

第八章 三相电路

8.1 三相电路概述

世界各国目前的电力系统中电能的生产、传输和供电方式绝大多数都采用三相制。

三相电力系统的组成：三相电源、三相负载、三相输电线路。

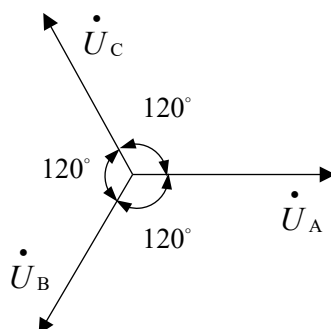
8.1.1 三相电源概念

8.1.1.1 三相电源与对称三相电源

三相电源：按照正弦规律变化、频率相同、相位各不相同的三个电源。

一相 (Phase)：三相电源中的每一个电源。

相电压：每相电源的端电压。



设

$$\begin{cases} u_A = \sqrt{2}U_A \cos(\omega t + \psi_A) \\ u_B = \sqrt{2}U_B \cos(\omega t + \psi_B) \\ u_C = \sqrt{2}U_C \cos(\omega t + \psi_C) \end{cases}$$

对称三相电源——频率相同、振幅相等，相位彼此差 120° 的三相电源。

对称三相电源相电压的**时域式**：

$$\begin{cases} u_A = \sqrt{2}U \cos \omega t \\ u_B = \sqrt{2}U \cos(\omega t - 120^\circ) \\ u_C = \sqrt{2}U \cos(\omega t + 120^\circ) \end{cases}$$

相量式：

$$\begin{cases} \dot{U}_A = U \angle 0^\circ \\ \dot{U}_B = U \angle -120^\circ = a^2 \dot{U}_A, \text{ 其中 } a = 1 \angle 120^\circ, \text{ 为单位相量算子} \\ \dot{U}_C = U \angle 120^\circ = a \dot{U}_A \end{cases}$$

8.1.1.2 相序

相序：各相电压依次达到最大值的次序。

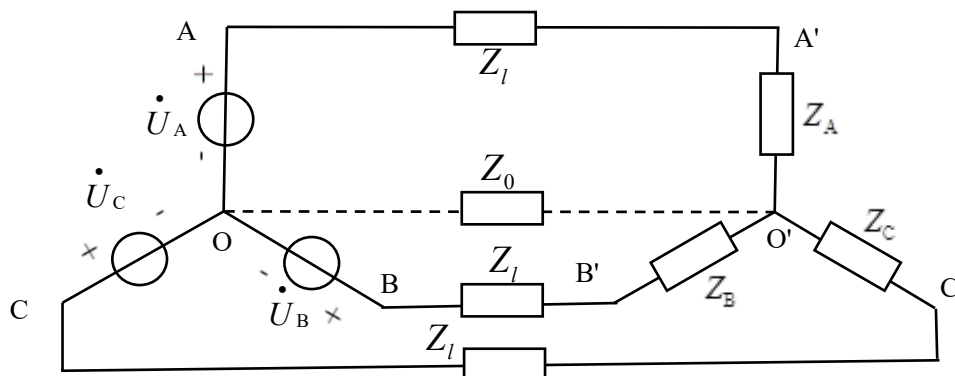
上述三相对称电源的相序 ABC 称为**正序/顺序**。即在正序系统中，各相电压达到最大值的次序为 ABC，即其相位是 B 相落后 A 相 120° ，C 相落后 B 相 120° 。

相序 ACB 称为**负序/反序**。

电力系统一般采用正序。

8.1.2 三相电路的连接

8.1.2.1 星形(Y)连接



将三相电源的末端接在一起，称为**电源的中性点/中点**；

从三个电源始端向外引出的导线是**端线**；

从中性点引出的导线叫**中线**。

线电压 \dot{U}_l ：端线与端线之间的电压. $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}, \dot{U}_{A'B'}, \dot{U}_{B'C'}, \dot{U}_{C'A'}$ 。

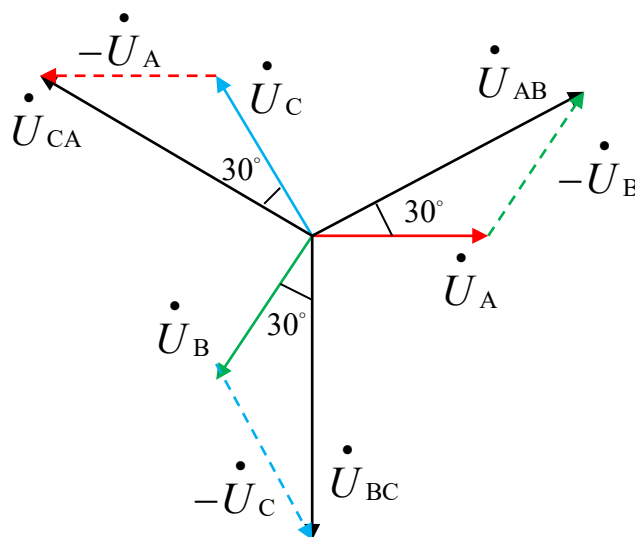
相电压 \dot{U}_p ：电源或负载每一相的电压. $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C, \dot{U}_{A'}, \dot{U}_{B'}, \dot{U}_{C'}$ 。

线电流 \dot{I}_l ：端线上的电流. $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ 。

相电流 \dot{I}_p ：一相上的电流. $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ 。

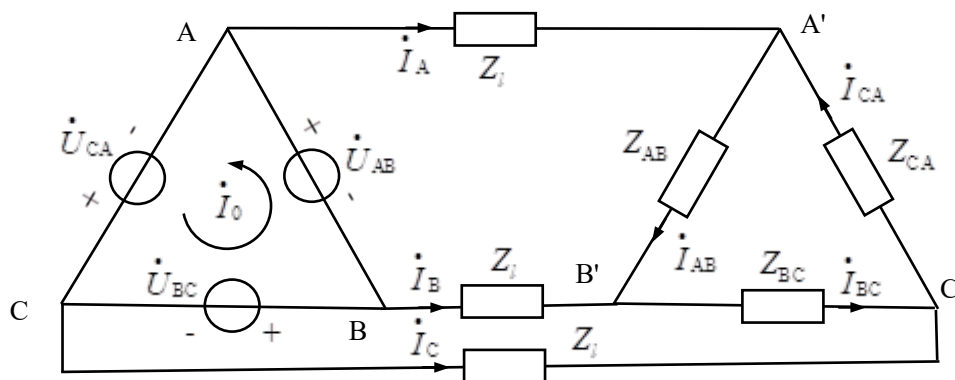
相电压与线电压关系: $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B$. 三相电压对称时, 相电压与线电压对称, 且有 $\dot{U}_l = \sqrt{3}\dot{U}_p$.

$\dot{U}_{AB} = \sqrt{3}\dot{U}_A \angle 30^\circ$, $\dot{U}_{BC} = \sqrt{3}\dot{U}_B \angle 30^\circ = \dot{U}_{AB} \angle -120^\circ$, $\dot{U}_{CA} = \sqrt{3}\dot{U}_C \angle 30^\circ = \dot{U}_{AB} \angle 120^\circ$. 做出相量图如图。



相电流与线电流关系: 对应相等.

8.1.2.2 三角形连接



线电压 \dot{U}_l : $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}, \dot{U}_{A'B'}, \dot{U}_{B'C'}, \dot{U}_{C'A'}$.

相电压 \dot{U}_p : $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}, \dot{U}_{A'B'}, \dot{U}_{B'C'}, \dot{U}_{C'A'}$.

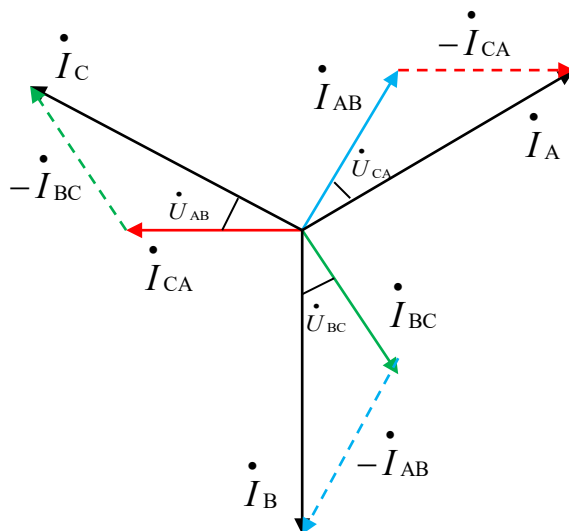
线电流 \dot{I}_l : $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$.

相电流 \dot{I}_p : $\dot{I}_{AB}, \dot{I}_{BC}, \dot{I}_{CA}$. 电源环流 $\dot{I}_0 = 0$.

相电压与线电压关系: 对应相等.

相电流与线电流关系: $\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}$. 三相电压对称时, 相电流与线电流对称, 且有 $\dot{I}_l = \sqrt{3} \dot{I}_p$.

$\dot{I}_A = \sqrt{3} \dot{I}_{AB} \angle -30^\circ$, $\dot{I}_B = \sqrt{3} \dot{I}_{BC} \angle -30^\circ = \dot{I}_A \angle -120^\circ$, $\dot{I}_C = \sqrt{3} \dot{I}_{CA} \angle -30^\circ = \dot{I}_A \angle 120^\circ$. 做出相量图如图



8.1.3 三相电路

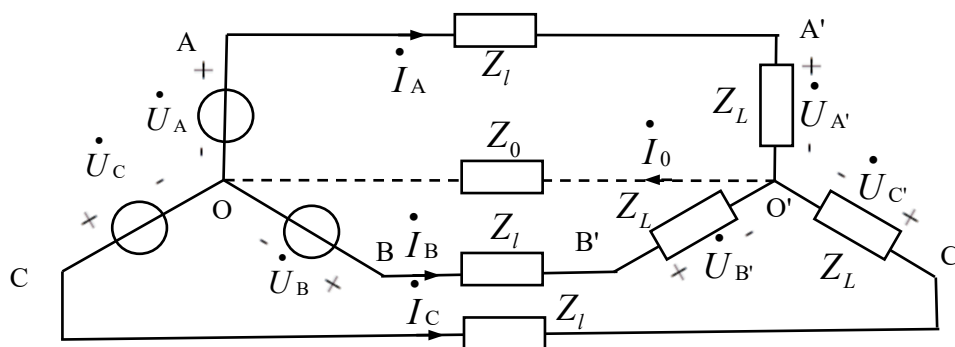
三相电路: 三相电源与三相负载相接后的电路。

对称三相电路: 电源、负载、传输线都对称。

电源与负载都有 Y、 Δ 两种连接, 这些组合起来就有多种连接形式的三相电路。

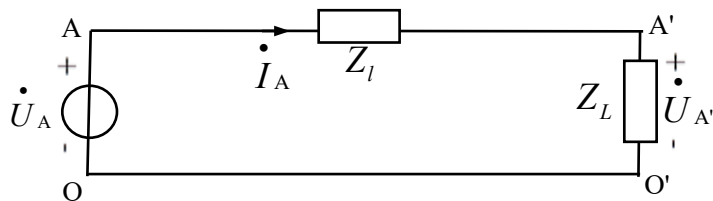
8.2 对称三相电路的计算

8.2.1 Y-Y 或 Y_0 - Y_0 连接对称三相电路



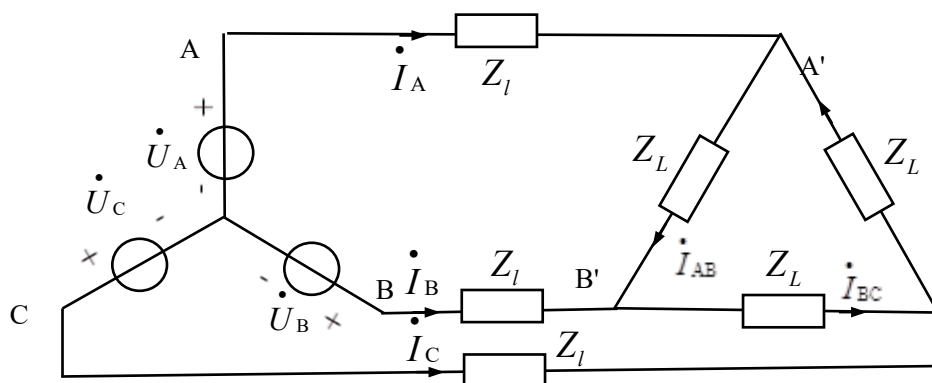
结点方程: $\left(\frac{3}{Z_L + Z_l} + \frac{1}{Z_0} \right) \dot{U}_{OO'} = \frac{\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C}{Z_L + Z_l} = 0$, 所以 $\dot{U}_{OO'} = 0$.

抽出 A 相:



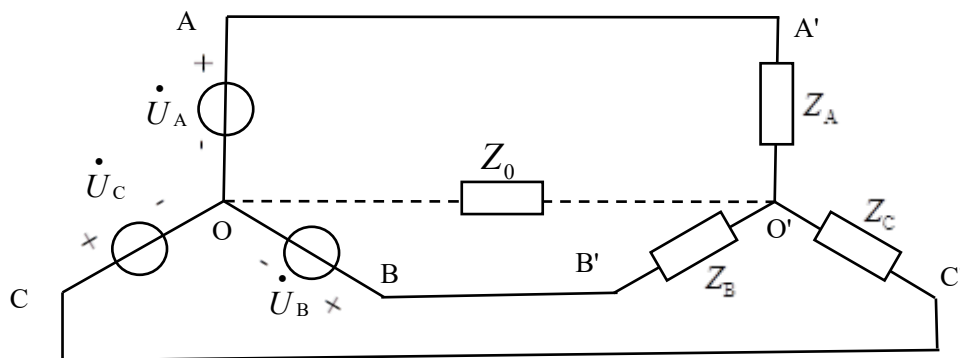
$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z_L + Z_l}, \quad \dot{U}_{A'} = \dot{I}_A Z_L = \frac{Z_L}{Z_L + Z_l} \dot{U}_A, \quad \dot{U}_{A'B'} = \sqrt{3} \dot{U}_{A'} \angle 30^\circ = \sqrt{3} \frac{Z_L}{Z_L + Z_l} \dot{U}_A \angle 30^\circ = \frac{Z_L}{Z_L + Z_l} \dot{U}_{AB}.$$

8.2.2 Y-△连接对称三相电路



负载等效为三个 \$\frac{Z_L}{3}\$ 星接，分析方法同上。

8.3 不对称三相电路的计算



$$\text{结点方程: } \left(\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C} + \frac{1}{Z_0} \right) \dot{U}_{OO'} = \frac{\dot{U}_A}{Z_A} + \frac{\dot{U}_B}{Z_B} + \frac{\dot{U}_C}{Z_C}, \quad \text{所以 } \dot{U}_{OO'} = \frac{\dot{U}_A Y_A + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_0}.$$

8.3 三相电路的功率

8.3.1 对称三相电路的功率计算

8.3.1.1 一相的功率

复功率：

$$\begin{aligned}\bar{S}_p &= \dot{U}_p I_p^* = U_p \angle(\varphi_u) \cdot I_p \angle(-\varphi_i) = U_p I_p \angle(\varphi_u - \varphi_i) \\ &= U_p I_p \angle\varphi = U_p I_p \cos\varphi + jU_p I_p \sin\varphi \\ &= U_p I_p \cos\varphi + jU_p I_p \sin\varphi = P_p + jQ_p\end{aligned}$$

视在功率： $S_p = U_p I_p$ ；

功率因数： $\cos\varphi_p = \frac{|P_p|}{S_p}$ 。

8.3.1.2 对称三相电路的功率

复功率：

$$\bar{S} = 3\bar{S}_p = 3U_p I_p \cos\varphi + j3U_p I_p \sin\varphi = 3P_p + j3Q_p$$

视在功率： $S = 3S_p = 3U_p I_p = \sqrt{3}U_l I_l$ ；

功率因数： $\cos\varphi = \frac{3|P_p|}{3S_p} = \cos\varphi_p$ 。

8.3.1.3 对称三相电路的瞬时功率

$$p(t) = 3U_p I_p \cos\varphi$$

对称三相电路的瞬时功率是一个常量，其值等于平均功率。这是对称三相电路的优点之一，称为瞬时功率平衡。

8.3.2 三相电路的功率测量

功率表法

对称电路测得一相功率便得知三相总功率， $P = 3P_A$ 。不对称电路：**三功率表法**， $P = P_A + P_B + P_C$ 。

二功率表法

三相三线电路，不管对称与否，用两只功率表可以测量三相总的平均功率。

三相负载吸收的平均功率为 $P = P_1 + P_2$ （代数和）。