

交流电路的相数变换技术

刘泰和

(电工学教研室)

提 要: 本文介绍两种交流供电系统的相数变换实例, 并从理论上进行了分析计算, 具有一定的实用价值。

关键词: 相数变换, 两相电路, 三相电路, 变相器

在自动控制和仪表检测系统中, 由于工作条件的限制, 往往要求把一般的三相交流电源改换为两相电源 (常见于某些测量仪表和各类控制电机中)、或由单相供电改换为三相供电 (应用于自动测量控制系统) 等, 这种交流电路的相数变换技术针对不同的工作系统设计出不同的变换电路, 本文参考有关资料引用两种较有实用价值的电路作一分析讨论。

1 三相电源转换为两相供电系统

控制用电机的电枢部分往往采用裂相法将单相电路转变为两相电路, 产生了旋转磁场, 从而使单相电动机的驱动工作得以实现, 这在一般电工书上都有介绍, 这里介绍一种要求功率较大, 运行绝对可靠的控制电机 (例如原子核反应堆驱动控制棒用的电动机) 的供电电路。

一个两相供电系统是由两个大小相等, 相位相差 90° 的正弦电压构成。用变压器绕组抽头连接的方法可以实现三相电源变换为两相供电系统。如图1, 用两台结构相同的变压器, 每台变压器原绕组的匝数为 N_p , 而且按 $\frac{1}{2}N_p$, $\frac{\sqrt{3}}{2}N_p$, N_p 抽头, N_s 为每台变压器付绕组的匝数, 按图示连接方法, 原边为三相三线制供电电源, 付边为两相三线制电路。

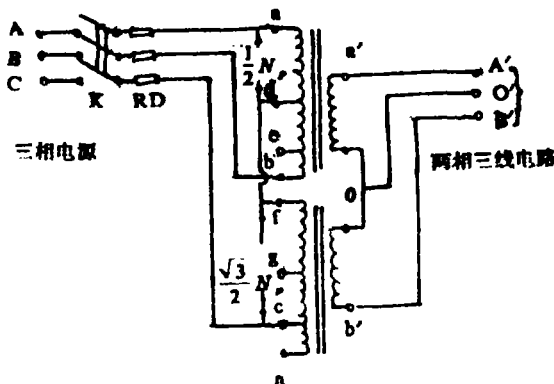


图1 三相电源变换为两相电源的电路图

①收到日期: 1989.03.10

接线时, 三相电源 A、B、C 分别同两个变压器原绕组的三端点 a、b、c 连接, 但要注意 C 点是第二个变压器原绕组的 $\frac{\sqrt{3}}{2} N_p$ 抽头点, 然后将第一个变压器原绕组的 $\frac{1}{2} N_p$ 抽头点 d 与第二个变压器原绕组的始端 f 连接, 这样从两个变压器付绕组的始端和末端得到的就是两相电源, 如果从 O' 引出中线, 就构成两相三线制。原付边相应的电势相量图见图 2a) 和 b)。

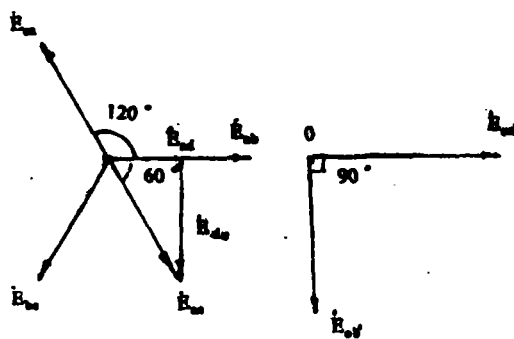


图 2 变换器抽头连接电势相量图

原、付绕组电势相量关系分析如下:

根据克希荷夫第二定律(KVL), 变压器原边的电势方程式为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{ac} &= \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{dc} \\ \text{而 } \dot{E}_{ad} &= \frac{1}{2} \dot{E}_{ab} \quad \dot{E}_{ac} = -\dot{E}_{ca} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)和相量图 2a)是对应的, 由相量图可知, 相量 \dot{E}_{ad} 、 \dot{E}_{dc} 和 \dot{E}_{ac} 构成一个有 30° 和 60° 锐角的直角三角形, 而且 \dot{E}_{ad} 在相位上超前 $\dot{E}_{dc} 90^\circ$, 原边电势这种相位关系经过电磁感应反映到付边, 按图 1 的连接方式必然使电势 $\dot{E}_{o'a'}$ 超前 $\dot{E}_{o'b'} 90^\circ$ 。

$\dot{E}_{o'a'}$ 和 $\dot{E}_{o'b'}$ 的大小关系是这样建立的:

第一个变压器原边的电压/匝数比 $= E_{ab} / N_p$ 。

第二个变压器电压/匝数比 $= E_{dc} / \frac{\sqrt{3}}{2} N_p$

$= E_{ac} \sin 60^\circ / \frac{\sqrt{3}}{2} N_p = E_{ac} / N_p$ 。由三相对称性知:

$$\left. \begin{aligned} E_{ab} &= E_{ac} \\ \therefore E_{ab} / N_p &= E_{ac} / N_p \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由于两个变压器原边的电压/匝数比相同, 而且两个付绕组有相同的匝数 N_s , 因而两个变压器的付边电压大小相等, 即付边电势 $\dot{E}_{o'a'}$ 和 $\dot{E}_{o'b'}$ 大小相等相位相差 90° , 是一个两相供电电路。

2 单相电路转换为三相电路

图 3 所示为单相电路变换成向三相负载供电原理图, 适用于小功率的测量系统中, 适当配备 L、C 元件参数, 就能在负载 r 上得到三相对称电流, 因此这种装置也叫变相器。

若电阻 r 为已知, 则 L、C 和 r 的关系可以进行计算。为此, 将原电路通过 Y- Δ 变换简化成图 4 所示的电路。

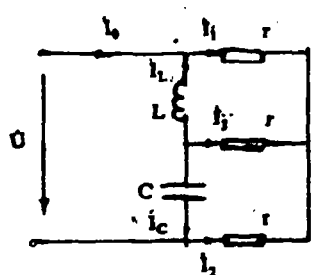
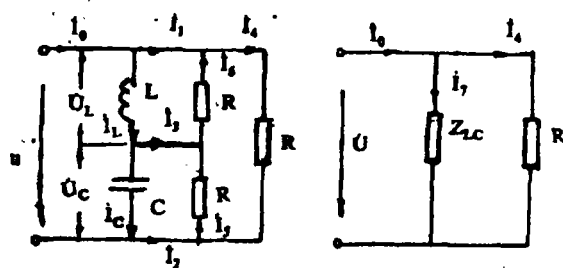


图3 变相器电路



a)Y-Δ变换

b)等效电路

图4 变相器电路化简分析

根据网络的Y-Δ变换公式:

$$R = 3r$$

(3)

令电源电压 \dot{U} 为参考相量, 即 $\dot{U} = U \angle 0^\circ = U$, 参阅图4a)电路, 利用三相对称性得:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_4 &= \frac{U}{R} \angle 0^\circ \\ \dot{I}_5 &= \frac{U}{R} \angle 120^\circ = \frac{U}{R} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \\ \dot{I}_6 &= \frac{U}{R} \angle -120^\circ = \frac{U}{R} \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

根据KCL方程:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{I}_4 - \dot{I}_6 = \frac{U}{R} - \frac{U}{R} \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \sqrt{3} \frac{U}{R} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} \right) = \sqrt{3} \frac{U}{R} \angle 30^\circ \\ \dot{I}_2 &= \dot{I}_5 - \dot{I}_4 = \frac{U}{R} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) - \frac{U}{R} = \sqrt{3} \frac{U}{R} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} \right) = \sqrt{3} \frac{U}{R} \angle 150^\circ \\ \dot{I}_3 &= \dot{I}_6 - \dot{I}_5 = \frac{U}{R} \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) - \frac{U}{R} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \sqrt{3} \frac{U}{R} (-j) = \sqrt{3} \frac{U}{R} \angle -90^\circ \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由图4b)电路知:

$$\dot{I}_7 = \frac{\dot{U}}{Z_{LC}}, \text{ 总电流 } \dot{I}_0 = \dot{I}_7 + \dot{I}_4 = \frac{U}{Z_{LC}} + \frac{U}{R}, \text{ 因而电感元件和电容元件上的电流分别为:}$$

为:

$$\begin{aligned} \dot{I}_L &= \dot{I}_0 - \dot{I}_1 = \frac{U}{Z_{LC}} + \frac{U}{R} - \sqrt{3} \frac{U}{R} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} \right) = \frac{U}{R} \left[\frac{R}{Z_{LC}} - \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right] \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_0 - \dot{I}_2 = \frac{U}{Z_{LC}} + \frac{U}{R} + \sqrt{3} \frac{U}{R} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} \right) = \frac{U}{R} \left[\frac{R}{Z_{LC}} - \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right] \end{aligned}$$

参阅图4a), 由KVL方程得:

$$\dot{U} = \dot{U}_L + \dot{U}_C = \dot{I}_L jX_L + \dot{I}_C (-jX_C)$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{U}{R} \left[\frac{R}{Z_{LC}} - \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right] jX_L + \frac{U}{R} \left[\frac{R}{Z_{LC}} - \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right] (-jX_C) \\
 &= \frac{U}{R} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} (X_L + X_C) + j(X_L - X_C) \left(\frac{R}{Z_{LC}} - \frac{1}{2} \right) \right]
 \end{aligned}$$

式中 Z_{LC} 是图4b)中的等效阻抗, 由图4a)知:

$$\begin{aligned}
 Z_{LC} &= jX_L // R + (-jX_C) // R = \frac{jRX_L}{R + jX_L} - \frac{jRX_C}{R - jX_C} \\
 \frac{R}{Z_{LC}} &= \frac{R}{\frac{jRX_L}{R + jX_L} - \frac{jRX_C}{R - jX_C}} = \frac{(R + jX_L)(R - jX_C)}{2X_L X_C + jR(X_L - X_C)}
 \end{aligned}$$

代入上式整理后得:

$$\begin{aligned}
 U &= \frac{U}{R} \left\{ \frac{\sqrt{3}}{2} (X_L + X_C) + j(X_L - X_C) \left[\frac{(R + jX_L)(R - jX_C)}{2X_L X_C + jR(X_L - X_C)} - \frac{1}{2} \right] \right\} \\
 &= \frac{U}{R} \left\{ \left[\frac{\sqrt{3}}{2} (X_L + X_C) + \frac{R^3 + RX_L X_C + \frac{2RX_L X_C^2}{X_L - X_C} - \frac{2RX_L^2 X_C}{X_L - X_C}}{R^2 + \left(\frac{2X_L X_C}{X_L - X_C} \right)^2} \right] \right. \\
 &\quad \left. + j \left[\left(\frac{2R^2 X_L X_C}{X_L - X_C} + \frac{2X_L^2 X_C^2}{X_L - X_C} + R^2 (X_L - X_C) \right) / R^2 + \left(\frac{2X_L X_C}{X_L - X_C} \right)^2 - \frac{1}{2} (X_L - X_C) \right] \right\} \quad (6)
 \end{aligned}$$

由于 $U = U + j0$ 虚部为零:

$$\begin{aligned}
 \therefore \frac{U}{R} &\left[\left(\frac{2R^2 X_L X_C}{X_L - X_C} + \frac{2X_L^2 X_C^2}{X_L - X_C} + R^2 (X_L - X_C) \right) / (R^2 + \left(\frac{2X_L X_C}{X_L - X_C} \right)^2) \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{2} (X_L - X_C) \right] = 0
 \end{aligned}$$

简化后得:

$$\frac{2R^2 X_L X_C + \frac{1}{2} R^2 (X_L - X_C)}{R^2 (X_L - X_C)^2 + 4X_L^2 X_C^2} (X_L - X_C) = 0$$

i) 当 $X_L - X_C = 0$ 得:

$$X_L = X_C$$

(7)

ii) 若 $2R^2 X_L X_C + \frac{1}{2} R^2 (X_L - X_C) = 0$ 得:

$$X_L = -X_C$$

X_L 、 X_C 做为电路参数, 此关系不合理。

又由于参考相量 U 的实部为 U , 则:

$$\frac{U}{R} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} (X_L + X_C) + (R^3 + RX_L X_C + \frac{2RX_L X_C^2}{X_L - X_C} - \frac{2RX_L^2 X_C}{X_L - X_C}) / (R^2 + (\frac{2X_L X_C}{X_L - X_C})^2) \right] = U$$

整理后得:

$$\frac{\sqrt{3}}{2R} (X_L + X_C) + \frac{R^2(X_L - X_C) + X_L X_C(X_L - X_C) + 2X_L X_C^2 - 2X_L^2 X_C}{R^2(X_L - X_C)^2 + 4X_L^2 X_C^2} (X_L - X_C) = 1$$

利用式(7)将上式简化为: $\frac{\sqrt{3}}{2R} (X_L + X_C) = 1$

根据式(3)的关系得出:

$$X_L - X_C = \frac{\sqrt{3}}{3} R = \sqrt{3} r \quad (8)$$

因此当 r 给定后, 可以计算出 X_L 和 X_C , 从而得到电感元件和电容元件的参数 L 、 C 值的大小。(电源频率 $f = 50\text{Hz}$).

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{\sqrt{3}}{2\pi 50} r 10^3 = 5.51r \text{ mH} \\ C &= \frac{1}{2\pi 50 \sqrt{3} r} 10^6 = 184 \frac{1}{r} \text{ }\mu\text{F} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

相量图如图 5 所示, 取 \dot{U} 为参考相量, 按式(4)画出 \dot{I}_4 、 \dot{I}_5 和 \dot{I}_6 , 再按式(5)的关系依次做出 \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 和 \dot{I}_3 , 显然, 这就是要找的三相对称电流。

电压相量关系可按图 4a) 做出, 因为:

$$U = -\dot{I}_6 R - \dot{I}_5 R, \quad \text{或} \\ U = U_L + U_C = j\dot{I}_L X_L - j\dot{I}_C X_C.$$

式(8)的结论亦可从相量图上加以证明。因为就大小而言, $I_6 = I_5$, $I_6 R = I_5 R$, $\dot{U}_L = -\dot{I}_6 R$, $\dot{U}_C = -\dot{I}_5 R$, 所以 $U_L = U_C$, \dot{I}_L 落后 $\dot{U}_L 90^\circ$, \dot{I}_C 导前 $\dot{U}_C 90^\circ$, \dot{U}_L 和 \dot{U}_C 的相位差 120° , 相量 \dot{U} 等分其相位角, 所以 \dot{I}_L 和 \dot{I}_C 与 \dot{U} 的夹角是 30° , 即 $\angle 1 = \angle 2 = \angle 3 = 30^\circ$, 因而得 $I_L = I_C$ 和 $X_L = X_C$ 。

由电路图 3 知 $\dot{I}_L - \dot{I}_C = \dot{I}_3$ 和 $\dot{I}_1 + \dot{I}_L = \dot{I}_0$, 在相量图上, 总电流 \dot{I}_0 和 \dot{U} 同相位, 而且 \dot{I}_L 、 $-\dot{I}_C$ 和 \dot{I}_3 围成一等角三角形, 因此:

$$I_L = I_C = I_3 = \sqrt{3} I_4 = \sqrt{3} \frac{U}{R}$$

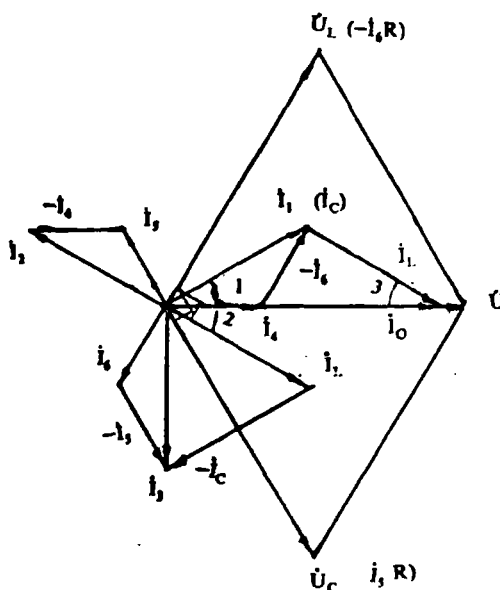


图 5 变换器相量图

$$\text{而: } \dot{U} = \dot{I}_L X_L - \dot{I}_C X_C = jX_L (\dot{I}_L - \dot{I}_C) = jX_L \dot{I}_3$$

$$\therefore |U| = |jX_L \dot{I}_3| = X_L \dot{I}_3 = \sqrt{3} X_L \frac{U}{R} \quad \text{于是有:}$$

$$X_L = \frac{\sqrt{3}}{3} R = \sqrt{3} r$$

参 考 文 献

- [1] Charles I. Hubert. Electric CirCuits AC/ DC An Intergrated Approach, P584
Mcgraw-Hill Book Co. New York. 1982
- [2] 俞大光编. 电工基础(修订本)上册. P294. 人民教育出版社. 1981
- [3] R.YORKE. Electric Circuit Theory. First edition 1981. Prined in Great Britain
- [4] 天津大学杨渝钦编. 控制电机. 机械工业出版社. 1979

Technique of Phase Number Changeover in the

A. C. Circuit

Liu Taihe

(Electrotechnice Teaching Group)

Abstract: This article evaluates two examples of phase number changeover in A. C. system of delivered electrical energy with theoretical analyses and calculations. It is of value for practical work.

Keywords: phase number changeover, two-phase circuit, three-phase circuit, phase number changer