

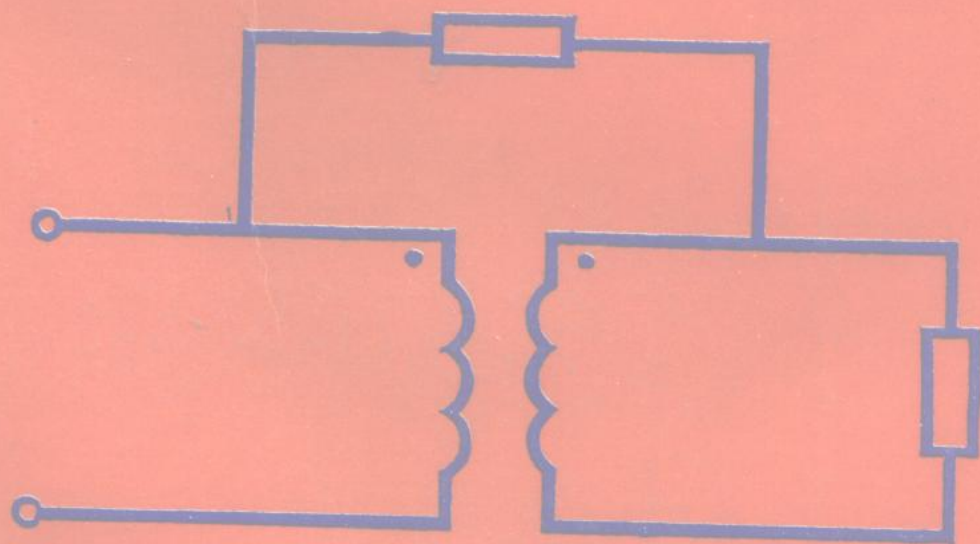
基本电路理论

JIBEN DIANLU LILUN

(修订本)

下册

主编 王 菡



基本电路理论

(修订本)

下册

上海交通大学

TN7
W11
(1.1)2

上海交通大学出版社

375305

基本电路理论

(修订版)

下 册

主编 王 蔼



上海交通大学出版社

内 容 简 介

本书分上、下两册，本下册内容共有七章，分别阐述了三相电路、非正弦周期信号作用下电路的稳态分析、拉普拉斯变换、网络函数、双口网络、状态变量法、非线性动态电路等。书中各章列举了相应的实例分析并都附有一定数量的习题，对掌握各章节的内容有很强的针对性。书末附有习题的参考答案。

本书可作为普通高校电类专业电路课程的教材，也可供夜大学、职工大学等成人高校电类专业的学生、自学者和有关科技人员参考。

DV60/3604



(沪)新登字205号 **基本电路理论(下)**
(修订版)

出版：上海交通大学出版社

(上海市华山路 1954 号 · 200030)

字数：371000

发行：新华书店上海发行所

版次：1994 年 3 月 第 1 版

印刷：常熟市印刷二厂

印次：1994 年 4 月 第 1 次

开本：787 × 1092 (毫米) 1/16

印数：6800

印张：15

科目：298.310

ISBN7-313-01223-3/TN·7

定价：10.00 元

目 录

第十章 三相电路

§ 10.1 三相电路的基本概念	1	形连接的对称三相电路	9
§ 10.2 三相电路的连接方式	3	10.3.4 复杂的对称三相电路	11
10.2.1 星形连接	3	§ 10.4 不对称三相电路的计算	13
10.2.2 三角形连接	4	§ 10.5 三相电路的功率	16
§ 10.3 对称三相电路的计算	6	10.5.1 三相电路的平均功率和无功 功率	16
10.3.1 星形-星形连接的对称三相 电路	6	10.5.2 三相电路的瞬时功率	17
10.3.2 星形-三角形连接的对称三相 电路	7	10.5.3 三相电路功率的测量	18
10.3.3 三角形-星形连接或三角形-三角 形连接的对称三相电路	9	习题	21

第十一章 非正弦周期信号作用下电路的稳态分析

§ 11.1 非正弦周期信号的三角级数 展开	26	§ 11.5 非正弦周期信号作用下电路 中的功率	41
§ 11.2 非正弦周期信号的频谱	32	§ 11.6 在非正弦周期电压和电流 作用下电路的谐振	45
§ 11.3 非正弦周期信号的有效值、 平均值	36	§ 11.7 对称三相电路中的高次 谐波	50
§ 11.4 非正弦周期信号激励下线性 定常电路的稳态响应	38	习题	54

第十二章 拉普拉斯变换

§ 12.1 拉氏变换的定义	59	§ 12.5 电路基本规律的复频域 形式	79
§ 12.2 拉氏变换的基本性质	62	12.5.1 基尔霍夫定律的复频域形式	79
12.2.1 唯一性	62	12.5.2 电阻器特性方程的复频域 形式	79
12.2.2 线性	62	12.5.3 电容器特性方程的复频域 形式	79
12.2.3 微分规则	63	12.5.4 电感器特性方程的复频域 形式	80
12.2.4 积分规则	65	12.5.5 耦合电感器特性方程的复频域 形式	81
12.2.5 时域平移(延时)性质	65	12.5.6 复频域等效网络	82
12.2.6 复频域平移性质	67	12.5.7 复频域阻抗和复频域导纳	85
12.2.7 初值定理	67	§ 12.6 冲激响应、零状态响应和卷积	
12.2.8 终值定理	68		
§ 12.3 拉氏反变换	68		
12.3.1 部分分式展开法	69		
12.3.2 用留数定理求拉氏反变换	73		
§ 12.4 积分微分方程的拉氏变换	74		

定理	88
§ 12.7 复频域分析的一般方法	90
12.7.1 稀疏表格分析法	91
12.7.2 改进的节点分析法	93
§ 12.8 网络定理在复频域分析中的应用	96
12.8.1 戴维宁定理和诺顿定理在复频域分析中的应用	96

12.8.2 互易定理在复频域分析中的应用	99
§ 12.9 固有频率	101
12.9.1 固有频率的定义	101
12.9.2 网络方程和网络固有频率	102
12.9.3 零固有频率	105
12.9.4 网络固有频率和网络变量固有频率	108
习题	110

第十三章 网络函数

§ 13.1 网络函数的定义和分类	116
§ 13.2 网络函数的零点、极点和网络函数的图解求值	118
13.2.1 网络函数的零点和极点	118
13.2.2 网络函数的图解求值	120
§ 13.3 网络函数和冲激响应	122
§ 13.4 网络函数的频率特性	126

13.4.1 一阶网络函数的频率特性	126
13.4.2 二阶网络函数的频率特性	129
§ 13.5 网络函数的零点对频率特性和冲激响应的影响	135
§ 13.6 RC 有源滤波器	136
习题	138

第十四章 双口网络

§ 14.1 多口网络和双口网络	143
§ 14.2 双口网络不含独立电源时的方程及其参数	143
14.2.1 含短路导纳参数的双口方程	146
14.2.2 含开路阻抗参数的双口方程	148
14.2.3 含混合参数的双口方程	149
14.2.4 含传输参数的双口方程	151
§ 14.3 双口网络各参数间的换算关系和互易性判据	153
§ 14.4 双口网络的相互连接	157

14.4.1 并联连接	158
14.4.2 串联连接	159
14.4.3 串-并联和并-串联连接	161
14.4.4 级联连接	161
§ 14.5 具有端接的双口网络	164
§ 14.6 双口网络含独立电源时的方程	166
§ 14.7 双口网络的等效电路	168
习题	170

第十五章 状态变量法

§ 15.1 概述	175
§ 15.2 状态和状态变量	176
§ 15.3 状态方程的列写方法	178
15.3.1 视察法	178
15.3.2 系统法	182
15.3.3 抽出法	188
§ 15.4 状态方程的解法	191

15.4.1 时域解法	191
15.4.2 复频域解法(拉氏变换法)	197
§ 15.5 冲激响应矩阵与网络函数矩阵的关系以及矩阵 A 的特征值与网络固有频率的关系	199
习题	202

第十六章 非线性动态电路

§ 16.1 非线性动态电路状态方程的 列写	206	线性化法	217
§ 16.2 分析非线性动态电路的相 平面法	211	§ 16.4 非线性动态电路的小信号 分析	221
§ 16.3 分析非线性动态电路的分段		习题	223
习题答案	226		

第十章 三相电路

因为电能易于生产、输送和使用,所以它已成为人类利用最多的一种能量。对电能消费的多少已经是衡量一个社会的物质文明高低的主要标准。电能的生产、输送和分配是靠电力系统实现的。目前世界上各个国家的电力系统主要是采用三相制(三相系统)。无论从发电、输电和配电来说,采用三相制比采用单相制能取得更高的效益。按照电路理论的观点,采用三相制的电力系统不过是一个三相电路。因为三相制有特定的连接方式,使得三相电路具有某些特殊性,对这些特殊性每个电气工程师都应有所了解。本章先陈述一些有关三相电路的概念,再论及对称三相电路和不对称三相电路的分析方法,最后研究三相电路的功率及其测量方法。本章对三相电路的讨论是在该电路已处于正弦稳态的前提下进行的,这样我们便可使用前面所讲的相量法。三相电路的非正弦稳态分析将在下一章简要提及。至于在正弦信号激励下三相电路全响应的求法我们不作任何讨论,因为三相电路充其量是一复杂电路,而复杂电路中全响应的求法已在前面几章中陈述过了。

§ 10.1 三相电路的基本概念

三相电路是由三相电源供电的电路。三相电源能产生三个频率相同而相位互异的随时间按正弦变化的电动势。如果三个电动势的振幅相等、相位依次相差 120° , 则称为对称三相电动势。产生对称三相电动势且各相阻抗相等的电源称为对称三相电源, 三相发电机是一种应用最普遍的三相电源, 它的原理简要介绍如下。图 10.1a 是三相发电机的示意图。在发电机的定子上嵌有三个绕组 AX 、 BY 及 CZ , 分别称为 A 相、 B 相及 C 相绕组。 A 、 B 、 C 端是各绕组的始端, X 、 Y 、 Z 端是各绕组的末端。各绕组的形状及匝数相同, 在定子上彼此相隔 120° 。发电机的转子是一对磁极, 当它按图示方向以角速度 ω 旋转时, 能在各个绕组中感应出正弦波形的电动势。我们以 e_A 、 e_B 、 e_C 分别表示 A 相、 B 相、 C 相的电动势, 并将三相电动势看成是三个

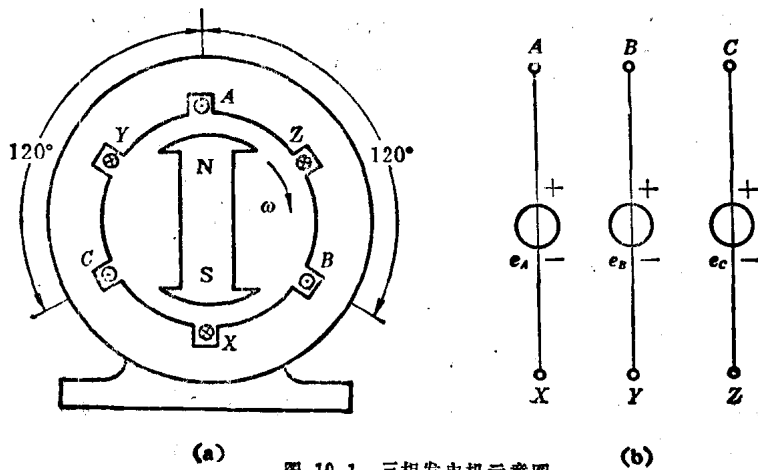


图 10.1 三相发电机示意图

理想电压源,如图 10.1b 所示。各电动势的参考极性是绕组始端为正,绕组末端为负。由于同一磁极(例如 N 极)经过 A、B、C 处的时间依次相差 1/3 周期,所以 e_A 、 e_B 、 e_C 的相位依次相差 120° 。又因各绕组的形状及匝数相同,所以各电动势的振幅 E_m 相同。由此可知 e_A 、 e_B 、 e_C 是一组对称三相电动势,它们的表达式为:

$$\left. \begin{aligned} e_A(t) &= E_m \sin(\omega t + \psi), \\ e_B(t) &= E_m \sin(\omega t + \psi - 120^\circ), \\ e_C(t) &= E_m \sin(\omega t + \psi - 240^\circ). \end{aligned} \right\} \quad (10.1)$$

相应的相量表达式为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_A &= E/\psi, \\ \dot{E}_B &= E/\psi - 120^\circ, \\ \dot{E}_C &= E/\psi - 240^\circ. \end{aligned} \right\} \quad (10.2)$$

上式中 $E = E_m/\sqrt{2}$, 为电动势的有效值。各相电动势的波形图及相量图分别如图 10.2a 及图 10.2b 所示。根据式 10.1 及 10.2 可分别求得:

$$e_A(t) + e_B(t) + e_C(t) = 0, \quad (10.3)$$

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0. \quad (10.4)$$

以上二式表明,如果三相电动势是对称的,则各相电动势的瞬时值之和等于零,各相电动势对应的相量之和也必然等于零。

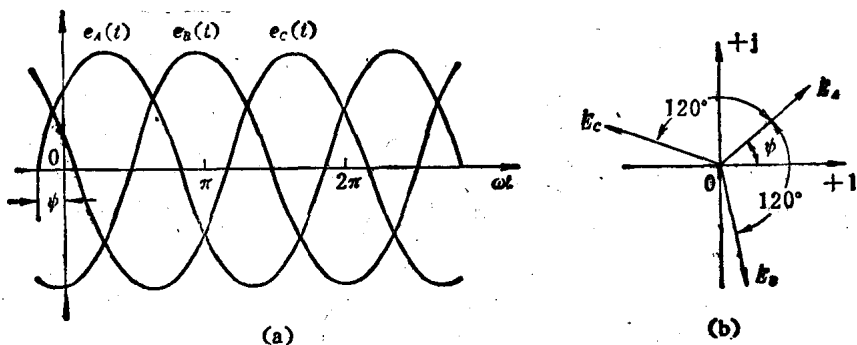


图 10.2 对称三相电动势的波形图及相量图

在应用相量法分析三相电路时,为了方便,可引入复因数 α 。我们定义

$$\alpha = /120^\circ = /-240^\circ = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

根据复数运算规则可得

$$\alpha^2 = /240^\circ = /-120^\circ = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2},$$

$$\alpha^3 = /0^\circ = 1.$$

α 、 α^2 及 1 是 $\sqrt[3]{1}$ 的三个根,显然

$$\alpha + \alpha^2 + 1 = 0.$$

以 α 乘某一相量,相当于在复平面上将此相量逆时针旋转 120° 。以 α^2 乘某一相量,相当于在复平面上将此相量顺时针旋转 120° 。引入复因数 α 后,可以根据对称三相电动势中的某一相电动势来表示其他两相电动势。例如根据 \dot{E}_A ,可写出 $\dot{E}_B = \alpha^2 \dot{E}_A$, $\dot{E}_C = \alpha \dot{E}_A$ 。

在三相电动势中，各相电动势经过同一量值(例如极大值)的先后次序称为三相电动势的相序。以上所述的三相电动势的相序为 $A-B-C$ (也可看成是 $B-C-A$ 或 $C-A-B$)，称为正序或顺序。如果图 10.1a 所示的三相发电机转子的旋转方向与图中表明的方向相反，则相序为 $A-C-B$ (也可看成是 $C-B-A$ 或 $B-A-C$)，称为负序或逆序。对于三相电动势的相序，以后如不加说明，就认为是正序。

在三相电路中，负载一般也是三相的，即由三个部分所组成，每一部分称为负载的一个相。如果三相负载的各相阻抗值相同，则称为对称三相负载。例如三相电动机就是一种对称三相负载。三相负载也可由三个单相负载(如电灯或电炉等)组成。

§ 10.2 三相电路的连接方式

在三相电路中，三相电源及三相负载都有两种连接方式：星形连接和三角形连接。

10.2.1 星形连接

在图 10.3 所示的三相电路中，三相电压源及三相负载都是星形连接的。各相电压源的正极性端连接在一起，称为三相电源的中点或零点，用 N 表示。各相电压源的正极性端 A, B, C 引出，以便与负载相连。这就是星形连接方式，或称 Y 形连接方式。三相负载 Z_A, Z_B, Z_C 也是星形连接的。各相负载的一端连接在一起，称为负载的中点或零点，用 N' 表示。各相负载的另一端 A', B', C' 引出后与电源连接。电源与负载相应各相的连接线 AA', BB', CC' 称为端线。电源中点与负载中点的连线 NN' 称为中线或零线。具有三根端线及一根中线的三相电路称为三相四线制电路；如果只接三根端线而不接中线，则称为三相三线制电路。

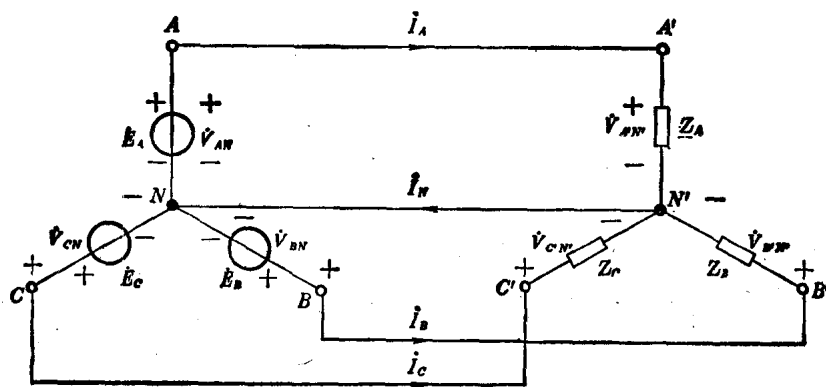


图 10.3 电源与负载均为星形连接的三相电路

在三相电路中，电源或负载各相的电压称为相电压。例如 $\vec{V}_{AN}, \vec{V}_{BN}, \vec{V}_{CN}$ 为电源相电压， $\vec{V}_{A'N'}, \vec{V}_{B'N'}, \vec{V}_{C'N'}$ 为负载相电压。端线之间的电压称为线电压。例如 $\vec{V}_{AB}, \vec{V}_{BC}, \vec{V}_{CA}$ 是电源的线电压， $\vec{V}_{A'B'}, \vec{V}_{B'C'}, \vec{V}_{C'A'}$ 是负载的线电压。流过电源或负载各相的电流称为相电流。流过各端线的电流称为线电流，流过中线的电流称为中线电流。

当电源或负载为星形连接时，线电压等于两个相应的相电压之差，例如在电源侧，各线电压为

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{AB} &= \dot{V}_{AN} - \dot{V}_{BN}, \\ \dot{V}_{BC} &= \dot{V}_{BN} - \dot{V}_{CN}, \\ \dot{V}_{CA} &= \dot{V}_{CN} - \dot{V}_{AN}. \end{aligned} \right\} \quad (10.5)$$

如果相电压是三相对称的, 即 $\dot{V}_{BN} = a^2 \dot{V}_{AN}$, $\dot{V}_{CN} = a \dot{V}_{AN}$, $\dot{V}_{AN} = a^2 \dot{V}_{CN}$ 则式 10.5 成为

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{AB} &= \dot{V}_{AN} - a^2 \dot{V}_{AN} = \sqrt{3} / 30^\circ \dot{V}_{AN}, \\ \dot{V}_{BC} &= \dot{V}_{BN} - a \dot{V}_{BN} = \sqrt{3} / 30^\circ \dot{V}_{BN}, \\ \dot{V}_{CA} &= \dot{V}_{CN} - a^2 \dot{V}_{CN} = \sqrt{3} / 30^\circ \dot{V}_{CN}. \end{aligned} \right\} \quad (10.6)$$

线电压与相电压的相量图如图 10.4a 或图 10.4b 所示。由于在复平面上相量可以平移, 所以这两种表示方法是一致的。由式 10.6 及相量图可见, 如果相电压是三相对称的, 则线电压也是三相对称的。线电压的振幅是相电压振幅的 $\sqrt{3}$ 倍, 也就是

$$V_{lm} = \sqrt{3} V_{pm}. \quad (10.7)$$

式中 V_{lm} 和 V_{pm} 分别表示线电压及相电压的振幅。在相位关系上, \dot{V}_{AB} 、 \dot{V}_{BC} 、 \dot{V}_{CA} 的相位分别超前于 \dot{V}_{AN} 、 \dot{V}_{BN} 、 \dot{V}_{CN} 的相位 30° 。以上分析对于星形连接的负载也是适用的, 因此不再另行讨论。

对于星形连接的电源或负载, 线电流等于相应的相电流, 例如 \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 和 \dot{I}_C 既是相电流, 又是线电流。

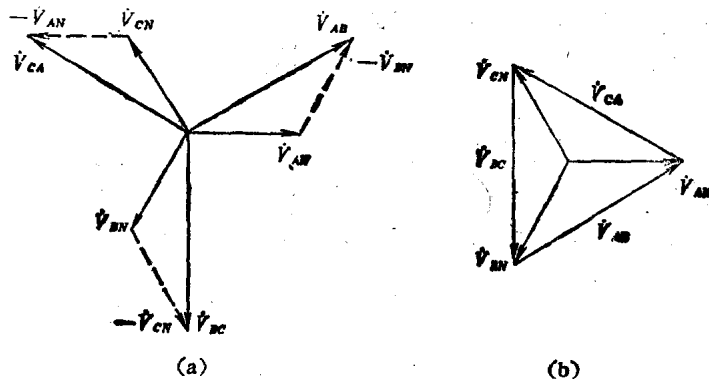


图 10.4 星形连接三相电源电压和相电压的相量图

10.2.2 三角形连接

在图 10.5 所示的三相电路中, 对称三相电压源是依次相连的, 相位超前的电压源的负极性端与相位滞后的电压源的正极性端相连, 也就是 Z 与 A 、 X 与 B 、 Y 与 C 分别连接。三相电压源形成回路, 然后从三个连接点引出端线, 这就是三角形连接方式, 也可称为 Δ 连接方式。

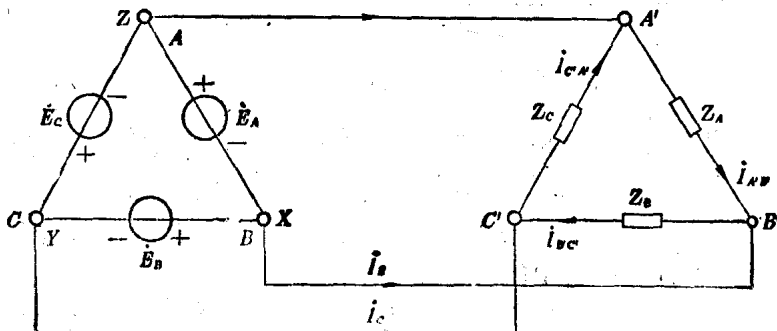


图 10.5 电源及负载均为三角形连接的三相电路

此电路中三相负载也是三角形连接的。因为三角形连接方式没有中点，电源与负载之间只有三根端线相连接，不可能有中线，所以是三相三线制电路。

当采用三角形连接方式时，线电流等于两个相应的相电流之差。例如在负载侧，线电流

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{A'B'} - \dot{I}_{C'A'} \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{B'C'} - \dot{I}_{A'B'} \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{C'A'} - \dot{I}_{B'C'} \end{aligned} \right\} \quad (10.8)$$

如果相电流是三相对称的，即 $\dot{I}_{C'A'} = \alpha \dot{I}_{A'B'}$, $\dot{I}_{A'B'} = \alpha \dot{I}_{B'C'}$, $\dot{I}_{B'C'} = \alpha \dot{I}_{C'A'}$ ，则

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= (1 - \alpha) \dot{I}_{A'B'} = \sqrt{3} / -30^\circ \dot{I}_{A'B'} \\ \dot{I}_B &= (1 - \alpha) \dot{I}_{B'C'} = \sqrt{3} / -30^\circ \dot{I}_{B'C'} \\ \dot{I}_C &= (1 - \alpha) \dot{I}_{C'A'} = \sqrt{3} / -30^\circ \dot{I}_{C'A'} \end{aligned} \right\} \quad (10.9)$$

线电流与相电流的相量图如图 10.6a 或图 10.6b 所示。此时线电流也是三相对称的。线电流的振幅 I_{lm} 是相电流振幅 I_{pm} 的 $\sqrt{3}$ 倍，即

$$I_{lm} = \sqrt{3} I_{pm} \quad (10.10)$$

线电流 \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C 的相位分别滞后于相电流 \dot{I}_{AB} 、 \dot{I}_{BC} 、 \dot{I}_{CA} 的相位 30° 。对于三角形连接的电源，线电流与相电流的关系与上述分析结果类似，读者可自行分析。

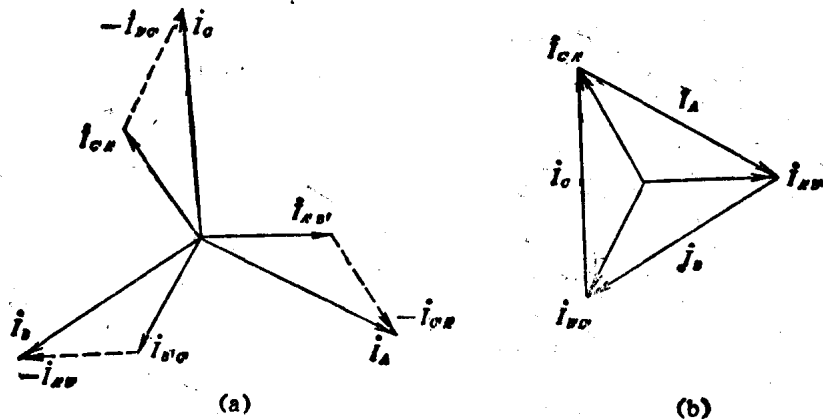


图 10.6 三角形连接负载的线电流和相电流的相量图

对于采用三角形连接方式的三相电源或三相负载，线电压等于相应的相电压。例如在电源侧，线电压 \dot{V}_{AB} 、 \dot{V}_{BC} 、 \dot{V}_{CA} 也是电压源的相电压。

应该指出，如果将对称三相电压源按三角形方式连接时，必须按图 10.5 所示的正确方法连接。这样，由三相电压源组成的回路中，电动势之和 $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$ 。在不接负载时回路中的电流等于零，即电源内部不会有环行电流。如果连接方式不正确，例如误将 \dot{E}_A 反接（见图 10.7a），则回路中电动势之和

$$-\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = -2\dot{E}_A$$

相应的相量图如图 10.7b 所示。由于电源内部的阻抗（图中未标出）是很小的，所以在电动势作用下，电源内部将产生很大的环行电流，会使电源（例如发电机）损坏，这是必须避免的。

上面讨论了电源与负载均作星形连接（简称星形-星形连接）及电源与负载均作三角形连接（简称三角形-三角形连接）的两种三相电路。还可以有电源作星形连接、负载作三角形连接（简称星形-三角形连接）的三相电路及电源作三角形连接、负载作星形连接（简称三角形-星形

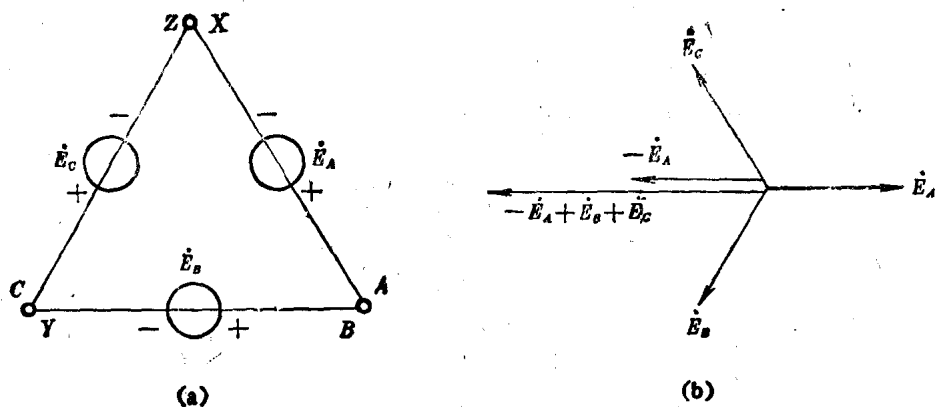


图 10.7 接法有误的三角形连接三相电源

连接)的三相电路。这两种电路是三相三线制的。星形连接一侧或三角形连接一侧的线电压与相电压之间的关系及线电流与相电流之间的关系可以分别进行分析。上面分析所得的结论仍适用。

§ 10.3 对称三相电路的计算

对称三相电路是由对称三相电源、对称三相负载及对称三相线路组成的电路。对称三相电源及对称三相负载的概念前面已经介绍。三相线路就是指三相端线，如果各端线阻抗也相等，则称为对称三相线路。在对称三相电路中如果有中线，它的阻抗不必与端线的阻抗相等。

10.3.1 星形-星形连接的对称三相电路

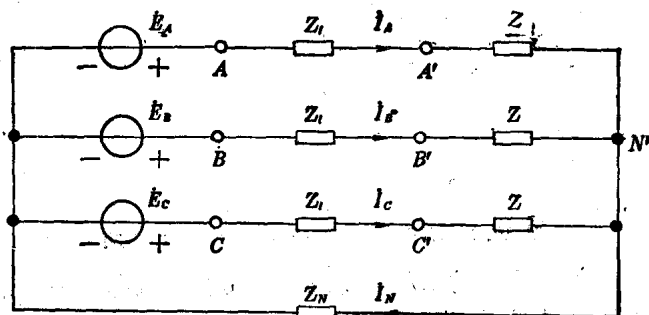


图 10.8 星形-星形连接的对称三相电路

在图 10.8 所示的星形-星形连接对称三相电路中， Z 为负载阻抗， Z_l 为线路阻抗， Z_N 为中线阻抗。根据节点分析可得

$$\left(\frac{3}{Z_l + Z} + \frac{1}{Z_N}\right) \dot{V}_{N'N} = \frac{\dot{E}_A}{Z_l + Z} + \frac{\dot{E}_B}{Z_l + Z} + \frac{\dot{E}_C}{Z_l + Z},$$

即

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

因为电源是三相对称的， $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$ ，所以 $\dot{V}_{N'N} = 0$ ， N' 与 N 点等电位。这样，我们可求得

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{\dot{E}_A}{Z + Z_l}, \\ \dot{I}_B &= \frac{\dot{E}_B}{Z + Z_l} = \frac{\alpha^2 \dot{E}_A}{Z + Z_l} = \alpha^2 \dot{I}_A, \\ \dot{I}_C &= \frac{\dot{E}_C}{Z + Z_l} = \frac{\alpha \dot{E}_A}{Z + Z_l} = \alpha \dot{I}_A, \end{aligned} \right\} \quad (10.11)$$

$$\dot{I}_N = \frac{\dot{V}_{N'N}}{Z_N} = 0; \quad (10.12)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{A'N'} &= \dot{I}_A Z, \\ \dot{V}_{B'N'} &= \dot{I}_B Z = \alpha^2 \dot{I}_A Z, \\ \dot{V}_{C'N'} &= \dot{I}_C Z = \alpha \dot{I}_A Z. \end{aligned} \right\} \quad (10.13)$$

根据以上分析,可得出下面几点结论:

1. 由于 $\dot{V}_{N'N} = 0$, $\dot{I}_N = 0$, 因此中线存在与否及中线阻抗的大小对于电路的计算是没有影响的。

2. 因为 $\dot{V}_{N'N} = 0$, 所以各相的计算具有独立性。我们可画出一相(例如A相)的计算电路如图 10.9 所示。在此电路中必须将 N' 点与 N 点短接, 中线阻抗 Z_N 不能列入。根据此电路可求出一相中的电流及各元件电压。

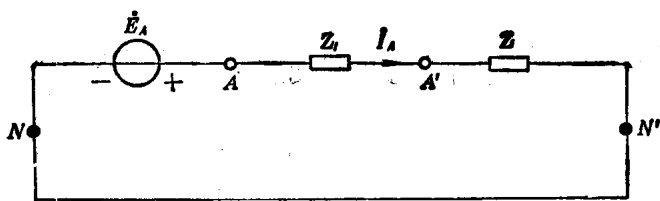


图 10.9 A相计算电路

3. 由式 10.11 及 10.13 可见, 在对称三相电路中, 三相电流 \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C 及负载三相电压 $\dot{V}_{A'N'}$ 、 $\dot{V}_{B'N'}$ 、 $\dot{V}_{C'N'}$ 等都是三相对称的。因此在求得一相的电流及一相中各元件的电压后, 另外两相的电流及各元件电压可直接写出。

10.3.2 星形-三角形连接的对称三相电路

对于图 10.10a 所示的星形-三角形连接的对称三相电路, 为了便于求解, 可将三角形连接的对称负载变换为等效的星形连接的对称负载(见图 10.10b)。如三角形连接的负载每相阻抗为 Z , 则星形连接的等效负载每相阻抗 $Z' = \frac{1}{3}Z$ 。负载变换为星形连接后, 我们可以应用前述求解星形-星形连接对称三相电路的方法求出 \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C , 并求出负载侧的线电压 $\dot{V}_{A'B'}$ 、 $\dot{V}_{B'C'}$ 、 $\dot{V}_{C'A'}$ 。这样, 三角形连接负载的相电压及相电流就容易求得了。

例 10.1 在图 10.10a 所示的对称三相电路中, $\dot{E}_A = 220/0^\circ \text{ V}$, $Z = 15 + j12 \Omega$, $Z_l = 1 + j1 \Omega$ 。试求负载的线电压、线电流、相电压与相电流。

解 将三角形连接的负载变换为星形连接的等效负载(如图 10.10b 所示)。星形连接的

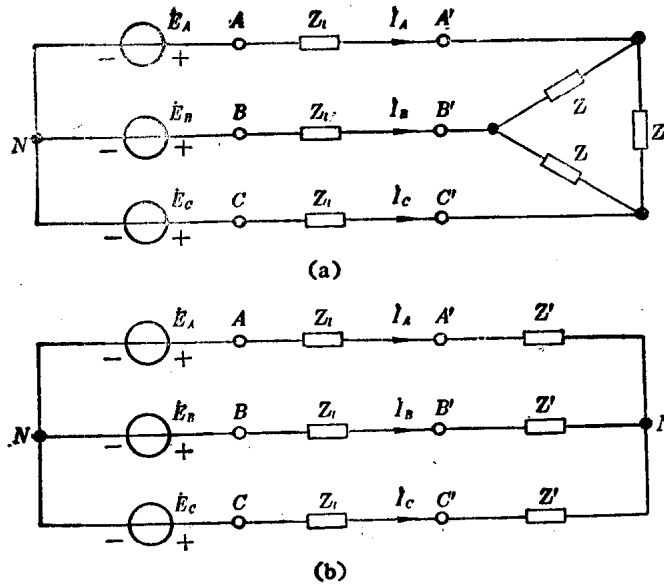


图 10.10 星形-三角形连接的对称三相电路及其等效电路

负载每相阻抗 $Z' = \frac{1}{3}Z = 5 + j4\Omega$ 。图 10.10b 所示电路的 A 相计算电路见图 10.11。根据此电路可求得

$$\dot{I}_A = \frac{220/0^\circ}{1 + j1 + 5 + j4} = \frac{220/0^\circ}{7.81/39.8^\circ} = 28.17/-39.8^\circ \text{ A.}$$

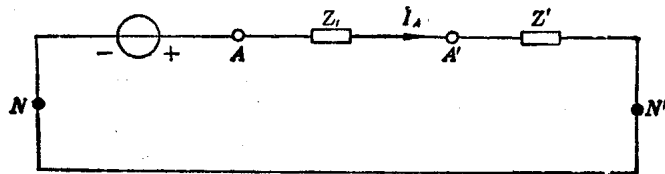


图 10.11 例 10.1 的 A 相计算电路

根据对称性可以写出：

$$\begin{aligned} \dot{I}_B &= 28.17/-159.8^\circ \text{ A,} \\ \dot{I}_C &= 28.17/80.2^\circ \text{ A.} \end{aligned}$$

负载侧线电压为：

$$\begin{aligned} \dot{V}_{A'B'} &= \sqrt{3}/30^\circ \dot{I}_A Z' = \sqrt{3}/30^\circ \times 28.17/-39.8^\circ \times 6.4/38.66^\circ \\ &= 312.27/28.9^\circ \text{ V,} \\ \dot{V}_{B'C'} &= 312.27/-91.1^\circ \text{ V,} \\ \dot{V}_{C'A'} &= 312.27/148.9^\circ \text{ V.} \end{aligned}$$

因为负载是三角形连接的，它的各相电压等于相应的线电压。负载的相电流为：

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A'B'} &= \frac{\dot{V}_{A'B'}}{Z} = \frac{312.27/28.9^\circ}{15 + j12} = 16.26/-9.76^\circ \text{ A,} \\ \dot{I}_{B'C'} &= 16.26/-129.76^\circ \text{ A,} \\ \dot{I}_{C'A'} &= 16.26/110.24^\circ \text{ A.} \end{aligned}$$

10.3.3 三角形-星形连接或三角形-三角形连接的对称三相电路

对于三角形-星形连接的对称三相电路,可将三角形连接的电源变换为等效的星形连接的电源,然后求解。对于三角形-三角形连接的对称三相电路,可将电源及负载都变换为等效的星形连接方式,然后求解。

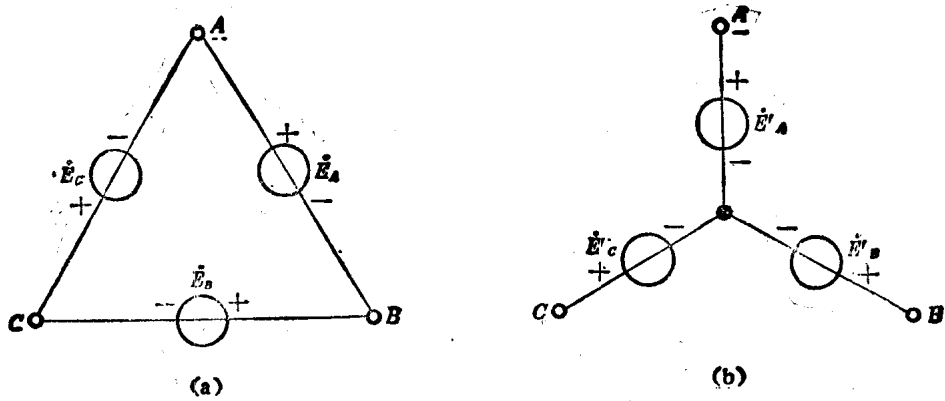


图 10.12 三角形连接电源变换为星形连接电源

关于电源变换讨论如下。图 10.12a 所示的对称三相电源是三角形连接的,各相电动势为 \dot{E}_A 、 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C , 各相内阻抗为零。等效的星形连接对称三相电源如图 10.12b 所示。各相电动势为 \dot{E}'_A 、 \dot{E}'_B 、 \dot{E}'_C 。参考式 10.6 可求得

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}'_A &= \frac{1}{\sqrt{3}} / -30^\circ \dot{E}_A, \\ \dot{E}'_B &= \frac{1}{\sqrt{3}} / -30^\circ \dot{E}_B, \\ \dot{E}'_C &= \frac{1}{\sqrt{3}} / -30^\circ \dot{E}_C. \end{aligned} \right\} \quad (10.14)$$

如果已知对称三相电源的线电压为 \dot{V}_{AB} 、 \dot{V}_{BC} 、 \dot{V}_{CA} , 电源内部阻抗可忽略不计, 则不论此电源连接方法如何, 都可以用图 10.12b 所示的星形连接对称三相电源表示。电源的电动势

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}'_A &= \frac{1}{\sqrt{3}} / -30^\circ \dot{V}_{AB}, \\ \dot{E}'_B &= \frac{1}{\sqrt{3}} / -30^\circ \dot{V}_{BC}, \\ \dot{E}'_C &= \frac{1}{\sqrt{3}} / -30^\circ \dot{V}_{CA}. \end{aligned} \right\} \quad (10.15)$$

对于图 10.13a 所示的计及电源内阻抗 Z_1 的三角形连接对称三相电源, 经过图 10.13b~f 所示的各个步骤逐步变换后, 可以得到图 10.13f 所示的等效的星形连接对称三相电源。其中 $Z'_1 = Z_1/3$, 各相电动势为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}'_A &= \frac{Z'_1}{Z_1} (\dot{E}_A - \dot{E}_C) = \frac{1}{3} (1 - \alpha) \dot{E}_A = \frac{1}{\sqrt{3}} / -30^\circ \dot{E}_A, \\ \dot{E}'_B &= \frac{Z'_1}{Z_1} (\dot{E}_B - \dot{E}_A) = \frac{1}{\sqrt{3}} / -30^\circ \dot{E}_B, \\ \dot{E}'_C &= \frac{Z'_1}{Z_1} (\dot{E}_C - \dot{E}_B) = \frac{1}{\sqrt{3}} / -30^\circ \dot{E}_C. \end{aligned} \right\} \quad (10.16)$$

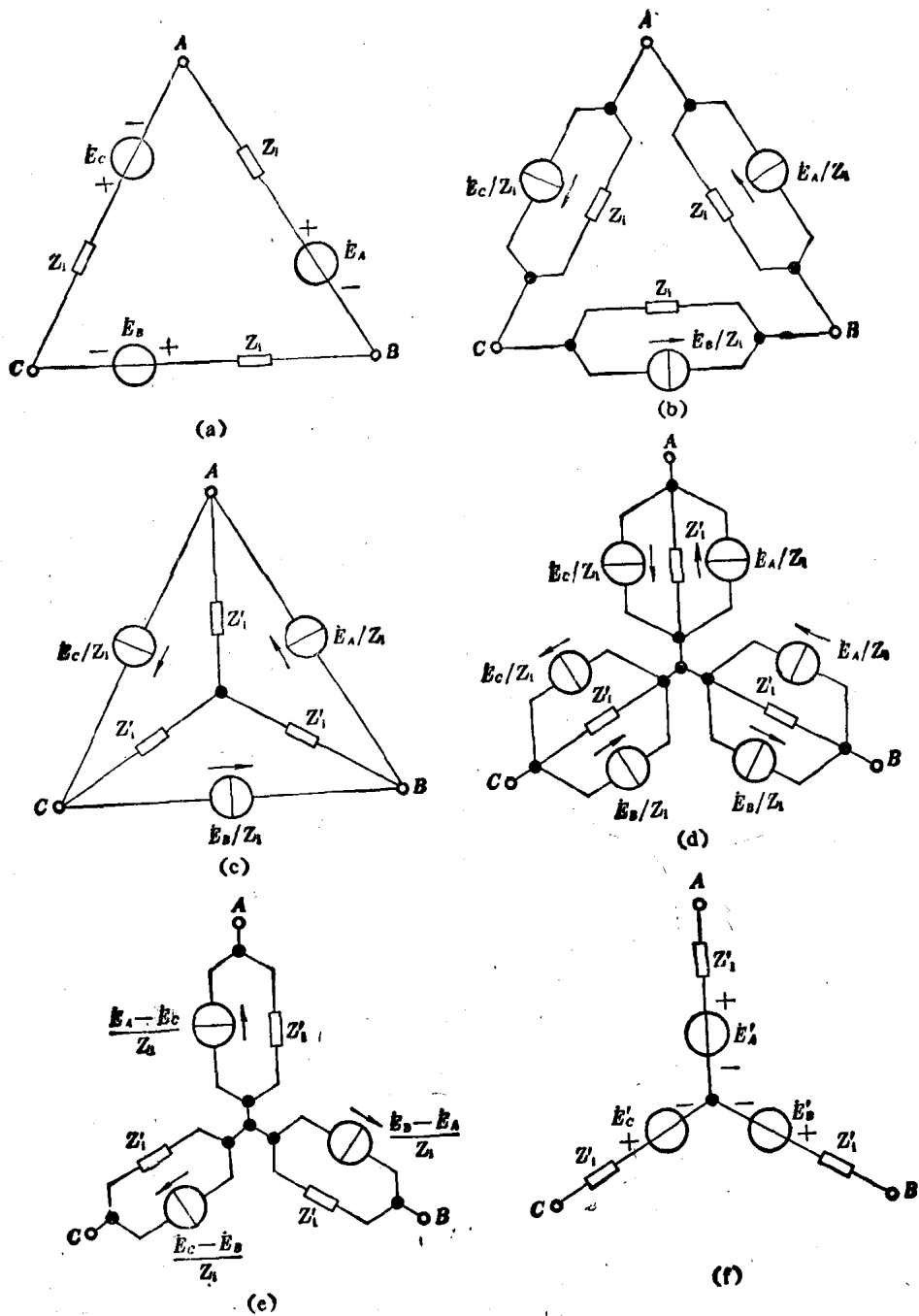


图 10.13 三角形连接对称电源变换为等效的星形连接对称电源(计及电源内阻抗)

例 10.2 在图 10.14a 所示的电路中,负载是星形连接的, $Z = 10 + j8\Omega$, $Z_1 = 1 + j0.5\Omega$, 端点 A, B, C 左侧接至对称三相电源, 线电压有效值为 380V 。试求负载的相电压及相电流。

解 如上所述, 我们可以认为对称三相电源是星形连接的(见图 10.14b)。根据式 10.15 可知, 电源的相电压为 $\frac{380}{\sqrt{3}}\text{V}$, 即 220V 。如以电源的 A 相电压作为参考相量, 则 $\dot{E}_A = 220\angle 0^\circ\text{V}$ 。

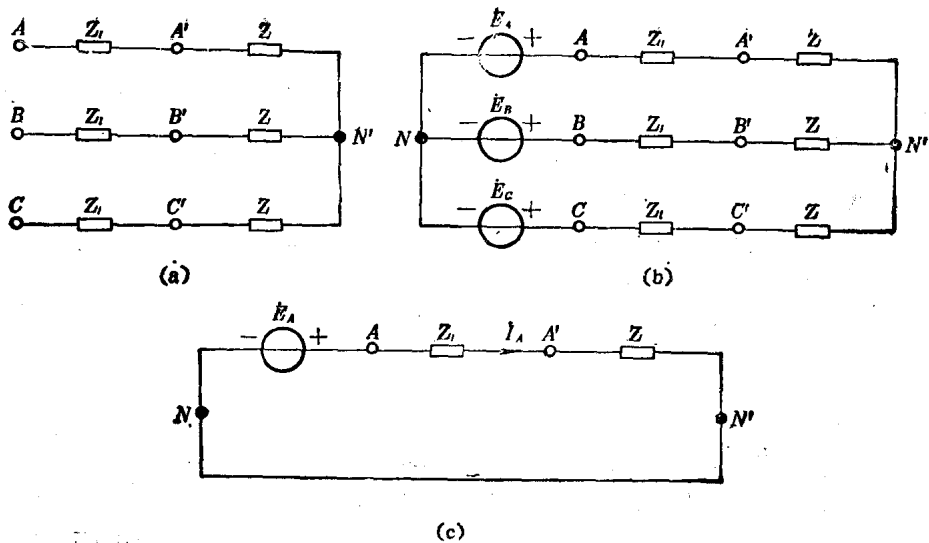


图 10.14 例 10.2 的电路图

A 相计算电路如图 10.14c 所示。根据此电路可以求得负载 A 相的电流及电压为：

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_A}{Z + Z_i} = \frac{220/0^\circ}{1 + j0.5 + 10 + j8} = 15.83 / -37.7^\circ \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_{A'N'} &= \dot{I}_A Z = 15.83 / -37.7^\circ \times 12.81 / 38.66^\circ \\ &= 202.7 / 0.96^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

根据对称性可得负载 B、C 相的电流及电压为：

$$\begin{aligned} \dot{I}_B &= 15.83 / -157.7^\circ \text{ A}, \quad \dot{I}_C = 15.83 / 82.3^\circ \text{ A}, \\ \dot{V}_{B'N'} &= 202.7 / -119.04^\circ \text{ V}, \quad \dot{V}_{C'N'} = 202.7 / 120.96^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

10.3.4 复杂的对称三相电路

复杂的对称三相电路是指有多个对称三相电源及对称三相负载的对称三相电路。电源或负载的连接方式可以是星形的或三角形的。这种电路的求解步骤是：

1. 将三角形连接的电源或负载用等效的星形连接的电源或负载代替。
2. 将各电源及负载的中点短接，作出一相(例如 A 相)的计算电路。求出一相的各电流及电压值。
3. 利用对称性求出其余两相的各电流及电压值。此时电路中原来为星形连接的电源及负载的相电流及相电压已可求得。
4. 对于电路中原为三角形连接的电源及负载，可以先求出它们的线电压及线电流，然后求出它们的相电压及相电流。

例 10.3 在图 10.15a 所示的对称三相电路中，已知 $\dot{E}_{A1} = 230/0^\circ \text{ V}$, $\dot{E}_{A2} = 380/30^\circ \text{ V}$, $Z_1 = 0.6\Omega$, $Z_2 = 30 + j24\Omega$, $Z_3 = 12 + j9\Omega$, $Z_{11} = 2\Omega$, $Z_{12} = 0.8\Omega$, $Z_{13} = 1\Omega$ 。试求负载 1 及负载 2 的各相电压及各相电流。