phase*的缩写）。

在日常的低压三相供电系统中，电源的相电压为220*V*，则线电压为$\sqrt{3}\times220=380V$。

一般若不加以说明，在三相电源中给出的电压均是线电压。

根据上面的结论，当已知星形联接的对称三相电源的任一相电压或线电压相量时，就可方便地写出其余各相电压和线电压相量的表达式。

例 7－1 若已知星形联接的对称三相电源*B*相的相电压为

$\dot{V}_B=220\angle 45^\circ V$，试写出其余各相电压及线电压的相量表达式。

解　根据对称关系及线电压和相电压间的关系，不难推得另两个相电压为

$$\dot{V}_A=\dot{V}_B\angle 120^\circ=220\angle 45^\circ+120^\circ=220\angle 165^\circ V$$

$$\dot{V}_C=\dot{V}_B\angle -120^\circ=220\angle 45^\circ-120^\circ=220\angle -75^\circ V$$

三个线电压为

$$\dot{V}_{AB}=\sqrt{3}\dot{V}_A\angle 30^\circ=\sqrt{3}\times 220\angle 165^\circ+30^\circ$$
$$=380\angle 195^\circ=380\angle -165^\circ V$$

$$\dot{V}_{BC}=\sqrt{3}\dot{V}_B\angle 30^\circ=\sqrt{3}\times 220\angle 45^\circ+30^\circ$$
$$=380\angle 75^\circ V$$

$$\dot{V}_{CA}=\sqrt{3}\dot{V}_C\angle 30^\circ=\sqrt{3}\times 220\angle -75^\circ+30^\circ$$
$$=380\angle -45^\circ V$$

相量之相位角的范围一般取$-180^\circ\leq\varphi\leq 180^\circ$。

2．三相负载的星形联接

若将各相负载的一个端子相互联在一起，形成一个公共点O'，称为负载的中性点；将另外三个端子A'、B'、C'引出以

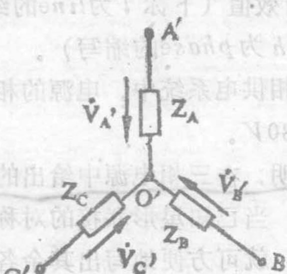


图7-2-3　三相负载的星形联接

联向电源，便得到三相负载的星形联接方式，如图7-2-3所示．星形联接的三相负载称为星形负载。

前已指出，若各相负载的复阻抗相等，即$Z_A=Z_B=Z_C$，则称之为对称三相负载，否则称为不对称三相负载。

在星形负载对称的情况下，其线电压、相电压间的关系和对称星形电源的线电压、相电压间的关系完全相同，即相电压对称、线电压亦对称，且有关系式：

$$\dot{V}_{A'B'}=\sqrt{3}\,\dot{V}_{A'}\angle 30^\circ \quad (7\text{-}2\text{-}5)$$

$$\dot{V}_{B'C'}=\sqrt{3}\,\dot{V}_{B'}\angle 30^\circ \quad (7\text{-}2\text{-}6)$$

$$\dot{V}_{C'A'}=\sqrt{3}\,\dot{V}_{C'}\angle 30^\circ \quad (7\text{-}2\text{-}7)$$

当然，若负载不对称，则相电压、线电压不可能同为对称或均不对称，上述关系式亦不复成立。

3．星形联接的三相制 5月15日

将星形电源和星形负载用导线联接起来，便得到星形联接的三相制，又称之为星形三相电路。星形电路又分为三相四线制和三相三线制两种情况。

（1）三相四线制

若将星形电源的三个始端（又称端点）A、B、C与星形负载的三个端点A′、B′、C′分别用导线相联，电源的中性点和负载的中性点也用导线联接起来，便构成了三相四线制。（如图7-2-4所示）。所谓“四线”是指电源和负载之间有四根联线。

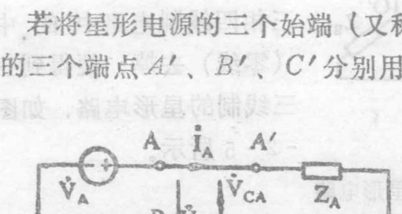


图7-2-4 三相四线制电路

下面结合图7-2-4，介绍一些三相电路

中的常用名词。

通常把电源端点和负载端点间的联线AA'、BB'和CC'称为端线，俗称火线；将电源中性点和负载中性点间的联线OO'称为中线。因中线大都接地，又称之为零线。

我们将端线（火线）中的电流$\dot{I}_A$、$\dot{I}_B$和$\dot{I}_C$称为线电流；中线中的电流$\dot{I}_0$称为中线电流；每相电源和每相负载中的电流称为相电流。由图7-2-4不难看出，火线间的电压便是线电压。

在三相电路中，常把线电压、线电流称为线量，并用下标l表示，如V_l、I_l等；把相电压、相电流称为相量，并用下标ph表示，如V_{ph}、I_{ph}等。要注意这种"相量"与表示正弦量的"相量"之间的区别，不可把两者混淆。

星形电路的一个重要特点是，在任何情况下，线电流均等于相电流。

（2）三相三线制的星形电路

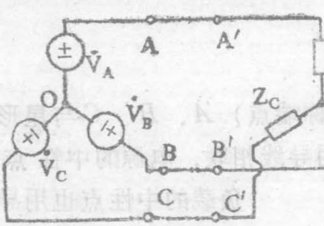


图7-2-5　三相三线制星形电路

若星形电路的两中性点O和O'之间不联导线，即把三相四线制电路中的中线（零线）去掉，便得到三相三线制的星形电路，如图7-2-5所示。

二、三相电路的三角形联接

1. 三相电源的三角形联接

若把三相电源的各相始末端顺次相联，使三相电源构成一闭合回路，并从各联接点引出端线联向负载，如图7-2-6所示，便得到三相电源的三角形联接方式。三角形联接的三相电源简称为三角形电源。