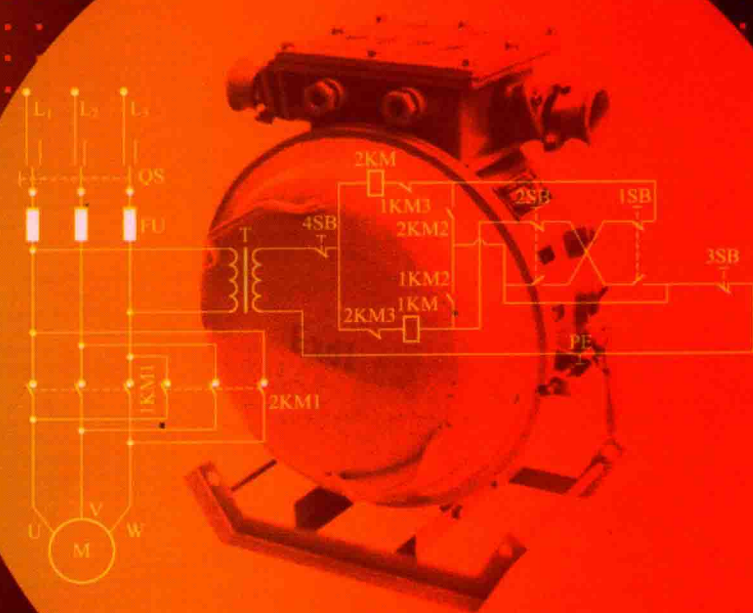


潘志栋 贺全智 主编 李正术 张盈盈 副主编

矿山电工 与电路仿真



化学工业出版社

吕梁学院科研基金项目资助（项目编号：ZRXN201407）

矿山电工与电路仿真

潘志栋 贺全智 主 编

李正术 张盈盈 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

矿山电工与电路仿真/潘志栋, 贺全智主编. —北京:
化学工业出版社, 2015. 3
ISBN 978-7-122-22827-7

I. ①矿… II. ①潘…②贺… III. ①矿山电工-计
算机仿真②矿山-电路-计算机仿真 IV. ①TD6-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 014469 号



责任编辑: 刘丽宏
装帧设计: 刘丽华

文字编辑: 云 雷

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 刷: 北京云浩印刷有限责任公司
装 订: 三河市瞰发装订厂
787mm×1092mm 1/16 印张 12 $\frac{3}{4}$ 字数 330 千字 2015 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究

矿山开采环境恶劣,尤其井下生产时刻受到水、火、瓦斯、煤尘和顶板等五大灾害的威胁,因此,矿山供电系统的可靠运行和矿山电气设备的安全使用是煤矿企业非常重视的一个生产环节。为适应当前国家普通高等教育大幅向应用技术型本科转型发展的现状,提高煤炭类专业学生在矿山电工方面理论知识的应用水平,我们编写了本书。

本书面向煤炭类应用型本科专业,注重学习者应用能力与实践能力的培养。理论知识以“必需、够用”为原则,强调学习者电路分析和仿真能力的培养,以及煤矿电工实践技能的训练。全书内容包括矿山供电系统、矿山电气设备、矿山供电安全技术以及采区供电设计等,各部分内容的编排采用先理论知识讲解,再实践案例介绍的形式,以期培养和提高学生分析问题与解决问题的能力。

本书配有教学课件,每一模块都有相应的复习题和实验内容,读者可以通过网址 <http://www.cipedu.com.cn> (化学工业出版社教学资源网) 下载。

本书编写过程中受吕梁学院校内自然科学基金(ZRXN201407)项目资助。全书由潘志栋、贺全智任主编,李正术、张盈盈任副主编,参与编写的还有常悦、王向玲、侯艳斐等。具体编写分工是,李正术编写第一模块,贺全智编写第二模块,张盈盈编写第三模块课题三,常悦编写第三模块课题一,王向玲编写第三模块课题二,潘志栋编写第四模块。全书由潘志栋统稿,张广荣主审。

在本书的编写过程中,山西大土河矿业投资有限公司提供了相关技术资料,在此衷心感谢。

由于笔者水平有限,书中不足之处恳请读者批评指正。

编者

模块一 矿山供电系统

1

课题一 三相交流电路	2
第一部分 理论知识	2
知识点 1: 三相电源	2
知识点 2: 三相负载	3
第二部分 实践案例	5
案例 1: 三相电路有功功率和无功功率的测量	5
案例 2: 三相电路相序判别及无功功率测量	7
案例 3: 三相负载 Y 形连接	10
课题二 矿井地面供电系统	13
第一部分 理论知识	13
知识点 1: 电力系统与供电电压等级	13
知识点 2: 供电系统的结线方式	19
知识点 3: 矿井变电所的主结线	21
第二部分 实践案例	27
案例 1: 高压系统放射式结线	27
案例 2: 高压系统干线式结线	28
课题三 井下供电系统	29
第一部分 理论知识	29
知识点 1: 中央变电所	29
知识点 2: 采区变电所	31
知识点 3: 采煤工作面供电系统及设备布置	34
第二部分 矿井供电系统案例	37
案例 1: 深井供电系统案例	37
案例 2: 浅井供电系统案例	37

模块二 矿用电气设备

41

课题一 低压电器	42
第一部分 理论知识	42
知识点 1: 接触器	42
知识点 2: 继电器	44
知识点 3: 低压断路器与低压隔离开关	48
知识点 4: 低压熔断器	50

第二部分 实践案例	51
案例 1: 矿用隔爆型电磁启动器	51
案例 2: 矿用隔爆型低压自动馈电开关	66
课题二 高压开关	74
第一部分 理论知识	74
知识点 1: 电弧理论	74
知识点 2: 高压开关	76
第二部分 高压配电开关案例	84
案例 1: 矿用隔爆型高压配电箱	84
案例 2: 矿用隔爆型移动变电站	87
课题三 矿用电力电缆	100
第一部分 理论知识	100
知识点 1: 电力电缆概述	100
知识点 2: 矿用电力电缆	103
第二部分 实践案例	108
案例 1: 矿用电缆的敷设	108

模块三 矿山供电安全技术

111

课题一 矿井电气火灾	112
第一部分 理论知识	112
知识点 1: 矿井电气火灾的产生原因及预防措施	112
知识点 2: 灭火器的合理使用	114
知识点 3: 火灾中的逃生自救	116
第二部分 煤矿特大电气火灾事故案例	117
案例 1: ×××煤矿特大电气火灾 1	117
案例 2: ×××煤矿特大电气火灾 2	119
课题二 安全用电与触电	121
第一部分 理论知识	121
知识点 1: 安全用电	121
知识点 2: 触电	126
第二部分 现场急救实践	128
案例 1: 人工呼吸法	128
案例 2: 胸外心脏挤压法	129
案例 3: 两种急救方法的联合应用	130
课题三 井下三大保护	131
第一部分 理论知识	131
知识点 1: 短路电流概述	131
知识点 2: 过流保护	139
知识点 3: 保护接地	142

知识点 4: 漏电保护	146
第二部分 实践案例	149
案例 1: 矿井高压电网短路计算	149
案例 2: 井下低压电网短路实验	153
案例 3: 煤矿井下保护接地网	157
案例 4: 漏电故障的判断与寻找	160
案例 5: 单相漏电时负载电压的相位关系	161
案例 6: JY82 型检漏继电器组成	165
案例 7: 漏电保护系统	166

模块四 采区供电设计

168

课题 供电设计过程	169
第一部分 理论知识	169
知识点 1: 供电设计概述	169
知识点 2: 供电设计过程	173
第二部分 供电设计案例	179

参考文献

197

模块一

矿山供电系统

● 学习目标

1. 熟悉矿山供电系统中电气设备的供电电压等级。
2. 掌握矿山变电所常用的主结线形式。
3. 掌握井下中央变电所位置选择及硐室布置原则。
4. 掌握采区变电所位置选择及硐室布置原则。

● 技能要求

1. 能依据矿井资料，确定矿山变电所（包括地面变电所、井下主变电所以及采区变电所）的合理位置，合理确定硐室设备摆放位置。
2. 掌握中央变电所中单母线分段结线的运行过程。

课题一

三相交流电路

第一部分 理论知识

► 知识点 1：三相电源

三相电源绕组有两种基本连接方式：星形连接和三角形连接。星形连接也称 Y 形连接，三角形连接也称 D 形连接。

一、三相电源绕组的 Y 形连接

如图 1-1 所示，将三相电源绕组的末端 U_2 、 V_2 与 W_2 连在一起，形成一个结点，称为中性点，记为 N ，始端 U_1 、 V_1 和 W_1 分别引出三根线 U_1 - U 、 V_1 - V 和 W_1 - W ，这种连接方式称为 Y 形连接方式。

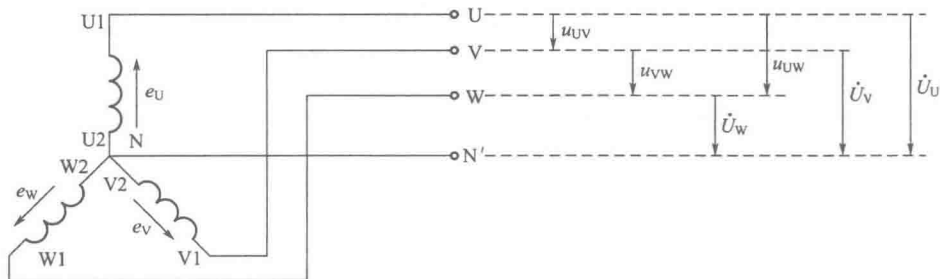


图 1-1 三相四线制接线

从始端 U_1 、 V_1 和 W_1 引出的三根线 U_1 - U 、 V_1 - V 和 W_1 - W 称为端线（或称相线，俗称火线），在不引起误解的情形下常写为端线 U 相、 V 相、 W 相；从中性点 N 引出的线 N - N' 称为中性线，简称中线，在不引起误解的情形下常写为中线 N 。端线 U 相、 V 相、 W 相，以及中线 N 将连接外电路的四根输电线。

在地面供电系统中，由三根端线和一根中线所组成的输电方式称为三相四线制（通常在低压供电中采用）；仅由三根端线所组成的输电方式称为三相三线制（一般在高压输电工程中采用）。

在三相四线制中，三相电源的中性点要直接接地，中性点接地后被称为零点，连接中性点与接地极的线称为零线。工程中 U 、 V 、 W 三相线分别用黄、绿、红颜色来区别，零线或中线用黄绿相间色的线表示。如图 1-1 所示，端线与中线间的电压，即各相绕组两端的电压

称为相电压,参考方向规定为由电源绕组的始端指向末端,有效值相量分别为 $\dot{U}_U$ 、 $\dot{U}_V$ 和 $\dot{U}_W$;端线间的电压称为线电压,瞬时值分别为 u_{UV} 、 u_{VW} 和 u_{WU} 。

由图 1-1 可以分析出,发电机(或变压器二次侧)绕组连接成 Y 形,可以为负载提供两种对称的三相电压;一种是对称的相电压,另一种是对称的线电压;流过各相的线电流有效值 $\dot{I}_L$ 等于流过各相电源的相电流有效值 $\dot{I}_P$,即 $\dot{I}_L = \dot{I}_P$ 。

目前煤矿综采工作面移动变电站使用 1140V 线电压供采煤机使用,也可提供 660V 相电压供工作面回柱绞车使用。

二、三相电源绕组的三角形连接

对称三相电源可以采用三角形连接,或称为 D 形连接。这种连接方式是将三相电源每相绕组的末端和另一相绕组的始端依次相连,如图 1-2 所示。此时,线电压 U_L 即为相电压 U_P 。(注意,图 1-2 中与电动势相量符号对应的箭头仅代表电动势有效值的参考方向)

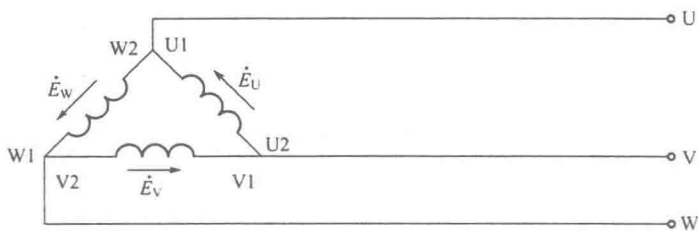


图 1-2 三相电源绕组的三角形连接

如果三相电动势彼此对称,则三角形闭合回路的电动势相量和为零,即 $\dot{E}_U + \dot{E}_V + \dot{E}_W = 0$ 。此时电源绕组内部不存在环流。但是,如果三相电动势不对称程度较大,则回路电动势相量和不为零,此时即使外部无负载,也会因为各相绕组本身的阻抗均较小,在闭合回路内产生较大的环流,可能导致绕组过热烧坏。因此,三相发电机(或三相变压器)常采用 Y 形连接,在特定情况下采用 D 形连接时,必须检查三相绕组的对称性,且连接过程中不能将各电源的始、末端接错,否则将导致电源绕组烧坏。

知识点 2: 三相负载

在三相电路中,与三相电源连接方式相类似,三相负载(即各类三相用电设备)也有 Y 形连接和 D 形连接两种接线方式。

一、三相负载的 Y 形连接

把用电设备的三相负载分别接在三相电网的端线与中线间的接法称为三相负载的星形连接。如图 1-3 所示,三相负载的中性点 N' 与三相电源的中性点 N 相连,三相负载各相阻抗 $Z_U = Z_V = Z_W = Z$ 。

如果用电设备为三相负载(如三相电动机、大功率三相电炉等),那么生产厂家在产品生产过程中可以做到三相负载完全对称(即阻抗大小相等且元件特性相同)。

然而,在现实生产生活中,用电设备的设计者往往更多地关注其产品功能能否满足用户需求,在此基础上再考虑节省成本。设计人员会依据所收集到的来自产品用户方的对产品功能的需求,首先确定待设计产品应有的供电方式。电气产品的这种设计思路决定了现实中的用电设备不仅工作于某种额定电压等级,体积有大有小,形状功能各异,而且用电设备可能成为电网的两相负载或三相负载,从而导致三相不对称电路的实际存在。为使此种情形下的

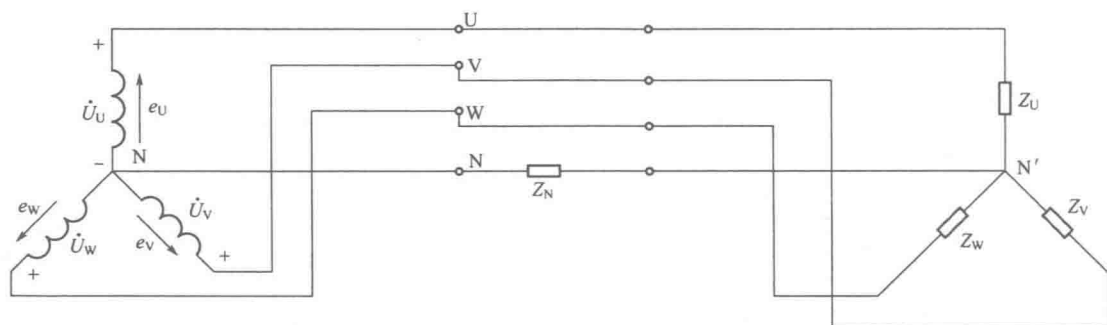


图 1-3 对称三相负载的星形连接

电气设备工作在额定电压下, 需要采用图 1-3 的形式连接电源与负载。

二、三相负载的 D 形连接

把三相负载分别接在三相线路每两根端线间的接法称为 D 形连接, 如图 1-4 所示, 三相阻抗分别为 Z_U 、 Z_V 和 Z_W 。

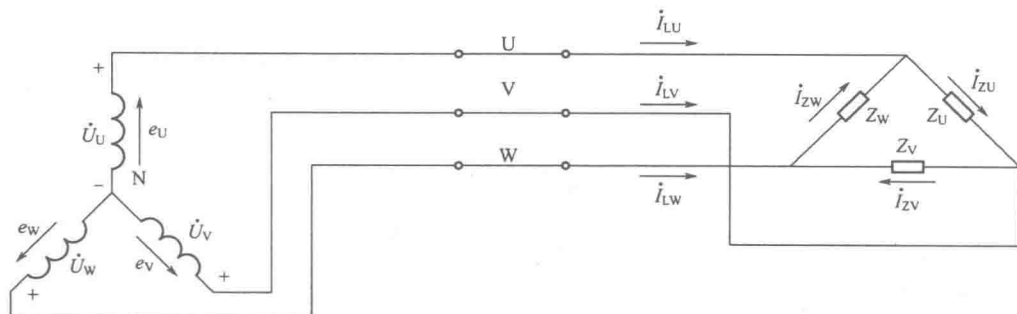


图 1-4 三相负载的 D 形连接

在 D 形连接中, 由于每相负载接在两根端线间, 因此负载两端的相电压 $\dot{U}_{ZP}$ 等于输电线的线电压 $\dot{U}_L$, 即 $\dot{U}_L = \dot{U}_{ZP}$ 。假设流过负载的相电流分别为 $\dot{I}_{ZU}$ 、 $\dot{I}_{ZV}$ 和 $\dot{I}_{ZW}$, 流过端线的线电流分别为 $\dot{I}_{LU}$ 、 $\dot{I}_{LV}$ 和 $\dot{I}_{LW}$ 。

由于三相电源提供三个对称的相电压 (即 $\dot{U}_U + \dot{U}_V + \dot{U}_W = 0$), 且三相负载对称 (设 $Z_U = Z_V = Z_W = Z$), 因此流过三相负载的相电流为: $\dot{I}_{ZU} = \frac{\dot{U}_{UW}}{Z}$, $\dot{I}_{ZV} = \frac{\dot{U}_{VW}}{Z}$, $\dot{I}_{ZW} = \frac{\dot{U}_{WU}}{Z}$, 且 $\dot{I}_{ZU} + \dot{I}_{ZV} + \dot{I}_{ZW} = 0$ 。

我国的三相四线制供电电网中, 线电压为 380V, 当用电设备 (如异步电动机) 的额定电压为 380V 时, 就应做 D 形连接接入电网; 当用电设备 (如照明灯具) 的额定电压为 220V 时, 就应做 Y 形连接接入电网。图 1-4 中接线形式不适合三相不对称负载的工作需要, 仅适用于三相负载的情况。

三、三相负载的功率

在三相交流电路中, 三相负载消耗的总功率为各相负载消耗的功率之和, 即

$$P = U_{ZU} I_{ZU} \cos \varphi_u + U_{ZV} I_{ZV} \cos \varphi_v + U_{ZW} I_{ZW} \cos \varphi_w \quad (1-1)$$

式中, U_{ZU} 、 U_{ZV} 和 U_{ZW} 为相电压, I_{ZU} 、 I_{ZV} 和 I_{ZW} 为相电流, $\cos \varphi_u$ 、 $\cos \varphi_v$ 和 $\cos \varphi_w$ 为功率因数。

负载对称的三相电路中, $U_{ZU}=U_{ZV}=U_{ZW}$, $\cos\varphi_u=\cos\varphi_v=\cos\varphi_w$, 因此三相负载消耗的总功率为: $P=3U_ZI_Z\cos\varphi$ 。

在实际工作中, 测量线电流比测量相电流要方便 (特别对于 D 形连接的负载), 测量线电压比测量相电压方便 (特别对于 Y 形连接的负载), 因此三相功率的计算式通常用线电流, 线电压来表示。

当三相对称负载作 Y 形连接时, 有功功率为:

$$P_Y=3U_ZI_Z\cos\varphi=3\frac{U_L}{\sqrt{3}}I_L\cos\varphi=\sqrt{3}U_LI_L\cos\varphi \quad (1-2)$$

当三相对称负载作 D 形连接时, 有功功率为:

$$P_D=3U_ZI_Z\cos\varphi=3U_L\frac{I_L}{\sqrt{3}}\cos\varphi=\sqrt{3}U_LI_L\cos\varphi \quad (1-3)$$

可以看出, 不论是 Y 形连接还是 D 形连接的三相对称负载, 其有功功率均为: $P=\sqrt{3}U_LI_L\cos\varphi$ (注意: 式中 φ 等于相电压 $\dot{U}_Z$ 与相电流 $\dot{I}_Z$ 的相位差)。同理可推出三相对称负载的无功功率和视在功率分别为: $Q=\sqrt{3}U_LI_L\sin\varphi=3U_ZI_Z\sin\varphi$, $S=\sqrt{3}U_LI_L=3U_ZI_Z$ 。

另外明确的是: D 形连接的三相负载接入电路时的线电流和线电压并不等于同一负载以 Y 形连接接入电路时线路上的线电流和线电压。

第二部分 实践案例

案例 1: 三相电路有功功率和无功功率的测量

一、目的

1. 掌握用两表法测定对称三相电路的功率。
2. 掌握三相对称电路无功功率的测量。

二、仪器

功率表、阻抗 Z , 三相电源、电压表、电流表。

三、原理

(一) 三相对称负载有功功率测量

在图 1-5 中, 三相负载的瞬时功率为

$$p=p_A+p_B+p_C=u_{AN'}i_A+u_{BN'}i_B+u_{CN'}i_C$$

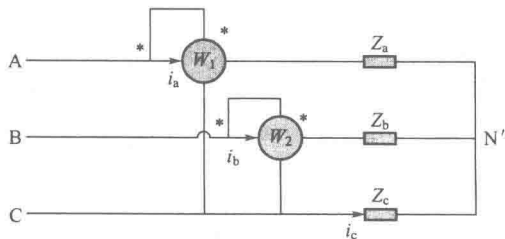


图 1-5 两瓦特计测功率

由于三相三线制中, $i_A+i_B+i_C=0$, 即有 $i_C=-(i_A+i_B)$, 代入上式整理得

$$p=u_{AC}i_A+u_{BC}i_B$$

根据正弦电路中平均功率的定义可求得三相平均功率为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = U_{AC} I_A \cos \varphi_1 + U_{BK} I_B \cos \varphi_2 = P_1 + P_2$$

P_1 和 P_2 分别为两个功率表的读数。所以两个功率表的读数和就是三相负载平均功率。

(二) 三相对称负载无功功率测量

用一只瓦特表按图 1-6 连接。根据有功功率表工作原理, 可知它的转矩是与电压线圈的电压 U_{BK} 、通过电流线圈的电流 I_A 以及二者之间的功率因数 $\cos \beta$ 成正比, 即 $M_p = CU_{BK} I_A \cos \beta$ (C 为常数)。

由图 1-7 可知, U_{BK} 与 U_A 的相位差为 90° , 则有 $\cos \beta = \sin \varphi$ 。 φ 为对称三相负载每一相功率因数角。

$$M_p = CU_{BK} I_A \cos \beta = CU_{BK} I_A \sin \varphi = CU_1 I_1 \sin \varphi$$

由于在对称三相电路中, 三相负载总无功功率 $Q = \sqrt{3} U_1 I_1 \sin \varphi$

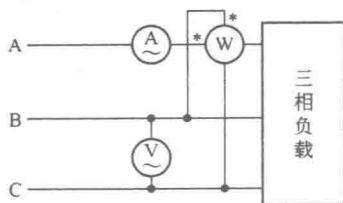


图 1-6 三相对称负载无功功率测量

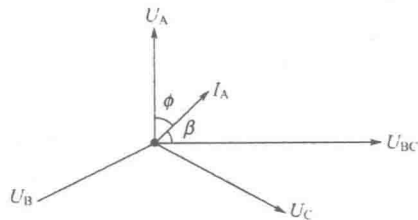


图 1-7 相量图

由于功率表读数与转矩成正比, 可以使读数 $W = M_p / C = U_1 I_1 \sin \varphi$, 则 $Q = \sqrt{3} W$

因此, 用该方法测量对称负载三相无功功率时, 只需将一只功率表的读数乘以 $\sqrt{3}$ 倍。必须注意: 若测 I_A , 电压须测 U_{BK} ; 若测 I_B , 电压须测 U_{CA} ; 若测 I_C , 电压须测 U_{AB} 。测量过程必须注意电源的相序, 以及电流极性。

四、实验内容

按图 1-8、图 1-9 接线。并测量三相电路有功功率, 填入表 1-1 中。

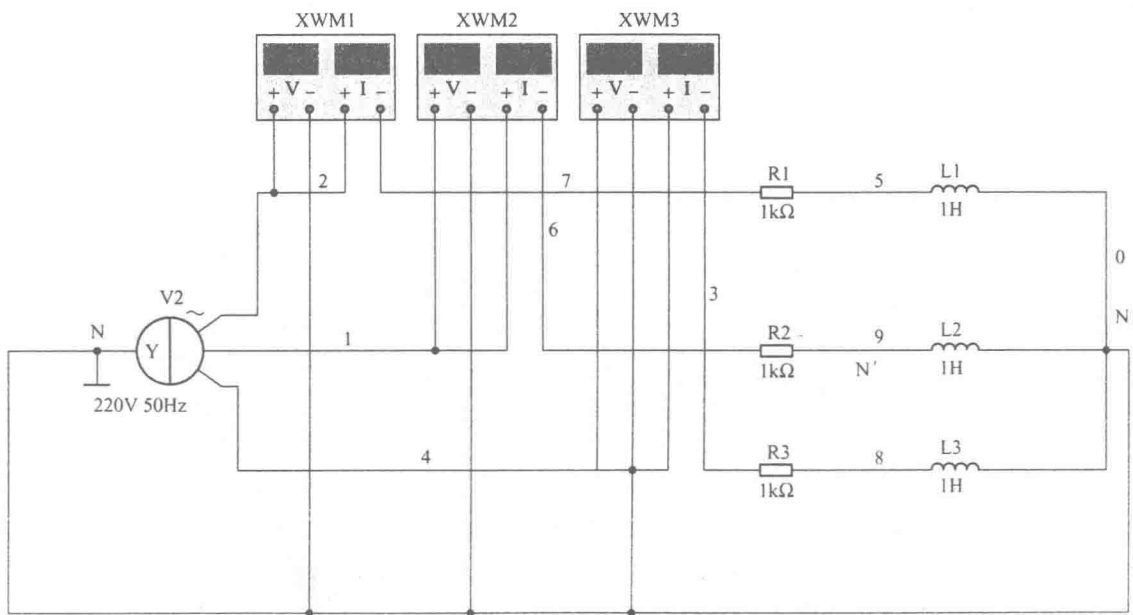


图 1-8 三表法接线图

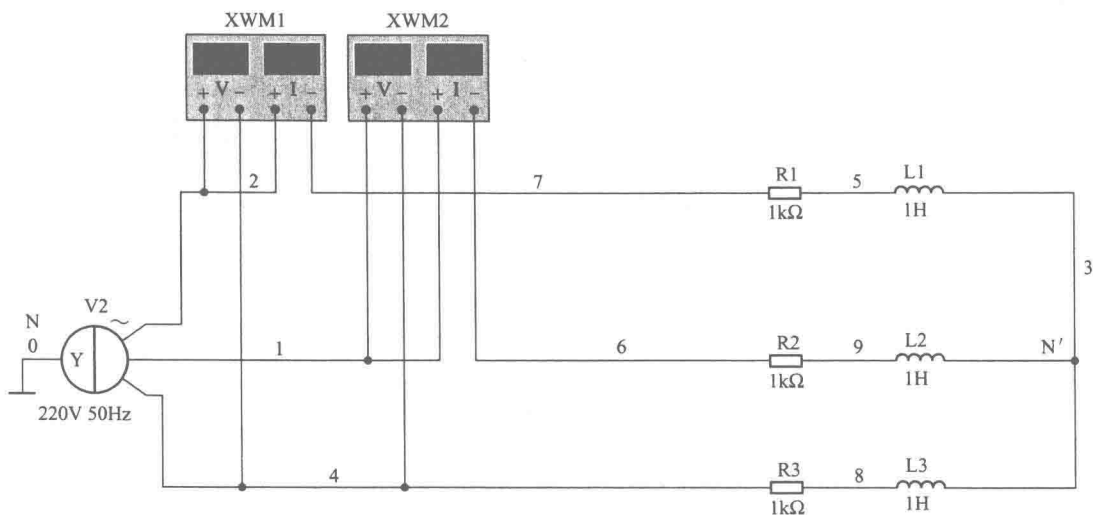


图 1-9 两表法接线图

表 1-1 三相功率测量用表

分类	XWM1	XWM2	XWM3	P
三表法				
两表法			—	

案例 2: 三相电路相序判别及无功功率测量

一、目的

1. 掌握三相交流电路相序判别方法。
2. 掌握测量三相对称负载无功功率的原理和方法。

二、仪器

功率表，单相交流电源，灯泡（220V/100W）， $1\mu\text{F}/220\text{V}$ ，三相电源。

三、原理

（一）三相电路相序判别原理

图 1-10 为相序指示器电路，用以测定三相电源的相序 A、B、C。它是由一个电容器和两个灯泡联接成的星形不对称三相负载电路。如果电容器所接的是 A 相，则灯光较亮的是 B 相，较暗的是 C 相。相序是相对的，任何一相均可作为 A 相。但 A 相确定后，B 相和 C 相也就确定了。原因如下：

设 $X_C=R_B=R_C=R$ ， $\dot{U}_A=U_p\angle 0^\circ$ ，则

$$\dot{U}_{N'N} = \frac{U_p \left(\frac{1}{-jR} \right) + U_p \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \left(\frac{1}{R} \right) + U_p \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \left(\frac{1}{R} \right)}{-\frac{1}{jR} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R}}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{BN'} &= \dot{U}_B - \dot{U}_{N'N} = U_p \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) - U_p (-0.2 + j0.6) \\ &= U_p (-0.3 - j1.466) = 1.49 \angle -101.6^\circ U_p \end{aligned}$$

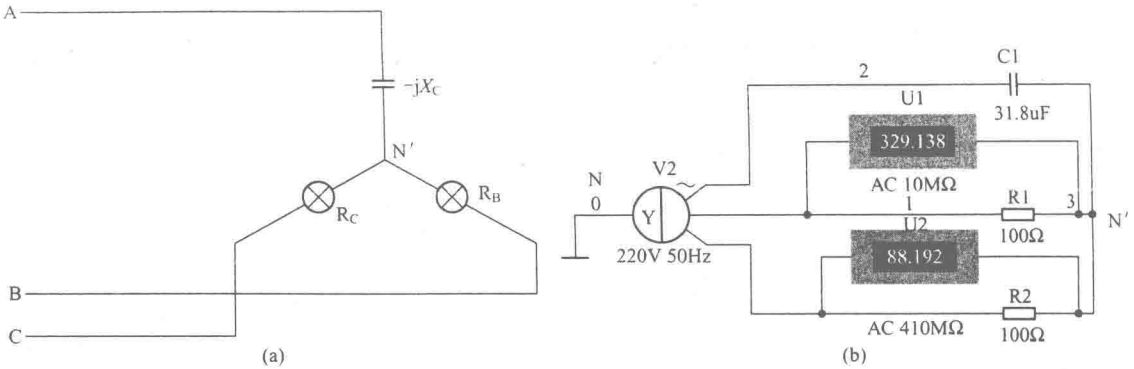


图 1-10 相序指示器电路原理图与接线图

$$\begin{aligned}\dot{U}_{CN'} &= \dot{U}_C - \dot{U}_{N'N} = U_p \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) - U_p (-0.2 + j0.6) \\ &= U_p (-0.3 + j0.266) = 0.4 \angle -138.4^\circ U_p\end{aligned}$$

由于 $U_{BN'} > U_{CN'}$ ，故 B 相灯光较亮。

(二) 三相不对称电路无功功率测量原理

测量三相对称电路无功功率的方法参见案例 1。当三相交流电路不对称时，可用图 1-11 测量。三相负载总无功功率 $Q = (W_1 + W_2 + W_3) / \sqrt{3}$ 。

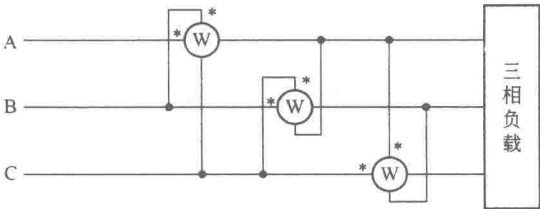


图 1-11 三相负载无功功率测量

四、实验内容

(一) 三相电路相序判别

相序判别实验接线图见图 1-12，相序判别实验用表见表 1-2。

表 1-2 相序判别实验用表

相	A 相	B 相	C 相	备注
电压				
网络号				

(二) 三相电路无功功率

无功功率实验接线及仿真见图 1-13，无功功率测量用表见表 1-3。

表 1-3 无功功率测量用表

功率表	Q_1	Q_2	Q_3	$\sum Q_i$	$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} \sum Q_i$
实测值					
理论值					

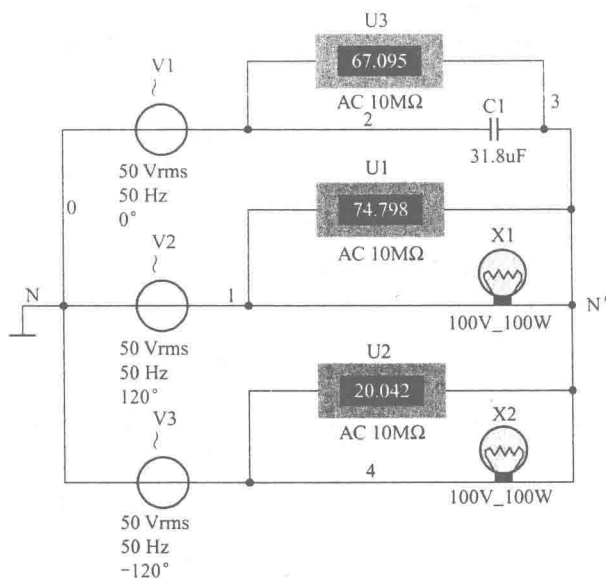


图 1-12 相序判别实验接线图

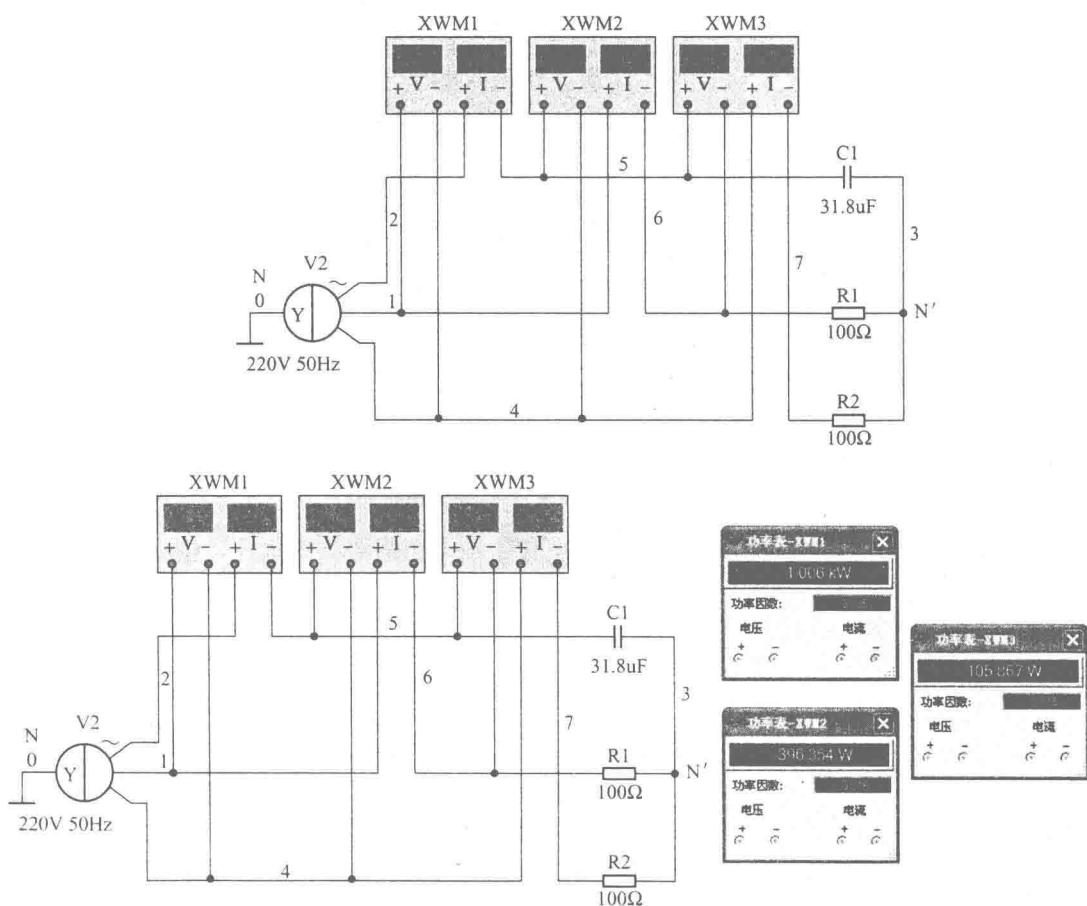


图 1-13 无功功率实验接线及仿真

案例 3: 三相负载 Y 形连接

一、目的

1. 掌握三相负载 Y 形连接下的相电流、相电压、线电流和线电压的关系。
2. 加深理解三相四线制供电系统中线的作用。

二、仪器

功率表, 单相交流电源, 灯泡 (127V-RMS), 三相电源 (127V)。

三、原理

如图 1-14 所示, 星形连接的三相负载, 当负载不对称时, 为了使负载的相电压对称, 必须用一条阻抗为零的导线 (即中线) 将电源的中点与负载的中点连接起来。在忽略线路阻抗的情况下, 负载的线电压即为电源的线电压, 负载的相电压即为电源的相电压, 线电压等于相电压的 $\sqrt{3}$ 倍。负载的相电流即为线电流 (电源端线上的电流), 中线电流相量等于线电流的相量和。若将中线断开, 由于电源中点与负载中点之间的电位差不再等于零, 导致负载的相电压不再对称, 负载阻抗大的一相相电压升高, 负载小的一相相电压降低。这就使得负载不能正常工作, 甚至损坏电气设备。

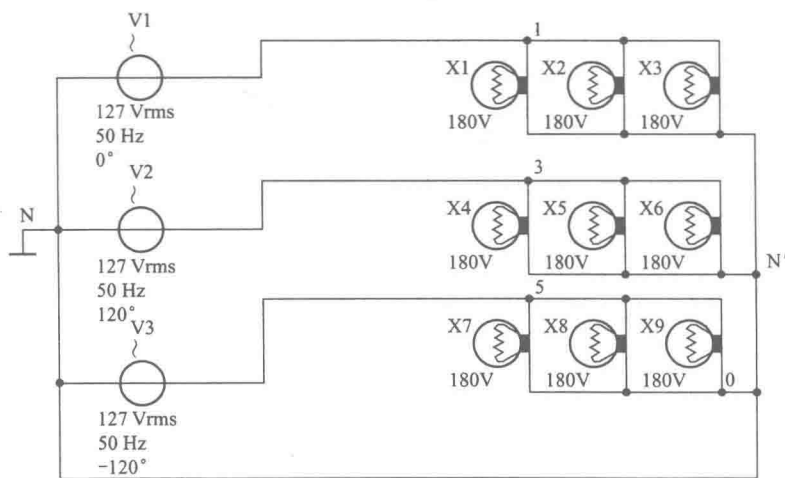


图 1-14 三相负载 Y 形连接接线图

在三相四线制电路中, 当负载对称时, 电源中点与负载中点等电位, 中线电流为零, 故可将中线省去, 这样的电路称为三相三线制电路。具有三相对称负载的固定电气设备, 且各相负载电压的额定值等于电源相电压, 在使用时连接成星形负载的三相三线制电路。

四、内容

1. 实验接线如图 1-15 所示。
2. 闭合开关 J1~J3, 形成三相对称 Y 形电路 (有中线)。分别测量三相负载的线电压、相电压、线电流、中线电流, 以及电源与负载中点间的电压, 数据记入表 1-4。
3. 断开开关 J3, 其余开关闭合, 形成对称三相负载 Y 形电路 (无中线)。分别测量三相负载的线电压、相电压、线电流、中线电流, 以及电源与负载中点间电压, 数据记入表 1-4。
4. 断开开关 J1 和 J2, 闭合开关 J3, 形成不对称三相负载 Y 形电路 (有中线)。分别测量三相负载的线电压、相电压、线电流、中线电流, 以及电源与负载中点间的电压, 数据记入表 1-4。