

# 实验室手摇三相发电机演示实验及故障分析\*

孙慧娟 杨晓梅

(宁夏大学 宁夏 银川 750021)

(收稿日期:2015-04-13)

**摘要:**结合实验室现有手摇三相交流发电机(JY 23-88)仪器,简析了三相电路的电源连接方式与负载的连接方式以及线电压、相电压与线电流、相电流之间的关系,并对手摇三相交流发电机演示实验中遇到的问题进行了理论分析与解释.

**关键词:**手摇三相发电机 三相电路连接方式 故障分析

## 1 引言

在学习中学物理实验的过程中,笔者发现手摇三相发电机是师范生很少接触到的演示实验仪器,有很多教师和学生都存在原理不清晰、不会连接线路等问题.手摇三相发电机原理涉及电磁感应现象,为了使学生了解交流电的产生过程且增加学生对物理的兴趣,笔者介绍了手摇三相发电机的工作机制,以及在做实验的过程中遇到的线路连接等问题,供教师和学生借鉴.

## 2 电磁感应现象

所谓电磁感应现象是一种“磁生电”的现象,即利用磁场产生电场的现象.闭合回路在磁场中会产生电流,产生的电流即为感应电流.法拉第发现产生感应电流的根本原因体现在“变化”和“运动”上,即变化的磁场和切割磁感线运动的导体棒.它们的共同点是使回路中的磁通量发生变化,产生感应电动势.法拉第电磁感应定律指出,感应电动势与磁通量的变化率成正比,其数学表达式为

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt}^{[1]}$$

其中  $e$  表示感应电动势,单位为 V,  $\Phi$  表示磁通量,单位为 Wb,  $N$  表示线圈匝数.当磁场  $B$  变化,导体不动时,产生的电动势叫感生电动势.当磁场  $B$  一定,导体运动时,产生的感应电动势叫动生电动势,

在该过程中,从能量转换角度看是非静电力  $F$  (使导体运动的外力) 做功产生电能,即机械能转换为电能.在手摇三相发电机演示实验中,摇动手柄时的机械能使得导体做切割磁感线的运动产生电能,完成能量的转化.

## 3 手摇三相发电机演示仪器及实验原理

### 3.1 实验仪器介绍

手摇三相发电机的主要部件如图 1 所示,下面分析其原理.

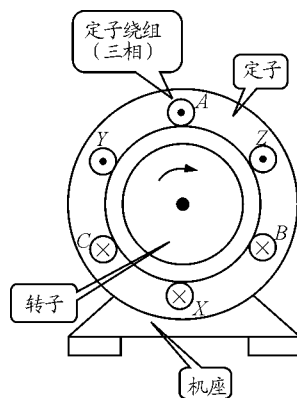


图 1 仪器主要部件

定子:它由机座、定子冲片和定子线圈组成.发电机机座支撑磁极转子进行工作,上面安装有电刷,将励磁电能引入磁极绕组产生稳恒磁场.定子冲片由硅钢片叠成,为定子线圈产生磁能提供通路,其内壁有槽,槽中镶嵌有 3 个轴线相差  $120^\circ$ ,外包黄、绿、

\* 2013 年宁夏教育厅本科教学工程项目;2013 宁夏大学一省一校教师教育提升项目.

作者简介:孙慧娟(1990-),女,在读硕士研究生,主要从事物理课程与教学论的研究.

指导教师:杨晓梅(1963-),女,硕士,教授,主要从事物理教育教学及科研工作.

红三色彩绸的线圈,即定子线圈.

转子:其主要部分为励磁绕组.磁极转子由电刷接入稳恒直流电源后通过机械转轴转动为三相电源的产生提供磁场能.

负载板:有 Y/ $\Delta$  接线板、Y 接法负载板和三相不平衡中性线带电负载板 3 种负载板.用负载板可以减少线路连接,使实验操作简单化.

机座:木制绝缘.

接线柱:三相电流输出端.

### 3.2 三相电流产生机制分析

直流电源(电压范围 4.5 ~ 6 V) 供电,电流经电刷进入闭合的励磁绕组,如图 2 所示.

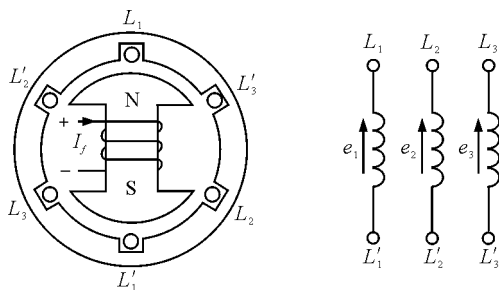


图 2 三相电流产生机制分析

由电磁感应现象知,物体带电时,周围电场使其具有电能.当闭合回路,建立磁场使其具有磁能,称之为自感磁能.通电时电流从零增加到  $I$ ,自感电动势阻碍其增加,因此在电流增加过程中克服自感电动势做功转化为载流线圈(励磁绕组)的磁能,其形成的磁极使得空气隙中磁场均沿半径方向且按正弦规律分布,即  $B = B_m \sin \alpha$ ,其中  $\alpha$  表示线圈始边  $L_1$  与转轴构成的平面和中性面的夹角.若线圈边长为  $l$ ,线速度为  $v$ ,则有

$$e_1 = 2Blv = 2B_m lv \sin \alpha$$

设线圈的角速度为  $\omega$ ,令  $E_m = 2B_m lv$ ,可得

$$e_1 = E_m \sin \omega t$$

由于 3 个轴线对称且相差  $120^\circ$ ,则定子线圈中产生感应电动势对称,故有

$$e_1 = E_m \sin \omega t$$

$$e_2 = E_m \sin (\omega t - 120^\circ)$$

$$e_3 = E_m \sin (\omega t - 240^\circ) =$$

$$E_m \sin (\omega t + 120^\circ) \quad (1)$$

其中  $E_m$  为电动势的最大值<sup>[2]</sup>.

## 4 三相电路连接方式

### 4.1 三相电源连接方式

三相电源有星形接法(Y 形接法)和三角形接法( $\Delta$  接法)两种连接方式.

#### 4.1.1 电源的星形连接(Y 形接法)

将绕组的 3 个末端连接起来,构成中性点  $N$ ,3 个首端引出相线,俗称火线.这种接法为星形接法,又称 Y 形接法.从中性点引出的导线称为中性线,即中线.引出中线的三相供电系统称为三相四线制,不引出中线的称三相三线制.

应用三相四线制供电方式向用户供电时提供两种电压:相线与中性线之间的电压为相电压,分别用  $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_3$  表示;相线与相线间的电压为线电压,分别用  $\dot{U}_{12}, \dot{U}_{23}, \dot{U}_{31}$  表示.如图 3 和图 4 所示,线电压和相电压之间关系为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{12} &= \dot{U}_1 - \dot{U}_2 \\ \dot{U}_{23} &= \dot{U}_2 - \dot{U}_3 \\ \dot{U}_{31} &= \dot{U}_3 - \dot{U}_1 \end{aligned} \quad (2)$$

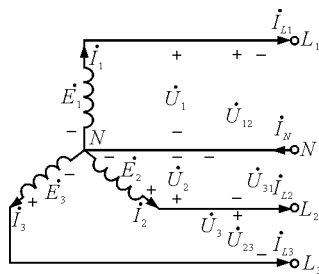


图 3 三相四线制星形连接图

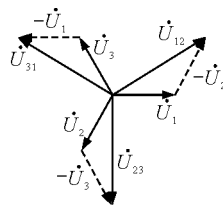


图 4 电压相量图

当略去电源内阻抗的作用时,由于三相电动势是对称的,所以相电压和线电压也都是对称的.用  $\dot{U}_p$  和  $\dot{U}_l$  分别表示相电压和线电压,有

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 = \dot{U}_3 = \dot{U}_p$$

$$\dot{U}_{12} = \dot{U}_{23} = \dot{U}_{31} = \dot{U}_1$$

且  $\dot{U}_1 = 3 \dot{U}_p$

对于电流,三相电源工作时,每相绕组中的电流  $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3$  称为电源的相电流,由端点输送出去的电流  $\dot{I}_{L1}, \dot{I}_{L2}, \dot{I}_{L3}$  称为电源的线电流. 星形连结时,线电流等于相电流,即  $I_{L1} = I_1, I_{L2} = I_2, I_{L3} = I_3$ .

#### 4.1.2 电源的三角形连接(△形接法)

将电源中每相绕组的首端与另一相绕组的末端顺次连接,形成闭合回路,从连接的各点引出连接负载的导线,如图 5 所示,这种连接方式为三角形接法或 △ 接法.

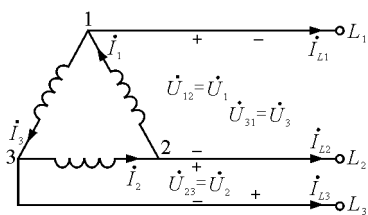


图 5 三角形连接图

三角形连接时,对应的线电压就是相电压,有

$$\dot{U}_{12} = \dot{U}_1 \quad \dot{U}_{23} = \dot{U}_2 \quad \dot{U}_{31} = \dot{U}_3 \quad (3)$$

以上三式统一写成

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_p$$

三角形连接方式,在接入负载前就已构成闭合回路,且其阻抗很小,所以只有当闭合回路内的电动势之和为零时才可使用这种接法.

### 4.2 三相负载的连接方式

对应电源的接法,三相负载的连接方式也有两种,即星形(Y)接法和三角形(△)接法.

#### 4.2.1 负载的星形接法(Y形)

三相电路中,各相负载首末端之间的电压成为负载的相电压,两相负载之间的电压称为线电压. 各相负载中通过的电流称为相电流,负载从供电线上取用的电流称为负载的线电流.

将 3 个负载的一端分别接到电源的 3 根相线上,另一端全部接到电源的中性线上,如图 6 所示,构成负载的星形接法. 由图 6 可知,线电流等于相电流,即  $I_1 = I_p$ .

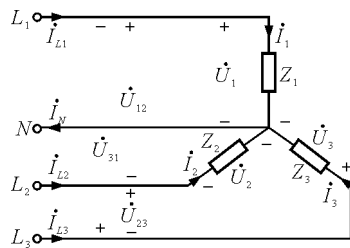


图 6 三相四线制星形连接图

由于三相电源提供的线电压和相电压一般是对称的,如果负载是对称的,即负载的阻抗相等,那么负载和电源的相电流及线电流必然是对称的,这样的三相电路称为对称三相电路. 在对称三相电路中,星形连接的三相负载和星形连接的三相电源,如图 7 所示.

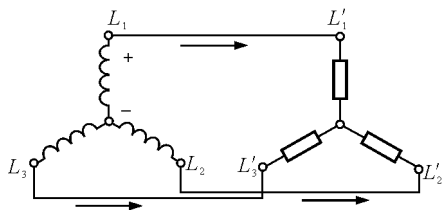


图 7 星形电源与星形负载连接方式

它们的线电压与相电压,线电流与相电流的有效值之间和相位之间的关系是相同的,即可推出在对称三相电路中,中性线的电流为零. 当三相负载不对称,则中性线的电流不为零. 在演示的过程中,中性线的灯泡会发光.

#### 4.2.2 负载的三角形接法(△形)

将负载的一端与另一负载的一端顺次连接,形成闭合回路,从连接的各点引出连接电源相线的 3 根导线,如图 8 所示,这种接法为三角形接法. 负载的线电压和相电压是对称的. 三相对称电路中,负载和电源的三角形接法所对应的线电压与相电压、线电流与相电流的有效值之间和相位之间的关系是相同的<sup>[3]</sup>.

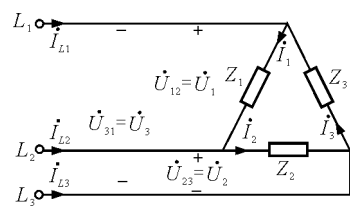


图 8 三角形联结图

在演示实验线路连接过程中,电源和负载的连

接方式可以参照图9和图10.

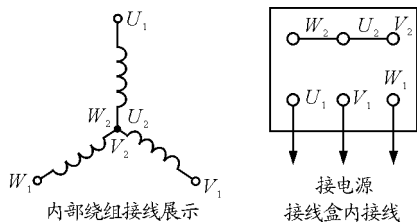


图9 定子绕组的星形(Y)

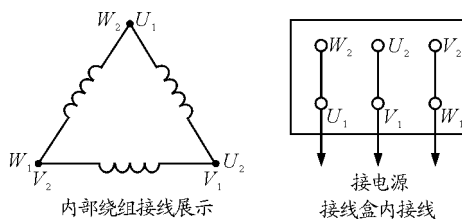


图10 定子绕组的三角形(Δ)

## 5 实验中遇到的问题分析

笔者在实验室做手摇三相发电机的演示实验时,遇到了一些问题,在查阅相关资料以及向相关技术人员请教后,分析总结出以下两点,供各位同仁参考.

### 5.1 接通电源瞬间灯泡发光故障原因分析

电源接直流电源后,在励磁绕组中激发磁场,摇动手柄时转子切割磁感线产生电流,从而使得小灯泡发光.而在本次实验的过程中,接通电源的瞬间还未摇动手柄小灯泡便发光,分析其原因为:电源误接了交流电.在误接交流电后,转子线圈和定子发生持续互感现象,即组成变压器向用电器提供电源,使得小灯泡发光.

在实验过程中,应仔细检查电路连接的情况,避免

发生这种错误,使瞬间电压过大将小灯泡或线圈烧损.

### 5.2 接通直流电源后摇动手柄不动故障原因分析

为了增强在工作状态下的磁场能量强度,实验仪器的转子铁心采用硅钢结构.在正常状态下,直流电源通电后,励磁绕组产生很强的磁场,使得转子的磁能对定子产生远超自重的电磁吸力,但由于机械构架的存在,定子、转子之间存在很小且均匀的空气间隙,使得转子可以自由地在轴套中转动.在本次实验过程中,当转子绕组接通直流电源后,再也摇不动手柄.出现这种现象的原因是转子被定子吸住了.该实验仪器的转子与定子之间的空气间隙一侧偏大,一侧偏小,不均匀,当转子绕组通电产生磁场时,空气间隙小的一侧在磁场力的作用下被定子吸住了,故出现摇不动手柄的现象.

如果出现这种现象,可以把仪器转子一侧的轴承支架与底座的螺丝松开,调整转子与定子之间的空气间隙,使其四周的气隙基本相同,可用厚度约为0.3 mm的硬纸片对空气间隙进行校验.当转子与定子间的空气间隙调整均匀后再把螺丝固定好,然后进行下一步实验<sup>[4]</sup>.

## 参考文献

- 1 赵凯华,陈熙谋.电磁学(第3版).北京:高等教育出版社,2011.322
- 2 谢应璞.电机学(上册).成都:四川大学出版社,2003.1~36
- 3 谢应璞.电机学(下册).成都:四川大学出版社,2003.4~53.78~80
- 4 许宝康.手摇三相交流发电机故障排除一例.教学仪器与实验,1990,6(2)

(上接第72页)

转动.但这个金属片转子用的方法是使金属片转子始终通过转轴通电,电流方向改变,磁场方向不变,转轴受到始终和它水平垂直方向的力,在这个力的作用下转子就转动起来.比如,电流是从A接线柱流入,通过固定导体、转轴和金属片转子,再通过圆形铝板从接线柱B流出,假如磁场方向向下,根据安培定则,受力 $F$ 如图1所示.

此教具的创新之处在于,突破了以往电动机的线圈随着轴转动,而且需要换向器,此教具没有换向

器,不存在平衡点,任何位置都可启动,因此制作非常方便;其次,教具设计非常巧妙,结构简单,一看就会做,因此构造具有可见性、简洁性和美感;另外,实验现象突出了直观性、奇特性和趣味性.

通过这些电磁教具的制作实验活动,学生们可以获得有关电和磁联系方面的感性知识,也能理解过去的科学发明在现代生活中所产生的巨大影响(如电动机在许多小电器中都会找到,日常使用的电器,如电话机、搅拌机、门铃等都有电动机),从而培养他们爱科学、学科学、用科学的志趣.