

○ 曹 祥 张校铭 等编著

技能型人才培养丛书

电动机原理、维修 及控制电路



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

技能型人才培养丛书

电动机原理、维修及控制电路

曹 祥 张校铭 等编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书写作的目的是使读者轻松学会电动机控制及维修技术。首先介绍了电动机控制与维修所必须掌握的基础知识,然后重点介绍了各种电动机的结构、原理、维修及电动机的控制电路。主要内容包括电的基础知识、电动机控制用低压电器、电动机的基础知识及拆装与绕组重绕、单相异步电动机、单相异步电动机控制电路、三相异步电动机、三相交流电动机控制电路、直流电动机、直流电动机的控制电路。在维修章节和控制电路章节中,附有大量的实例,并附有部分技术资料,供维修时参考。

本书具有较强的针对性和实用性,内容新颖、资料翔实、通俗易懂。可供电气技术人员、电气工人、电动机维修人员、工厂及农村电工,以及电气爱好者阅读,也可作为高职高专、中等教育和维修短训班的教材。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电动机原理、维修及控制电路 / 曹祥等编著. —北京: 电子工业出版社, 2010.1

(技能型人才培养丛书)

ISBN 978-7-121-09962-5

I. 电… II. 曹… III. ①电动机—理论②电动机—维修③电动机—控制电路 IV. TM32

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 216318 号

策划编辑: 王敬栋 (wangjd@phei.com.cn)

责任编辑: 雷洪勤

印 刷: 北京市海淀区四季青印刷厂

装 订: 涿州市桃园装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 16.75 字数: 429 千字

印 次: 2010 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 34.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

电动机是一种把电能转换成机械能的设备，它广泛应用于工农业生产、国防建设、科学研究和日常生活等各个方面。目前，在我国电网的总负荷中，电动机的用电量约占 60%，充分说明电动机在我国国民经济和人们生活中所起的作用非同一般。为了使电动机维修和控制人员了解电动机的结构、控制与维修等方面的知识，我们根据积累的理论和实践经验，编写了本书。

按照结构清晰、层次分明的原则，全书共分 9 章：第 1 章 电的基础知识；第 2 章 电机控制用低压电器；第 3 章 电动机的基础知识及拆装与绕组重绕；第 4 章 单相异步电动机；第 5 章 单相异步电动机控制电路；第 6 章 三相异步电动机；第 7 章 三相交流电动机控制线路；第 8 章 直流电动机；第 9 章 直流电动机的控制电路。在维修章节和控制电路章节中，附有大量的实例，并附有部分技术资料，供维修时参考。

本书写作的出发点是不讲过深的理论知识，力求做到理论与实践相结合，循序渐进，由浅入深，通俗实用，以指导初学者快速入门。

本书具有较强的针对性和实用性，内容新颖、资料翔实、通俗易懂。可供电气技术人员、电气工人、电动机维修人员、工厂及农村电工，以及电气爱好者阅读，也可作为高职高专、中等教育和维修短训班的教材。

由于时间仓促，书中不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

作者

目 录

第 1 章 电的基础知识	1
1.1 直流电与交流电	1
1.1.1 电的形成与分类	1
1.1.2 正弦交流电	1
1.1.3 三相交流电	5
1.2 电磁学基础知识	12
1.2.1 磁场和磁力线	12
1.2.2 磁通和磁通密度	14
1.2.3 磁场对载流导体的作用力	14
1.2.4 电磁感应	15
第 2 章 电动机控制用低压电器	17
2.1 低压电器的分类	17
2.1.1 低压电器的分类	17
2.1.2 低压电器产品型号类组代号	17
2.2 低压电器器件与故障维修	19
2.2.1 熔断器	19
2.2.2 刀开关	21
2.2.3 低压断路器	23
2.2.4 交、直流接触器	25
2.2.5 中间继电器	32
2.2.6 热继电器	34
2.2.7 时间继电器	36
2.2.8 按钮	38
2.2.9 行程开关	40
2.2.10 电磁铁	42
2.2.11 凸轮控制器	44
2.2.12 频敏变阻器	46
第 3 章 电动机的基础知识及拆装与绕组重绕	48
3.1 电动机的分类与性能要求	48

3.1.1 电动机的分类与型号	48
3.1.2 电动机的主要性能	49
3.2 电动机绕组的相关知识	51
3.2.1 电动机绕组及线圈	51
3.2.2 绕组的检测与连接	54
3.3 电动机的拆装与绕组重绕	58
3.3.1 常用工具及材料	58
3.3.2 电动机的拆装	65
3.3.3 绕组重绕步骤	70
第4章 单相异步电动机	82
4.1 单相异步电动机的结构及原理	82
4.1.1 单相异步电动机的结构	82
4.1.2 单相异步电动机的工作原理	84
4.2 单相异步电动机的绕组	86
4.2.1 单相异步电动机绕组及嵌线方法	86
4.2.2 常用的单相异步电动机定子绕组举例	92
4.3 单相异步电动机的应用及检修	101
4.3.1 单相异步电动机的应用	101
4.3.2 单相异步电动机的故障及处理方法	102
4.4 单相串激电动机	104
4.4.1 单相串激电动机的结构及工作原理	105
4.4.2 单相串激电动机的电枢绕组常见故障及其处理方法	108
第5章 单相异步电动机控制电路	120
5.1 单相异步电动机的启动元件	120
5.1.1 离心开关	120
5.1.2 启动继电器	121
5.1.3 电容器	123
5.1.4 PTC 启动器	124
5.2 单相电动机的五种运行方式及控制电路	125
5.2.1 单相电动机的五种运行方式	125
5.2.2 单相异步电动机正、反转控制电路	128
5.2.3 单相异步电动机调速控制电路	132
第6章 三相异步电动机	136
6.1 三相异步电动机的构造及工作原理	136
6.1.1 三相异步电动机的构造	136
6.1.2 三相交流异步电动机的工作原理	138

6.2	三相异步电动机的铭牌	141
6.2.1	三相异步电动机的铭牌标注	141
6.2.2	铭牌内容	142
6.3	三相电动机的拆卸、安装与常见故障排除	147
6.4	三相电动机绕组及嵌线步骤	149
6.4.1	单层链式绕组	150
6.4.2	单层叠式绕组	158
6.4.3	单层同心式绕组	170
6.4.4	单层交叉式绕组	185
6.4.5	单层同心交叉式绕组	193
6.4.6	双层叠式绕组	196
6.4.7	多槽电动机绕组展开图	204
第7章	三相交流电动机控制电路	212
7.1	笼型电动机的启动控制电路分析	212
7.1.1	直接启动控制电路分析	212
7.1.2	降压启动控制电路分析	213
7.2	电动机正、反转控制电路分析	216
7.2.1	电动机正、反转电路分析	216
7.2.2	正、反转自动循环电路分析	217
7.3	电动机制动控制电路分析	218
7.3.1	能耗制动控制电路分析	218
7.3.2	反接制动控制电路分析	219
7.4	手动控制和自动控制电路分析	220
7.4.1	点动控制电路分析	220
7.4.2	连锁或互锁电路分析	220
7.4.3	多点控制电路分析	222
7.4.4	工作循环自动控制分析	223
7.5	电动机的调速控制	224
7.5.1	双速电动机高、低速控制电路分析	224
7.5.2	多速电动机的控制电路分析	225
7.6	线绕转子异步电动机控制电路	228
7.6.1	线绕转子异步电动机的自动控制电路分析	228
7.6.2	线绕转子异步电动机的正反转及调速控制电路	229
7.7	电动机的保护	230
第8章	直流电动机	233
8.1	直流电动机的用途、分类、结构及原理	233

8.1.1 直流电动机的用途与分类	233
8.1.2 直流电动机的结构及工作原理	234
8.2 直流电动机常见故障及检查	236
第9章 直流电动机的控制电路	245
9.1 直流电动机的启动与制动控制电路	245
9.1.1 串励直流电动机的控制电路	245
9.1.2 并励直流电动机的控制电路	246
9.1.3 直流电动机的保护电路	249
9.2 电气控制自动调速系统	249
9.2.1 直流发电机—电动机系统	249
9.2.2 电动机扩大机的自动调速系统	251
9.2.3 晶闸管—直流电动机调速	254

第 1 章 电的基础知识

1.1 直流电与交流电

1.1.1 电的形成与分类

电子的定向移动形成电流，而电又有“直流电”和“交流电”之分。电流在直流电源（如干电池、蓄电池等）的供电下，沿着一个方向流通，也就是电流的大小不随时间改变，这是直流电的基本特征。

交流电的全名是交变电流或交流电压。顾名思义，交流电中电子的移动不总是朝着一个方向变化，也就是说电流的大小和方向都不断地发生变化。

1.1.2 正弦交流电

在现代工农业生产和日常生活中，人们所用的大部分是交流电。大小和方向都随时间做周期性变化的电动势、电压和电流，统称为交流电。

由于常用的交流电是按正弦规律随时间变化的，因此也称为正弦交流电。

交流电有着极其广泛的应用。与直流电相比，它有许多独特的优点。首先，交流电可以利用变压器进行电压变换，便于远距离高压传输，以减少电路损耗；便于低压配电，可以保证用电安全。其次，交流电动机比直流电动机构造简单、价格低廉、性能可靠，因此，现代发电厂发出的电几乎都是交流电，照明、动力、电热等大多数设备也都使用交流电。在电路分析计算时，同频率的正弦量加、减运算后，其结果仍为正弦量，频率保持不变，使电路分析计算较为简便。

1. 正弦交流电的产生

法拉第发现电磁感应现象使人类“磁生电”的梦想成真。发电机就是根据电磁感应原理制成的。正弦交流电由交流发电机产生。

最简单的交流发电机模型如图 1-1 所示。线圈 $abcd$ 在匀强磁场中绕固定转轴匀速转动，把线圈的两根引线焊接到随线圈一起转动的两个铜环上，铜环通过电刷与电流表连接。线圈每旋转一周，指针就左右摆动一次。这表明，转动的线圈里产生了感应电流，并且感应电流的大小和方向都随时间做周期性的变化——线圈中有交流电产生。

如图 1-2 所示为线圈的截面图。线圈 $abcd$ 以角速度 ω 沿逆时针方向匀速转动，当线圈转动到线圈平面与磁感线垂直位置时，线圈 ab 边和 cd 边的线速度方向都与磁感线平行，导线不切割磁感线，所以线圈中没有感应电流产生。我们把线圈平面与感应线垂直的位置

叫中性面。设线圈在转动的起始时间 $t=0$ ，线圈与中性面的夹角为 φ_0 ， t 后线圈转过角度 ωt ，则 t 时刻线圈平面与中性面的夹角为 $\omega t + \varphi_0$ 。从图中可以看出， ab 、 cd 转动的线速度 v 与磁感线的夹角是 $\omega t + \varphi_0$ 。设 ab 边和 cd 边的长度都为 L ，磁场的磁通密度为 B ，则线圈两边产生的感应电动势 $e_{ab}=e_b=Blv\sin(\omega t + \varphi_0)$ 。由于这两个电动势是串联的，因此在 t 时刻整个线圈产生的感应电动势 e 为

$$e=2Blv\sin(\omega t + \varphi_0)$$

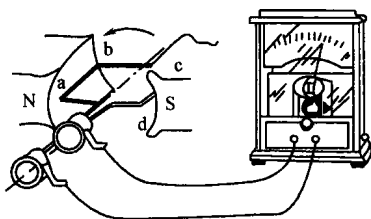


图 1-1 交流发电机模型

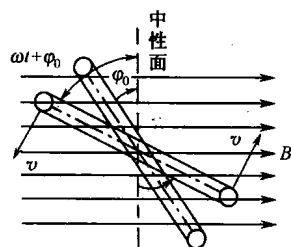


图 1-2 线圈的截面图

当线圈平面转动到与磁感线平行位置时， ab 边和 cd 边都垂直切割磁感线。显然，此时线圈中产生的感应电动势最大，用 E_m 表示。若线圈有 N 匝，面积为 S ，则 $E_m=2NB\omega S=NB\omega S$ 。

因此，线圈产生的感应电动势又可表示为

$$e=2Blv\sin(\omega t + \varphi_0)$$

式中， e 表示 t 时刻电动势的瞬时值。交流电的瞬时值用小写字母表示，如电流瞬时值 i ，电压瞬时值 u 。

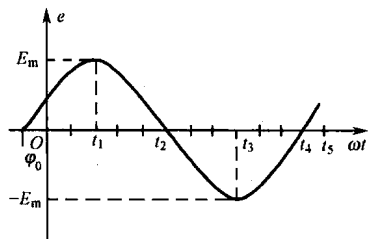


图 1-3 正弦量波形图

E_m 称为电动势的最大值，也叫振幅或峰值，用大写字母加小写字母 m 表示，如电流最大值 I_m ，电压最大值 U_m 。

公式 $e=E_m\sin(\omega t + \varphi_0)$ 叫电动势的瞬时值表达式， $i=i_m\sin(\omega t + \varphi_0)$ 和 $u=u_m\sin(\omega t + \varphi_0)$ 分别是电流和电压的瞬时值表达式。它们统称为交流电的解析式，都是正弦量。

交流电的变化规律除用解析式表示外，还能用波形图直观地表示出来。如图 1-3 所示的是 $e=E_m\sin(\omega t + \varphi_0)$ 的波形图。当 $t=0$ 时，公式 $e=E_m\sin\varphi_0$ 即为初始值；当 $t=t_1$ ， $(\omega t + \varphi_0)=\pi/2$ 时， $e=E_m$ ，出现最大值；当 $t=t_2$ ， $(\omega t + \varphi_0)=\pi$ 时， $e=0$ 。同理， $t=t_3$ 时， $e=-E_m$ ； $t=t_4$ 时， $e=0$ ； $t=t_5$ 时， $e=E_m\sin(\omega t + \varphi_0)$ 回到初始值，电动势变化一周。以后周而复始。

2. 正弦交流电的三要素

(1) 最大值

正弦交流电瞬时值表达式为

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi_e)$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u)$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$$

式中, 在正弦符号前面的系数 E_m 、 U_m 、 I_m 称为这些正弦量的最大值, 它是交流电瞬时值中所能达到的最大值。从正弦交流电的波形图可知, 交流电完成一次周期性变化时, 正、负最大值各出现一次。

(2) 初相

$(\omega t + \varphi_0)$ 称为交流电的相位, 又称相角。它是一个随时间变化的量, 不仅决定了交流电瞬时值的大小和方向, 还可以用来比较交流电的变化步调。

计时开始时刻, 即 $t=0$ 时的相位 φ_0 称为初相, 它反映了交流电起始时刻的状态。正弦量的初相不同, 初始值就不同, 到达最大值和某一特定值所需时间也不同。

初相 $\varphi_0=0$ 波形图如图 1-4 (a) 所示; $\varphi_0>0$ 时, 波形沿横坐标向右平移了一个 φ_0 角, 如图 1-4 (b) 所示; $\varphi_0<0$ 时, 波形沿横坐标向左平移了一个 φ_0 角, 如图 1-4 (c) 所示。

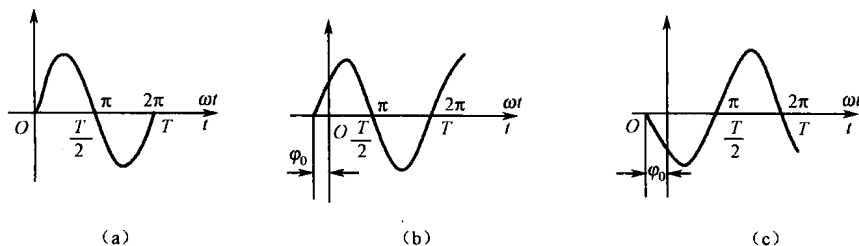


图 1-4 初相不同的几种正弦波

(3) 角频率、周期和频率

角频率是描述正弦交流电变化快慢的物理量。我们把交流电每秒钟变化的电角度叫做交流电的角频率, 用字母 ω 表示, 单位是弧度/秒 (rad/s)。

在工程中, 常用周期或频率来表示交流电变化的快慢。交流电完成一次周期性变化所需的时间, 叫做交流电的周期, 用字母 T 表示, 单位是秒 (s)。交流电在 1 秒钟内完成周期性变化的次数, 称为交流电的频率, 用字母 f 表示, 单位是赫兹 (Hz), 简称赫。

根据定义, 周期和频率互为倒数, 即

$$T = 1/f \text{ 或 } f = 1/T$$

因为交流电完成 1 次周期性变化所对应的电角度为 2π , 所用时间为 T , 所以角频率 ω 与周期 T 和频率 f 的关系是

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi f$$

我国采用 50Hz 作为电力标准频率, 也称为工频交流电, 其周期是 0.02s, 即 20ms, 角频率是 100π rad/s 或 314rad/s, 电流方向每秒钟变化 100 次。

任何一个正弦量的最大值、角频率和初相确定后, 就可以写出它的解析式, 得出这个正弦量任一时刻的瞬时值。因此, 最大值、角频率和初相称为正弦量的三要素。

3. 正弦交流电的相位差

设两个同频率的正弦交流电：

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u)$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$$

式中， $(\omega t + \varphi_u)$ 是电压 u 的相位； $(\omega t + \varphi_i)$ 是电流 i 的相位。

两个同频率正弦量的相位之差，叫做它们的相位差，用 φ 表示。这样，电压 u 和电流 i 的相位差为

$$\varphi = (\omega t + \varphi_u) - (\omega t + \varphi_i) = \varphi_u - \varphi_i$$

相位差是描述同频率正弦量相互关系的重要特征量。它表示两个同频率正弦量变化的步调，即在时间上超前或滞后到达正、负最大值或零值的关系。图 1-5 所示为两个同频率正弦电压和电流的相位关系。

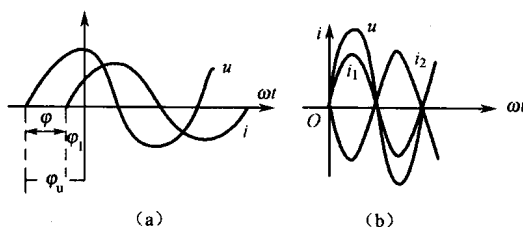


图 1-5 同频率正弦量的相应关系

在图 1-5 (a) 中， $\varphi_u > \varphi_i$ ，相位差 $\varphi = \varphi_u - \varphi_i > 0$ ，称为电压 u 超前电流 i 角度 φ ，或称电流 i 滞后电压 u 角度 φ 。它表示电压 u 比电流 i 要早到达正（或负）最大值或零值的时间是 φ/ω 。

图 1-5 (b) 中， u 和 i 具有相同的初相位，即相位差 $\varphi = 0$ ，称为 u 与 i_1 同相；而 u 和 i_2 相位正好相反，称为反相，即 u 与 i_2 的相位差为 $\pm 180^\circ$ 。

4. 正弦交流电的有效值和平均值

交流电的有效值是根据电流的热效应来规定的。交流电 i 与直流电 I 分别通过两个相同的电阻，如果在相同的时间内产生的热量相同，则该直流电的数值 I 就叫交流电的有效值。交流电有效值的表示方法与直流电相同，用大写字母表示，如 E 、 U 、 I 分别表示交流电的电动势、电压和电流的有效值。

交流电压表、电流表所测量的数值、各种交流电气设备铭牌上所标的额定电压和额定电流值、我们平时所说的交流电的值都是指有效值。以后凡涉及交流电的数值，只要没有特别说明，都是指有效值。

理论计算证明，正弦交流电的有效值和最大值之间满足下列关系：

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0.707 E_m$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0.707U_m$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707I_m$$

我国照明电路的电压是 220V，其最大值是 $220\sqrt{2} \approx 311\text{V}$ ，接入 220V 交流电路的电器耐压值必须不小于 311V。

在电子技术中，有时要求交流电的平均值。交流电压或电流在半个周期内所有瞬时值的平均数，称为该交流电压或电流的平均值。理论和实践都可以证明：交流电的平均值是最大值的 $2/\pi$ ，即为最大值的 0.637。

1.1.3 三相交流电

目前，世界各国电力系统普遍采用三相制供电方式，组成三相交流电路。日常生活中的单相用电也是取自三相交流电中的一相。三相交流电之所以被广泛应用，是因为它节省线材、输送电能经济方便、运行平稳。三相交流电动机构造简单、价格低廉、性能良好，是工农业生产的主要动力设备。

因此，在单相交流电路基础上，进一步研究三相交流电路具有重要的现实意义。

1. 三相交流电的产生

三相交流电由三相交流发电机产生，其过程与单相交流电基本相似。

1) 三相交流发电机的简单构造

三相交流发电机原理示意图如图 1-6 所示，它主要由定子和转子两部分组成。发电机定子铁芯由内圆开有槽口的绝缘薄硅钢片叠制而成，槽内嵌有 3 个尺寸、形状、匝数和绕向完全相同的独立绕组 U_1U_2 、 V_1V_2 和 W_1W_2 。它们在空间位置互差 120° ，其中 U_1 、 V_1 、 W_1 分别是绕组的始端， U_2 、 V_2 、 W_2 分别是绕组的末端。每个绕组称为发电机中的一相，分别称为 U 相、V 相和 W 相。发电机的转子铁芯上绕有励磁绕组，通过固定在轴上的两个滑环引入直流电流，使转子磁化成磁极，建立磁场，产生磁通。

2) 三相对称正弦量

当转子磁极在原动机驱动下以角速度 ω 顺时针匀速旋转时，相当于每相绕组沿逆时针方向匀速旋转，做切割磁感线运动，从而产生 3 个感应电压 u_U 、 u_V 、 u_W 。由于三相绕组的结构完全相同，在空间位置互差 120° ，并以相同角速度切割磁感线，因此这 3 个正弦电压的最大值相等，频率相同，而相位互差 120° 。以 u_U 为参考电压，则这 3 个绕组的感应电压瞬时值表达式为

$$\begin{cases} u_U = \sqrt{2}U_{\text{相}} \sin \omega t \\ u_V = \sqrt{2}U_{\text{相}} \sin(\omega t - 120^\circ) \\ u_W = \sqrt{2}U_{\text{相}} \sin(\omega t - 240^\circ) = \sqrt{2}U_{\text{相}} \sin(\omega t + 120^\circ) \end{cases}$$

式中， u_U 、 u_V 、 u_W 分别叫 U 相电压、V 相电压和 W 相电压。我们把这种最大值（有效值）

相等、频率相同、相位互差 120° 的三相电压称为三相对称电压。每相电压都可以看做一个独立的正弦电压源，其参考极性规定：各绕组的始端为“+”极，末端为“-”极，如图 1-7 所示。将发电机三相绕组按一定方式连接后，就组成一个三相对称电压源，可对外供电。

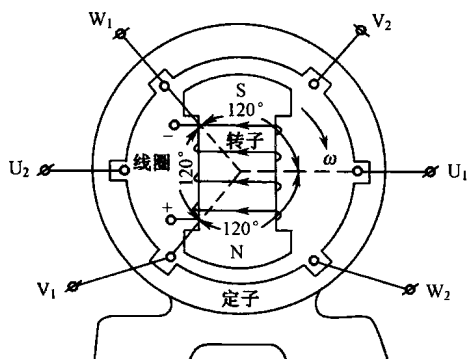


图 1-6 三相交流发电机原理示意图

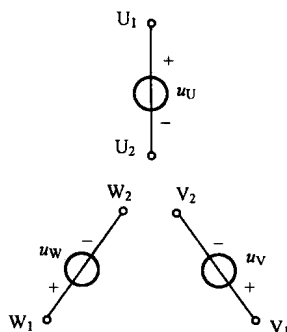


图 1-7 三相电源

三相对称电压的波形图和向量图如图 1-8 (a) 和图 1-8 (b) 所示。由三相对称电压的波形图可以看出，三相对称电压的瞬时值，在任一时刻的代数和等于零，即 $u_U + u_V + u_W = 0$ 。

将图 1-8 (b) 所示向量图中任意两个电压向量按平行四边形法则合成，其向量和必与第 3 个电压向量大小相等，方向相反，向量和为零。即三相对称电压瞬时值的代数和等于零，有效值的向量和等于零的结论，同样适用于三相对称电动势、三相对称电流，即三相对称正弦量之和恒等于零。

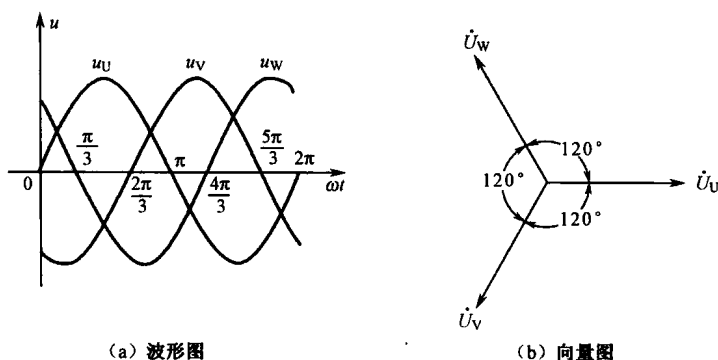


图 1-8 三相对称电压波形图和相量图

3) 相序

在三相电压源中，各相电压到达正的或负的最大值的先后次序，称为三相交流电的相序。习惯上，选用 U 相电压作参考，V 相电压滞后 U 相电压 120° ，W 相电压又滞后 V 相电压 120° （或 W 相电压超前 U 相电压 120° ），所以它们的相序为 U—V—W，称为正序；反之则称为负序。

在实际工作中，相序是一个很重要的问题。例如，几个发电厂并网供电，相序必须相同；否则，发电机会遭到严重损害。因此，统一相序是整个电力系统安全、可靠运行的基本要求。

为此,电力系统并网运行的发电机、变压器、输送电能的高压电路和变电所等,都按技术标准采用不同颜色区分电源的三相:用黄色表示U相,绿色表示V相,红色表示W相。

2. 三相电源的连接

1) 三相电源的星形连接

把三相电源的3个绕组的末端 U_2 、 V_2 、 W_2 连接成一个公共点N,由3个始端 U_1 、 V_1 、 W_1 分别引出3根导线 L_1 、 L_2 、 L_3 向负载供电的连接方式称为星形连接,如图1-9所示。

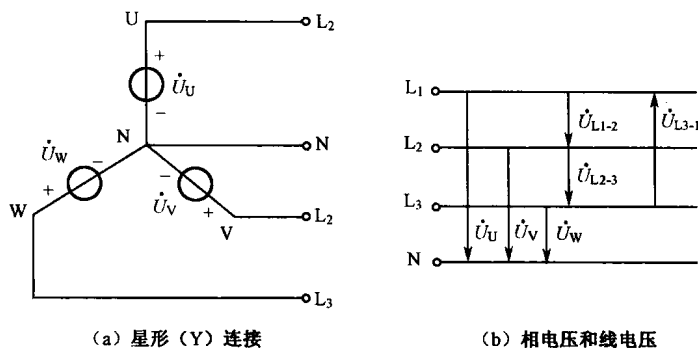


图 1-9 三相四线制电源

公共点N称为中点或零点,从N点引出的导线称为中线或零线。若N点接地,则中线又叫地线。由始端引出的三根输电线,称为相线,俗称火线。这种由三根火线和一根中线组成的三相供电制系统,在低压配电中经常采用。为了简化电路图,经常省略三相电源不画,只标出相线和中线符号。

电源每相绕组两端的电压称为相电压。在三相四线制中,相电压就是相线与中线之间的电压。3个相电压的瞬时值用 u_U 、 u_V 、 u_W 表示,相电压的正方向规定为由绕组的始端指向末端,即由相线指向中线。

相线与相线之间的电压称为线电压,它们的瞬时值用 u_{L1-2} 、 u_{L2-3} 、 u_{L3-1} 表示。线电压的正方向由下标数字的先后次序来表明。例如,表示两相线 L_1 和 L_2 之间的线电压是由 L_1 线指向 L_2 线。

2) 三线电源的三角形连接

将三相电源的3个绕组的始、末端顺次相连,接成一个闭合三角形,再从3个连接点U、V、W分别引出3根输电线 L_1 、 L_2 、 L_3 ,如图1-10所示,这就是三相电源的三角形(Δ)连接。

从图1-10可以看出,三相电源三角形连接时,各线电压就是相应的相电压,即

$$\begin{cases} u_{L1-2} = u_U \\ u_{L2-3} = u_V \\ u_{L3-1} = u_W \end{cases}$$

其对应的相量形式为

$$\begin{cases} \dot{U}_{L1-2} = \dot{U}_U \\ \dot{U}_{L2-3} = \dot{U}_V \\ \dot{U}_{L3-1} = \dot{U}_W \end{cases}$$

因为三相对称电压 $U_U + U_V + U_W = 0$ ，所以三角形闭合回路的总电压为零，不会引起环路电流。要特别注意：三相电源采用三角形连接时，必须把各相绕组始、末端顺次连接，任何一相绕组接反，闭合回路中的总电压将会是相电压的两倍，从而产生很大的环路电流，致使电源绕组烧毁。

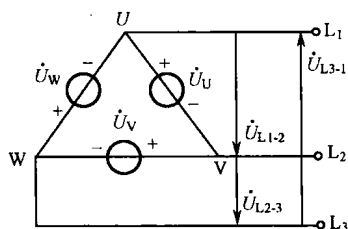


图 1-10 三相电源的三角形连接

3. 三相负载的连接

在三相负载中，如果每相负载的电阻、电抗分别相等，则称为三相对称负载。一般情况下，三相异步电动机等三相用电设备是三相对称负载；而由三组单相负载组合成的三相负载通常是不对称的。

要使负载正常工作，必须满足负载实际承受的电源电压等于额定电压。三相负载也有星形和三角形连接方法，以满足它对电源电压的要求。

1) 三相负载的星形连接

把三相负载的其中一端连接在一起，该点称为负载中心点，用 N 表示，它常与三相电源的中线连接；把三相负载的另一端分别与三相电源的 3 根相线连接，这种连接方式称为三相负载的星形（Y）连接，如图 1-11 所示。这是最常见的三相四线制供电电路。

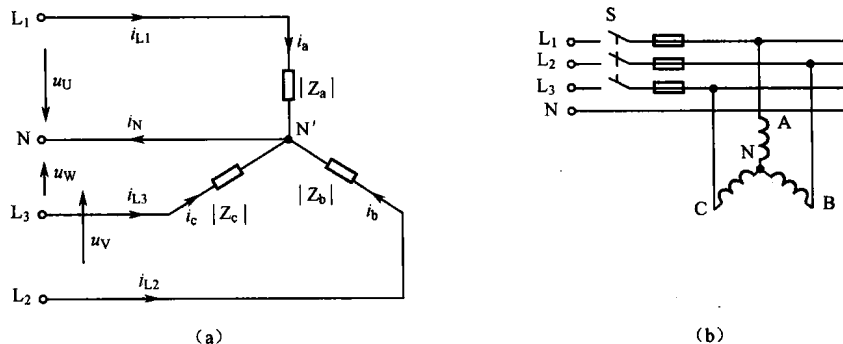


图 1-11 三相负载的星形连接

在三相四线制电路中，每相负载两端的电压叫做负载的相电压，用 $U_{Y\text{相}}$ 表示，其正方向规定为由相线指向负载的中心点，即相线指向中线。若忽略电线电阻上的电压降，负载的相电压等于电源的相电压，电源的线电压等于负载相电压的 $\sqrt{3}$ 倍，即

$$U_{\text{线}} = \sqrt{3} U_{Y\text{相}}$$

当电源的线电压为各相负载的额定电压的 $\sqrt{3}$ 倍时，三相负载必须采用星形连接。

在三相电路中，流过每相负载的电流叫相电流，用 $I_{\text{相}}$ 表示，正方向与相电压方向相同；

流过每条相线的电流叫线电流，用 $I_{\text{线}}$ 表示，正方向规定由电源流向负载，工程上通称的三相电流，若无特别说明，都是指线电流的有效值；流过中线的电流称为中线电流，用 I_N 表示，正方向规定为由负载中点流向电源中点。显然，在三相负载的星形连接中，线电流就是相电流，即

$$I_{Y\text{线}} = I_{Y\text{相}}$$

由三相对称电源和三相对称负载组成的电路称为三相对称电路。在三相四线制三相对称电路中，每一相都组成一个单相交流电路，各相电压与电流的数量和相位关系，都可采用单相交流电路的方法来处理。

在三相对称电压作用下，流过三相对称负载的各相电流也是对称的，即

$$I_{Y\text{相}} = I_U = I_V = I_W = \frac{U_{Y\text{相}}}{|Z_{\text{相}}|}$$

因此，对于三相对称电路，只要计算出其中一相，再根据对称特点，就可以推出其他两相。

当三相对称负载为电感特性时，其相电压与相电流的向量图如图 1-12 所示。

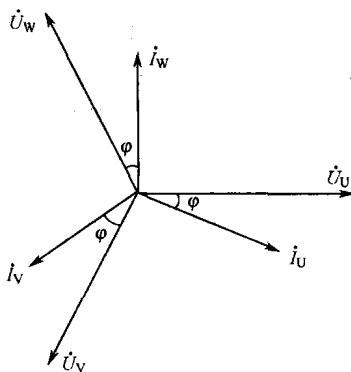


图 1-12 向量图

因为 $I_{Y\text{线}} = I_{Y\text{相}}$ ，所以三个线电流也对称。由基尔霍夫第一定律可知

$$i_V = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3} = 0$$

或

$$\dot{i}_V = \dot{i}_{L1} + \dot{i}_{L2} + \dot{i}_{L3} = 0$$

所以，三相对称负载作星形连接时，中线电流为零，此时可以把中线去掉，不影响电路的正常工作，各相负载的相电压仍为对称的电源相电压，三相四线制变成了三相三线制，称为 Y—Y 对称电路。在工农业生产中普遍使用的三相异步电动机等三相负载一般是对称的，所以三相三线制也得到了广泛的应用。

2) 三相负载的三角形连接

三相负载分别接在三相电源的每两根相线之间的连接方式，称为三相负载的三角形连接，如图 1-13 所示。