



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

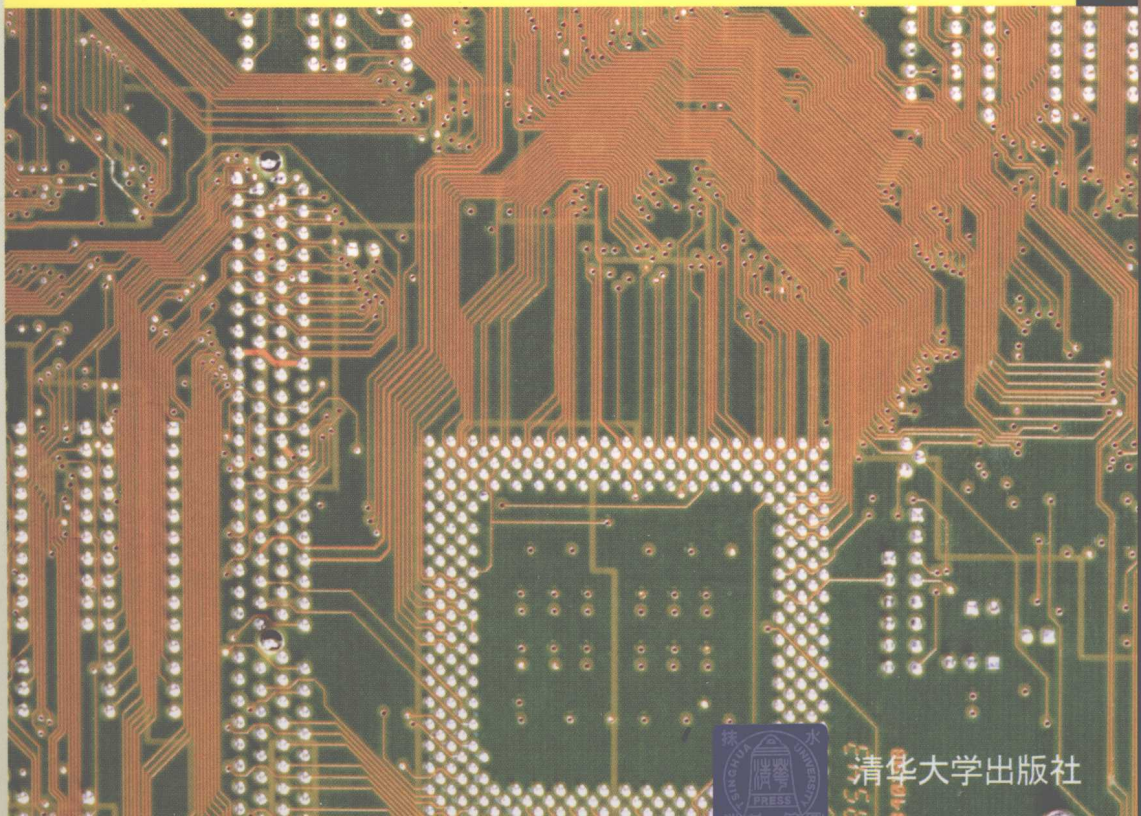
湖北省精品课程教材

国家工科电工电子教学基地教材

电路原理

汪建 编著

(下册)



清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

湖北省精品课程教材

国家工科电工电子教学基地教材

电路原理 (下册)

汪建 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了电路理论的基本概念、基本原理和基本分析方法。全书共分上下两册 15 章。上册内容包括:电路的基本定律和电路元件;电路分析方法——等效变换法、电路方程法、运用电路定理法;正弦稳态分析;谐振电路与互感耦合电路。下册内容包括:三相电路;周期性非正弦稳态电路分析;双口网络;暂态分析方法——经典分析法、复频域分析法、状态变量分析法;均匀传输线的稳态分析和暂态分析;非线性电路分析概论。

从培养学生分析、解决电路问题的能力出发,通过对电路理论课程中重点、难点及解题方法的详细论述,本书将基本内容的叙述和学习方法的指导有机融合,例题丰富,语言严谨流畅,便于自学。

本书可作为高等院校电气、电子类专业电路理论课程的教材,也可供有关科技人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电路原理.下册/汪建编著. —北京:清华大学出版社,2008.5

ISBN 978-7-302-16945-1

I. 电… II. 汪… III. 电路理论 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 012410 号

责任编辑:王一玲

责任校对:焦丽丽

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京市昌平环球印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:26.5 字 数:642 千字

版 次:2008 年 5 月第 1 版 印 次:2008 年 5 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:35.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:027482-01

前 言

电路理论是电类各专业重要的技术基础课。本课程的教学目的是使学习者懂得电路的基础理论,掌握电路分析的基本方法,为后续课程的学习及今后从事电类各学科领域的学习和工作打下坚实的基础。毋庸置疑,在电类专业领域的学习、研究过程中,电路理论知识的掌握程度至关重要,因此,学好这门课程的重要性不容低估。

电路理论的内容丰富,知识点多,概念性强。学习本课程不仅要具有良好的物理学有关内容的基础,也需要掌握高等数学的相关理论。可以说,清晰的物理概念和扎实的数学基础是学好电路理论的基本保证。通过本课程的学习,学生能够了解高等数学的理论在工程专业领域的应用方法,可以体会到数学工具在研究和解决专业理论和工程实际问题时的重要作用。

学生对本课程内容的掌握,可归结为综合运用所学的知识分析求解具有电路的能力。而这一能力的培养和提高,有赖于对基本概念、基本原理的准确理解,对基本方法的熟练掌握。因此,在本书的编写中,除参照高等学校对“电路”课程教学的基本要求,兼顾电气类和电子类专业的需要,突出对基本内容的叙述外,还刻意加强了对学习方法特别是解题方法的指导。具体的做法是:

(1) 强调对基本概念的准确理解。对重点、难点内容用注释方式予以较详尽的说明和讨论;对在理解和掌握上易于出错之处给予必要的提示。

(2) 重视对基本分析方法的训练和掌握。对各种解题方法给出了具体步骤,并用众多实例说明这些解题方法的具体应用,且许多例题同时给出多种解法,供读者比较。

(3) 注意培养学生独立思考、善于灵活运用基本概念和方法分析解决各种电路理论问题的能力。在每一章的最后均安排有“例题分析”,通过对一些典型的或综合性较强、具有一定难度的例题的精讲,进一步讨论各种电路分析方法的灵活应用,以启迪思维,开阔电路,达到融会贯通、举一反三的效果。

本书的内容采用授课式语言叙述,十分便于自学。

全书共分上、下两册 15 章,本书为下册。本书的出版得到了清华大学出版社的大力支持,在此深表谢意。

限于编者的学识水平,书中的疏漏和不当之处在所难免,希望读者批评指正。

编 者

2007 年 10 月于华中科技大学

目 录

第 7 章 三相电路	1
7.1 三相电路的基本概念	1
7.2 三相电路的两种基本连接方式	4
7.3 对称三相电路的计算	8
7.4 不对称三相电路的计算	15
7.5 三相电路的功率及测量	18
7.6 例题分析	25
习题	34
第 8 章 周期性非正弦稳态电路分析	37
8.1 周期性非正弦稳态电路的基本概念	37
8.2 周期性非正弦函数的谐波分析	39
8.3 周期性非正弦函数的频谱图	48
8.4 周期性非正弦电压、电流的有效值与平均值	51
8.5 周期性非正弦稳态电路的功率	55
8.6 周期性非正弦稳态电路分析	57
8.7 对称三相周期性非正弦电路的稳态分析	64
8.8 例题分析	70
习题	76
第 9 章 双口网络	81
9.1 双口网络及其方程	81
9.2 双口网络的参数	82
9.3 双口网络参数间的关系	97
9.4 双口网络的等效电路	99
9.5 复合双口网络	102
9.6 有载双口网络	109
9.7 回转器与负阻抗变换器	113
9.8 例题分析	117
习题	127

第 10 章 暂态分析方法之一——时域分析法	133
10.1 动态电路暂态过程的基本概念	133
10.2 动态电路初始值的确定	139
10.3 关于动态电路初始状态的突变	144
10.4 一阶电路的响应	150
10.5 二阶电路	167
10.6 阶跃响应和冲激响应	176
10.7 线性时不变网络零状态响应的基本特性	182
10.8 卷积	185
10.9 例题分析	192
习题	207
第 11 章 暂态分析方法之二——复频域分析法	218
11.1 拉普拉斯变换	218
11.2 拉普拉斯变换的基本性质	221
11.3 用部分分式展开法求拉氏反变换	225
11.4 用运算法求解暂态过程	229
11.5 网络函数	237
11.6 例题分析	250
习题	256
第 12 章 暂态分析方法之三——状态变量分析法	261
12.1 状态变量分析法的相关概念	261
12.2 状态方程的编写方法	266
12.3 输出方程的编写方法	276
12.4 状态方程和输出方程的解法	279
12.5 例题分析	284
习题	289
第 13 章 均匀传输线的稳态分析	293
13.1 均匀传输线的基本方程	293
13.2 均匀传输线方程的正弦稳态解	296
13.3 均匀传输线的正向行波和反向行波	302
13.4 均匀传输线的副参数	307
13.5 终端接负载的均匀传输线	311
13.6 无损耗传输线	318
13.7 均匀传输线的集中参数等效电路	326

13.8 例题分析	330
习题	333
第 14 章 均匀传输线的暂态分析	335
14.1 无损耗线偏微分方程的通解	335
14.2 无损耗线暂态过程中波的发生与反射	339
14.3 采用柏德生法则研究无损耗线的暂态过程	350
14.4 例题分析	355
习题	360
第 15 章 非线性电路分析概论	361
15.1 非线性电路元件概述	361
15.2 非线性电阻电路方程的建立	364
15.3 非线性电阻电路的三个基本概念	367
15.4 非线性电阻电路的图解分析法	370
15.5 具有分段线性端口特性的非线性电阻电路设计	374
15.6 小信号分析法	376
15.7 非线性电阻电路的分段线性处理法	379
15.8 非线性动态电路状态方程的建立	382
15.9 一阶电路的分段线性处理方法	387
15.10 例题分析	390
习题	396
部分习题答案	400

第7章 三相电路

本章提要

三相制是电力系统广泛采用的基本供电方式,也称为三相电路。本章讨论正弦稳态下的三相电路的基本分析方法。

本章的主要内容有:三相电路的基本概念;三相电路的两种基本连接方式;对称三相电路的分析方法;不对称三相电路的计算;三相电路中的功率及其测量方法等。

7.1 三相电路的基本概念

电力系统的发电、输电及配电均采用三相制。动力用电及日常生活用电亦大多取自三相供电系统,三相供电系统又称为三相电路。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连接方式。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。

一、对称三相电源

1. 对称三相电压的产生

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。三相发电机的主要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 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。设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

$$u_A = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \varphi) \quad (7-1)$$

$$u_B = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \varphi - 120^\circ) \quad (7-2)$$

$$u_C = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \varphi - 240^\circ) = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \varphi + 120^\circ) \quad (7-3)$$

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

$$\dot{U}_A = U \angle \varphi, \quad \dot{U}_B = U \angle \varphi - 120^\circ, \quad \dot{U}_C = U \angle \varphi - 240^\circ = U \angle \varphi + 120^\circ \quad (7-4)$$

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。对称三相电压的相量模型及其电压波形如图 7-1 所示。

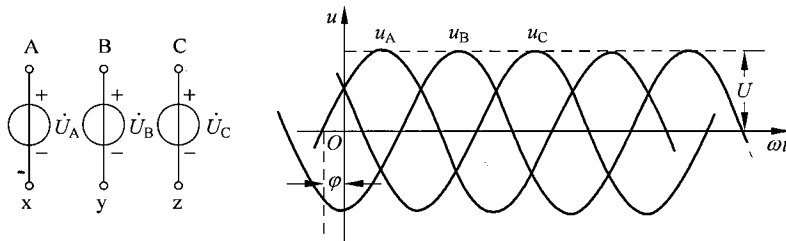


图 7-1 对称三相电压的相量模型及电压波形图

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

$$u_A + u_B + u_C = \sqrt{2}U[\sin(\omega t + \varphi) + \sin(\omega t + \varphi - 120^\circ) + \sin(\omega t + \varphi + 120^\circ)]$$

利用三角函数公式运算,可得

$$u_A + u_B + u_C = 0 \quad (7-5)$$

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

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0 \quad (7-6)$$

(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

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

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

$$\dot{U}_A = U \angle \varphi, \quad \dot{U}_B = \dot{U}_A \angle -120^\circ = a^2 \dot{U}_A$$

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

由于

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

故

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

(3) 三相电压被称为“对称”的条件是: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 7-2(a)所示。

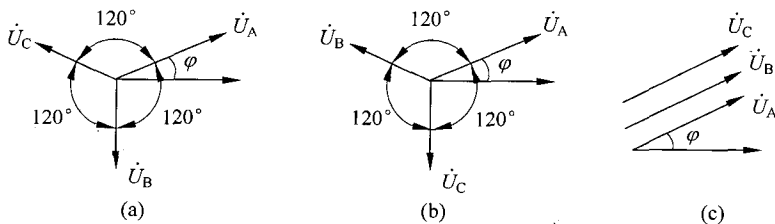


图 7-2 三种相序的电压相量图

实际的三相电源一般为正序电源。为便于用户识别,通常用黄、绿、红三种颜色分别表示 A、B、C 三相。

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

$$\dot{U}_A = U \angle \varphi, \quad \dot{U}_B = U \angle \varphi + 120^\circ, \quad \dot{U}_C = U \angle \varphi - 120^\circ$$

其相量图如图 7-2(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

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

其相量图如图 7-2(c)所示。

三、三相电路中电源和负载的连接方式

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,即 $Z_A = Z_B = Z_C = Z$ 时,称为对称三相负载,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”一词含义上的不同。

2. 三相电源及三相负载的连接方式

在三相电路中,三相电源和三相负载采用两种基本的连接方式,即星形连接(Y连接)和三角形连接(Δ连接)。这两种连接方式在结构和电气上的特性将在 7.2 节详细讨论。

7.2 三相电路的两种基本连接方式

一、三相电路的星形连接

1. 三相电源的星形连接

(1) 三相电源的星形连接方式

若把三相电源的三个末端 x, y, z 连在一起, 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(丫形)连接方式, 如图 7-3(a) 所示。若将三相电源的三个始端连在一起, 将三个末端引出, 亦可得到三相电源的星形连接方式, 如图 7-3(b) 所示。习惯上采用图 7-3(a) 的连接方式。星形连接的三相电源称为星形电源。

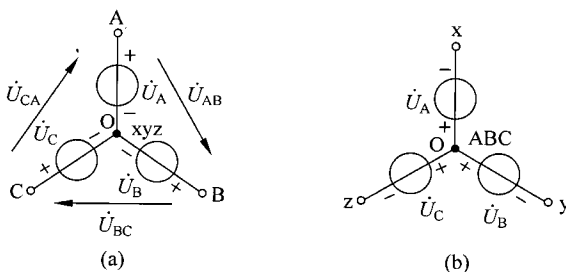


图 7-3 三相电源的星形连接

(2) 对称三相电源在星形连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 7-3(a) 中, $\dot{U}_A, \dot{U}_B$ 和 $\dot{U}_C$ 为相电压, $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}$ 和 $\dot{U}_{CA}$ 为线电压。下面分析对称三相电源在星形连接方式下线电压和相电压之间的关系。

在图 7-3(a) 中, 三个线电压分别为相应的两相电压之差, 即

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B, \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C, \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A$$

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

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B = U \angle 0^\circ - U \angle -120^\circ = \sqrt{3}U \angle 30^\circ = \sqrt{3} \dot{U}_A \angle 30^\circ \quad (7-8)$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C = U \angle -120^\circ - U \angle 120^\circ = \sqrt{3}U \angle -90^\circ = \sqrt{3} \dot{U}_B \angle 30^\circ \quad (7-9)$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A = U \angle 120^\circ - U \angle 0^\circ = \sqrt{3}U \angle 150^\circ = \sqrt{3} \dot{U}_C \angle 30^\circ \quad (7-10)$$

可做出相电压、线电压的相量图和位形图分别如图 7-4(a)、(b) 所示。

根据以上分析, 可得出如下的重要结论: 在星形连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。

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

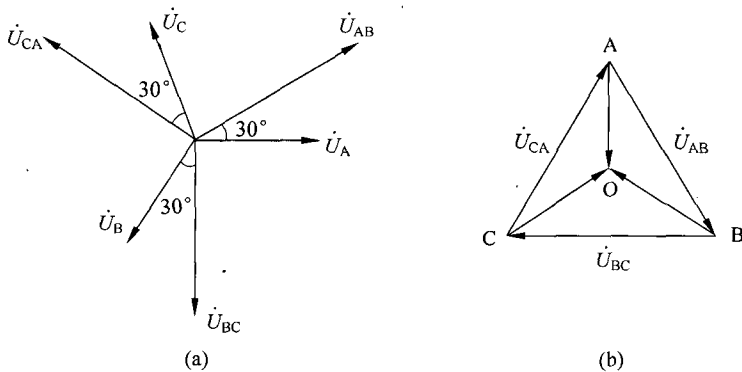


图 7-4 星形电源的电压相量图和位形图

$$U_l = \sqrt{3}U_{ph} \quad (7-11)$$

其中 U_l 表示线电压有效值(下标 l 为 line 的缩写), U_{ph} 表示相电压有效值(下标 ph 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 220V ,则线电压为 $\sqrt{3} \times 220 \approx 380\text{V}$ 。

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,当已知星形连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 若已知星形连接的对称三相电源 B 相的相电压为 $\dot{U}_B = 220\angle 45^\circ\text{V}$, 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

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

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

三个线电压为

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

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

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

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

2. 三相负载的星形连接

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' 引出并并联向电源,便得到三相负载的星形连接方式,如图 7-5 所示。星形连接的三个负载称为星形负载。

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

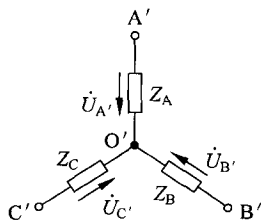


图 7-5 三相负载的星形连接

电压对称、线电压亦对称,且有关系式

$$\dot{U}_{A'B'} = \sqrt{3} \dot{U}_{A'} \angle 30^\circ \quad (7-12)$$

$$\dot{U}_{B'C'} = \sqrt{3} \dot{U}_{B'} \angle 30^\circ \quad (7-13)$$

$$\dot{U}_{C'A'} = \sqrt{3} \dot{U}_{C'} \angle 30^\circ \quad (7-14)$$

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,上述关系式亦不成立。

3. 星形连接的三相制

将星形电源和星形负载用导线连接起来,便得到星形连接的三相制,又称为星形三相电路。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'分别用导线相连,电源的中性点和负载的中性点也用导线连接起来,便构成了三相四线制,如图7-6所示。所谓“四线”是指电源和负载之间有四根连线。

下面结合图7-6,介绍三相电路中的一些常用术语。

通常把电源端点和负载端点间的连线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连线OO'称为中线。因中线大都接地,又称之为零线或地线。

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 $\dot{I}_O$ 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7-6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 U_l 、 I_l 等;把相电压、相电流称为相量,并用下标ph表示,如 U_{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。

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

若星形电路的两中性点O和O'之间不连导线,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7-7所示。

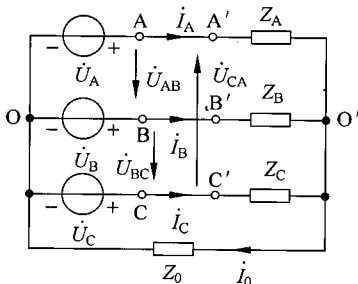


图 7-6 三相四线制电路

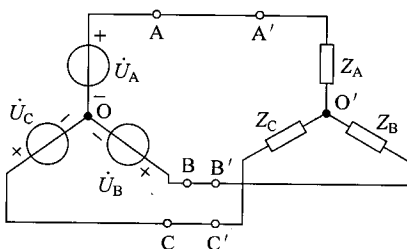


图 7-7 三相三线制星形电路

二、三相电路的三角形连接

1. 三相电源的三角形连接

若把三相电源的各相始、末端顺次相连,使三相电源构成一个闭合回路,并从各连接点

引出端线连向负载,如图 7-8 所示,便得到三相电源的三角形连接方式。三角形连接的三相电源简称为三角形电源。

在三角形电源中,由于每相电源跨接在各相的引出端之间,因此各线电压等于相应的相电压,这是三角形连接方式的一个重要特点。在各相电压对称的情况下,三角形闭合回路的电压相量之和为零,即 $\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0$ 。在作三相电源的三角形连接时,要特别注意避免某相电源始端、末端的顺序接错,否则因三相电压之和不为零,且绕组的阻抗很小,将造成烧毁发电机绕组的严重后果。关于这一情况,读者可自行分析。

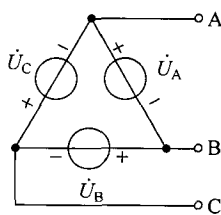


图 7-8

2. 三相负载的三角形连接

将三相负载分别跨接在火线之间,如图 7-9 所示,便得到三相负载的三角形连接方式。作三角形连接的三相负载简称为三角形负载。由图 7-9 可见,无论三相负载是否对称,线电压必定等于相电压。下面分析在对称的情况下(即给对称的三角形负载施加对称的三相电压),各线电流和相电流的关系。

根据图 7-9 所示的各电流参考方向,各线电流为相应的两相电流之差,即

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A'B'} - \dot{I}_{C'A'}, \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{B'C'} - \dot{I}_{A'B'}, \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{C'A'} - \dot{I}_{B'C'}$$

由于相电流是对称的,则三个相电流相量为

$$\dot{I}_{A'B'} = I \angle \varphi, \quad \dot{I}_{B'C'} = I \angle \varphi - 120^\circ, \quad \dot{I}_{C'A'} = I \angle \varphi + 120^\circ$$

于是各线电流为

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{A'B'} - \dot{I}_{C'A'} = I \angle \varphi - I \angle \varphi + 120^\circ \\ &= \sqrt{3} I \angle \varphi - 30^\circ = \sqrt{3} \dot{I}_{A'B'} \angle -30^\circ \end{aligned} \quad (7-15)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_B &= \dot{I}_{B'C'} - \dot{I}_{A'B'} = I \angle \varphi - 120^\circ - I \angle \varphi = \sqrt{3} I \angle \varphi - 150^\circ \\ &= \sqrt{3} \dot{I}_{B'C'} \angle -30^\circ \end{aligned} \quad (7-16)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_C &= \dot{I}_{C'A'} - \dot{I}_{B'C'} = I \angle \varphi + 120^\circ - I \angle \varphi - 120^\circ = \sqrt{3} I \angle \varphi + 90^\circ \\ &= \sqrt{3} \dot{I}_{C'A'} \angle -30^\circ \end{aligned} \quad (7-17)$$

可做出相电流和线电流的相量图如图 7-10 所示。

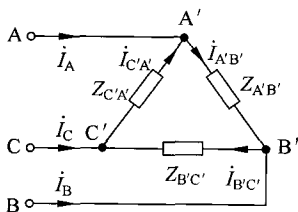


图 7-9 三相负载的三角形连接

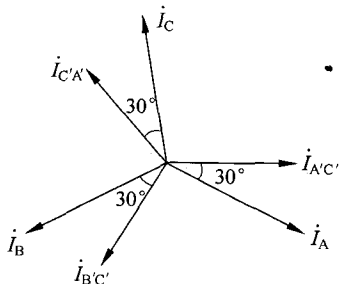


图 7-10 对称三角形负载的电流相量图

根据以上分析,可得出如下的重要结论:

在三角形连接的对称三相负载中,相电流对称,线电流亦对称,且线电流的有效值为相电流有效值的 $\sqrt{3}$ 倍,每一线电流均滞后于相应的相电流 30° 。

上述线电流和相电流有效值之间的关系可表示为

$$I_l = \sqrt{3} I_{ph} \quad (7-18)$$

式(7-18)的结论也适用于对称的三角形电源。

读者不难看到,在对称的情况下,三角形连接时线电流、相电流之间的关系与星形连接时线电压、相电压之间的关系是极为相似的,即线量的有效值均是相量有效值的 $\sqrt{3}$ 倍,线量和相量的相位差都是 30° 。但要注意,在星形连接方式中,线电压相位上超前于相应的相电压 30° ;而在三角形连接方式中,线电流相位上滞后于相应的相电流 30° 。

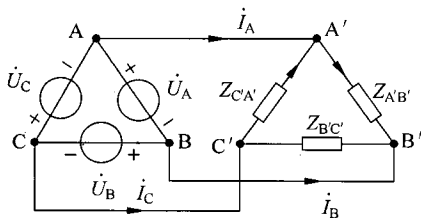


图 7-11 三角形连接的三相制

3. 三角形连接的三相制

若将三角形电源和三角形负载用导线相连接,便得到三角形连接的三相制,称为三角形三相电路,简称三角形电路。三角形电路只有三相三线制一种情况,如图 7-11 所示。

练习题

7-1 星形连接的对称三相电源如图 7-12 所示,若 $\dot{U}_{CB} = 380 \angle 60^\circ \text{V}$,求各相电源电压相量 $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ 及线电压 $\dot{U}_{AB}$ 、 $\dot{U}_{CA}$ 。

7-2 三相对称负载接成三角形,如图 7-13 所示,设 $\dot{I}_{ac} = 3.6 \angle -135^\circ \text{A}$,求各电流相量 $\dot{I}_{ab}$ 、 $\dot{I}_{bc}$ 、 $\dot{I}_A$ 、 $\dot{I}_B$ 和 $\dot{I}_C$ 。

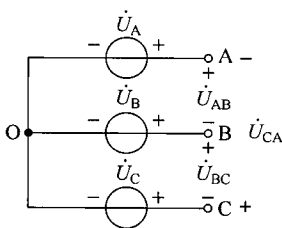


图 7-12 练习题 7-1 电路

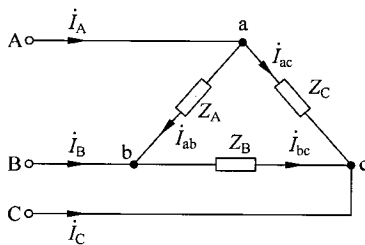


图 7-13 练习题 7-2 电路

7-3 三相对称电源连接成三角形,若 B 相电源反接,试画出此种情况下的电压相量图,并说明由此而产生的危害。

7.3 对称三相电路的计算

我们把电源和负载均对称以及各相线路阻抗均相同的三相电路称为对称三相电路;反之,只要电源、负载或线路阻抗中有一个不对称,便为不对称三相电路。这里要重申对称的

定义。所谓三相电源对称(正序、负序)指的是各相电源电压的有效值相等、频率相同、彼此间的相位互差 120° ; 三相负载对称指的是各相负载的阻抗相同。在实际中, 三相电源一般都是对称电源。因此, 不再考虑电源不对称的情况, 这样, 一个三相电路是否对称便取决于负载及线路阻抗是否对称了。

无论是从电气性能的角度还是从计算方法的角度看, 对称三相电路都有其特殊之处。特别重要的是, 计算对称三相电路时, 可采用简便的计算方法, 即把三相电路化为单相电路计算。下面分不同的情况讨论这种方法的应用。

一、对称星形三相电路的计算

1. 对称星形三相电路计算方法的讨论

前已指出, 对称星形三相电路有两种情形, 即三相四线制电路和三相三线制电路。下面先讨论图 7-14 所示的三相四线制电路。图中 Z_l 为线路阻抗, Z_0 为中线阻抗。采用节点法求解。

以 O 点为参考点, 可列得节点方程为

$$\left(\frac{1}{Z_l + Z} + \frac{1}{Z_l + Z} + \frac{1}{Z_l + Z} + \frac{1}{Z_0} \right) \dot{U}_{O'} = \frac{\dot{U}_A}{Z_l + Z} + \frac{\dot{U}_B}{Z_l + Z} + \frac{\dot{U}_C}{Z_l + Z}$$

可解得

$$\dot{U}_{O'} = \frac{\frac{1}{Z_l + Z} (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C)}{\frac{3}{Z_l + Z} + \frac{1}{Z_0}}$$

因三相电源对称, 便有 $\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0$, 于是

$$\dot{U}_{O'} = 0$$

这表明电路的两个中性点 O 和 O' 为等位点, 中线中的电流为零, 中线的存在与否对电路的状态不产生任何影响。因此, 在对称的情况下, 三相四线制电路和三相三线制电路是等同的。

按等位点的性质, 在三相三线制电路中, O 、 O' 两点间可用一根无阻导线相连; 在三相四线制电路中, 可把阻抗为 Z_0 的中线换为阻抗为零的导线。这样, 星形三相电路的各相均为一独立的回路, 从而可分别计算; 又因为各相电压、电流均是对称的, 则在求得某相的电压和电流后, 便可依对称关系推导出其余两相的电压、电流。因此, 三相电路的计算可归结为单相电路的计算。比如, 可先计算对应于 A 相的单相电路, 求得 A 相的电压、电流后, 再推出 B 、 C 两相的电压、电流。

2. 对称星形三相电路的计算步骤

(1) 任选一相进行计算, 做出对应于该相的单相电路。应注意的是, 中线阻抗不应出现在单相电路中。

(2) 求解单相电路。

(3) 根据单相电路的计算结果, 按对称关系导出另两相的电压、电流。

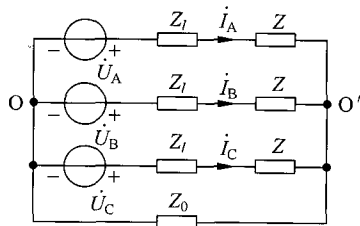


图 7-14 对称星形三相四线制电路

例 7-2 设图 7-14 中各相电压的有效值为 220V , $Z = (15 + \text{j}8)\Omega$, $Z_l = (3 + \text{j}4)\Omega$, 求各相电流及负载电压相量。

解 (1) 抽取 A 相进行计算。做出对应于 A 相的单相电路, 如图 7-15 所示。

(2) 设 $\dot{U}_A = 220\angle 0^\circ\text{V}$, 则可求得 A 相电流为

$$\begin{aligned}\dot{I}_A &= \frac{\dot{U}_A}{Z + Z_l} = \frac{220\angle 0^\circ}{18 + \text{j}12} = \frac{220\angle 0^\circ}{21.63\angle 33.7^\circ} \\ &= 10.17\angle -33.7^\circ\text{A}\end{aligned}$$

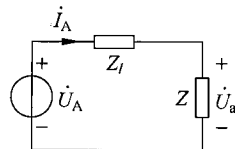


图 7-15 例 7-2 计算用图

A 相负载电压为

$$\begin{aligned}\dot{U}_a &= \dot{I}_A Z = 10.17\angle -33.7^\circ \times (15 + \text{j}8) \\ &= 10.17\angle -33.7^\circ \times 17\angle 28.1^\circ = 172.89\angle -5.6^\circ\text{V}\end{aligned}$$

(3) 由 A 相的计算结果, 推得 B、C 两相的电流及负载电压为

$$\begin{aligned}\dot{I}_B &= \dot{I}_A \angle -120^\circ = 10.17\angle -33.7^\circ - 120^\circ = 10.17\angle -153.7^\circ\text{A} \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_A \angle 120^\circ = 10.17\angle -33.7^\circ + 120^\circ = 10.17\angle 86.3^\circ\text{A} \\ \dot{U}_b &= \dot{U}_a \angle -120^\circ = 172.89\angle -5.6^\circ - 120^\circ = 172.89\angle -125.6^\circ\text{V} \\ \dot{U}_c &= \dot{U}_a \angle 120^\circ = 172.89\angle -5.6^\circ + 120^\circ = 172.89\angle 114.4^\circ\text{V}\end{aligned}$$

二、对称三角形三相电路的计算

简单的对称三角形三相电路有两种情况, 现分别讨论它们的计算方法。

1. 线路阻抗为零的对称三角形三相电路

和这一情况对应的电路如图 7-16 所示。

由图 7-16 可见, 电源电压直接加在负载上, 即每一相负载承受的是对应于该相的电源相电压。显然, 这种电路也可化为单相电路计算, 具体的计算步骤为

- (1) 任取某相进行计算, 求出该相的负载相电流;
- (2) 由上面求出的某相负载相电流推出另两相的负载相电流及各线电流。

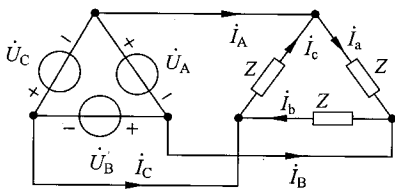


图 7-16 线路阻抗为零的三角形电路

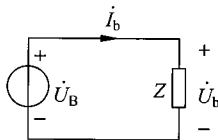


图 7-17 例 7-3 计算用图

例 7-3 在图 7-16 所示的电路中, 已知 $\dot{U}_A = 380\angle 30^\circ\text{V}$, $Z = (3 - \text{j}4)\Omega$, 求各相负载电流及各线电流。

解 (1) 取 B 相计算, 则 B 相电源电压为

$$\dot{U}_B = \dot{U}_A \angle -120^\circ = 380\angle 30^\circ - 120^\circ = 380\angle -90^\circ\text{V}$$

做出对应于 B 相的单相电路如图 7-17 所示。要注意这一单相电路中的电流是 B 相负载中的电流, 而不是线电流 $\dot{I}_B$ 。可求得