

绪 论

一、电机在国民经济中的地位和作用

电能是现代最主要的能源，电机是与电能生产、传输和使用有关的能量转换的机器。发电机是电能的电源。电动机不仅是工业、农业、交通运输事业中的原动机，而且在国防、文教、医疗以及日常生活中，得到了愈来愈广泛的应用。

在电力系统中，发电机和变压器是发电厂的主要动力设备。例如将水力、热力、风力、太阳能、核能等转换为电能，都要使用发电机。为了经济地传输电能，需要使用升压变压器；为了安全和降低用电设备成本，需要使用降压变压器。

在机械、冶金、石油、煤炭、化学以及其它各种工业企业中，都使用电动机作为原动机。如机床、电铲、轧钢机、吊车、鼓风机、压缩机、抽水机、搅拌机、造纸机等，都采用电动机拖动。一个现代化的大型工厂，需要几百台至几千台的电动机。

随着农业机械化的发展，农业上也广泛使用电动机，如电力排灌、脱粒、碾米、粉碎等，都使用电动机来拖动。

随着城市交通运输和电气铁道的发展，需要很多具有良好起动性能和调速性能的牵引电动机。在航空和航运事业中，需要很多具有特殊要求的航空电机和船用电动机。

在军事国防和各种自动控制系统中，如雷达、航空、无线电、计算技术和航天技术等，需要大量的控制电机作为自动化系统中的元件。

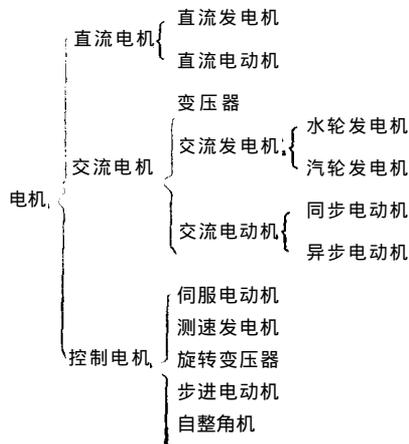
综上所述，发电机是电能的电源，变压器是大容量、远距离输电不可缺少的重要设备，电动机是实现工业、农业、交通运输机械化、自动化的原动机。所以电机对祖国的四化建设有着重要的作用，与国民经济及科学技术的发展有着密切的关系。

二、电机的分类

电机是一种能量转换的机器，其分类方法很多，按其功能来看，可分为：

- (1) 发电机——将机械能转变成电能；
- (2) 电动机——将电能转变成机械能；
- (3) 变压器——升高或降低电压；
- (4) 控制电机——作为自动化系统中的一个元件，完成信息的某种处理。

发电机和电动机是电机的两种运行方式，它们本身是可逆的。电机的分类可归纳如下：



三、我国电机工业发展概况

解放前，我国电机制造工业非常落后，生产的发电机单机容量在200kW以下，电动机容量不超过132kW（180马力），变压器不超过2000kVA，汽轮及水轮发电机组从未生产过。

解放后，我国电机制造工业的发展速度是极为迅速的。1955年制成10000kW水轮发电机，1956年制成12000kW汽轮发电机，1960年制成72500kW水轮发电机和50000kW氢冷、100000kW氢内冷汽轮发电机，1969年制成125000kW双水内冷水轮发电机，1972年制成300000kW双水内冷汽轮发电机和300000kW双水内冷水轮发电机，还制成了电压为330kV、容量为360000kVA变压器。目前，已制成320000kW水轮发电机和电压等级为500kV、容量为360000kVA变压器，还能生产600000kW大型汽轮发电机。此外，各种电机都有系列产品，并大量采用新材料、新工艺、新技术，不断生产出适应国民经济发展的新产品。

四、电力拖动的基本知识及发展概况

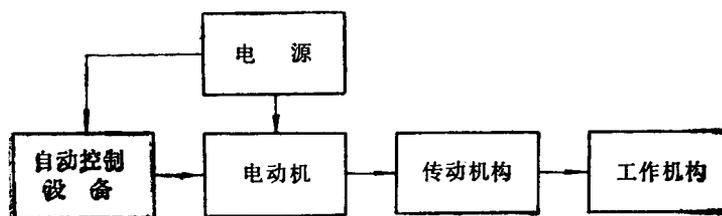
1. 电力拖动的基本知识

在现代工业中，为了实现各种生产工艺过程，需要使用各种各样的生产机械，拖动这些生产机械运动的电气机械装置，称为电力拖动装置。

电力拖动系统是由电动机拖动、通过传动机构带动生产机械运转的一个动力学整体。电力拖动系统主要由下面三部分组成：

- (1) 电动机——电力拖动的原动机，是将电能转换成机械能的部件；
- (2) 自动控制设备——控制电动机运转的各种控制电器，是间接控制工作机构运动的部件；
- (3) 电动机与工作机构之间的传动装置，如减速箱、皮带、联轴器等。

电力拖动的组成，如下所示：



拖动生产机械可以采用气动、液压拖动和电力拖动，但大多数生产机械都采用电力拖动，因为电力拖动具有如下优点：

- (1) 电能不仅能实现远距离输送，而且分配简单、检测方便、价格低廉、经济效益高。
- (2) 电动机与被拖动的机械连接简单、损耗小、效率高；
- (3) 电动机型式和种类很多，并具有不同的特性，可适应不同生产机械的需要，且

电力拖动的起动、制动、反转及调速控制简单，调节性能良好；

(4) 可实现远距离控制与自动调节，从而实现生产过程自动化。

由于电力拖动具有以上优点，因此电力拖动自动控制已成为现代工业生产和交通运输的高度电气化、自动化的基础与核心，对提高产品质量、改善工人劳动条件、提高生产率和经济效益，有着十分重大的意义。

2. 电力拖动自动控制发展概况

电力拖动自动控制经历了三个阶段：集中拖动——单电动机拖动——多电动机拖动。

19世纪末，在生产机械的拖动系统中，电动机逐渐代替了蒸汽机，出现了集中电力拖动。所谓集中电力拖动，就是用一台电动机拖动传动轴，再由传动轴经过皮带或绳索来分别拖动许多生产机械。这种拖动系统在传动过程中，能量损失大，不安全，又不能实现自动控制。随着生产实践的需要和发展，20世纪20年代，电力拖动方式由集中拖动发展为单电动机拖动。所谓单电动机拖动，就是一台电动机拖动一个生产机械。这种拖动方式可以充分利用电动机的调速性能，提高生产率，降低传送中的能量损失，并易于实现自动控制。随着生产的迅速发展，单电动机拖动已不能满足较复杂生产机械（大型机械和精密机械）对各种运动形式实现自动控制的要求，因此在30年代初出现了多电动机拖动方式。所谓多电动机拖动方式，就是用许多台电动机，分别拖动复杂机械的各个工作机构。这种多电动机拖动简化了机械结构，为机械的自动控制创造了良好的条件，更大地提高了生产率。目前常用的生产机械，都采用单电动机拖动或多电动机拖动。

在电力拖动方式发展过程中，电力拖动的控制方式，从手动控制逐步向自动控制方向发展。随着半导体器件与微电子技术的迅猛发展，近代又产生了程序控制、数字控制和计算机控制。电力拖动正向着用计算机控制生产过程自动化的方向迈进。

五、本课程的内容、任务和学习方法

(1) 内容：变压器；异步电动机及电力拖动；同步电机及电力拖动；直流电动机及电力拖动；电力拖动系统中电动机的选择。

(2) 任务：学习各种电动机的简单结构，工作原理，运行性能，交、直流电机的机械特性、起动及调速方法，培养学生分析问题、解决问题的能力 and 实验技能。

(3) 方法：电机学既是一门理论性很强的技术基础课，又具有专业课性质。在电机学中要应用理论解决实际问题，而实际问题往往是复杂的、综合的，因此在分析问题时，需要将其简化，找出主要矛盾，运用理论加以解决，这样得到的结果有一定的近似性，但机械能正确反映客观规律。根据电机学的性质和特点，学习方法应注意以下几点：

1) 抓住主要矛盾，略去次要因素，使问题简化。例如，忽略变压器原、副绕组的阻抗压降，则

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

2) 要抓住重点，即牢固掌握基本概念、基本理论、各物理量之间的相互关系及变化规律。

3) 要理论联系实际。一方面在讲电机的结构和绕组时，最好到电机制造厂结合实际

进行现场教学，了解各种电机结构部件的名称、作用及使用材料，并引导学生比较各种电机结构的异同，对各种电机建立初步的感性认识；另一方面，要重视实验和实习，它是理论联系实际的重要环节，不仅能巩固和验证所学的理论知识，而且能使学生在基本技能的训练，培养学生分析问题、解决实际问题的能力。

4) 要培养学生综合分析问题的能力，引导学生对各种电机的结构、原理、性能进行比较，辨别异同，进行综合分析，以加深理解，帮助记忆。

六、研究电机常用的基本定律

1. 全电流定律

设空间有几根载流导体，导体中的电流分别为 i_1 、 i_2 、 i_3 ……，则沿任何闭合路径 L ，磁场强度 \vec{H} 的线积分 $\oint_L \vec{H} dL$ ，等于该闭合回路中所包围的导体电流的代数和，即

$$\oint_L \vec{H} dL = \sum i$$

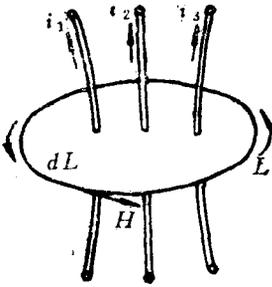


图 0-1 全电流定律

全电流定律在电机中应用很广，它是电机和变压器磁路计算的基础。全电流定律应用到电机和变压器中的多段磁路时，可改写成

$$\sum H_k L_k = \sum I = NI$$

式中 H_k ——第 k 段磁路的磁场强度，A/m；

L_k ——第 k 段磁路的平均长度，m；

NI ——磁势，安匝。

2. 电磁感应定律

设有一个匝数为 N 的线圈放在磁场中，当交链的线圈磁通 Φ 发生变化时，线圈就会产生感应电势，这种现象叫做电磁感应。如果感应电势的正方向与磁通的正方向规定得符合右螺旋定则，则感应电势为

$$e = - \frac{d\psi}{dt} = -N \frac{d\phi}{dt}$$

3. 电路定律

在电路里，对任何一个回路，若沿某一方向环绕一周，则回路内所有电势的代数和等于所有电压降的代数和，即

$$\sum e = \sum u$$

4. 电磁力定律

通电导体在磁场中要受到力的作用。这种力是磁场和电流相互作用产生的，所以称为电磁力。若磁场与导体相互垂直，则作用在导体上的电磁力为

$$f = BLi$$

式中 B ——磁通密度，T；

L ——切割磁力线的导线长度， m；

i ——导体中的电流， A；

f ——作用在导体上的电磁力， N。

七、电机中常用的材料

电机是以磁场为媒介、利用电磁感应原理和电磁力定律实现能量转换的，所以在电机里有磁路和电路两部分。

为了减小电阻损耗（ $\Delta p = I^2 R$ ），电路必须采用导电性能良好的导电材料，所以电机的绕组常用紫铜线或铝线绕制而成。

为了增加磁路的导磁性能，在激磁电流一定的情况下产生较强的磁场，电机和变压器的铁芯都采用导磁性能高的硅钢片迭成，磁路的其它部分也采用导磁性能较高的钢板和铸铁制成。

为了把带电部分分开以构成电路，在导体与导体之间，还隔有绝缘材料。绝缘材料要求介电强度高，耐热性能好。详细情况可见本书第二十四章第二节。

第一篇 变 压 器

变压器是一种静止的电气设备。它利用电磁感应原理制成，其功能是将一种等级的电压、电流，变成频率相同的另一种等级的电压和电流，主要用途是改变电压，故称为变压器。

变压器的结构比交流电机简单，而它的基本理论和分析方法是研究交流电机特别是异步电动机的基础，所以先研究变压器，再论述交流电机。

变压器的种类很多，本篇主要讲述电力变压器，但其基本原理也适用于其它变压器。

第一章 变压器的基本工作原理及结构

本章首先阐述变压器的基本工作原理，然后介绍变压器的分类、主要结构及变压器在电力系统中的作用。

第一节 变压器的基本工作原理及分类

一、变压器的基本工作原理

变压器是利用电磁感应原理制成的，它的主要结构是一个铁芯和套在铁芯上的两个绕组。这两个绕组具有不同的匝数，且互相绝缘，如图1-1所示。两个绕组之间具有磁的耦合，但没有电的直接联系。

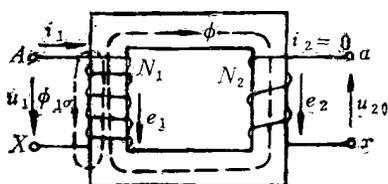
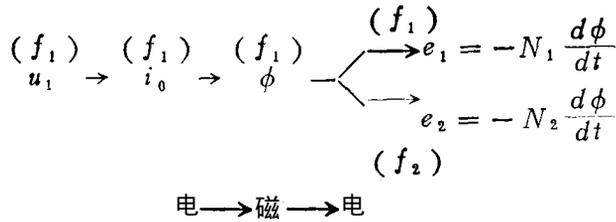


图 1-1 变压器的原理图

实际上，两个绕组套在同一铁芯柱上，以增大磁耦合作用。但为了画图简明起见，常把两个绕组分别套在铁芯的两边。通常一个绕组接电源，

称为原绕组或一次绕组；另一个绕组接负载，称为副绕组或二次绕组。

当原绕组接在交流电源 u_1 上时，原绕组中有交变电流 i 通过，并在铁芯中产生交变磁通 ϕ ，其频率与电源电压频率相同。铁芯中的交变磁通同时交链原、副绕组，根据电磁感应定律，分别在原、副绕组中产生交变的感应电势 $e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt}$ 和 $e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$ 。如果副绕组接上负载，副绕组中便有电流流过，向负载供电，实现了电的传递。变压器工作时的电磁物理过程如下：



变压器工作时，经历了由电变磁，再由磁变电的过程。原、副绕组的感应电势分别与原、副绕组匝数成正比，变压器就是利用原、副绕组匝数不等来实现变压的。

二、变压器的分类

变压器的种类很多，一般分为电力变压器和特种变压器两大类。电力变压器是电力系统中输配电的主要设备，容量从几十千伏安到几十万千伏安，电压等级从几百伏到五百千伏以上。

1. 电力变压器的分类

按用途分类：升压变压器；降压变压器；配电变压器。

按结构分类：双绕组变压器；三绕组变压器；多绕组变压器；自耦变压器。

按相数分类：单相变压器；三相变压器；多相变压器。

按冷却方式分类：干式空冷变压器；油浸自冷变压器；油浸风冷变压器；油浸水冷变压器；强迫油循环风冷变压器；强迫油循环水冷变压器。

按调压方式分类：无励磁调压变压器；有载调压变压器。

2. 特殊变压器的种类

特殊变压器是根据冶金、矿山、化工、交通等部门的具体要求设计制造的专用变压器。主要有以下几种：

- (1) 整流变压器，用于把交流电能变成直流电能；
- (2) 电炉变压器，用于把电能转换成热能；
- (3) 试验变压器，供高压试验用的变压器；
- (4) 矿用变压器，供矿井下配电用的变压器；
- (5) 船用变压器，供船舶用的变压器；
- (6) 中频变压器，供1000~8000Hz 交流系统用的变压器。

随着电力事业的发展，电力系统中发电机容量不断增大，输电线电压等级不断提高，要求生产更大容量的变压器。为了加强电力系统的集中控制，提高供电质量，变压器正向着有载调压和有载自动调压的方向发展。

第二节 变压器的主要结构

从变压器的功能来看，铁芯和绕组是变压器的主要部件。铁芯和绕组称为器身。如果器身放在充满了变压器油的油箱里，这种变压器叫做油浸式变压器。目前油浸式变压器是

生产量最大、应用最广的一种电力变压器，它的外形结构如图 1-2 所示。

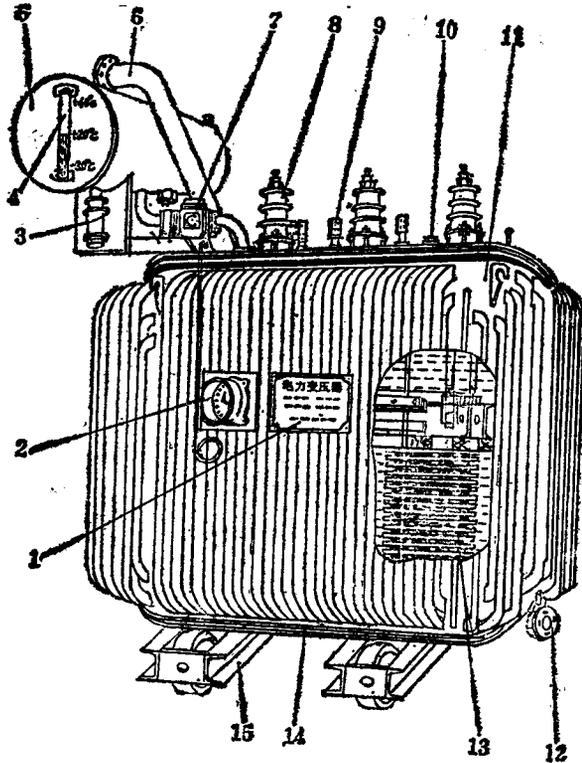


图 1-2 油浸式电力变压器

1—铭牌；2—讯号式温度计；3—吸湿器；4—油表；5—储油柜；6—安全气道；7—气体继电器；
8—高压套管；9—低压套管；10—分接开关；11—油箱；12—放油阀门；13—器身；14—接地板；
15—小车

变压器主要由以下几部分组成：

变压器结构	器身	}	铁芯、绕组
			绝缘、分接开关
	油箱及附件	}	油箱本体
			附件 { 放油阀、小车 铭牌、接地螺栓
	冷却装置	}	散热器
			风扇
保护装置	}	储油柜、安全气道、吸湿器	
		净油器、油表、温度计、气体继电器	
出线装置	}	高压瓷套管	
		低压瓷套管	

下面重点说明油浸变压器的主要结构部件。

一、铁芯

变压器铁芯由铁芯柱和铁轭两部分组成，是变压器的磁路部分。铁芯的作用是导磁，以减小激磁电流。为了提高磁路的导磁性能和减小涡流及磁滞损耗，铁芯通常涂有绝缘漆

的0.35mm或0.5mm厚的硅钢片迭成。

在迭装硅钢片时，常采用交错式装配方法。它是把剪成一定尺寸的长方形硅钢片交错迭装而成，迭装时相邻层的接缝要错开，如图1-3所示。这种迭装法的优点是接缝处气隙小，以减小激磁电流。

近年来，铁芯材料多用冷轧硅钢片，因冷轧硅钢片沿着碾压方向有较低的铁损和较高的导磁率。为了使磁通方向和轧碾方向基本一致，铁芯采用45°全斜接缝迭装法，如图1-4所示。

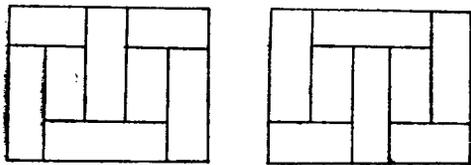


图 1-3 热轧硅钢片迭装图

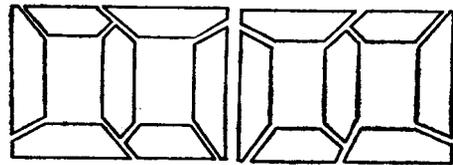


图 1-4 冷轧硅钢片迭装图

随着电力工业的迅速发展，如何降低变压器的损耗，节约能源，已成为国际上研究的重要课题。为降低空载损耗，国外目前采用的是晶粒取向电工钢片，不久将被非晶合金、高硅材料和薄片材料所取代。为降低负载损耗，缩小体积，采用了金属箔导电材料和SF₆冷却介质。与国际水平相比，我国生产的变压器技术性能和经济指标均较落后。为了赶超世界先进水平，1979年沈阳变压器厂组织有关制造厂，对中小型变压器进行了降低损耗、赶超国际水平为目标的更新换代准备工作。82年生产了节能效果比较显著的SL₇和SZL₇系列产品，深受使用部门的欢迎。SL₇系列产品的试制成功，在降低损耗、节约能源方面进行了一次成功的尝试，为我国中小型变压器赶超国际水平迈出了第一步。1985年又设计制造了S₉系列中小型节能变压器，它是以意大利80年代初的产品水平为目标的、赶超国际先进水平的过渡产品，是目前国内技术经济指标最先进的铜线系列配电变压器，不久将代替SL₇型产品进入国内市场。

S₉低损耗铜线变压器铁芯的导磁材料，采用的是优质Q147-30(相当日本Z10-0.03)冷轧晶粒取向电工钢片，铁芯采用45°全斜接缝迭装法，芯柱与轭等截面。

二、绕组

绕组是变压器的电路部分，一般用包有绝缘的铜线或铝线绕制而成，用以改变电压和传递功率。按照高、低压绕组相互之间的位置以及绕组在铁芯上的安排方法，变压器的绕组可分为同心式和交迭式两种。同心式绕组的高压绕组和低压绕组都作成圆筒形，它们同心地套在铁芯柱上，如图1-5所示。为了便于绝缘，通常低压绕组在里面，靠近铁芯，高压绕组在外面。高、低压绕组之间，低压绕组与铁芯柱之间，都留有一定的绝缘间隙，并用绝缘纸筒隔开。根据绕组绕制方法的不同，同心式绕组又分为圆筒式、螺旋式、连续式和纠结式几种，如图1-6所示。交迭式绕组都做成圆饼式，高、低压绕组交替放置在铁芯柱上，如图1-7所示。

同心式绕组的结构简单，制造方便，国产电力变压器都采用这种结构。交迭式绕组机

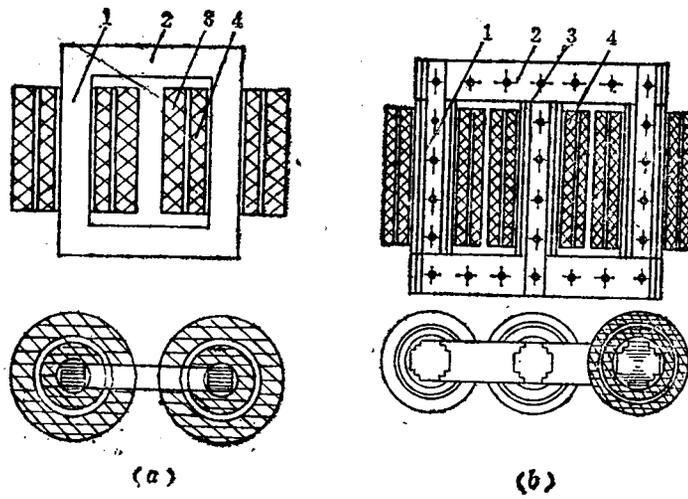


图 1-5 芯式变压器

(a) 单相; (b) 三相

1—铁芯柱; 2—铁轭; 3—高压绕组; 4—低压绕组

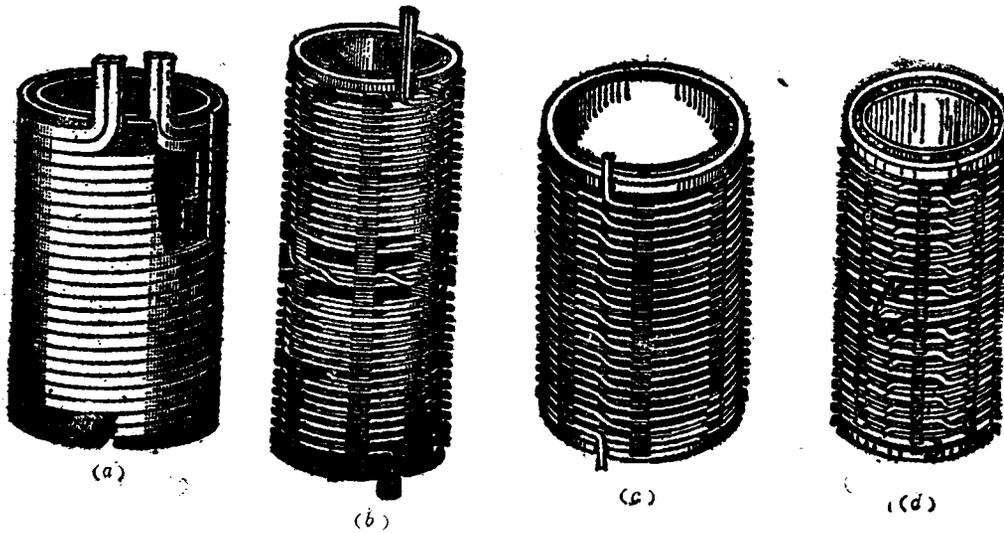


图 1-6 同心式绕组的形式

(a) 圆筒式; (b) 螺旋式; (c) 连续式; (d) 纠结式

械强度好,引出线的布置和焊接比较方便, ν 电抗也较小,多用在低电压、大电流的电焊、电炉变压器。

三、绝缘

变压器绝缘包括外部绝缘和内部绝缘两种。外部绝缘指的是油箱外、导线引出线套管之间以及导管对地部分之间的绝缘。内部绝缘指的是油箱内的绝缘,主要是绕组、引线和

分接开关的绝缘。内绝缘又分成主绝缘和纵绝缘。主绝缘是指绕组、引线对地和相间绝缘。纵绝缘是指绕组的匝间、层间绝缘。

小型变压器的匝间绝缘用漆包线，大型变压器用电缆纸包线。

四、分接开关

电压是电能质量的指标之一，为了保证供电质量，电压波动范围一般不得超过额定电压的 $\pm 5\%$ ，因此必须调压。变压器绕组的感应电势与绕组的匝数成正比，因此改变绕组匝数就能实现调压。为了改变绕组匝数，常把高压绕组引出若干个抽头，这些抽头叫分接头。用调压开关倒换绕组的分接头，就可以达到调压的目的。

五、油箱及变压器油

变压器的器身放在装有变压器油的箱内。变压器油是从石油中提炼出来的优质矿物油。在油浸变压器中，变压器油既是绝缘介质又是冷却介质，因此对变压器油的质量有较高的要求。要求变压器油介质强度高、粘度低、燃点高、凝固点低、酸碱度低、灰尘及水分少。变压器中只要含少量的水分，就会使绝缘强度大大降低。如含 0.004% 水分时绝缘强度降低 50% 。

六、保护装置

1. 储油柜

储油柜又叫油枕，通过连通管与油箱相通，其作用是保证油箱内始终充满变压器油和减少油与空气的接触面积，从而降低变压器油受潮和老化的速度，使变压器油具有良好的性能。

随着油温度的变化，油的体积会膨胀或收缩，因此，油面高度是变化的。油面上的空气不断地与油箱外的空气进行交换，空气中的水分就可能进入油中。用了储油柜，油面与空气接触面积大大地减小了，从而减少了油的氧化和水分的浸入；加之储油柜的油温较低，油面老化的速度减慢了。大型变压器有采用胶囊式储油柜的。胶囊式储油柜就是在储油柜里装上胶囊，使变压器油与空气完全隔离。

2. 吸湿器

吸湿器又叫做呼吸器，通过它吸气和排气，使储油柜与大气连通。吸湿器内装有硅胶，可吸收空气中的水份。

3. 安全气道

安全气道又叫防爆管。它是一个长钢筒，出口装有玻璃或酚醛纸板，下面与主油箱连通。其作用是当变压器内部发生严重故障时，箱内的油产生很大压力，气流冲破玻璃或酚醛纸板而向外喷出，以降低油箱内的压力，防止油箱爆炸。

4. 气体继电器

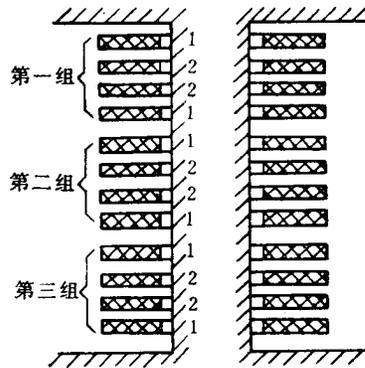


图 1-7 交迭式绕组
1—低压绕组；2—高压绕组

在储油柜与主油箱的连通管道上，装有气体继电器，是变压器内部故障的保护装置。其结构和原理在电力系统继电保护课程中讲述。

5. 散热器

变压器运行时，因产生铜损和铁损而发热，为保证变压器能安全运行，必须采取措施散热。容量大于20kVA的变压器，都采用管式油箱。所谓管式油箱，就是在油箱壁上装有为增加散热面积用的扁管。容量更大的变压器，通常采用风冷、强迫油循环风冷或强迫油循环水冷。

七、高、低压瓷套管

变压器的引出线从油箱内穿过油箱盖时，必须经过绝缘瓷套管，使带电的引线和接地的油箱绝缘。

第三节 变压器在电力系统中的作用

变压器的作用是升压或降压。用来升高电压的变压器叫升压变压器，用来降低电压的变压器叫降压变压器。

发电厂发出来的交流电，一般都要经过升压变压器升压后，通过高压输电线把电能输送到很远的用电地区去，然后经过降压变压器降压后，送到各用电分区，最后再经过配电变压器把电压降到用户所需的电压等级，供用户使用。

简单的电力系统如图1-8所示。从图中可以看到，发电厂发出来的交流电升压后再降低，这是由于发电机的电压因受绝缘和制造技术上的限制，不可能太高，一般只有10.5~20kV，如果发电厂容量大，输送距离远，采用发电机电压等级输电几乎是不可能的。因为当输送功率一定时，由 $P = \sqrt{3}UI \cos\varphi$ 可知，电压低，电流就大，输电线上的功率损耗 $\Delta P = I^2 R$ 和电压降 $\Delta U = IZ$ 都很大，致使电能送不出去。所以要用升压变压器把发电机电压升高后，用高压输电线送出去。电压升高了，电流就减小了，线路功率损耗成平方地

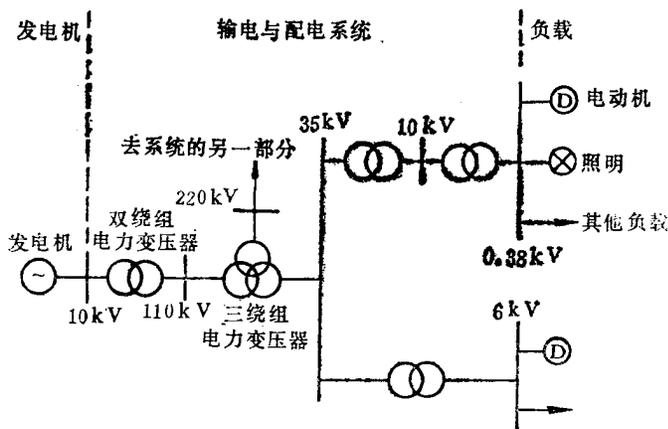


图 1-8 简单电力系统示意图

减小，这样就能比较经济地传输电能。我国输电线电压等级有35、60、110、220、330、500kV等几种。

当电能通过高压输电线送到用电地区后，还要用降压变压器把输电电压降低为配电电压输送到各用电分区，再经配电变压器把电压降低到用户所需要的电压等级，供用户使用。大型动力负载采用6kV或10kV，小型动力负载采用380V，照明负载采用220V。用电设备一般都采用低压，其目的是为了

安全用电和降低用电设备成本。

第四节 变压器的铭牌

每一台变压器都有一个铭牌，铭牌上标注着变压器的型号和各种额定数据。它是设计和使用变压器的依据。

一、型号

变压器的型号包括说明结构性能特点的基本代号、额定容量、额定电压等，其排列顺序如下所示。其基本代号的含义，如表1-1所列。

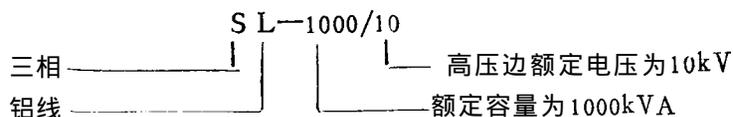


表 1-1 变压器型号中基本代号的含义

分 类	类 别	代表符号	分 类	类 别	代表符号
相 数	单 相	D	循环方式	自然循环	—
	三 相	S		强迫循环	P
绕组外冷却介质	矿物油 气 体 空 气	— Q K	绕组数	导体内冷	N
				双 绕 组	—
				三 绕 组	S
箱壳外冷却介质	空气自冷 风 冷 水 冷	— F W	调压方式	自 耦	O
				无励磁调压	—
			有载调压	Z	
			绕组导体材料	铜 线	—
				铝 线	L

注 此表根据GB1094-75，目前仍在使用；新的冷却方式的字母代号见 GB1094-85电力变压器部分。

二、额定值

1. 额定容量 S_N

变压器额定容量指的是变压器在额定情况下运行时的视在功率，单位用VA或kVA表示。由于变压器效率高，通常把原、副边的额定容量设计得相等。

2. 额定电压 U_{1N}/U_{2N}

U_{1N} 是原边额定电压， U_{2N} 是副边额定电压。副边额定电压是指当原边加额定电压 U_{1N} 时，副边的空载电压。对三相变压器，额定电压均指线电压。单位用V或kV表示。

3. 额定电流 I_{1N}/I_{2N}

根据额定容量和额定电压计算出来的电流，称为额定电流。对三相变压器，额定电流均指线电流。单位用A或kA。

对单相变压器

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}}; \quad I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}}$$

对三相变压器

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}}; \quad I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}}$$

4. 额定频率 f_N

额定频率的单位用 Hz 表示。我国的工业用电频率为 50Hz。

5. 额定温升

额定温升是指变压器绕组或上层油温与变压器周围大气温度之差的允许值。根据国家标准，周围大气的最高温度规定为 $+40^{\circ}\text{C}$ ，绕组的额定温升为 65°C 。

此外，铭牌上还标有接线图和连接组别、阻抗电压、变压器重量等。

第五节 小结

(1) 转换电能由高压变低压（或反之）而不改变其频率的静止的电能转换器，称为变压器。它的基本结构是铁芯和绕组。

(2) 双绕组变压器原、副绕组只有磁的联系，而无电的直接联系。它利用电磁感应原理作成，借助于原、副绕组匝数不等实现变压。

(3) 电力变压器在电力系统中的作用是升压或降压。升压是为了适应大容量远距离输电的需要，减小电能损失和输电线路上的压降，提高运行的经济效益和供电质量。降压是为了安全用电和降低用电设备成本。

(4) 变压器铭牌上的各种额定值，是设计、制造和正确使用变压器的依据。要特别注意的是：铭牌上的额定电压指的是线电压，额定电流指的是线电流。

(5) 变压器是利用电磁感应原理制成的，因此要求变压器原、副绕组有良好的磁耦合，铁芯应用导磁率高的硅钢片迭成。在迭制铁芯时，应尽可能减小磁阻，以减小激磁电流。

思考题及习题

1-1 变压器利用什么原理作成？电力变压器在电力系统中的作用是什么？

1-2 变压器由哪些基本部件构成？各部件的作用是什么？

1-3 变压器铁芯的作用是什么？为什么铁芯要用 0.5mm 厚的硅钢片迭成而不用钢板？

1-4 能生产直流变压器吗？为什么？

1-5 若将一台原边额定电压为 220V 的单相变压器，接在 220V 的直流电源上，对变压器有何影响？为什么？

1-6 有一台单相变压器，额定容量为 $S_N = 2000\text{kVA}$ ，额定电压 $U_{1N}/U_{2N} = 10/0.4\text{kV}$ ，试求原、副边的额定电流 I_{1N} 和 I_{2N} 。

1-7 有一台变压器 额定容量为 $S_N=25000\text{kVA}$ ，额定电压为 $U_{1N}/U_{2N}=10/6.3\text{kV}$ ， $Y, d(\text{Y}/\Delta)$ 连接，试求原、副边的额定电流。

1-8 有一台单相变压器，额定容量 $S_N=10\text{kVA}$ ，高低压边均由两个相同的绕组组成。高压边每个绕组的额定电压 $U_{1N}=1100\text{V}$ ，低压边每个绕组的额定电压 $U_{2N}=110\text{V}$ 。用这些绕组进行不同的连接，且各种连接方案全部绕组均应接入，问可得几种不同的连接方案？每种连接方案的变比是多少？高、低压边的额定电压和额定电流各为多少？（接线方式文字符号的代表意义参见本书第四章第二节）

第二章 单相变压器的空载运行

变压器的空载运行，是指变压器原边接在电源上，副边开路时的运行。空载运行时，由于副边电流为零，对原边没有影响，所以空载运行的变压器实际上是一个有铁芯的电感线圈，分析起来比较简单。空载运行是负载运行的一种特殊情况，它的运行理论是分析负载运行的理论基础。

本章主要讨论空载运行原理、分析方法及其参数，为讨论负载运行打下基础。

研究过程中，为了抓住主要矛盾，常常忽略次要因素，使问题简化。在获得基本规律之后，再把忽略了的次要因素考虑进去，以形成一个完整的概念。

研究时，首先分析空载时的物理情况，进而导出空载时的电压方程式，绘出等值电路和相量图，最后通过空载试验求等值电路中的各参数。

第一节 空载运行时的电势平衡及变比

一、变压器空载运行时的磁场

空载运行的单相变压器，如图2-1所示。当副绕组开路，原绕组接到电压为 U_1 的交流

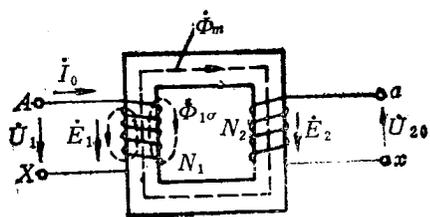


图 2-1 单相变压器空载运行时的示意图

电源上时，原绕组便有电流 I_0 流过，这个电流称为变压器的空载电流。空载电流产生空载磁势 $F_0 = I_0 N_1$ ，并建立空载时的磁通。空载时的磁通根据闭合的路径不同，可分成等效的两部分磁通——主磁通及漏磁通。由于铁芯的导磁系数比空气和油大得多，因此绝大部分磁通沿磁阻很小的铁芯闭合，同时交链原、副绕组，是变压器进行能量传递的媒介，这部分磁通称为主磁通或互感磁通，用 Φ_m 表示；另一部分磁通 $\Phi_{1\sigma}$ 沿空气或油等非铁磁材料闭合，仅与原绕组相交链，称为原绕组漏磁通。漏磁通很小，约占主磁通的0.1%~0.2%。

主磁通与漏磁通的性质是不相同的，主要表现在下面两个方面：

（1）主磁通与漏磁通起的作用不同。主磁通同时交链原、副绕组，并在原、副绕组内产生感应电势，如果副边与负载接通，副边就有电流，向负载输送电功率，所以主磁通起了传递能量的媒介作用。而漏磁通仅在原绕组内感应电势，只起电压降的作用，不能传递能量。

（2）由于铁磁材料存在着饱和现象，主磁通 Φ 与空载电流 I_0 是非线性的，即 Φ 与 I_0 不是正比关系。由于漏磁通主要沿非铁磁材料而闭合，所以 $\Phi_{1\sigma}$ 与 I_0 成正比关系。

二、各物理量正方向的规定

变压器中的电压、电流、电势和磁通都是时间的交变量，它们的正方向是可以任意规定的。但正方向规定得不同，同一电磁过程所列的方程式的正、负号也就不同。为了统一起见，一般按惯例规定它们的正方向。习惯上将变压器的原绕组看作负载，各量正方向的规定遵循电动机惯例；将变压器副绕组看作电源，各量正方向的规定遵循发电机惯例。

- (1) 电压 U_1 的正方向：规定从 A 指向 X ；
- (2) 电流 I_1 的正方向与 U_1 的正方向一致；
- (3) 主磁通的正方向与电流的正方向符合“右螺旋”定则；
- (4) 感应电势 \dot{E}_1 的正方向与主磁通 Φ_m 的正方向符合“右螺旋”定则；
- (5) \dot{E}_2 的正方向与 Φ_m 的正方向符合“右螺旋”定则；
- (6) 电流 I_2 的正方向与 E_2 的正方向一致；
- (7) 电压 U_2 的正方向与电流 I_2 的正方向一致。

三、空载时磁通、电势、电压之间的相互关系

1. 电势与磁通之间的相互关系

设主磁通按正弦规律变化，即

$$\phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (2-1)$$

式中 Φ_m ——主磁通的极大值；

ω ——主磁通变化的角速度。

感应电势的瞬时值

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\phi}{dt} = -N_1 \omega \Phi_m \cos \omega t = N_1 \omega \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \\ e_2 &= -N_2 \frac{d\phi}{dt} = -N_2 \omega \Phi_m \cos \omega t = N_2 \omega \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

感应电势的极大值

$$\left. \begin{aligned} E_{1m} &= N_1 \omega \Phi_m = 2\pi f N_1 \Phi_m \\ E_{2m} &= N_2 \omega \Phi_m = 2\pi f N_2 \Phi_m \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

感应电势的有效值

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_1 \Phi_m = 4.44 f N_1 \Phi_m \\ E_2 &= \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_2 \Phi_m = 4.44 f N_2 \Phi_m \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

同理可推出一次绕组漏电势的有效值

$$E_{1\sigma} = 4.44 f N_1 \Phi_{1\sigma m} \quad (2-5)$$

漏电势的有效值也可以用电压降来表示，即

$$E_{2\sigma} = I_0 \omega L_{1\sigma} = I_0 x_{1\sigma} \quad (2-6)$$

由于原绕组漏抗 $x_{1\sigma}$ 所对应的漏磁通 $\varphi_{1\sigma}$ 的路径，主要是空气和油，磁阻为常数，因此漏抗 $x_{1\sigma}$ 是一个常数。为了写起来方便，以后将 $x_{1\sigma}$ 写成 $x_{1\bullet}$ 。

下面用电工基础中学过的公式推导感抗的表达式。

因为
而

$$L = \frac{\psi}{i}, \quad \psi = N\phi, \quad \phi = \frac{Ni}{R_{\sigma i}}$$

所以

$$x = \omega \frac{N^2}{R_{\sigma i}}$$

式中 N ——绕组的匝数；

ϕ ——磁通；

$R_{\sigma i}$ ——磁通 ϕ 所经磁路的磁阻。

由此可见，在频率、绕组匝数一定的情况下，感抗与磁路的磁阻成反比，磁阻越大，感抗越小；反之亦然。

2. 电势方程式

根据基尔霍夫第二定律和图2-1 所规定的正方向，一次绕组电势方程式为

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + \dot{I}_0 r_1 \\ &= -\dot{E}_1 + j \dot{I}_0 x_1 + \dot{I}_0 r_1 \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 (r_1 + jx_1) \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 z_1 \end{aligned} \quad (2-7)$$

式中， $z_1 = r_1 + jx_1$ 是一次绕组的漏阻抗，为常数。

空载运行时，二次侧无电流，所以二次绕组空载电压 U_{20} 与二次绕组的感应电势 \dot{E}_2 相等，即

$$U_{20} = E_2 \quad (2-8)$$

一般 $I_0 = (2 \sim 10) \% I_N$ ， $I_0 z_1 < 0.5 \% U_N$ ，由于 $I_0 z_1$ 很小，因此可略去不计，则

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 = j4.44fN_1\dot{\Phi}_m \quad (2-9)$$

$$U_1 \approx E_1 = 4.44fN_1\Phi_m \quad (2-10)$$

式(2-9)和(2-10)表明：

(1) 感应电势 E_1 和电源电压 U_1 大小近似相等，相位互差 180° 。

(2) 当变压器绕组匝数 N_1 和电源电压频率 f 为常数时，主磁通 Φ_m 与电源电压成正比，而与变压器所用材料及尺寸大小无关。当 N_1 、 f 、 U_1 均为常数时， Φ_m 亦为常数，称为常磁通，它是分析变压器运行十分重要的一个概念。

四、变压器的变比 k

变压器一、二次绕组感应电势之比，称为变比。变比用 k 表示。

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44N_1f\Phi_m}{4.44N_2f\Phi_m} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2-11)$$

式(2-11)表明，变压器的变比等于原、副绕组的匝数之比。设计时，适当的选择原、副绕组匝数之比，就可以把原边电压变到所需要的副边电压。

习惯上取 $k > 1$ ，因此变比为高压绕组电势与低压绕组电势之比。变压器空载运行

时, $U_1 \approx E_1$, $U_{20} \approx E_2$, 所以可以近似地用原、副边电压之比作为变比, 即

$$k = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \quad (2-12)$$

这里应注意, 式(2-12)中的 E_1 和 E_2 , 分别为原、副绕组的相电势, 亦即原、副边相电压 U_1 、 U_2 之比等于原、副绕组的匝数之比。

对于三相变压器, 变比仍为原、副边相电压之比。由于三相变压器有不同的连接方式, 变比的表达式也不相同。

对于Y, d(Υ/Δ)连接的三相变压器

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_{1\phi}}{E_{2\phi}} \approx \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}U_{2N}} \quad (2-13)$$

对于D, Y(Δ/Υ)连接的三相变压器

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_{1\phi}}{E_{2\phi}} \approx \frac{\sqrt{3}U_{1N}}{U_{2N}} \quad (2-14)$$

式中 $E_{1\phi}$ ——原边相电势;

$E_{2\phi}$ ——副边相电势;

U_{1N} ——原边线电压;

U_{2N} ——副边线电压。

【例2-1】 有一台Y, d(Υ/Δ)连接的变压器, 额定容量为180kVA, 原、副边电压(指线电压)为10000/400V, 原绕组为700匝。试求:

(1) 副绕组匝数 N_2 ;

(2) 为了使副边电压能在额定电压值的上、下调节 $\pm 5\%$, 问高压绕组应怎样抽头?

(3) 求原、副边额定电流(指线电流)。

解:(1) 副绕组匝数 N_2

$$\frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{\sqrt{3}N_1}{N_2} = \frac{10000}{400} = 25$$

$$N_2 = \frac{\sqrt{3}N_1}{25} = \frac{\sqrt{3} \times 700}{25} = 49 \text{ (匝)}$$

(2) 高压绕组的抽头匝数

$$N_1 = 700 \pm 700 \times 5\% = 700 \pm 35 \text{ (匝)}$$

$$N_1' = 700 + 35 = 735 \text{ (匝)}$$

$$N_1'' = 700 - 35 = 665 \text{ (匝)}$$

(3) 原、副边的额定电流

原边额定电流

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{180000}{\sqrt{3} \times 10000} = 10.39 \text{ (A)}$$

副边额定电流

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{2N}} = \frac{180000}{\sqrt{3} \times 400} = 260 \text{ (A)}$$

第二节 空载电流及空载损耗

变压器原边加额定电压，副边开路时，流过副绕组的电流称为空载电流。

一、空载电流 I_0

1. 空载电流的大小及性质

空载电流 i_0 流过原绕组时，产生交变磁势 $f_0 = i_0 N_1$ ，并在铁芯中建立交变磁通 ϕ 。该交变磁通在铁芯中产生磁滞损耗和涡流损耗。空载电流在原绕组中产生铜损。因此，空载电流包含有功电流和无功电流两个分量：无功电流分量 I_μ 用来产生主磁场，起励磁的作用，称为磁化电流；有功电流分量 I_{Fe} 用来补偿变压器的空载损耗。无功电流分量 I_μ 与 Φ_m 同相，滞后电源电压 $\dot{U}_1 90^\circ$ ，有功电流分量 I_{Fe} 与 U_1 同相，如图 2-2 所示。

由图 2-2 可得

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_\mu + \dot{I}_{Fe} \quad (2-15)$$

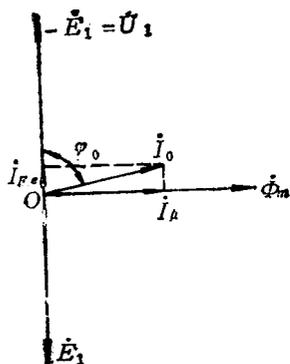


图 2-2 空载电流相量图

由于 $I_\mu \gg I_{Fe}$ ，所以磁化电流近似等于空载电流，即

$$I_\mu \approx I_0$$

因此空载电流基本上属于无功性质的电流。

一般的电力变压器， $I_0 = (2 \sim 10) \% I_N$ ，容量越大， I_0 越小。

2. 空载电流的波形

忽略变压器损耗时，空载电流等于磁化电流。由于导磁材料磁化曲线的非线性关系，在一定电压下，磁化电流的大小和波形取决于铁芯的饱和程度，即取决于铁芯的磁通密度 B_m 的大小。对热轧硅钢片来说，当 $B_m < 0.8 \text{ T}$ 时可认为磁路是不饱和的。空载电流 i_0 与磁通 ϕ 成正比。如果磁通是正弦波，则空载电流也是正弦波，如图 2-3 所示。[为了充分利用有效材料，变压器是在饱和情况下工作的。用热轧硅钢片制作电力变压器铁芯时，磁通密度通常选用 $1.1 \sim 1.47 \text{ T}$ ，磁路已经相当饱和了，这时磁通与空载电流之间不再是线性关系，空载电流比磁通增加得快得多。当外施电压等于额定电压时，虽然电压为正弦波，与其相应的主磁通也是正弦波，但由于磁路饱和的影响，空载电流是尖顶波。根据磁通波形曲线 $\phi = f(t)$ 和铁芯磁化曲线 $\phi = f(i_0)$ ，可用图解法求出空载电流波形，如图 2-4 所示。

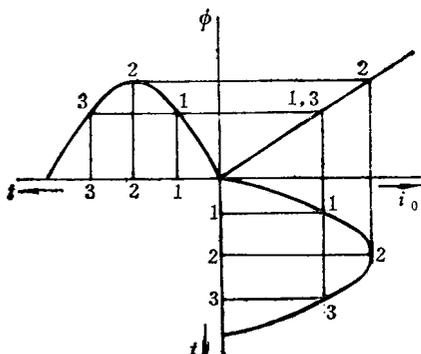


图 2-3 磁路未饱和时的空载电流波形

可用图解法求出空载电流波形，如图 2-4 所示。

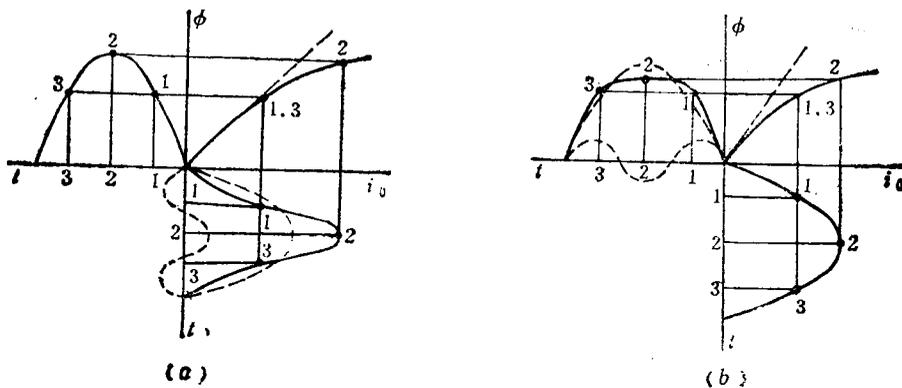


图 2-4 磁路饱和时的空载中等波形

(a) 激磁电流为尖顶波，磁通为止弦波：

(b) 激磁电流为正弦波，磁通为平顶波

二、空载损耗

变压器空载运行时，输出功率为零，从电源吸取的输入功率 P_0 全部用来补偿空载损耗。空载损耗包括两部分，一部分是空载电流 I_0 在原绕组产生的铜损 $p_{Cu} = I_0^2 r_1$ ；另一部分是交变磁通在铁芯中产生的铁损，铁损又包括磁滞损耗和涡流损耗两部分。由于空载电流 I_0 和原绕组电阻 r_1 很小，所以空载时的铜损 p_{Cu} 很小（约占 p_0 的2%），如忽略铜损 p_{Cu} ，则空载损耗 p_0 等于铁芯损耗 p_{Fe} ，即

$$p_{Fe} \approx p_0 = UI_{Fe} = UI_0 \cos \varphi_0 \quad (2-16)$$

式中 φ_0 —— U_1 与 I_0 之间的夹角。

一般电力变压器，铁损可用下式计算

$$p_{Fe} = p_{1/50} B_m^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1.3} G \quad (2-17)$$

式中 G ——铁芯重量，kg；

$p_{1/50}$ ——频率为50Hz，最大磁密 B_m 为1T时1kg铁芯的损耗。 $p_{1/50}$ 可以从材料性能表中查出。

一般电力变压器在额定电压时，空载损耗约为额定容量的0.2%~1%，随着变压器容量的增大，空载损耗要降低。

第三节 空载时的等值电路及相量图

一、变压器空载运行时的等值电路

变压器原、副边有电与磁的相互联系，而磁路的分析和计算都是很复杂的。为了简化计算和便于分析问题，将变压器电和磁的相互联系，用纯电路“等值”地表示出来，这个电路称为等值电路。

从电压方程式可知

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + \dot{I}_0 r_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_0 x_1 + \dot{I}_0 r_1$$

漏电势 $\dot{E}_{1\sigma}$ 的作用，可看成是电流 I_0 流过漏抗 x_1 时所引起的电压降。同样，对主磁通所感应的电势 \dot{E}_1 ，也可以用阻抗压降来表示。但考虑到主磁通在铁芯中要引起铁损，故不能单独地引入一个电抗，而应引入一个阻抗 z_m ，把 \dot{E}_1 和 I_0 联系起来，这时电势 \dot{E}_1 的作用可以看成是 \dot{I}_0 流过 z_m 的阻抗压降，即

$$-\dot{E}_1 = I_0 z_m = I_0 (r_m + jx_m) \quad (2-18)$$

式中 z_m ——激磁阻抗；

x_m ——对应于主磁通的激磁电抗；

r_m ——对应于铁芯损耗的激磁电阻，

$$r_m = p_{Fe} / I_0^2$$

将式(2-18)代入电压方程式，得

$$U_1 = -\dot{E}_1 + I_0 z_1 = I_0 z_m + I_0 z_1 = I_0 (z_m + z_1) \quad (2-19)$$

对应于式(2-19)的等值电路，如图2-5所示。

由图可见，空载运行的变压器可以看成是两个阻抗串联的电路，其中一个原绕组的漏阻抗 $z_1 = r_1 + jx_1$ ，另一个是激磁阻抗 $z_m = r_m + jx_m$ 。

r_1 是原绕组的电阻，为常数。 x_1 是对应于漏磁通的电抗。漏磁路是不饱和的，因此漏磁电抗 x_1 是常数。但 r_m 和 x_m 是变量，随磁路饱和程度的增加而减小。因 x_m 是对应于主磁通的电抗，其数值随主磁通 Φ_m 的大小而变化，即随铁芯饱和程度而改变。变压器运行时， $U_1 \approx E_1 = 4.44fN_1\Phi_m$ ，当 $U_1 =$ 常数时， $\Phi_m =$ 常数， x_m 近似为一常数。若 U_1 增大， Φ_m 增大，磁路饱和程度增大，磁阻增大， x_m 减小。若 U_1 减小， Φ_m 减小，磁路饱和程度降低， x_m 增大。通常，变压器在额定电压下运行，故作定量计算时，可以认为 z_m 不变。

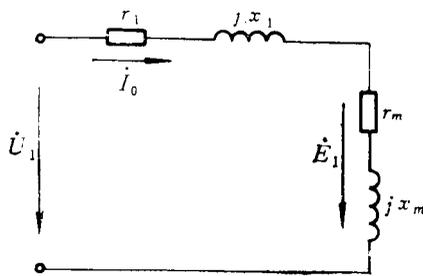


图 2-5 变压器空载时的等值电路

变压器空载运行时，无功功率很大，有功功率很小，因此 $r_m \ll x_m$ 。又因 $r_m \gg r_1$ ， $x_m \gg x_1$ ，所以 $z_m \gg z_1$ 。从图2-5可知，变压器空载电流 I_0 主要取决于激磁阻抗 z_m 的大小， z_m 越大， I_0 越小。变压器运行时，希望 I_0 小，以提高变压器的效率和电网的功率因数，所以变压器的铁芯均采用高导磁率的硅钢片迭成。因铁芯所用材料导磁性能越好，则激磁电抗越大，空载电流 I_0 越小。

二、空载运行时的相量图

相量图能直观地反映变压器各物理量之间的大小和相位关系。作定性分析时，常用相量图。

根据电压方程式 $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 r_1 + j\dot{I}_0 x_1$ 和 $U_{20} = \dot{E}_2$ ，以及各物理量之间的相互关系，绘出空载运行相量图，如图2-6所示。图中的 $I_0 r_1$ 和 $jI_0 x_1$ 是放大的了。

作图步骤如下：

(1) 选主磁通 Φ_m 为参考相量，并画在水平方向上；

(2)画电势 \dot{E}_1 和 \dot{E}_2 ,并使它们滞后 $\Phi_m 90^\circ$;

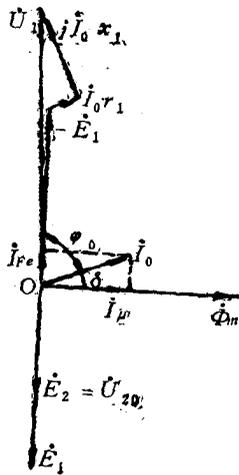


图 2-6 变压器空载运行时的相量图

(3)空载电流的无功分量 I_μ 与 Φ_m 同相,有功分量电流 I_{Fe} 超前 $I_\mu 90^\circ$, I_μ 和 I_{Fe} 相量相加得 I_0 ;

(4)画 $-\dot{E}_1$,它与 \dot{E}_1 大小相等方向相反。再以 $-\dot{E}_1$ 的顶点画电阻压降 $I_0 r_1$,它与 I_0 同相。在 $I_0 r_1$ 的末端画 $j I_0 x_1$,它超前 $I_0 90^\circ$. $-\dot{E}_1$ 、 $I_0 r_1$ 和 $j I_0 x_1$ 相加得 U_1 .

第四节 空 载 试 验

一、空载试验的目的

空载试验的目的是测量变压器的变比 k 、铁芯损耗 p_{Fe} 、空载电流 I_0 和激磁参数 z_m 、 r_m 、 x_m 。

二、空载试验方法

(1)按图 2-7接线;

(2)在变压器低压侧加交变的额定电压,高压侧开路。从理论上讲,空载试验可以在任意侧加电压,但为了试验安全和仪表选择方便,一般都在低压侧加电压。因试验电压较低,操作较安全,而且空载电流较大,读数准确度高。

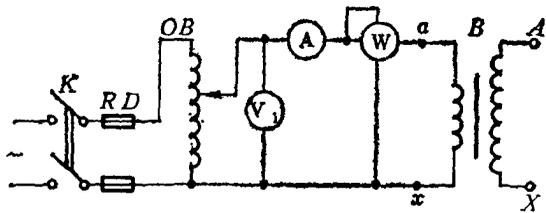


图 2-7 单相变压器空载试验接线图

(3)调节调压器 OB 的手柄,使 V_1 表的读数为额定电压,并同时读取 U_{20} 、 I_0 、 p_0 的数值。

三、利用空载试验数据计算变压器参数

空载试验时,变压器没有输出功率,输入功率与空载损耗相平衡。空载损耗 p_0 包括铁损和铜损两部分,即 $p_0 = p_{Fe} + p_{Cu}$ 。由于 I_0 很小,铜损 $p_{Cu} = I_0^2 r_1$ 可略去不计,则铁损近似地等于空载损耗,即 $p_{Fe} \approx p_0$ 。空载试验时,原边加的是额定电压,变压器铁芯中磁通和磁密都达到正常运行时的数值。而铁损与磁密的平方成正比,即与电源电压的平方成正比,所以空载试验测得的铁损为变压器正常运行时的铁损。下面根据实验测得的数据,计算变压器的变比和激磁参数。

变压器的变比

$$k = \frac{U_1}{U_{20}}$$

铁损

$$p_{Fe} = p_0$$

求激磁参数时，考虑到 $z_m \gg z_1, r_m \gg r_1$ 可忽略漏阻抗压降，于是得：

激磁阻抗

$$z_m \approx z_0 = \frac{U_1}{I_0}$$

激磁电阻

$$r_m \approx r_0 = \frac{p_0}{I_0^2}$$

激磁电抗

$$x_m = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}$$

式中 z_0 —— 变压器的空载阻抗， $z_0 = z_m + z_1$ ；

r_0 —— 变压器的空载电阻， $r_0 = r_m + r_1$ 。

四、注意事项

(1) 以上计算式中所列的各种数值，都是指的每相数值。如果是三相变压器，计算方法与单相变压器一样，但必须注意，式中的功率、电压、电流均要采用每相的数值，计算出的参数也是每相的参数。

(2) 空载试验时，变压器的功率因数很低，一般在0.2以下，所以作空载试验时，应选用低功率因数的功率表来测量空载功率，以减少测量误差。

【例2-2】 有一台Y，y(Y/Y)连接的变压器， $S_N = 100\text{kVA}$ ， $U_{1N}/U_{2N} = 6000/400\text{V}$ ， $I_{1N}/I_{2N} = 9.63/144\text{A}$ 。在低压侧加额定电压作空载试验测得 $p_0 = 600\text{W}$ ， $I_0 = 9.37\text{A}$ ， $U_1 = 400\text{V}$ ， $U_{20} = 6000\text{V}$ ，试求：

(1) 变压器的变比 k ；

(2) 变压器的激磁参数 z_m 、 r_m 、 x_m 的低压测值。

解：(1) 变压器的变比 k

低压侧相电压

$$U_{1\phi} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230 (\text{V})$$

高压侧相电压

$$U_{2\phi} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3464 (\text{V})$$

变比

$$k = \frac{U_{2\phi}}{U_{1\phi}} = \frac{3464}{230} = 15$$

(2) 变压器的激磁参数

每相空载损耗

$$p'_0 = \frac{p_0}{3} = \frac{600}{3} = 200(\text{W})$$

激磁阻抗

$$z_m = \frac{U_{10}}{I_0} = \frac{230}{9.37} = 24.55(\Omega)$$

激磁电阻

$$r_m = \frac{p'_0}{I_0^2} = \frac{200}{(9.37)^2} = 2.28(\Omega)$$

激磁电抗

$$x_m = \sqrt{z_m^2 - r_m^2} = 24.44(\Omega)$$

第五节 小结

(1) 变压器空载运行时的磁场

空载电流产生的磁通分为主磁通和漏磁通，两者的性质和作用是不同的，其主要区别是：

1 主磁通 ϕ 沿铁芯而闭合，磁路是饱和的， ϕ 与 i_0 的关系是非线性的。而漏磁通 ϕ_s 沿空气和油箱壁而闭合，磁路是不饱和的， ϕ_s 与 i_0 保持线性关系。

2 主磁通 ϕ 在原、副绕组中产生感应电势 \dot{E}_1 和 \dot{E}_2 ，起传递功率的媒介作用，而漏磁通 ϕ_s 只在原绕组产生感应电势，起电压降的作用，不能传递功率。

(2) 电压方程式

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 z_1 \\ U_{20} &= E_2 \end{aligned}$$

(3) 电压、电势与磁通之间的相互关系为

$$U_1 = E_1 = 4.44 N_1 f_1 \Phi_m$$

当 N_1 、 f_1 均为常数时， Φ_m 正比于电源电压 U_1 。当 N_1 、 f_1 、 U_1 均为常数时， Φ_m 等于常数，称为常磁通。

(4) 变比

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_1}{U_2}$$

(5) 空载电流 $I_0 = I_\mu + I_{Fe}$ ，它的无功电流分量 I_μ 用来产生主磁通，有功电流分量 I_{Fe} 用来补偿空载损耗。一般 $I_0 \approx (2 \sim 10) \% I_N$ ，其性质基本上属于感性无功电流。

(6) 等值电路是实际变压器的模拟电路，等值电路图中的 r_1 和 x_1 是常数， r_m 和 x_m 是变量，随磁路的饱和程度的增加而减小。而且 $r_m \gg r_1$ ， $x_m \gg x_1$ 。

(7) 空载试验的目的是为了求 I_0 、 p_{Fe} 、 k 、 r_m 、 x_m 和 z_m 。

$$p_{Fe} \approx p_0$$

$$z_m = \frac{U_1}{I_0}$$

$$r_m = \frac{p_0}{I_0^2}$$

$$x_m = \sqrt{z_m^2 - r_m^2}$$

思考题及习题

2-1 什么叫主磁通？什么叫漏磁通？它们的作用和性质有什么不同？在等值电路中如何反应它们的作用？

2-2 保持变压器外施电压不变，当减小原绕组匝数时，试问铁芯饱和程度、空载电流 I_0 、铁损 p_{Fe} 和副边电势 E_2 有何变化？

2-3 一台单相变压器额定电压为 220/110V，如果不小心将低压侧误接到 220V 电源上，问主磁通 Φ_m 、空载电流 I_0 、铁芯损耗 p_{Fe} 、激磁阻抗 x_m 如何变化？

2-4 为什么变压器空载运行时功率因数很低？

2-5 r_m 和 x_m 的物理意义是什么？ x_m 的数值大好还是小好？为什么？

2-6 有一台单相变压器，额定容量 $S_N = 5000 \text{kVA}$ ， $U_{1N}/U_{2N} = 3.5/6.6 \text{kV}$ ，额定频率 $f_N = 50 \text{Hz}$ ，铁芯柱有效面积 $S = 1120 \text{cm}^2$ ， $B_m = 1.45 \text{T}$ ，试求原、副绕组的匝数及变比。

2-7 在变压器低压侧接电源与在高压侧接电源做空载试验，测得的铜损 p_{0a} 、空载电流 I_0 与求得的激磁参数 z_m 、 r_m 、 x_m 是否相同？二者有什么关系？

2-8 有一台三相变压器， $S_N = 50000 \text{kVA}$ ，Y, d(Y/Δ) 接线， $U_{1N}/U_{2N} = 110/10.5 \text{kV}$ ，在低压侧加电压，空载试验数据为 $I_0 = 5\% I_N$ ， $p_0 = 48600 \text{W}$ ，试求变比 k 和低压侧激磁参数 z_m 、 r_m 、 x_m 。

2-9 有一台 180kVA 的铝线变压器，Y, y(Y/Y) 接线，原、副绕组额定相电压分别为 $10000/\sqrt{3}$ 和 $400/\sqrt{3}$ ，铁芯截面 $S = 160 \text{cm}^2$ ，取铁芯磁密 $B_m = 1.445 \text{T}$ ，试求：

(1) 变压器原、副绕组匝数；

(2) 为了使副边电压能在额定电压值的上、下调节 $\pm 5\%$ ，问高压绕组如何抽头？

2-10 填空题

(1) x_1 是对应 () 磁通的电抗， x_m 是对应 () 磁通的电抗。 x_m 越大， I_0 越 ()。

(2) r_1 是 () 的电阻， r_m 是反映 () 的等值电阻。

(3) r_m 和 x_m 随磁路饱和程度的增加而 ()，如果变压器原绕组匝数增加，则 x_m ()，如果变压器铁芯接缝越大，则 x_m ()，空载电流 ()。

(4) 如果变压器电源电压增加，则主磁通 ()，激磁电流 ()，激磁电抗 ()，铁芯损耗 ()。

(5) 变压器空载电流的有功分量 I_{Fe} 用来 ()，电流的无功分量 I_μ 用来 ()。

第三章 单相变压器的负载运行

第一节 负载运行时的磁势平衡和电势平衡

变压器的原边接在电源上 副边上接上负载时的运行情况 称为变压器的负载运行 如图3-1所示。

负载运行是变压器的基本运行方式。负载运行与空载运行的主要区别是副边有了电流和磁势，变压器铁芯的主磁通由原、副绕组组合成磁势产生。

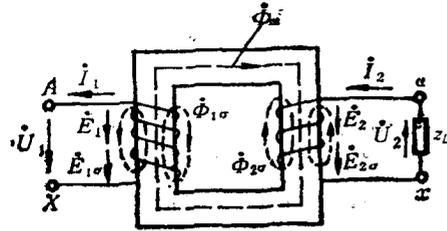


图 3-1 变压器负载运行示意图

本章首先研究变压器负载运行时的物理情况、磁势平衡、电压方程式及折算，进而导出等值电路及相量图，最后讨论变压器的运行特性指标——电压调整率（变化率）及效率。本章还要介绍标么值概念及运算。

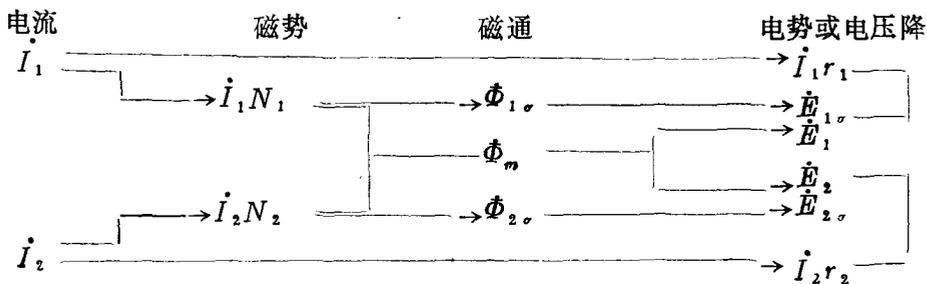
一、负载运行时的物理状况

空载运行时，原边电流为 I_0 ，副边电流为零。在空载电流 I_0 的作用下，建立空载磁势 $\dot{F}_0 = \dot{I}_0 N_1$ ，并产生主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 。这个交变的磁通分别原、副绕组上产生感应电势 \dot{E}_1 和 \dot{E}_2 。电网电压 \dot{U}_1 与反电势 $-\dot{E}_1$ 及阻抗压降相平衡，维持空载电流 I_0 在原绕组中流过，使变压器中的电磁关系处于平衡状态，各物理量的大小均有一个确定的数值。负载运行时，副边接上了负载阻抗 Z_L ，副绕组有电流 \dot{I}_2 流过，产生磁势 $\dot{F}_2 = \dot{I}_2 N_2$ ，此时，原、副绕组磁势共同作用在主磁路上，企图使主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 趋于改变， \dot{E}_1 随之改变，破坏了空载时的平衡状态。但由于电源电压 $U_1 = \text{常数}$ ，则 $\dot{\Phi}_m = \text{常数}$ ，所以原边电流必须从 I_0 变到 I_1 ，以补偿副边磁势的去磁作用，维持主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 不变，建立新的平衡状态。

二、电势平衡方程式

变压器负载运行时，原、副绕组磁势除在主磁路中共同建立磁通 $\dot{\Phi}_m$ 并产生感应电势 \dot{E}_1 和 \dot{E}_2 外，原、副绕组本身还有漏磁通 $\dot{\Phi}_{1\sigma}$ 和 $\dot{\Phi}_{2\sigma}$ ，并产生漏电势 $\dot{E}_{1\sigma}$ 和 $\dot{E}_{2\sigma}$ 。

变压器负载运行时，电流、磁势、磁通、电势之间的相互关系可列表如下：



漏电势可用漏抗压降来表示，即

$$\begin{aligned}\dot{E}_{1\sigma} &= -j \dot{I}_1 x_1 \\ \dot{E}_{2\sigma} &= -j \dot{I}_2 x_2\end{aligned}$$

根据基尔霍夫第二定律，原、副边的电势方程式为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 x_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1 \quad (3-1)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 r_2 - j \dot{I}_2 x_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 z_2 \quad (3-2)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 z_L \quad (3-3)$$

式中 z_1 ——原绕组的漏阻抗， $z_1 = r_1 + jx_1$ ；

z_2 ——副绕组的漏阻抗， $z_2 = r_2 + jx_2$ ；

z_L ——负载阻抗。

三、磁势平衡方程式

空载时，作用在变压器主磁路上只有原绕组的空载磁势 F_0 。负载时，作用在变压器主磁路上有原绕组磁势 F_1 和副绕组磁势 F_2 。变压器从空载到负载运行，原边加的都是额定电压。由于空载与负载运行时电源电压不变，因此主磁通 Φ_m 基本不变，那么，产生这一磁通的空载磁势 F_0 和负载运行时的合成磁势 $F_1 + F_2$ 应相等。即

$$\left. \begin{aligned}\dot{F}_1 + \dot{F}_2 &= \dot{F}_0 \\ \dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 &= \dot{I}_0 N_1\end{aligned} \right\} \quad (3-4)$$

式中 \dot{F}_1 ——原绕组磁势， $\dot{F}_1 = \dot{I}_1 N_1$ ；

\dot{F}_2 ——副绕组磁势， $\dot{F}_2 = \dot{I}_2 N_2$ ；

\dot{F}_0 ——空载磁势， $\dot{F}_0 = \dot{I}_0 N_1$ 。

如果忽略 I_0 ，则 $I_1 N_1 = -I_2 N_2$ ，说明副边磁势对原边磁势起去磁作用。

若将式(3-4)中的 $I_2 N_2$ 移到等式右边，得

$$\dot{I}_1 N_1 = \dot{I}_0 N_1 + (-\dot{I}_2 N_2) \quad (3-5)$$

从式(3-5)可知，负载时，原边磁势 $F_1 = I_1 N_1$ 由两个分量组成，第一部分 $I_0 N_1$ 为励磁分量，用来产生负载时的主磁通 Φ_m ；第二部分 $-I_2 N_2$ 称为负载分量磁势，用来补偿副边磁势的去磁作用，维持主磁通不变。

将式(3-5)磁势平衡式两边同时除以 N_1 ，得

$$\begin{aligned}\dot{i}_1 &= \dot{I}_0 + \left(-\dot{I}_2 \frac{N_2}{N_1}\right) \\ &= \dot{I}_0 + \left(-\frac{\dot{I}_2}{k}\right) = \dot{I}_0 + \dot{I}_{1L}\end{aligned} \quad (3-6)$$

式中 \dot{I}_{1L} ——一次电流的负载分量， $\dot{I}_{1L} = -\frac{\dot{I}_2}{k}$ 。

式(3-6)表明，变压器负载运行时，原边电流由两个分量组成，其中 I_0 用来产生主磁通 Φ_m ，称为励磁分量；另一部分 $\dot{I}_{1L} = -\frac{\dot{I}_2}{k}$ 用来补偿副边电流的去磁作用，称为负载分量。所以当副边电流变化时，必将引起原边电流的变化，亦即变压器原边电流和功率将随副边电流和功率的变化而变化。变压器就是这样通过电磁感应和磁势平衡来实现功

率传递的。

因空载电流 I_0 很小，为了分析问题方便起见，常将 I_0 忽略不计，则式 (3-6) 变为

$$\dot{I}_1 = -\frac{1}{k}\dot{I}_2 = -\frac{N_2}{N_1}\dot{I}_2 \quad (3-7)$$

如果只考虑 I_1 和 I_2 的绝对值，则

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k} \quad (3-8)$$

式(3-8)表明，变压器原、副绕组电流与原、副绕组的匝数成反比。这说明变压器在变电压的同时，也起了变电流的作用。

第二节 变压器的折算

根据前面分析，归纳负载运行时的几个重要关系式，可列出变压器负载运行时的基本方程组为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1 \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 z_2 \\ \dot{E}_1 &= k\dot{E}_2 \\ \dot{I}_0 &= \dot{I}_1 + \frac{1}{k}\dot{I}_2 \\ \dot{E}_1 &= -\dot{I}_0 z_m \\ \dot{U}_2 &= \dot{I}_2 z_L \end{aligned} \right\} \quad (3-9)$$

以上这六个方程式，反映了变压器负载运行时各电磁量的主要关系。利用这组联立方程式，便能对变压器进行定量计算。例如，当已知电源电压 \dot{U}_1 ，变比 k 和参数 z_1 、 z_2 、 Z_m 以及负载阻抗 z_L 时，就能从上述六个方程式求出六个未知量 \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 、 \dot{I}_0 、 \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 和 U_2 。但是解联立复数方程组是非常复杂的，特别是画相量图更加困难。为了便于分析和简化计算，引入了折算法。

折算就是用一台原、副绕组匝数相等 ($N_1 = N_2'$) 的变压器，来等效地代替原、副绕组匝数不等的实际变压器的计算为法。所谓等效，就是折算前后变压器内部的电磁效应不变，即折算前后磁势平衡、功率传递、有功功率损耗和漏磁场储能等均保持不变。

折算是一种研究方法，其目的是为了得出原、副边有电的直接联系的等值电路，从而简化计算。

在变压器计算中，常常是把副绕组折算到原绕组，就是在定量计算时把副绕组匝数变换成原绕组匝数而不改变其电磁效应。折算后，副边各物理量的数值，称为副边折算到原边的折算值。折算值用原来副边各物理量的符号加上一个“'”来表示。例如副绕组各物理量的折算值为 U_2' 、 E_2' 、 I_2' 、 r_2' 、 x_2' 等。

假设副绕组为低压侧，原绕组为高压侧，那么由副绕组折算到原绕组的折算方法如下。

1. 副边电流的折算值 I_2'

根据折算前后副边磁势 F_2 不变的原则得

$$I'_2 N_1 = I_2 N_2$$

$$I'_2 = \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{1}{k} I_2 \quad (3-10)$$

2. 副边电势及电压的折算值 E'_2 和 U'_2

根据电势与匝数成正比的关系得

$$\begin{aligned} \frac{E'_2}{E_2} &= \frac{N_1}{N_2} = k \\ E'_2 &= kE_2 \\ \text{同理} \quad U'_2 &= kU_2 \end{aligned} \quad (3-11)$$

3. 副边电阻的折算值 r'_2

根据折算前后副绕组有功损耗不变的原则得

$$\begin{aligned} (I'_2)^2 r'_2 &= I_2^2 r_2 \\ r'_2 &= \left(\frac{I_2}{I'_2} \right)^2 r_2 = k^2 r_2 \end{aligned} \quad (3-12)$$

4. 副边漏抗的折算值 x'_2

根据折算前后副绕组无功功率不变的原则得

$$\begin{aligned} (I'_2)^2 x'_2 &= I_2^2 x_2 \\ x'_2 &= \left(\frac{I_2}{I'_2} \right)^2 x_2 = k^2 x_2 \end{aligned} \quad (3-13)$$

5. 副边阻抗的折算值 z'_2

$$\begin{aligned} z'_2 &= r'_2 + jx'_2 = k^2(r_2 + jx_2) = k^2 z_2 \\ \text{同理} \quad z'_L &= k^2 z_L \end{aligned} \quad (3-14)$$

综上所述，把变压器副绕组折算到原绕组以后，电势和电压的折算值等于实际值乘以变比 k ，电流的折算值等于实际值除以变比 k ，而电阻、漏抗和阻抗的折算值等于实际值乘以变比 k 的平方。

如已知折算值和变比 k ，可以反过来求各量的实际值。经过折算后，变压器的基本方程式组可写为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jx_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1 \\ \dot{U}'_2 &= \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2(r'_2 + jx'_2) = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 z'_2 \\ \dot{I}_0 &= \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 \\ \dot{E}_1 &= -\dot{I}_0 z_m \\ \dot{U}'_2 &= \dot{I}'_2 z'_L \end{aligned} \right\} \quad (3-15)$$

第三节 变压器的等值电路及相量图

变压器在空载运行时，可以用一个等值电路来代替实际变压器中电和磁的相互关系。

变压器的等值电路就是把基本方程式组 (3-15) 所表示的电磁关系用电路的形式表示出来, 将场化为路, 以简化计算。

一、T形等值电路

等值电路可由基本方程式组 (3-15) 导出。根据电压方程式 $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 x_1$, 可画出一侧等值电路。根据电压方程式 $\dot{E}_2' = \dot{U}_2 + \dot{I}_2' r_2' + j \dot{I}_2' x_2'$ 和 $\dot{U}_2 = \dot{I}_2' z_L$, 可画出二次侧的电路, 如图 3-2(a) 所示。又根据 $\dot{E}_1 = \dot{E}_2'$ 、 $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2'$ 和 $\dot{E}_1 = -\dot{I}_0 (r_m + j x_m)$, 可画出变压器的 T 形等值电路, 如图 3-2(b) 所示。

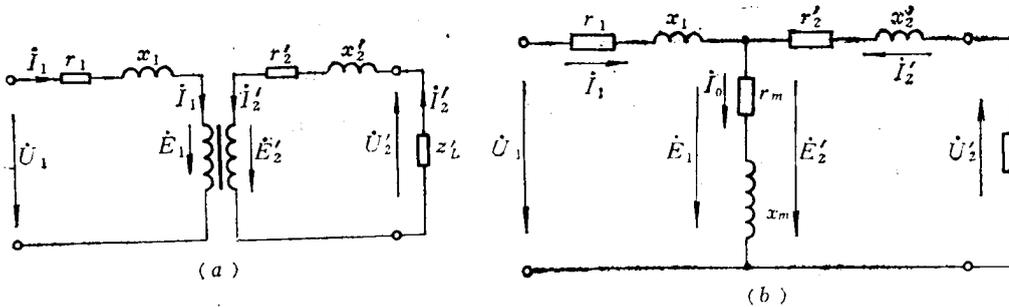


图 3-2 变压器 T 形等值电路

(a) 两侧分开的等值电路; (b) T 形等值电路

二、近似 T 形等值电路

T 形等值电路完整地表达了变压器内部的电磁关系, 因而能准确地代替实际变压器。

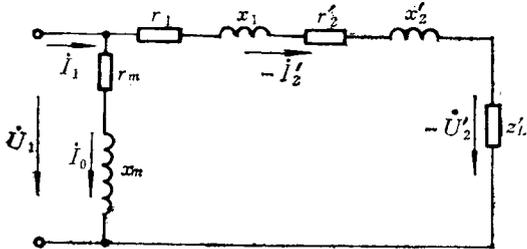


图 3-3 T 形等值电路

但它是一个混联电路, 进行复数运算比较麻烦。在实际电力变压器中 $I_{1N} \gg I_0$, $z_m \gg z_1$, 因而电压降 $I_0 z_1$ 很小, 故可以把激磁支路从 T 形电路的中部移到电源端。激磁支路移动后, 使负载回路电压和激磁回路电压略有升高, 造成了很小的误差, 故称为近似的 T 形等值电路, 如图 3-3 所示。

三、简化等值电路

变压器的空载电流很小, 在实际工程中可以忽略不计, 即去掉激磁支路, 从而得到一个简单的串联电路, 如图 3-4 所示, 这个电路称为变压器的简化等值电路。

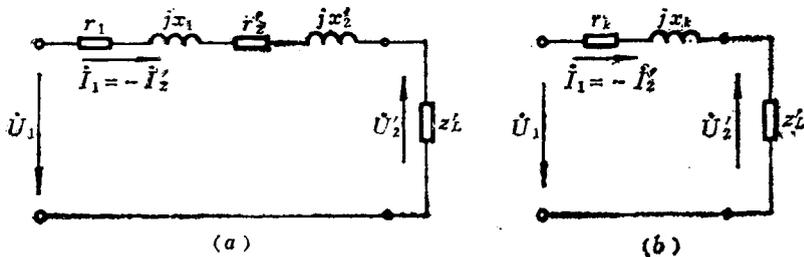


图 3-4 简化等值电路

图中

$$\left. \begin{aligned} r_k &= r_1 + r_2' \\ x_k &= x_1 + x_2' \\ z_k &= r_k + jx_k \end{aligned} \right\} \quad (3-16)$$

而

式中 r_k —— 短路电阻；
 x_k —— 短路电抗；
 z_k —— 短路阻抗。

四、负载时的相量图

变压器负载运行时的电磁关系，除了用基本方程式和等值电路表示外，还可以用相量图表示。相量图能直观地看出变压器中各物理量之间的大小和相位关系。

根据折算后的基本方程式组 (3-15)，可以绘出变压器负载运行时的相量图。图3-5 (a) 为变压器带感性负载时的相量图，图3-5 (b) 为变压器带容性负载时的相量图。

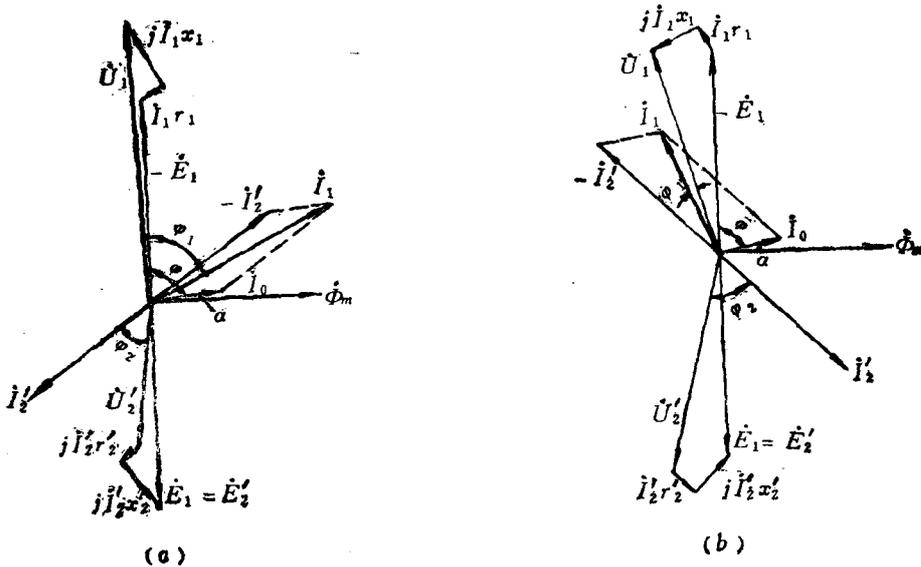


图 3-5 负载运行时变压器的相量图

(a) 感性负载；(b) 容性负载

相量图的步骤随已知条件的不同而不同。

如果已知负载运行的 U_2' 、 I_2' 、 r_2 、 x_2 、 r_1 、 x_1 、 r_m 、 x_m 、 φ_2 值，则画相量图的步骤如下。

- (1) 作 U_2' 和 I_2' 的相量，并使它们之间的夹角为 φ_2 。
- (2) 在 U_2' 的末端加上副边阻抗压降 $I_2' r_2$ 和 $j I_2' x_2$ ，便得到 E_2' 的相量。画图时， $I_2' r_2$ 与 I_2' 平行， $j I_2' x_2$ 比 I_2' 超前 90° 。
- (3) 由 $E_2' = E_1$ 得到相量 E_1 。
- (4) 作主磁通 Φ_m ，使它超前 E_1 90° 。
- (5) 作激磁电流 I_0 ，它超前 Φ_m 一个角度 α ，且 $\alpha = \text{tg}^{-1} \frac{r_m}{x_m}$ 。

(6) 作一次电流 I_1 ，它由 I_0 和 $-I_2'$ 相加而得。

(7) 在 $-E_1$ 的末端加上原边阻抗压降 $I_1 r_k$ 和 $jI_1 x_k$ ，得原边电压相量 U_1 。

由图 3-5 可见，变压器带感性负载时，副边电压 $U_2' < E_2'$ ；带容性负载时，副边电压 $U_2' > E_2'$ 。

五、简化相量图

与简化等值电路相对应的电压方程式为

$$U_1 = -U_2' + I_1 r_k + jI_1 x_k \quad (3-17)$$

根据电压方程式 (3-17) 绘出的简化相量图，如图 3-6 所示。

为了看得清楚，图中各量未按比例尺画，电压降是放大的了。

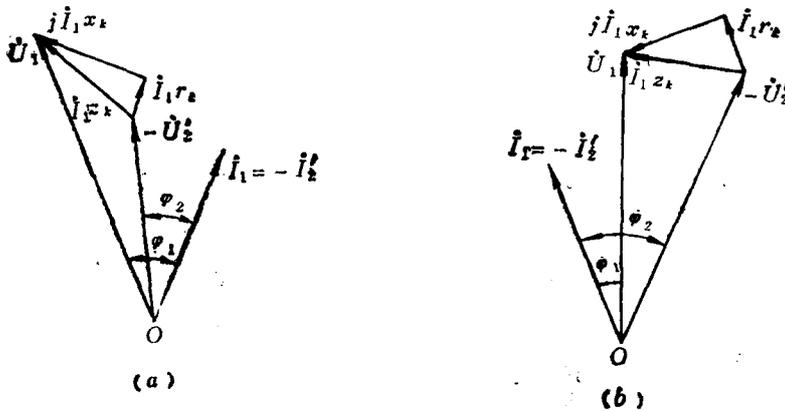


图 3-6 变压器的简化相量图

(a) 感性负载；(b) 容性负载

第四节 变压器的负载（短路）试验

变压器短路是一种事故状态。短路时，变压器副绕组短接，负载阻抗 $z_L = 0$ ，副边端电压 $U_2 = 0$ 。限制短路电流的仅是变压器的短路阻抗 z_k 。由于 z_k 很小，所以原、副绕组的短路电流很大，可达额定电流的 20 倍左右，可能烧坏变压器。因此，仅在新产品的型式试验时，才作这种试验。

本章讨论的不是事故短路，而是为了测变压器参数、铜损、阻抗电压所作的短路试验。作短路试验时，为了避免过大的短路电流，必须适当降低外施电压。一般外施电压降到副边短路电流为额定电流时为止，这时的外施电压称为阻抗电压，它约为额定电压的 5%~10% 或更大。这种短路试验在 GB2900.15-82 中，称作负载试验，以与前述的突发性短路试验相区别。

一、负载试验方法

负载试验的具体步骤如下。

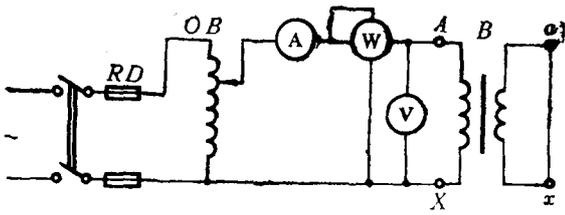


图 3-7 变压器负载试验接线图

短路电压 $U_2 = 0$ ，因此输出功率等于零，变压器的输入功率全部变成短路时的损耗，称为负载损耗 p_k 。损耗 p_k 与原、副绕组的铜损和铁芯损耗相平衡，即

$$p_k = p_{Cu} + p_{Fe}$$

式中 p_k ——负载损耗；

p_{Cu} ——原、副绕组铜损；

p_{Fe} ——变压器铁芯损耗。

变压器的铁损与磁密的平方成正比，铜损与电流的平方成正比。负载试验时，原、副绕组的电流均为额定电流，铜损也为正常运行时的额定值。但作负载试验时，外施电压很小，一般为额定电压的 5%~10% 主磁通 Φ_m 和磁通密度 B_m 大大低于正常运行时的数值，所以铁损很小。此时铁损与铜损相比可以忽略不计，因此负载损耗近似地等于铜损，即

$$p_k \approx p_{Cu} = U_k I_{1N} \cos \varphi_k = I_1^2 r_k \quad (3-18)$$

大型变压器负载试验时， $\cos \varphi = 0.05$ ，因此作负载试验时，应选用低功率因数的功率表来测量负载损耗。

二、利用负载试验数据计算变压器的参数

$$\left. \begin{aligned} \text{短路阻抗} \quad z_k &= \frac{U_k}{I_k} = \frac{U_k}{I_{1N}} \quad (\Omega) \\ \text{短路电阻} \quad r_k &= \frac{p_k}{I_k^2} = \frac{p_k}{I_{1N}^2} \quad (\Omega) \\ \text{短路电抗} \quad x_k &= \sqrt{z_k^2 - r_k^2} \quad (\Omega) \end{aligned} \right\} \quad (3-19)$$

在 T 形等值电路中，可认为

$$r_1 = r_2' = \frac{1}{2} r_k$$

$$x_1 = x_2' = \frac{1}{2} x_k$$

由于短路电阻随温度的变化而变化，而试验温度与变压器实际运行温度不一定相同，因此按国家标准规定，测出的电阻应换算到工作温度（75℃）时的数值。

对于铜线变压器

(1) 按图 3-7 接线。

(2) 为了便于测量，一般将高压侧经调压器接电源，低压侧直接短路。

(3) 调节调压器，使外施电压从零逐渐增大，直到副边电流达到额定电流时为止，此时原边电流也达到原边的额定值。

(4) 测取阻抗电压 U_k 。由于副边短路

$$\left. \begin{aligned} r_{k75^{\circ}\text{C}} &= \frac{235+75}{235+\theta} r_k \\ r_{k75^{\circ}\text{C}} &= \frac{225+75}{225+\theta} r_k \end{aligned} \right\} \quad (3-20)$$

对于铝线变压器

式中 θ ——试验时的室温；

$r_{k75^{\circ}\text{C}}$ ——75 时的电阻。

凡与 r_k 有关的各量，都应按相应的关系换算到 75 时的值，如 75℃ 时的短路阻抗

$$z_{k75^{\circ}\text{C}} = \sqrt{r_{k75^{\circ}\text{C}}^2 + x_k^2} \quad (3-21)$$

三、阻抗电压 U_k

作负载试验时，使短路电流为额定电流所加的电源电压，称为阻抗电压（即短路电压）。阻抗电压一般都以额定电压的百分比来表示，即

$$\left. \begin{aligned} u_k &= \frac{U_k}{U_{1N}} \times 100\% = \frac{I_{1N} z_{k75^{\circ}\text{C}}}{U_{1N}} \times 100\% \\ u_{kr} &= \frac{U_{kr}}{U_{1N}} \times 100\% = \frac{I_{1N} r_{k75^{\circ}\text{C}}}{U_{1N}} \times 100\% \\ u_{kx} &= \frac{U_{kx}}{U_{1N}} \times 100\% = \frac{I_{1N} x_k}{U_{1N}} \times 100\% \end{aligned} \right\} \quad (3-22)$$

式中 u_{kr} ——电阻电压的百分值；

u_{kx} ——电抗电压的百分值。

阻抗电压标在变压器的铭牌上，是变压器的重要参数之一。它的大小标志着额定负载时变压器内部压降的大小，并由它决定短路电流的大小。阻抗电压的大小取决于变压器的结构。从正常运行角度来看，希望阻抗电压小一些，使变压器输出电压随负载变化波动小些。但阻抗电压小 短路电流大 因此变压器阻抗电压应有一个适当的数值。一般中小型变压器的短路电压为 4%~10.5%，大型变压器为 12.5%~17.5%。

第五节 变压器参数的标么值

在电力工程中，一般都不用电压、电流、功率等物理量的实际值，而是用各物理量的标么值。某物理量的实际值与选定的同单位的基值之比，称为标么值，即

$$\text{标么值} = \frac{\text{实际值}}{\text{基值}}$$

在电机和变压器中，常取各物理量的额定值作为基值。标么值是在原来符号的右下角加一“*”来表示。

一、二次侧电压标么值为

$$\left. \begin{aligned} U_{1*} &= \frac{U_1}{U_{1f}} = \frac{U_1}{U_{1N}} \\ U_{2*} &= \frac{U_2}{U_{2f}} = \frac{U_2}{U_{2N}} \end{aligned} \right\} \quad (3-23)$$

一、二次侧电流标么值为

$$\left. \begin{aligned} I_{1*} &= \frac{I_1}{I_{1f}} = \frac{I_1}{I_{1N}} \\ I_{2*} &= \frac{I_2}{I_{2f}} = \frac{I_2}{I_{2N}} \end{aligned} \right\} \quad (3-24)$$

一、二次侧阻抗的标么值为

$$\left. \begin{aligned} z_{1*} &= \frac{z_1}{z_{1f}} = \frac{z_1}{z_{1N}} \\ z_{2*} &= \frac{z_2}{z_{2f}} = \frac{z_2}{z_{2N}} \end{aligned} \right\} \quad (3-25)$$

一、二次侧电阻的标么值为

$$\left. \begin{aligned} r_{1*} &= \frac{r_1}{z_{1f}} = \frac{r_1}{z_{1N}} \\ r_{2*} &= \frac{r_2}{z_{2f}} = \frac{r_2}{z_{2N}} \end{aligned} \right\} \quad (3-26)$$

一、二次侧电抗的标么值为

$$\left. \begin{aligned} x_{1*} &= \frac{x_1}{z_{1f}} = \frac{x_1}{z_{1N}} \\ x_{2*} &= \frac{x_2}{z_{2f}} = \frac{x_2}{z_{2N}} \end{aligned} \right\} \quad (3-27)$$

一、二次侧阻抗的额定值为

$$\left. \begin{aligned} z_{1N} &= \frac{U_{1N}}{I_{1N}} \\ z_{2N} &= \frac{U_{2N}}{I_{2N}} \end{aligned} \right\} \quad (3-28)$$

采用标么值有下列优点：

1. 便于比较变压器的参数和性能

不论变压器的容量多大，用标么值表示的参数及性能数据变化很小，这就便于对不同变压器性能进行比较。例如空载电流 $I_{0*} = 0.02 \sim 0.10$ ；短路阻抗 $z_{k*} = 0.04 \sim 0.175$ 。

2. 可以简化计算

(1) 变压器一、二次侧相对应的各物理量的标么值相等，不需要再进行折算，如：

$$U_{1*} = \frac{U_1}{U_{1N}} = \frac{kU_2}{kU_{2N}} = \frac{U_2}{U_{2N}} = U_{2*}$$

(2) 各物理量额定值的标么值为 1，简化了计算；

(3) 某些物理量的标么值具有相同的数值，如

$$z_{k*} = \frac{z_k}{z_{1N}} = \frac{z_k I_{1N}}{z_{1N} I_{1N}} = \frac{U_k}{U_{1N}} = U_{k*}$$

同理

$$r_{k*} = U_{kr*}$$

$$x_{k*} = U_{k**}$$

即是说，短路阻抗标么值与阻抗电压标么值相等，电阻标么值与阻抗电压有功分量标么值相等，电抗标么值与阻抗电压无功分量标么值相等。

【例 3-1】有一台 Y, y(Y/Y) 连接的变压器， $S_N = 750 \text{ kVA}$ ， $U_{1N}/U_{2N} = 1000/400 \text{ V}$ 。在低压边做空载试验，测得 $U_1 = 400 \text{ V}$ ， $I_0 = 60 \text{ A}$ ， $p_0 = 3800 \text{ W}$ 。在高压边作负载试验，测得 $U_k = 400 \text{ V}$ ， $I_k = I_{1N} = 43.3 \text{ A}$ ， $p_k = 10900 \text{ W}$ 。试求：

(1) 折算到高压侧“ T ”形等值电路各参数的欧姆值及标么值；

(2) 阻抗电压的百分值。

解 (1) 变压器的变比

$$k = \frac{U_{1N}/\sqrt{3}}{U_{2N}/\sqrt{3}} = \frac{10000/\sqrt{3}}{400/\sqrt{3}} = 25$$

原边额定电流

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{1N}} = \frac{750 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 10000} = 43.3 \text{ (A)}$$

副边额定电流

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{2N}} = \frac{750 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 400} = 1083 \text{ (A)}$$

原边阻抗基值

$$z_{1j} = z_{1N} = \frac{U_{1N}/\sqrt{3}}{I_{1N}} = \frac{10000}{\sqrt{3} \times 43.3} = 133.3 \text{ (} \Omega \text{)}$$

从低压边测得的激磁阻抗

$$z_m = \frac{U_1/\sqrt{3}}{I_0} = \frac{400}{\sqrt{3} \times 60} = 3.85 \text{ (} \Omega \text{)}$$

从低压边测得的激磁电阻

$$r_m = \frac{p_0}{3I_0^2} = \frac{3800}{3 \times 60^2} = 0.35 \text{ (} \Omega \text{)}$$

从低压边测得的激磁电抗

$$x_m = \sqrt{z_m^2 - r_m^2} = \sqrt{3.85^2 - 0.35^2} = 3.83 \text{ (} \Omega \text{)}$$

折算到高压侧的激磁参数

$$z'_m = k^2 z_m = 25^2 \times 3.85 = 2406 \text{ (} \Omega \text{)}$$

$$r'_m = k^2 r_m = 25^2 \times 0.35 = 219 \text{ (} \Omega \text{)}$$

$$x'_m = k^2 x_m = 25^2 \times 3.83 = 2394 \text{ (} \Omega \text{)}$$

从高压边测得的短路参数

$$z_k = \frac{U_k/\sqrt{3}}{I_k} = \frac{400}{\sqrt{3} \times 43.3} = 5.87 \text{ (} \Omega \text{)}$$

$$r_k = \frac{P_k}{3I_k^2} = \frac{10900}{3 \times 43.3^2} = 1.94 (\Omega)$$

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{5.87^2 - 1.94^2} = 5.54 (\Omega)$$

各参数的标么值

$$z_{m*} = \frac{z'_m}{z_{1N}} = \frac{2406}{133.3} = 18.05$$

$$r_{m*} = \frac{r'_m}{z_{1N}} = \frac{219}{133.3} = 1.64$$

$$x_{m*} = \frac{x'_m}{z_{1N}} = \frac{2394}{133.3} = 18$$

$$z_{k*} = \frac{z_k}{z_{1N}} = \frac{5.87}{133.3} = 0.044$$

$$r_{k*} = \frac{r_k}{z_{1N}} = \frac{1.94}{133.3} = 0.015$$

$$x_{k*} = \frac{x_k}{z_{1N}} = \frac{5.54}{133.3} = 0.042$$

$$r_{1*} = r_{2*} = \frac{1}{2} r_{k*} = \frac{0.015}{2} = 0.0075$$

$$x_{1*} = x_{2*} = \frac{1}{2} x_{k*} = \frac{0.042}{2} = 0.021$$

(2) 阻抗电压百分值 (标么值)

$$u_k = \frac{I_{1N} z_k}{U_{1N}} \times 100\% = \frac{43.3 \times 5.87}{10000 / \sqrt{3}} = 4.4\%$$

$$u_{kr} = \frac{I_{1N} r_k}{U_{1N}} \times 100\% = \frac{43.3 \times 1.94}{10000 / \sqrt{3}} = 1.5\%$$

$$u_{kx} = \frac{I_{1N} x_k}{U_{1N}} \times 100\% = \frac{43.3 \times 5.54}{10000 / \sqrt{3}} = 4.2\%$$

第六节 变压器的运行性能

变压器负载运行时，标志变压器性能的主要指标是电压调整率（又称电压变化率）和效率。电压调整率是反映变压器供电电压的质量指标；效率是反映变压器运行时的经济指标。

一、电压调整率

由于变压器内部存在着电阻和漏抗，因而负载电流变化时，变压器内部电压降将随之

变化，造成副边端电压随负载电流的变化而变化。副边电压变化的大小 ΔU ，用电压调整率来表示。

所谓电压调整率，是指变压器原边加额定电压，空载时的副边电压 U_{20} 与在给定负载功率因数下副边有额定电流时的副边电压 U_2 之差（算术差），与副边额定电压之比。电压调整率一般用百分数表示，即

$$\Delta U_N = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100\% = \frac{U_{1N} - U_2'}{U_{1N}} \times 100\% \quad (3-29)$$

电压调整率 ΔU 与变压器的参数、负载的大小和性质有关，可用简化相量图求出。

根据简化相量图3-6求得：

$$\Delta U = \beta(r_{k*} \cos \varphi_2 + x_{k*} \sin \varphi_2) + \frac{\beta^2}{2} (x_{k*} \cos \varphi_2 - r_{k*} \sin \varphi_2)^2$$

上式中后面一项很小，在一般计算中可忽略不计，则

$$\Delta U = \beta (r_{k*} \cos \varphi_2 + x_{k*} \sin \varphi_2) \quad (3-30)$$

式中 β ——负载系数， $\beta = \frac{I_1}{I_{1N}} = \frac{I_2}{I_{2N}}$ 。 (3-31)

式(3-30)表明，电压调整率与电流成正比，与负载功率因数有关。在实际变压器中， x_{k*} 比 r_{k*} 大很多倍，故在纯电阻负载时（ $\cos \varphi = 1$ ），电压调整率很小；在感性负载时， $\varphi_2 > 0$ ， ΔU 为正值，副边电压比空载电压低；带容性负载时， $\varphi_2 < 0$ ， $\sin \varphi_2$ 为负值，当 $|x_{k*} \sin \varphi_2| > r_{k*} \cos \varphi_2$ 时， ΔU 为负值，此时副边电压比空载电压高。当 $\cos \varphi_2 = 0.8$ （滞后）时， $\Delta U_N = 4\% \sim 5.5\%$ 左右。故国家标准规定，电力变压器高压绕组要有抽头，用分接开关在额定电压 $\pm 5\%$ 范围内进行调节。

二、损耗与效率

1. 变压器的损耗

变压器在传递能量的过程中，产生损耗，致使输出功率小于输入功率。变压器的总损耗 Σp 包括铁损（涡流和磁滞损耗） p_{Fe} 和铜损 p_{Cu} 两部分，即

$$\Sigma p = p_{Fe} + p_{Cu}$$

铁损与 B_m^2 或 U_1^2 成正比，由于变压器空载和负载时，电源电压基本不变，因此空载和负载时的铁损基本相同，故铁损又称为不变损耗。铁损近似地等于空载损耗，即

$$p_{Fe} = p_0$$

铜损 p_{Cu} 是电流在原、副绕组电阻上产生的有功功率损耗，它与电流的平方成正比，随负载的变化而变化，故称为可变损耗。额定电流下的铜损近似地等于短路电流为额定电流时的短路损耗，即

$$p_{CuN} = p_k$$

负载电流不为额定值时，铜损与负载系数的平方成正比，即

$$p_{Cu} = \beta^2 p_{kN}$$

2. 变压器的效率 η

变压器输出的有功功率 P_2 与输入的有功功率 P_1 之比，称为变压器的效率。效率一般用百分值表示，即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \quad (3-32)$$

由于变压器的效率很高，一般都在95%以上，大型变压器可达99%以上，因此用直接负载法测量输出功率 P_2 和输入功率 P_1 来确定效率，很难得到准确的结果。为此，一般用测损耗的办法来计算效率，于是效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma p}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_2 + \Sigma p} \quad (3-33)$$

上式中：

总损耗 $\Sigma p = p_{Fe} + p_{Cu}$

铁损 $p_{Fe} = p_0$

铜损 $p_{Cu} = I_1^2 r_{k75^\circ C} = \left(\frac{I_1}{I_{1N}} \right)^2 I_{1N}^2 r_{k75^\circ C} = \beta^2 p_{kN}$

输出功率 $P_2 = U_{2N} I_2 \cos \varphi_2 = \frac{I_2}{I_{2N}} U_{2N} I_{2N} \cos \varphi_2 = \beta S_N \cos \varphi_2$

在忽略负载运行副边电压的变化时，变压器的效率为

$$\eta = 1 - \frac{p_0 + \beta^2 p_{kN}}{\beta S_N \cos \varphi_2 + p_0 + \beta^2 p_{kN}} \quad (3-34)$$

3. 效率曲线

当功率因数 $\cos \varphi_2 = \text{常数}$ 时，效率与负载系数之间的关系曲线 $\eta = f(\beta)$ ，称为效率曲线，如图3-8所示。

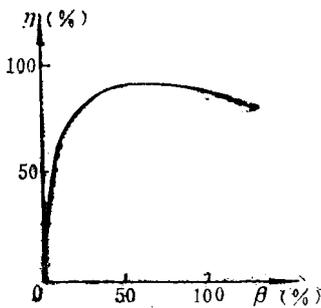


图 3-8 变压器的效率特性

空载时，因 $P_2 = 0$ ，所以 $\eta = 0$ 。铁损是不变损耗，负载较小时，铁损占输入功率的百分数较大，所以效率很低。负载增加时， P_2 增加， η 随之增加。当负载增加到某一数值时，铜损因与电流平方成正比而增加得很快，效率反而降低。

通过数学分析和计算表明，当可变损耗（铜损）与不变损耗（铁损）相等时，变压器出现最高效率 η_{max} ，即

$$\beta^2 p_{kN} = p_0 \quad (3-35)$$

变压器以最高效率 η_{max} 运行时的负载系数 β 为

$$\beta = \sqrt{\frac{p_0}{p_{kN}}} = \beta_m \quad (3-36)$$

由于变压器的负载是变化的，一般不会长期在额定负载下运行，为了使变压器平均效率高，通常 $\beta_m = 0.5 \sim 0.6$ 。因此，应根据负载变化情况，确定变压器的运行台数，使变压器在最高效率下运行，使总的经济效益提高。

【例3-2】试用例题3-1的数据，求：

(1) 供给额定负载，且 $\cos \varphi_2 = 0.8$ （滞后）时的电压调整率 ΔU 、副边电压 U_2 、

变压器效率 η ;

(2)当 $\cos\varphi_2=0.8$ 时的最高效率 η_{max} .

解:(1)变压器的电压调整率

$$\begin{aligned}\Delta U &= \beta (r_{k*} \cos\varphi_2 + x_{k*} \sin\varphi_2) \\ &= 0.015 \times 0.8 + 0.042 \times 0.6 = 0.037 = 3.7\%\end{aligned}$$

副边电压

$$U_2 = U_{2N} - U_{2N} \Delta U = 400 - 400 \times \frac{3.7}{100} = 385 \text{ (V)}$$

变压器的效率

$$\begin{aligned}\eta &= 1 - \frac{p_0 + \beta^2 p_{kN}}{\beta S_N \cos\varphi_2 + p_0 + \beta^2 p_{kN}} \\ &= 1 - \frac{3800 + 10900}{750000 \times 0.8 + 3800 + 10900} = 97.6\%\end{aligned}$$

(2)当 $\cos\varphi_2=0.8$ 时的最高效率

出现最高效率时的负载系数

$$\beta_m = \sqrt{\frac{p_0}{p_{kN}}} = \sqrt{\frac{3800}{10900}} = 0.59$$

最高效率

$$\begin{aligned}\eta_{max} &= 1 - \frac{2p_0}{\beta_m S_N \cos\varphi_2 + 2p_0} \\ &= 1 - \frac{2 \times 3800}{0.59 \times 750000 \times 0.8 + 2 \times 3800} = 97.9\%\end{aligned}$$

【例3-3】有一台变压器， $S_N=1000\text{KVA}$ ，Y，d(Y/ Δ)接线，额定电压为10/6.3kV。当外施额定电压时，空载损耗 $p_0=4.9\text{kW}$ ，空载电流占额定电流的5%。当短路电流为额定值时，短路损耗 $p_{kN}=15\text{kW}$ ，阻抗电压为额定电压的5.5%。试求：

- (1)折算到高压侧T形等值电路中各参数的欧姆值；
- (2)标么值；
- (3)画出等值电路；
- (4)有额定负载且功率因数为0.8(滞后)时的电压调整率；
- (5)供给额定负载且功率因数为0.8(滞后)时的效率；
- (6)功率因数为0.8(滞后)时的最高效率。

解:(1)归算至高压侧的欧姆值

额定相电流

$$I_{1N\phi} = I_{1Ne} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{1N}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \times 10} = 57.7 \text{ (A)}$$

额定相电压

$$U_{1N\phi} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{10000}{\sqrt{3}} = 5770 \text{ (V)}$$

阻抗基值

$$z_j = z_{1N} = \frac{U_{1N\phi}}{I_{1N\phi}} = \frac{5770}{57.7} = 100 (\Omega)$$

空载电流

$$I_0 = I_{0*} I_{1N} = 0.05 \times 57.7 = 2.89 (\text{A})$$

激磁阻抗

$$z_m = \frac{U_{1N\phi}}{I_0} = \frac{5770}{2.89} \approx 2000 (\Omega)$$

激磁电阻

$$r_m = \frac{p_0}{3I_0^2} = \frac{4900}{3 \times 2.89^2} \approx 196 (\Omega)$$

激磁电抗

$$x_m = \sqrt{z_m^2 - r_m^2} = \sqrt{2000^2 - 196^2} \approx 1990 (\Omega)$$

阻抗电压

$$U_k = U_{k*} U_{1N\phi} = 0.055 \times 5770 = 317 (\text{V})$$

短路阻抗

$$z_k = \frac{U_k}{I_{1N}} = \frac{317}{57.7} = 5.5 (\Omega)$$

短路电阻

$$r_k = \frac{p_k}{3I_{1N}^2} = \frac{15000}{3 \times 57.7^2} = 1.5 (\Omega)$$

短路电抗

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{5.5^2 - 1.5^2} = 5.3 (\Omega)$$

(2) 标么值

$$z_{m*} = \frac{z_m}{z_j} = \frac{2000}{100} = 20$$

$$r_{m*} = \frac{r_m}{z_j} = \frac{196}{100} = 1.96$$

$$x_{m*} = \frac{x_m}{z_j} = \frac{1990}{100} = 19.9$$

$$z_{k*} = \frac{z_k}{z_j} = \frac{5.5}{100} = 0.055$$

$$r_{k*} = \frac{r_k}{z_j} = \frac{1.5}{100} = 0.015$$

$$x_{k*} = \frac{x_k}{z_j} = \frac{5.3}{100} = 0.053$$

$$r_{1*} = r_{2*} = \frac{r_{k*}}{2} = 0.0075$$

$$x_{1*} = x_{2*} = \frac{x_{k*}}{2} = 0.027$$

(3) T形等值电路图, 如图3-9所示。

(4) 有额定负载且 $\cos\varphi_2 = 0.8$ (滞后)

时的电压调整率

$$\begin{aligned} \Delta U &= \beta (r_{k*} \cos\varphi_2 + x_{k*} \sin\varphi_2) \\ &= 0.015 \times 0.8 + 0.053 \times 0.6 = 4\% \end{aligned}$$

(5) 供给额定负载且 $\cos\varphi_2 = 0.8$ 时的效率

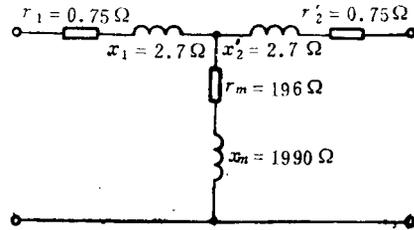


图 3-9 例题3-3的 T形等值电路

$$\begin{aligned} \eta &= 1 - \frac{p_0 + \beta^2 p_{kN}}{\beta S_N \cos\varphi_2 + p_0 + \beta^2 p_{kN}} \\ &= 1 - \frac{4.9 + 15}{1000 \times 0.8 + 4.9 + 15} = 97.6\% \end{aligned}$$

(6) $\cos\varphi_2 = 0.8$ (滞后) 时的最高效率

$$\beta_m = \sqrt{\frac{p_0}{p_{kN}}} = \sqrt{\frac{4.9}{15}} = 0.57$$

$$\eta_{max} = 1 - \frac{2 \times 4.9}{0.57 \times 1000 \times 0.8 + 2 \times 4.9} = 97.9\%$$

第七节 小结

(1) 本章是变压器篇的重点之一, 也是分析变压器运行的理论基础。

(2) 变压器的磁势平衡式为

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 &= \dot{I}_0 N_1 \\ \dot{I}_1 N_1 &\approx -\dot{I}_2 N_2 \end{aligned}$$

上式表明, 变压器副边磁势对原边磁势起去磁作用。当副边电流变化时, 原边电流必须相应变化, 以补偿副边磁势的去磁作用, 维持主磁通不变。变压器负载运行时, 其功率传递就是通过副边磁势对原边磁势的作用而实现的。

(3) 变压器负载运行时的原边电流为

$$I_1 = I_0 + (-I_2/k) = I_0 + I_{1L}$$

上式表明, 变压器负载运行时, 原边电流由两个分量组成。其中 I_0 用来产生主磁通,

$\dot{I}_{1L} = -\frac{\dot{I}_2}{k}$ 是电流的负载分量 用来补偿副边电流的去磁作用。所以原边电流随副边电

流的变化而变化。

(4) 变压器的基本方程式为

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1 \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 z_2 \\ k &= \frac{E_1}{E_2} \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 - \frac{1}{k} \dot{I}_2 \\ \dot{E}_1 &= -\dot{I}_0 (r_m + jx_m) \\ \dot{U}_2 &= \dot{I}_2 z_L\end{aligned}$$

(5) 基本方程式、相量图、等值电路是分析变压器内部电磁关系的三种方法。作定性分析时常用相量图，而作定量计算时常用等值电路。绘等值电路前，必须先进行折算。

(6) 变压器等值电路中的激磁参数 r_m 和 x_m 可以通过空载试验求得；短路参数 r_k 和 x_k 可以通过负载试验求得。 r_m 是反应铁芯损耗的等值电阻， x_m 是对应于主磁通的电抗。 r_m 和 x_m 随磁路饱和程度的增加而减小。 $x_k = x_1 + x_2'$ ，漏抗 x_1 和 x_2 是对应原、副绕组漏磁通的电抗，它不受磁路饱和的影响，因此是一个常数。短路阻抗 $z_k = r_k + jx_k$ ，是变压器的一个重要参数。 z_k 愈大，短路电流愈小，但电压调整率愈大。因此， z_k 不能太大，也不能太小，国家标准对各种容量的变压器 z_{k*} 都作了规定。一般情况下，容量愈大，额定电压愈高， z_{k*} 亦愈大。

(7) 电压调整率 ΔU 及效率 η

电压调整率
$$\Delta U_N = \frac{U_{1N} - U_2'}{U_{1N}} \times 100\%$$

$$\Delta U = \beta (r_{k*} \cos \varphi_2 + x_{k*} \sin \varphi_2)$$

电机的效率

$$\eta = 1 - \frac{p_0 + \beta^2 p_k}{\beta S_N \cos \varphi_2 + p_0 + \beta^2 p_k}$$

电机的最高效率

$$\eta_{max} = 1 - \frac{2p_0}{\beta_m S_N \cos \varphi_2 + 2p_0}$$

最高效率时的负载系数

$$\beta_m = \sqrt{\frac{p_0}{p_k}}$$

电压调整率 ΔU 和效率 η 是变压器运行时的两个重要指标。电压调整率直接影响供电的稳定性，是变压器的质量指标；效率 η 是变压器运行时的经济指标。

思考题及习题

- 3-1 为什么变压器原边电流随副边电流的变化而变化？
- 3-2 为什么变压器铁芯中的主磁通不随负载的变化而变化？
- 3-3 变压器原边的输入功率是怎样传递到副边去的？
- 3-4 漏电抗 x_1 、 x_2 ，电阻 r_1 、 r_2 的物理意义是什么？用什么方法测出这些参数？

3-5 x_m 、 r_m 的物理意义是什么？用什么方法测出这些参数？它与磁路饱和程度有什么关系？

3-6 一台单相变压器， $S_N=1000\text{kVA}$ ， $U_{1N}/U_{2N}=60/6.3\text{kV}$ ， $f=50\text{Hz}$ ，空载及负载试验的结果如表3-1所列。

表 3-1 变压器空载及负载试验数据

试验名称	电压 (V)	电流 (A)	功率 (W)	备注
空 载	6300	19.1	5000	电源加在低压侧
负 载	3240	15.15	14000	电源加在高压侧

试求：

- (1) 折算到高压侧的参数；
- (2) T形等效电路各参数的标么值；
- (3) 绘出变压器的T形等值电路；
- (4) 计算满载且 $\cos\varphi=0.8$ （滞后）时的电压调整率及效率；
- (5) 计算最大效率 η_{\max} 。

3-7 一台单相变压器， $S_N=20000\text{kVA}$ ， $U_{1N}/U_{2N} = \frac{220}{\sqrt{3}}/11\text{kV}$ ， 50Hz ，在低

压侧加电压作空载试验时，测得 $U_1=11\text{kV}$ ， $I_0=45.4\text{A}$ ， $p_0=47\text{kW}$ 。在高压侧加电压作短路试验时，测得 $U_k=9.24\text{kV}$ ， $I_k=157.3\text{A}$ ， $p_k=129\text{kW}$ 。试求

- (1) T形等效电路中各参数的欧姆值；
- (2) T形等效电路中各参数的标么值；
- (3) 阻抗电压的百分值；
- (4) 当变压器带80%负载且 $\cos\varphi=0.8$ （滞后）时，电压变化率 ΔU 、副边电压 U_2 及变压器的效率 η ；
- (5) 变压器的最高效率 η_{\max} 。

第四章 三相变压器

目前各国电力系统均采用三相制，因此三相变压器使用得最广泛。三相变压器在对称负载下运行时，各相电流、电压的大小相等，相位互差 120° ，就其一相而言，与单相变压器没有什么区别。因此，分析单相变压器的方法，如基本方程式、等值电路、相量图以及性能计算公式，完全适用于对称运行的三相变压器，这里就不再重复了。本章主要讨论三相变压器的几个特殊问题，即三相变压器的磁路系统、三相绕组的连接方法及组别、绕组感应电势的波形等问题。

第一节 三相变压器的磁路系统

目前采用的三相变压器有两种结构形式：一种是三相组式变压器，又称为三相变压器组；另一种是三相芯式变压器。

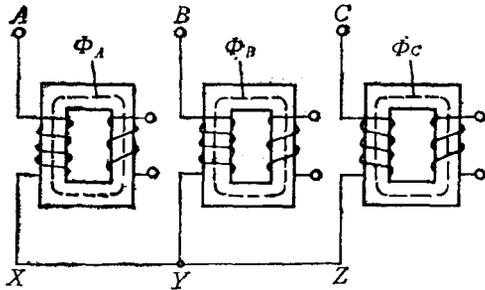


图 4-1 三相组式变压器的磁路系统

；另一种是三相芯式变压器。

一、三相组式变压器磁路的特点

由三个单相变压器连接成三相运行，这种变压器称为三相组式变压器或三相变压器组。其特点是每相有独立的磁路，如图4-1所示。

二、三相芯式变压器磁路的特点

三相芯式变压器每相有一个铁芯柱，三个铁芯柱用磁轭连接起来，构成三相铁芯，如图4-2所示。三相芯式变压器是由三相组式变压器演变而来的。把三个单相变压器合并成图4-2(a)所示的结构，通过中间铁芯柱的磁通应为三相磁通的相量和。由于三相对称运行时，三相磁通的大小相等，相位互差 120° ，因此三相磁通的相量和为零，即

$$\dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_C = 0$$

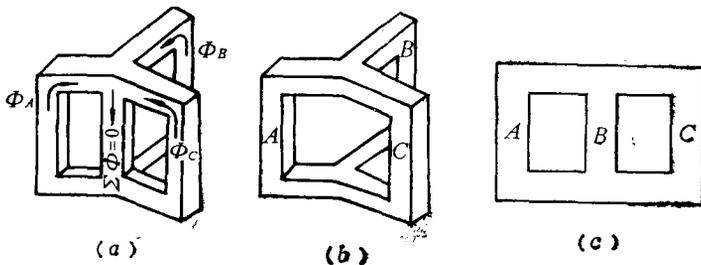


图 4-2 三相芯式变压器的磁路系统

中间铁芯柱无磁通通过，可以省去，形成图4-2 (b) 所示的铁芯。为了使结构简单、制造工艺方便和节省材料，将三个铁芯柱安排在同一平面内，如图4-2 (c) 所示，这是目前广泛采用的芯式变压器的铁芯结构。

三相芯式变压器磁路的特点是：各相磁路彼此关连，任何一相磁通都要借助于其它两相的铁芯柱作为闭合回路。

第二节 三相变压器绕组的连接方法及连接组别

一、三相绕组的连接方法

在三相变压器中，常用大写字母 A 、 B 、 C 表示高压绕组的首端，用 X 、 Y 、 Z 表示其末端；用小写字母 a 、 b 、 c 表示低压绕组的首端，用 x 、 y 、 z 表示其末端，星形连接的中点用 O 表示。

在三相变压器中，不论是原绕组或副绕组，我国最常用的有两种连接方法：

(1) 星形连接法。将三个绕组的末端 X 、 Y 、 Z 连接在一起，而把它们的三个首端 A 、 B 、 C 引出，便构成星形连接，用 Y 表示，如图4-3 (a) 所示。

(2) 三角形连接。将一个绕组的末端与另一个绕组的首端连接在一起，顺次构成一

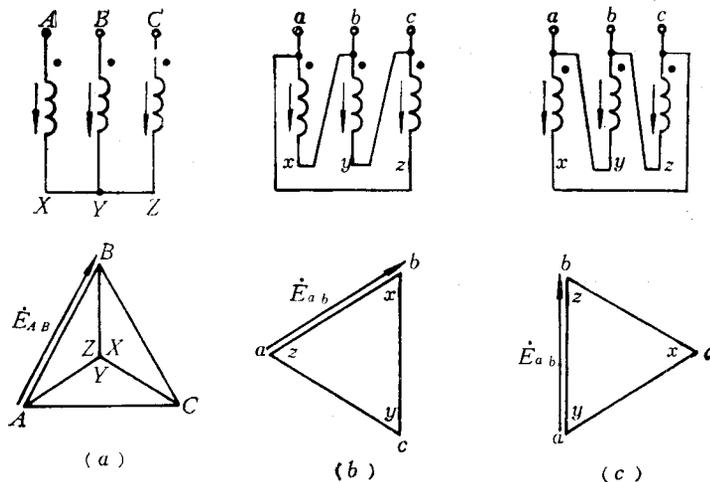


图 4-3 三相绕组连接方法及向量图

(a) 星形；(b) 三角形（顺序连接）；(c) 三角形（逆序连接）

个闭合回路，便是三角形连接，用 Δ 表示，如图4-3 (b) 和4-3 (c) 所示。 Δ 连接可以按 $ax-by-cz$ 的顺序连接，称为顺序三角形接法；也可以按 $ax-cz-dy$ 的顺序连接，称为逆序三角形接法。此外，还有曲折形接法，又称 Z 接法。

二、单相变压器的极性

单相变压器的主磁通及原、副绕组的感应电势都是交变的，无固定的极性。这里所讲的极性是指某一瞬间的相对极性，即任一瞬间，高压绕组的某一端点的电位为正（高电位）时，低压绕组必有一个端点的电位也为正（高电位），这两个具有正极性或另两个具有负极性

的端点，称为同极性端或同名端，用符号“·”表示。同极性端可能在绕组的相同端，如图4-4(a)所示，也可能在绕组的不同端，如图4-4(b)所示，这取决于绕组的绕向。当原、副绕组的绕向相同时，同极性端在两个绕组的相同端；当原、副绕组的绕向相反时，同极性端在两个绕组的不同端。

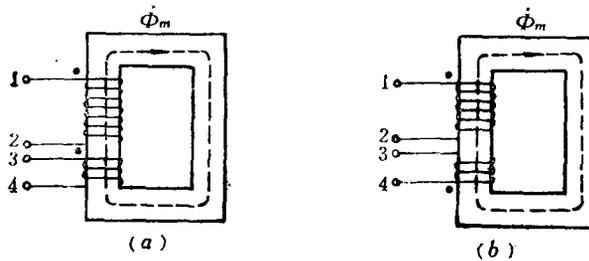


图 4-4 绕组的同极性端

设原、副绕组内的电势 E_A 与 E_a 的正方向都是从首端指向末端，如图4-5所示。当原、副绕组的绕向相同，标记也相同时，则原、副绕组的首端 A 和 a 为同名端，因此原、副绕组相电势 E_A 与 E_a 同相，如图4-5(a)所示。当原、副绕组的绕向相同，标记不相同，原、副绕组的首端为异名端， E_A 与 E_a 反相，如图4-5(b)所示。

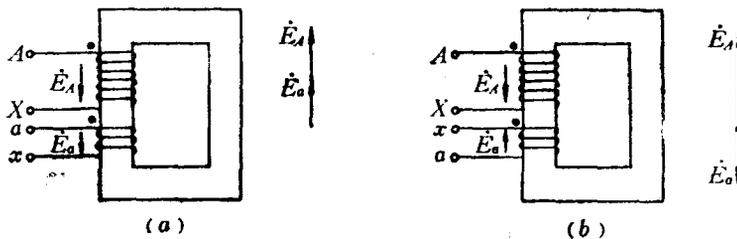


图 4-5 单相变压器原、副绕组相电势的相位关系

三、三相变压器的连接组别

变压器原、副绕组都可以连接成星形、三角形、曲折形，对高压绕组分别以字母Y、D、Z表示，对中压或低压绕组分别以y、d、z表示。如果星形连接或曲折形连接的中性点是引出的，则分别以YN或ZN及yn或zn表示。在两绕组具有公共部分的自耦变压器中，两个绕组中额定电压较低的一个绕组以字母a表示。对中性点引出的星形连接的自耦变压器用YN，a表示。单相绕组用罗马字“Ⅰ”表示，按书写的先后次序分别表示高、（中）、低压绕组。

不同的接连方法，高、低压侧线电压之间有不同的相位关系。几台变压器并联运行时，各台变压器高压侧线电压相位是相同的，低压侧线电压也应同相位，否则在变压器内部将产生很大的环流，致使不能并联运行。

变压器连接组别就是用来表征相位关系的一种标志。

1. 连接组别

表示变压器高压侧与低压侧电压（三相变压器指线电压）之间的相位关系，以及高、低压侧三相绕组的连接方式，称为连接组别。变压器高、低压侧绕组的连接方式不同，高、低压侧电压之间的相位关系也不同，但不论怎样连接，高压侧与低压侧电压（三相变压器指线电压）之间的相位关系总是30°的倍数，因此组别的表示方法可采用时钟表示法。

2. 时钟表示法

把变压器高压侧线电压相量看成时钟的长针，固定在“12”的位置上，低压侧线电压相量看成时钟的短针，短针所指的时数就是变压器连接组别的标号。

3. Y, y0 (Y/Y₀-12) 连接组

图4-6所示为Y, y₀连接组三相变压器绕组连接图。图中高、低压绕组的首端为同名端，因此高、低压绕组的相电势同相位，线电势也同相位。将高压侧线电势 \dot{E}_{AB} 固定在时钟“12”的位置上，由于 E_{ab} 与 E_{AB} 同相，因此 E_{ab} 也指向“12”，其连接组别为Y, y₀。

4. Y, y6 (Y/Y-6) 连接组

图4-7所示为Y, y₆连接组三相变压器绕组连接图。图中高、低压绕组的首端为非同名端，因此高、低压绕组相电势相位相差180°，线电势相位也相差180°。将高压侧线电势 \dot{E}_{AB} 固定在时钟“12”的位置上，由于 E_{ab} 与 E_{AB} 相位相差180°，因此 E_{ab} 指向“6”，其连接组别为Y, y₆。

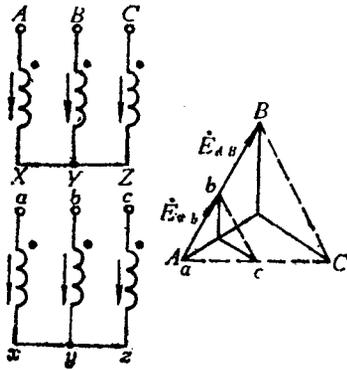


图 4-6 Y, y₀(Y/Y₀-12)连接组

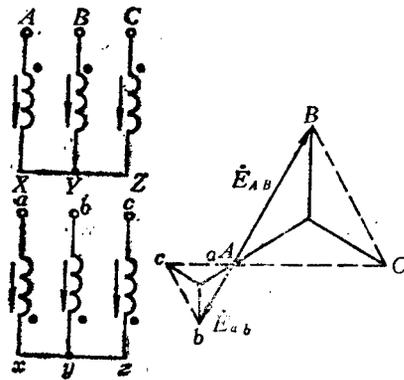


图 4-7 Y, y₆(Y/Y₆-6)连接组

5. Y, d11 (Y/Δ-11) 连接组

图4-8所示为Y, d₁₁连接组三相变压器绕组连接图。图中低压绕组按 $ax \rightarrow cz \rightarrow by \rightarrow a$ 顺序连接。由于高、低压绕组的首端为同名端，因此高、低压绕组的相电势同相， \dot{E}_{ab} 超前于 E_{AB} 30°，其连接组别为Y, d₁₁。

6. Y, d1 (Y/Δ-1) 连接组

图4-9所示为Y, d₁连接组三相变压器绕组的连接图。图中低压绕组按 $ax \rightarrow by \rightarrow cz \rightarrow a$ 顺序连接。由于高、低压侧首端为同名端，因此高、低压侧绕组相电势同相，线电势 \dot{E}_{ab} 滞后于 E_{AB} 30°，其连接组别为Y, d₁。

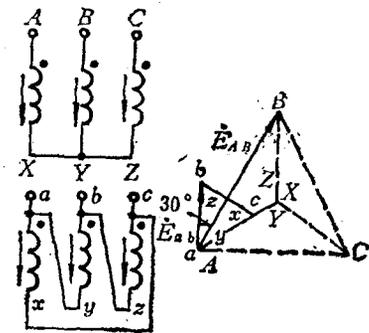


图 4-8 Y, d11(Y/Δ-11) 连接组

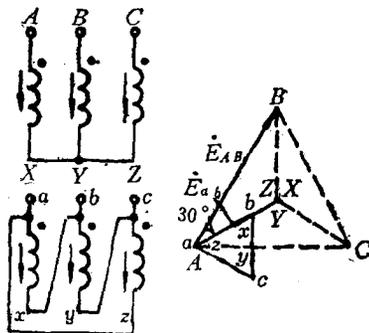


图 4-9 Y, d1(Y/Δ-1) 连接组

7. 常用连接组别

变压器高、低压绕组连接方式采取不同的组合后，可以得到很多个连接组。为了制造和并联运行的方便，我国规定同一铁芯柱上的原、副绕组采用相同符号的标志字母。国家标准(GB1904-85)规定的三相电力变压器常用连接组别为

- Y, y0
- Y, d11
- D, z0
- Y, z11

第三节 变压器连接组别的实验测定

组别相同，是变压器并联运行必须满足的条件之一。因此变压器出厂前和变压器检修后，都要进行组别试验。

一、单相变压器连接组别（极性）的实验测定

实验步骤如下：

- (1) 按图 4-10 接线，并将高、低压侧绕组的尾端 X 和 x 连接起来；
- (2) 在高压侧加一个较低而又便于测量的电压 U_{AX} ；
- (3) 测取 U_{Aa} 、 U_{AX} 、 U_{aa} 三个电压值。如果 $U_{Aa} = U_{AX} - U_{aa}$ ，则 A 与 a 是同名端， U_{AX} 与 U_{aa} 同相，称为减极性变压器，其组别为 I/I-12。如果 $U_{Aa} = U_{AX} + U_{aa}$ ，A 与 a 是异名端， U_{AX} 与 U_{aa} 反相，其组别为 I/I-6。

二、三相变压器组别的实验测定

- (1) 按图 4-11 接线，并将 A 与 a 连接起来；
- (2) 在高压侧加一个较低的对称三相电压；
- (3) 测取 U_{Bb} 、 U_{Cc} 、 U_{Cb} 、 U_{Bc} 四个电压值。如果测得的电压大小符合表 4-1 某个组号的关系，该变压器就属于那个组别。表 4-1 中的变比 $k = V_{AB}/V_{ab}$ 。

现以 Y, d11 为例，说明表 4-1 所列的电压关系。因为端点 A 与 a 连在一起，A 与 a 等电位，因此电压三角形的 A 与 a 点重合在一起，如图 4-12 所示。根据几何图形，可以找到

几个电压之间的相互关系。令

$$k = \frac{U_{AB}}{U_{ab}}$$

则

$$U_{Bb} = U_{Cc} = U_{Bc} = U_{ab} \sqrt{k^2 - \sqrt{3}k + 1}$$

$$U_{Cb} = U_{ab} \sqrt{k^2 + 1}$$

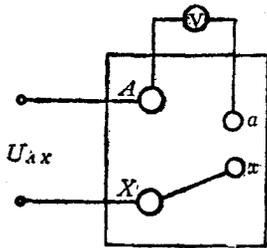


图 4-10 单相变压器组别试验接线图

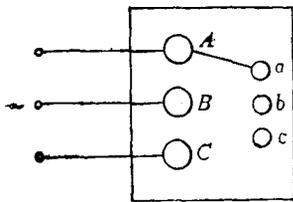


图 4-11 三相变压器组别试验接线图

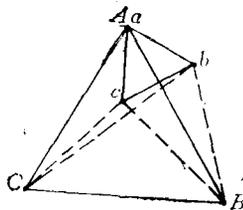


图 4-12 Y, d₁₁ 0(12) 原、副边电压关系

表 4-1 连接组别标号的判断

标号	电 压	
	$U_{Bb} = U_{Cc}$	U_{Bc}/U_{Bb}
1	$U_{ab} \sqrt{k^2 - \sqrt{3}k + 1}$	>1
2	$U_{ab} \sqrt{k^2 - k + 1}$	>1
3	$U_{ab} \sqrt{k^2 + 1}$	>1
4	$U_{ab} \sqrt{k^2 + k + 1}$	>1
5	$U_{ab} \sqrt{k^2 + \sqrt{3}k^2 + 1}$	$=1$
6	$U_{ab} (k + 1)$	<1
7	$U_{ab} \sqrt{k^2 + \sqrt{3}k + 1}$	<1
8	$U_{ab} \sqrt{k^2 + k + 1}$	<1
9	$U_{ab} \sqrt{k^2 + 1}$	<1
10	$U_{ab} \sqrt{k^2 - k + 1}$	<1
11	$U_{ab} \sqrt{k^2 - \sqrt{3}k + 1}$	$=1$
0(12)	$U_{ab} (k - 1)$	>1

把所测的电压数值代入上式，如果各公式都能满足，就可以确定其连接组别为 Y, d₁₁。

第四节 三相变压器空载运行时的电势波形

变压器的感应电势 $e = -N \frac{d\phi}{dt}$ ，因此相电势波形与磁通波形有关，而磁通波形与激磁电流波形和磁路系统（铁芯结构）有关，激磁电流的波形取决于绕组的连接方式，也就是说变压器感应电势的波形与绕组连接方式及铁芯结构有关。

一、激磁电流、磁通、感应电势波形之间的相互关系

如果激磁电流 i_0 是正弦波，由于磁路饱和的影响，磁通 ϕ 是平顶波，如图 4-13 所示。平顶波含有 3 次和更高次的谐波分量，即主磁通 ϕ 中除基波 ϕ_1 外，将会出现较强的 3 次谐波磁通 ϕ_3 。 ϕ_1 在变压器原、副绕组中产生基波电势 e_1 ； ϕ_3 在变压器一、二次绕组中产生 3 次谐波电势 e_3 。 e_1 和 e_3 分别滞后 ϕ_1 和 ϕ_3 90°，因而其合成电势呈尖顶波形，如图 4-14 所示。

当电源电压 u_1 为正弦波时，因为 $U_1 \approx -E_1$ ，所以感应电势 e 和产生感应电势 e 的磁通 ϕ 是正弦波。但由于磁路饱和的影响，激磁电流是尖顶波。亦即是说，为了保证磁通 ϕ 和感应电势 e 是正弦波，激磁电流 i_0 必须是尖顶波。尖顶波含有 3 次和更高次谐波分量，

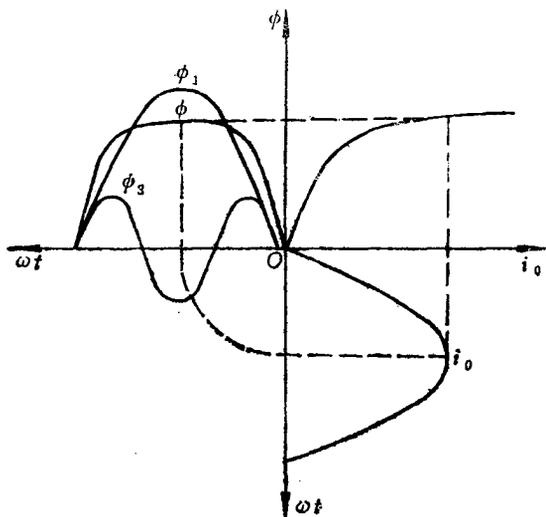


图 4-13 正弦激磁电流产生的磁通波形

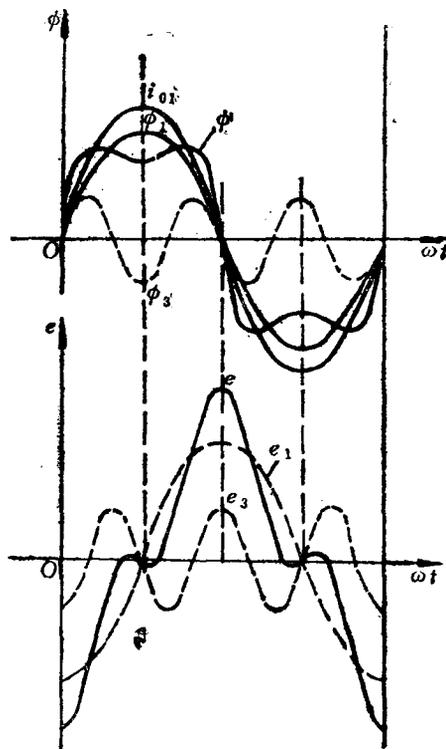


图 4-14 平顶波磁通产生的电势波形

其中 3 次谐波具有最大幅值。3 次谐波电流幅值可达基波电流幅值的 50%~60%。但在三相变压器中，激磁电流不一定有 3 次谐波，这与绕组的连接和铁芯结构有密切的关系。为了获得正弦的感应电势，必须采用合理的磁通结构和连接组别。

二、感应电势与绕组连接方式和铁芯结构之间的关系

1. 3 次谐波电流的特点

(1) 3 次谐波电流的频率是基波电流频率的 3 倍，即

$$f_3 = 3f_1$$

(2) 各相的 3 次谐波电流大小相等，方向相同，即

$$\left. \begin{aligned} i_{A3} &= I_{3m} \sin \omega t \\ i_{B3} &= I_{3m} \sin \omega t \\ i_{C3} &= I_{3m} \sin \omega t \end{aligned} \right\} \quad (4-1)$$

当三相绕组接成星形而无中线时，三相的 3 次谐波电流 i_{A3} 、 i_{B3} 、 i_{C3} 在某一瞬间指向中性点 0，无 3 次谐波电流回路，因此相绕组中无 3 次谐波电流，激磁电流为正弦波，如图 4-15 所示。

当三相绕组接成 D(△) 时，由于三相中 3 次谐波电流方向相同，可以在△形的闭合回路中流通，因此相电流中有 3 次谐波电流，但线电流中无 3 次谐波电流，因为

$$i_{s1} = i_{s\phi A} - i_{s\phi B} = 0$$

式中 i_{s1} ——线电流中的三次谐波；
 i_{sA} ——A相的 3 次谐波电流；
 i_{sB} ——B相的 3 次谐波电流。

2. Y, y(Y/Y) 连接三相组式变压器的电势波形

由于变压器原、副绕组都是 y 连接且无中线，因此无 3 次谐波电流通路，激磁电流为正弦波，由于磁路饱和的影响，磁通为平顶波。平顶的磁通波可以分解成基波磁通 ϕ_1 和 3 次谐波磁通 ϕ_3 。又由于三相组式变压器每相有独立的磁路， ϕ_3 沿着磁阻很小的铁芯而闭合，因此 3 次谐波磁通 ϕ_3 较大，并在原、副绕组中产生较大的 3 次谐波电势 e_3 ，其幅值可达基波幅值的 45%~60%。使相电势幅值升高很多和波形严重畸变，可能损坏绕组的绝缘，因此三相组式变压器不允许采用 Y, y 连接。

3. Y, y 连接三相芯式变压器的电势波形

三相芯式变压器的三相磁路彼此关联，而各相三次谐波磁通大小相等，方向相同，不能沿铁芯闭合，只能借助油和油箱壁等形成回路，如图 4-16 所示。这种磁路的磁阻很大，使 3 次谐波磁通 ϕ_3 很小， e_3 相应很小，相电势接近于正弦波。标准组别 Y, y 0 应采用三相芯式变压器。

3 次谐波磁通的频率是基波磁通频率的 3 倍。 ϕ_3 通过油箱壁、铁件等金属时要产生涡流，引起变压器局部发热，降低变压器效率。所以，容量大于 1800kVA 时，不宜采用这种连接。

4. D, y(Δ/Y) 连接三相变压器的电势波形

变压器的原绕组作三角形连接时，3 次谐波电流可在三角形闭合回路中流通，激磁电流是尖顶波，由于磁路饱和的影响，磁通和感应电势是正弦波。

5. Y, d(Y/Δ) 连接三相变压器的电势波形

原绕组作 Y 连接，激磁电流为正弦波，主磁通为平顶波。主磁通的 3 次谐波 ϕ_3 在副绕组中感应 3 次谐波电势 E_{23} ，且比 ϕ_3 滞后 90°。在 E_{23} 的作用下，副边闭合的三角形回路中产生 3 次谐波电流 I_{23} 。由于二次绕组对 3 次谐波电流呈现较大的阻抗，至使电抗远大于电阻，如忽略电阻不计，则 I_{23} 滞后 E_{23} 90°。 I_{23} 建立的磁场 Φ_{23} 与 I_{23} 同相而与 $\dot{\phi}_3$ 反相对 $\dot{\phi}_3$ 起去磁作用，如图 4-17 所示。由于 $\dot{\phi}_{23}$ 对 $\dot{\phi}_3$ 起去磁作用，致使合成 3 次谐波磁通 $\dot{\phi}'_3$ 很小，相应的 3 次谐波电势 e_3 也很小，感应电势接近正弦波。

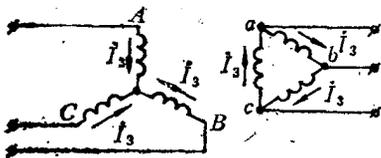


图 4-15 三次谐波电流在 Y 和 D 连接中的流通情况

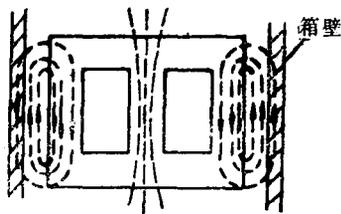


图 4-16 三相芯式变压器中三次谐波磁通的路径

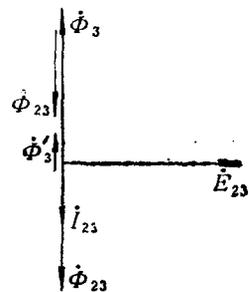


图 4-17 D, y(Δ/Y) 连接变压器三次谐波电流去磁作用相量图

综上所述可知，在三相变压器中，无论是原边或副边，只要有一侧三相绕组接成三角形，就能保证磁通和感应电势为正弦波。为了改善波形，总希望原、副边中至少有一边接成三角形。但为了节省绝缘材料，实际上总是高压边星形连接，低压边三角形连接，因绝缘通常按相电势设计。

第五节 小 结

(1) 三相变压器分为三相组式变压器和三相芯式变压器两大类。三相组式变压器每相有独立的磁路，三相芯式变压器各相磁路彼此关连。

(2) 在某一瞬间，变压器高压绕组与低压绕组同时为正或同时为负的两个对应端，称为同极性端或同名端。如果变压器高、低压绕组的首端为同名端，则高、低压绕组的相电势同相位；如果高、低压绕组的首端为异名端，则高、低压绕组的相电势反相。

(3) 变压器高、低压侧电压（三相变压器指线电压）之间的相位关系及绕组连接方式，称为连接组别。变压器共有12种连接组别，为了制造及使用方便，国家标准规定的三相电力变压器常用的连接组别为

Y, y0
Y, d11
D, z0
Y, z11

(4) i_0 、 ϕ 、 e 波形之间的相互关系。

如果 i_0 为正弦波，由于磁路饱和的影响，磁通 ϕ 为平顶波，感应电势 e 为尖顶波。

如果 i_0 为尖顶波，由于磁路饱和的影响，磁通 ϕ 为正弦波，感应电势 e 亦为正弦波。

为了获得正弦的感应电势，激磁电流必须是尖顶波。激磁电流的波形与绕组连接方式有关。如果三相绕组作y连接且无中线，激磁电流为正弦波；如果三相绕组作D(Δ)连接或 y_n 连接，激磁电流为尖顶波。磁通和感应电势波形取决于绕组连接方式及铁芯结构。Y, y连接组式变压器不仅波形严重畸变，而且要产生危险的过电压，因此三相组式变压器不允许采用Y, y连接。1800kVA以下的三相芯式配电变压器，可以采用Y, y连接。D, y或Y, d连接的变压器，感应电势为正弦波。为了改善电势波形，我们总希望变压器有一侧接成三角形。

思考题及习题

4-1 有一台单相变压器，额定电压为220/100V，作极性试验时，将A与a相连，如图4-18所示。如果A与a为同极性端，电压表的读数为多少？如果A与a为异极性端，电压表的读数又为多少？

4-2 试绘出Y, d11和Y, y0连接组的接线图及相量图。

4-3 用相量图判断图4-19的连接组别。

4-4 将Y, d连接的三相变压器高压侧加额定电压，然后用电压表测低压侧的开口电压。试问三相组式变压器与三相芯式变压器测得的读数是否相同？为什么？

4-5 为什么三相组式变压器不允许采用 Y, Y0 连接, 而三相芯式变压器又可以采用 Y, y0 连接? 为什么总希望三相变压器有一侧接成三角形?

4-6 一台 Y, d 连接的三相变压器, 由于不慎将三角形侧的一相绕组接反, 将产生什么后果?

4-7 为什么 Y, d 或 D, y 连接的三相变压器的感应电势为正弦波?

4-8 有一台 100kVA, 6300/400V, Y, y0 (Y/Y-12) 连接的三相芯式变压器, 其实验数据如表 4-2 所列。试求:

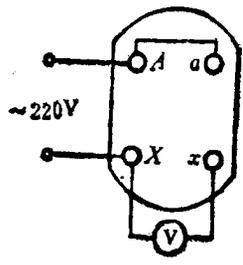


图 4-18 题 4-1 图

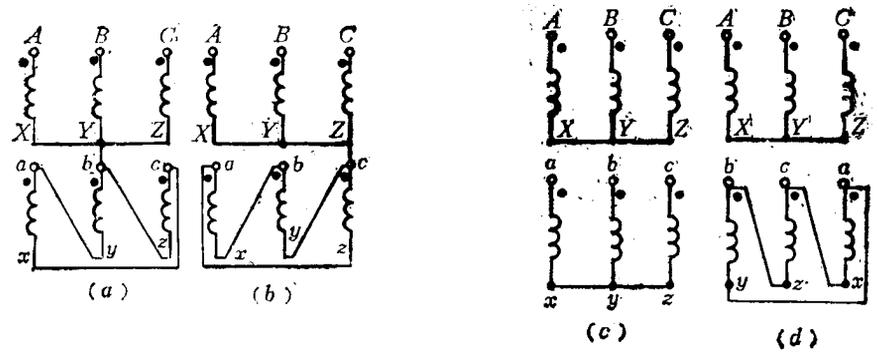


图 4-19 题 4-3 图

表 4-2 变压器空载试验及负载试验数据

试验类型	线电压 (V)	线电流 (A)	总功率 (W)	备注
空载试验	400	10.1	60	自低压边测得
负载试验	284	9.16	2250	自高压边测得

- (1) 变压器各参数归算到高压边的欧姆值和标么值;
- (2) 画出变压器的近似等值电路图;
- (3) 变压器供给额定负载, 且 $\cos\varphi=0.8$ (滞后) 时的效率及最高效率;
- (4) 变压器供给额定负载, 且 $\cos\varphi=0.8$ (滞后) 时的电压调整率及副边电压。

4-9 填空题

- (1) 三相组式变压器每相有 () 磁路, 三相芯式变压器各相磁路彼此 ()。
- (2) 如果激磁电流是正弦波, 由于 () 的影响, 磁通是平顶波, 感应电势为 () 波。
- (3) 变压器三相绕组采用三角形连接的目的是 ()。
- (4) Y, d11 连接组中的 Y 表示 (), d 表示 (), 11 表示 ()。

(5) 变压器常用的连接组别有 ()、()、()、()、()、()、()、()。

(6) y, y0连接三相组式变压器的激磁电流为 () 波, 磁通为 () 波, 感应电势为 () 波。

(7) y, y0连接组三相芯式变压器激磁电流为 () 波, 感应电势为 () 波。

(8) y, d和D, y连接三相变压器感应电势为 () 波。

(9) 为了获得正弦的感应电势, 激磁电流必须是 () 波。

(10) 激磁电流的波形取决于 () 和 () , 感应电势的波形取决于 () 。

第五章 变压器的并联运行

将两台或多台变压器的原边和副边分别接在公共母线上，共同向用户供电，这种运行方式称为变压器的并联运行，如图5-1所示。

现代发电厂和变电所中，常常采用多台变压器并联运行。并联运行有以下优点：

(1) 能提高供电的可靠性。并联运行时，如果某台变压器发生故障或需要检修，可以将其从电网切除，而电网仍能保证重要用户供电。

(2) 能提高运行效率，经济效益高。电网的负载随昼夜或季节的不同而有所变化，变压器并联运行时，可根据负载的变化调整投入并联运行的台数，使变压器尽可能在最高效率下运行，以提高经济效益。

(3) 可以减少总的备用容量，并可随着用电量的增加，分批增加变压器的台数。

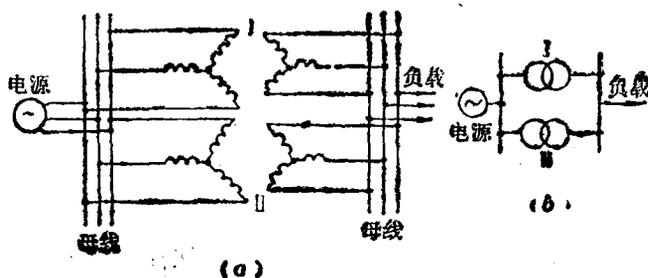


图 5-1 Y, y (Y/Y) 连接三相变压器的并联运行
(a) 三线图；(b) 单线图

第一节 变压器并联运行的条件

变压器并联运行的理想状况是：

(1) 空载时并联的各变压器副绕组之间没有环流。因此，副边无铜损，原边损耗较小。

(2) 负载时，各台变压器能合理地分担负载，即各台变压器分担的负载与它们的额定容量成比例分配，使各台变压器同时达到满载，变压器容量得到充分利用。

(3) 负载后各台变压器副边电流同相位。这样，当总的负载电流一定时，各台变压器分担的电流最小；当各台变压器副边电流一定时，则共同供给的负载电流最大。

要达到变压器并联运行的理想状况，并联运行的变压器必须满足下列条件：

- (1) 各台变压器原、副边额定电压分别相等，即各台变压器的变比相同；
- (2) 各台变压器的连接组别相同；

(3) 各台变压器的阻抗电压 (短路阻抗) 的标么值相等, 阻抗角相同。

第二节 变比不等时的并联运行

为了简单明了, 用图 5-2 所示两台单相变压器来进行分析。

设第一台变压器的变比为 k_I , 第二台变压器的变比为 k_{II} , 且 $k_I < k_{II}$ 。因为两台变压器原绕组接到同一电源上, 原边电压相等。但由于两台变压器变比不同, 因此副边空载电压

不等。第一台变压器副边电势 $\dot{E}_{2I} = -\frac{\dot{U}_1}{k_I}$; 第二台变压器副边电势 $\dot{E}_{2II} = -\frac{\dot{U}_1}{k_{II}}$ 。而

$k_I < k_{II}$, 所以 $E_{2I} > E_{2II}$ 。两台变压器副绕组接在同一母线上, 在两台变压器副绕组所构成的闭合回路内出现电势差

$$\Delta \dot{E}_2 = \dot{E}_{2I} - \dot{E}_{2II}$$

并联投入后, 闭合回路在电势差 $\Delta \dot{E}_2$ 的作用下产生环流, 它等于电势差 $\Delta \dot{E}_2$ 除以两台变压器的短路阻抗, 即

$$\dot{i}_{2h} = \frac{\Delta \dot{E}_2}{z_{kI} + z_{kII}} \quad (5-1)$$

上式中的 z_{kI} 和 z_{kII} , 分别为两台变压器折算到副边时的短路阻抗。由于短路阻抗很小, 微小的 ΔE_2 (变比相差很小) 也会产生很大的环流, 引起附加铜损, 影响变压器的正常运行。一般要求环流不超过额定电流的 10%, 为此变比误差允许不超过 $\pm 0.5\%$ 。

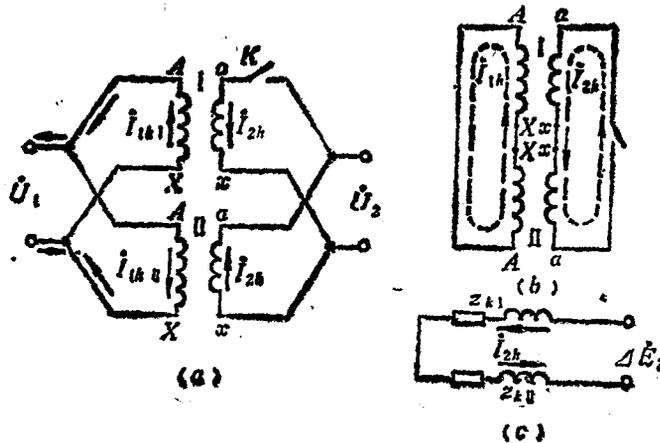


图 5-2 两台变比不等的变压器并联运行时的空载环流

(a) 并联接线示意图; (b) 两变压器原、副边闭合回路; (c) 环流所经阻抗的简化等值电路

【例 6-1】 容量为 100kVA , 电压为 $6000/230\text{V}$ 的单相变压器 I, 与容量为 320kVA 、电压为 $6000/227\text{V}$ 的单相变压器 II 并联运行。 $z_{kI*} = z_{kII*} = 5.5\%$, 且阻抗角相等。求空载时的环流及对额定电流的百分数。

解: 根据题设可知

闭合回路的电势差

$$\Delta E = 230 - 227 = 3(\text{V})$$

短路阻抗的欧姆值

$$z_{kI} = 0.055 \times \frac{230^2}{100 \times 10^3} = 0.03(\Omega)$$

$$z_{kII} = 0.055 \times \frac{227^2}{320 \times 10^3} = 0.01(\Omega)$$

二次侧环流

$$|i_{2h}| = \frac{\Delta E_2}{z_{kI} + z_{kII}} = \frac{3}{0.03 + 0.01} = 75(\text{A})$$

二次侧额定电流

$$I_{2NI} = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{100 \times 10^3}{230} = 435(\text{A})$$

$$I_{2NII} = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{320 \times 10^3}{227} = 1410(\text{A})$$

环流对二次电流的百分数

$$\frac{I_{2h}}{I_{2NI}} = \frac{75}{435} = 17\%$$

$$\frac{I_{2h}}{I_{2NII}} = \frac{75}{1410} = 5\%$$

两台变压器变比差为

$$\left(\frac{6000}{230} - \frac{6000}{227} \right) / \frac{6000}{230} = -1.3\%$$

从上面的计算可知，变比差为1.3%时，环流为额定电流的17%，限制了变压器的输出功率和效率。

第三节 阻抗电压标么值不等时的并联运行

假设并联运行的两台变压器变比相等 组别相同 但阻抗电压不等。

由于两台变压器原、副边分别接在公共母线 U_1 和 U_2 上，故其简化电路如图5-3所示。

一、阻抗电压标么值相等 ($U_{kI} = U_{kII}$) 而阻抗角不等 ($\varphi_{kI} \neq \varphi_{kII}$) 时的并联运行

由图5-3可知，变压器二次侧输出的总电流为

$$I = I_I + I_{II} \quad (5-2)$$

由于阻抗角 $\varphi_{kI} \neq \varphi_{kII}$ ，故 I_I 与 I_{II} 之间必有相位差 $\varphi_i = \varphi_{kI} - \varphi_{kII}$ 。由简化相量图5-4可知，两台变压器供给负载的总电流小于两台变压器电流绝对值之和，即 $|I| < |I_I| + |I_{II}|$ 。又由于两台变压器副边电压相等，且均为 U_2 ，因此 $\sqrt{3}U_2 I_I + \sqrt{3}U_2 I_{II} > \sqrt{3}U_2 I$ 。亦即是说，两台变压器并联运行时，如果 $\varphi_{kI} \neq \varphi_{kII}$ ，输出总容量小于两台变压器容量之和。在一般情况下，两台变压器容量差越大， φ_i 也越大，而输出总容量越小，故并联运行的两台变压器容量比一般不得超过3:1。

二、阻抗角相等 ($\varphi_{kI} = \varphi_{kII}$) 而阻抗电压标么值不等 ($U_{kI} \neq U_{kII}$) 时的并联运行

由图5-3可知，两台并联运行的变压器阻抗压降应相等，即

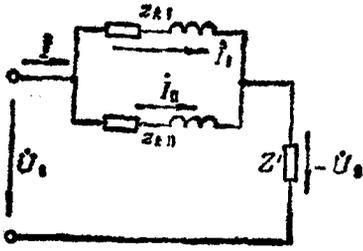


图 5-3 并联运行时的简化等效电路

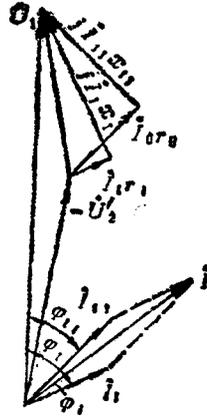


图 5-4 两台并联运行变压器的简化相量图

$$\dot{I}_1 z_{kI} = \dot{I}_2 z_{kII} \quad (5-3)$$

所以

$$I_1 z_{kI} = \frac{I_1}{I_{1N}} \frac{I_{1N} z_{kI}}{U_N} U_N = \beta_1 U_{kI*} U_N$$

$$I_2 z_{kII} = \frac{I_2}{I_{2N}} \frac{I_{2N} z_{kII}}{U_N} U_N = \beta_2 U_{kII*} U_N$$

$$\beta_1 U_{kI*} = \beta_2 U_{kII*} = k$$

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \frac{k}{U_{kI*}} \\ \beta_2 &= \frac{k}{U_{kII*}} \end{aligned} \right\} \quad (5-4)$$

式中 β_1 ——第一台变压器的负载系数， $\beta_1 = \frac{I_1}{I_{1N}} = \frac{S_1}{S_{1N}}$ ；

β_2 ——第二台变压器的负载系数， $\beta_2 = \frac{I_2}{I_{2N}} = \frac{S_2}{S_{2N}}$ 。

两台变压器并联运行时，各台变压器的负载系数与阻抗电压的标么值成反比。如果并联运行的变压器阻抗电压不相等，那么当阻抗电压大的变压器满载时，阻抗电压小的变压器已过载；当阻抗电压小的变压器满载时，阻抗电压大的变压器处于轻载运行。变压器长期过载运行是不允许的，因此两台阻抗电压不相等的变压器并联运行时，就只能是阻抗电压大的变压器轻载运行，容量得不到充分利用，是极不经济的。为了充分利用各台变压器的容量，合理分配负载，要求各台变压器阻抗电压标么值相等。

第四节 联结组别不同时的并联运行

连接组别不同时的并联运行，其后果比变比不相等和阻抗电压标么值不相同更为严重。因为连接组别不同，二次侧线电压相位差是 30° 的倍数，至少是 30° 。因此，在并联变压器的副绕组中会出现电压差 ΔU ，并产生很大的环流。例如 Y, y0 与 Y, d11 两台变

压器并联运行，副边线电压有 30° 的相位差，如图 5-5 所示。副边线电压差为

$$\Delta U_{20} = 2U_{2N} \sin \frac{30^\circ}{2} = 0.518U_{2N}$$

或

$$\Delta U_{2N*} = \frac{\Delta U_{20}}{U_{2N}} = 0.518$$

当 $z_{kI*} = z_{kII*} = 5\%$ 时，在 ΔU_{2N*} 作用下产生的环流为

$$I_{2h*} = \frac{\Delta U_{2N*}}{z_{kI*} + z_{kII*}} = \frac{0.518}{2 \times 0.05} = 5.18$$

即空载环流是额定电流的 5.18 倍。而且它们之间的相位差

越大，环流也越大，可将变压器烧坏，因此连接组别不同的变压器绝对不允许并联运行。

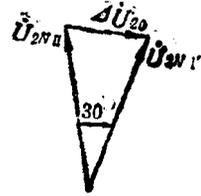


图 5-5 Y, y0(Y/Y-12) 与 Y, d11(Y/\Delta-11) 变压器并联运行时的电压差

第五节 小结

(1) 为了提高供电可靠性和经济效益，近代发电厂及变电所都采用多台变压器并联运行。

(2) 变压器并联运行的理想状况是：空载运行时副绕组之间无环流；负载运行时各台变压器能合理地分担负载；各台变压器副边电流一定时，共同供给的负载电流最大。

(3) 为了达到理想的并联运行状况，并联运行的变压器必须满足下列条件：变比相等；组别相同；阻抗电压标么值相等。变比相等是为了保证空载运行时不产生环流；阻抗电压标么值相同是为了保证负载运行时，各台变压器能合理地分配负载，使设备容量能得到充分利用；短路阻抗角相等是为了供给负载的电流最大。组别不相同并联运行后果最严重，环流很大，会烧坏变压器，因此组别不同的变压器绝对不允许并联运行。

思考题及习题

5-1 什么叫并联运行？为什么在发电厂和变电站中，常常采用多台变压器并联运行？

5-2 什么是理想并联运行？满足什么条件才能达到理想并联运行？为什么组别不同的变压器绝对不允许并联运行？

5-3 为什么并联运行的两台变压器，其容量比不得超过 3:1？

5-4 在图 5-6 中，已知两台变压器的组别，如果从 110kV 母线到 400V 的母线再接一台变压器（如图中虚线所示），问该变压器应是哪种连接组别？

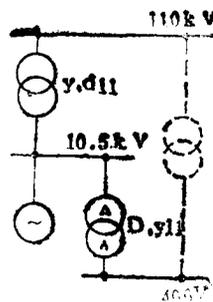


图 5-6 题 5-4 图

5-5 并联运行的变压器，如果阻抗电压标么值或变比不等时会产生什么后果？如果并联运行的变压器容量不相等，对容量大的变压器，阻抗电压和变比是大些好还是小些好？为什么？

5-6 填空题

(1) 变压器并联运行时的理想状况是：空载时，并联运行的各台变压器副绕组之间无 () ，负载运行时，各台变压器能合理地 () 。

(2) 如果并联运行的两台变压器阻抗电压标么值不相等，那么当阻抗电压大的变压器满载时，阻抗电压小的变压器处于 () 运行。反之，当阻抗电压小的变压器处于满载运行时，阻抗电压大的变压器处于 () 运行，其设备容量 () 充分利用。

(3) 组别不同的变压器并联运行时，副边线电压相位 () ，因而会产生很大的 () ，因此组别不同的变压器 () 并联运行。

第六章 其它变压器

变压器的种类很多，在电力系统中，除前几章讨论的普通双绕组电力变压器外，还常采用三绕组变压器、自耦变压器和一些具有特殊用途的变压器。本章主要阐述常用的三绕组变压器、自耦变压器、调压变压器和电焊变压器的结构特点、工作原理及适用场合。

第一节 三绕组变压器

在变压器每一个铁芯柱上，有高压、中压、低压三个绕组的电力变压器，称为三绕组变压器。需要几种电压等级输电的发电厂、变电站，常采用三绕组变压器。例如某发电厂的发电机电压为 10kV ，如果要把发电厂的电能同时送到 35kV 和 110kV 的输电系统中去，可以用两台双绕组变压器，如图6-1所示，也可以用一台三绕组变压器，如图6-2所示。当通过变压器功率最小那一侧能达到变压器容量的 15% 以上时，用一台三绕组变压器代替两台双绕组变压器，不仅在经济上是合理的，而且使发电厂、变电站的设备简单，维护方便，占地少，因此三绕组变压器在电力系统中得到了广泛使用。

一、绕组排列和额定容量

三绕组变压器有一个原绕组和两个副绕组。对应于三个绕组有高压、中压和低压三种额定电压，如果低压是原绕组，中压和高压是副绕组，称为升压变压器。如果高压是原绕组，低压和中压是副绕组，则称为降压变压器。

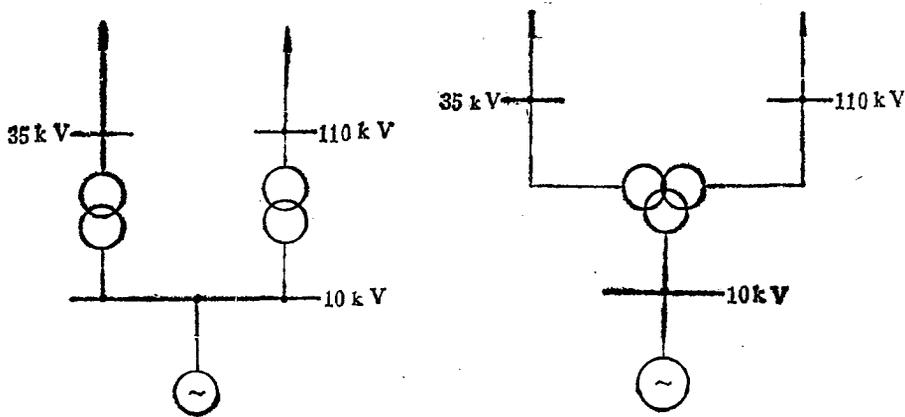


图 6-1 采用两台双绕组变压器供电 图 6-2 采用一台三绕组变压器供电

根据国家标准规定，三相三绕组变压器的标准接线组，有 $YN, yn0, d11$ ($Y_0/Y_0/\Delta-12-11$)和 $YN, yn0, y0$ ($Y_0/Y_0/Y-12-12$)两种。

三绕组变压器的铁芯一般为芯式结构，高、中、低三个绕组同心地套在一个铁芯柱上

为绝缘方便起见，高压绕组放在最外层，低、中压绕组则根据相互间传递功率较多的两个绕组靠近些的原则安排。对于降压变压器，中压绕组放在中间，低压绕组靠近铁芯柱，如图 6-3 (b) 所示。对于升压变压器，为了使漏磁场分布均匀，漏电抗分配合理，以保证较好的电压调整率和提高运行性能，把中压绕组放在靠近铁芯柱，低压绕组放在中间，如图 6-3 (a) 所示。

在三绕组变压器中，根据供电的实际需要，三个绕组的容量可以设计得不一样，这时三绕组变压器的额定容量是指三个绕组中容量最大的那一个绕组的容量。如果将额定容量作为 100%，按国家标准规定，三个绕组的容量配合有下列三种情况，如表 6-1 所示。

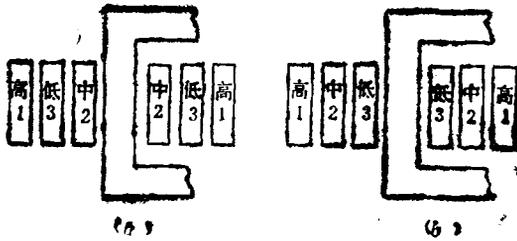


图 6-3 三绕组变压器绕组布置图
(a) 升压变压器 ; (b) 降压变压器

表 6-1 三绕组容量配合表

高压绕组	中压绕组	低压绕组
100	100	100
100	50	100
100	100	50

二、变比、磁势平衡及等值电路

1. 变比

三绕组变压器有三个变比

$$\left. \begin{aligned} k_{12} &= \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} \\ k_{13} &= \frac{N_1}{N_3} = \frac{U_{1N}}{U_{3N}} \\ k_{23} &= \frac{N_2}{N_3} = \frac{U_{2N}}{U_{3N}} \end{aligned} \right\} \quad (6-1)$$

式中， N_1 、 N_2 、 N_3 和 U_{1N} 、 U_{2N} 、 U_{3N} 分别为 1、2、3 绕组的匝数和额定相电压。

2. 磁势平衡方程式

图 6-4 为三绕组变压器负载运行时的原理图。主磁通是指同时与三个绕组相交链的磁通，由三个绕组的磁势 $I_1 N_1$ 、 $I_2 N_2$ 、 $I_3 N_3$ 共同产生。三个绕组的合成磁势等于空载磁势，即

$$I_1 N_1 + I_2 N_2 + I_3 N_3 = I_0 N_1 \quad (6-2)$$

式中， I_1 、 I_2 、 I_3 分别为 1、2、3 绕组的电流。

将 I_2 和 I_3 分别折算到绕组 1，则

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{I}_2}{k_{12}} = \dot{I}_2 \frac{N_2}{N_1}$$

$$\dot{I}'_3 = \frac{\dot{I}_3}{k_{13}} = \dot{I}_3 \frac{N_3}{N_1}$$

于是式(6-2)可写成

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 + \dot{I}'_3 = \dot{I}_0 \quad (6-3)$$

忽略激磁电流, 则

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 + \dot{I}'_3 = 0 \quad (9-4)$$

3. 等值电路

在三绕组变压器中, 三个绕组在磁路方面互相耦合, 漏磁场的分布比较复杂。同时与三个绕组交链的磁通, 称为主磁通。凡不同时与三个绕组交链的磁通, 称为漏磁通, 其中仅与一个绕组交链的漏磁通, 称为自漏磁通, 仅与两个绕组交链的磁通, 称为互漏磁通。三绕组变压器的等值电抗 x_1 、 x'_2 、 x'_3 分别表示绕组 1、2、3 的等值电抗, 它与双绕组变压器漏抗含义不一样。双绕组变压器的漏抗只有自漏抗, 而三绕组变压器的等值电抗包含自漏抗和互漏抗。与各绕组等值阻抗相应的阻抗为 z_1 、 z'_2 、 z'_3 , 称为等值阻抗。

按照双绕组变压器的分析方法, 电压平衡方程式为

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{I}_1 z_1 - \dot{I}'_2 z'_2 - \dot{U}'_2 \\ \dot{U}_1 = \dot{I}_1 z_1 - \dot{I}'_3 z'_3 - \dot{U}'_3 \end{cases} \quad (6-5)$$

根据式(6-4)和式(6-5), 可作出如图6-5所示的三绕组变压器的简化等值电路。

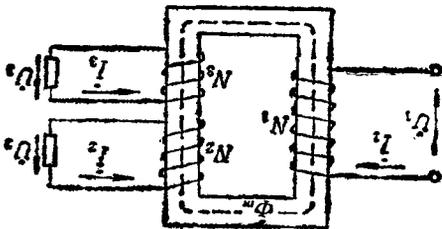


图 6-4 三绕组变压器原理图

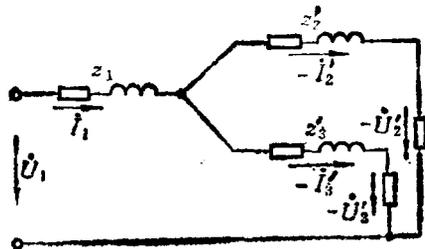


图 6-5 三绕组变压器的简化等值电路

第二节 自 耦 变 压 器

一次和二次绕组共用一部分线圈的变压器, 称为自耦变压器。自耦变压器有单相的, 也有三相的。有降压自耦变压器, 也有升压自耦变压器。

一、结构特点及工作原理

1. 结构特点

自耦变压器的结构示意图, 如图6-6(a)所示。它的结构特点是, 在每一个铁芯柱上只有一个绕组 AX , 其匝数为 N_1 , 而且这个绕组中的一部分(图中的 ax 绕组, 其匝数为 N_2)既属于原边, 也属于副边, 称为公共绕组。因此, 原、副绕组之间既有磁的联系,

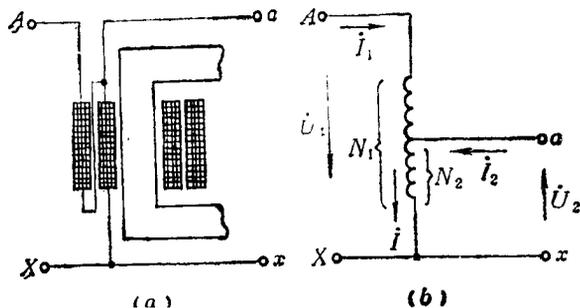


图 6-6 自耦变压器

(a) 结构示意图; (b) 原理接线图

也有电的直接联系。

2. 工作原理

自耦变压器的工作原理与双绕组变压器相同，都是利用电磁感应原理制成。当绕组 AX 两端加上交变电压 U_1 时，铁芯中便产生交变磁通，并分别在原、副绕组上产生感应电势 \dot{E}_1 和 \dot{E}_2 ，其值为

$$E_1 = 4.44f N_1 \Phi_m$$

$$E_2 = 4.44f N_2 \Phi_m$$

若忽略漏抗压降，则

$$U_1 = E_1 = 4.44f N_1 \Phi_m$$

$$U_2 = E_2 = 4.44f N_2 \Phi_m$$

自耦变压器的变比为

$$k_a = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (6-6)$$

只要 $N_1 \neq N_2$ ，就可以实现变压。适当选择 N_2 ，便可获得所需的输出电压 U_2 。

如果将电源 U_1 接在匝数多的 AX 绕组上，就成为降压自耦变压器；如果将电源 U_1 接在匝数少的 ax 绕组上，就成为升压自耦变压器。

二、基本电磁关系

1. 电流关系

自耦变压器负载运行时，由于电源电压保持额定值，主磁通为常数，因此与双绕组变压器一样，负载运行时，原、副绕组的合成磁势等于空载磁势，即

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1$$

若忽略空载电流，则

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = 0$$

或

$$\dot{I}_1 = -\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 = -\frac{1}{k_a} \dot{I}_2 \quad (6-7)$$

式(6-7)说明副边电流 I_2 是原边电流 I_1 的 k_a 倍，原、副边电流 I_1 与 I_2 的相位相差 180° 。

公共绕组 (ax 绕组) 中的电流为

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \left(-\frac{1}{k_a} \dot{I}_2\right) + \dot{I}_2 = \left(1 - \frac{1}{k_a}\right) \dot{I}_2 \quad (6-8)$$

由于 I_1 与 I_2 相位相差 180° , 因此公共绕组中的电流 I 是原、副边电流的算术差, 即

$$I = I_2 - I_1 = \left(1 - \frac{1}{k_a}\right) I_2 \quad (6-9)$$

或

$$I_2 = I_1 + I \quad (6-10)$$

式(6-10)说明, 自耦变压器的输出电流 I_2 由两部分组成, 其中 I_1 是通过电路直接从原边流入副边的, I 是通过电磁感应从公共绕组传递到副边的。显然, $I < I_2$ 。如果自耦变压器与双绕组变压器输出电流相同, 则自耦变压器公共绕组的导线截面比双绕组变压器副绕组导线截面小, 用铜省。而且 k_a 越接近 1, 公共绕组电流 I 越小, 经济效益越高。

2. 容量关系

自耦变压器有两个容量, 一个是变压器容量, 一个是绕组容量。所谓变压器容量就是变压器的输入容量, 也等于输出容量, 其值等于输入电压与输入电流的乘积, 或输出电压与输出电流的乘积。当输入(或输出)电流为额定值时, 变压器容量等于额定容量 $S_N = U_{1N} I_{1N} = U_{2N} I_{2N}$ 。所谓绕组容量, 就是该绕组的电压与电流的乘积, 又称为电磁容量或设计容量。对于双绕组变压器, 绕组容量与变压器容量相等, 但自耦变压器的绕组容量与变压器容量却不相等。现以单相自耦变压器进行分析。

自耦变压器的容量为

$$S_N = U_{1N} I_{1N} = U_{2N} I_{2N}$$

串联绕组 Aa 段的容量为

$$S_{Aa} = U_{Aa} I_{Aa} = \frac{N_1 - N_2}{N_1} U_{1N} I_{1N} = \left(1 - \frac{1}{k_a}\right) S_N \quad (6-11)$$

公共绕组 ax 段的容量为

$$S_{ax} = U_{ax} I = U_{2N} I_2 \left(1 - \frac{1}{k_a}\right) = \left(1 - \frac{1}{k_a}\right) S_N \quad (6-12)$$

式(6-11)和式(6-12)说明, 变压器的绕组容量(设计容量), 只有额定容量(输出容量)的 $\left(1 - \frac{1}{k_a}\right)$ 倍, 也就是绕组容量小于额定容量, 因此用料(铜线及硅钢片)省。

输出容量为

$$S_2 = U_2 I_2 = U_2 (I + I_1) = U_2 I + U_2 I_1 \quad (6-13)$$

式(6-13)说明自耦变压器的输出功率由两部分组成, 其中 $U_2 I$ 称为电磁功率, 是通过电磁感应作用从原边传送到副边的功率, 这部分功率与普通双绕组变压器相同。 $U_2 I_1$ 称为传导功率, 是通过电路的直接联系, 从原边传递到副边的功率, 它不需要增加绕组容量。因此, 自耦变压器的绕组容量小于额定容量。双绕组变压器没有传导容量, 全部输出功率都是通过电磁感应作用传递的, 因而绕组容量与变压器容量相等。

综上所述, 自耦变压器由于原、副边有电的直接联系, 其副边能从原边直接吸取功

率，因此它的设计容量小于额定容量。额定容量由输出功率决定，设计容量由电磁功率决定。变压器的用料和尺寸取决于设计容量。

三、优缺点及应用场所

1. 主要优点

(1) 由于自耦变压器设计容量是额定容量的 $(1 - \frac{1}{k_a})$ 倍，与相同额定容量的双绕组变压器相比，自耦变压器用料省，体积小，造价低。

(2) 由于用料省，铜损和铁损减小，效率高，巨型自耦变压器效率高达99.7%。

(3) 由于用料省，则体积小、重量轻、便于运输和安装。

由于设计容量为变压器容量的 $(1 - \frac{1}{k_a})$ 倍， k_a 越接近1， $(1 - \frac{1}{k_a})$ 值越小，其优点越突出。若 k_a 大，则优点不显著。因此，电力系统中的自耦变压器的变比一般小于2。

2. 主要缺点

(1) 自耦变压器短路阻抗标么值比普通变压器小，短路电流大。

(2) 由于自耦变压器原、副边有电的直接联系，当提高侧过电压时，会引起低压侧过电压，因此继电保护及过压保护较复杂，高、低压侧都要装避雷器，且变压器中性点必须可靠接地。

3. 应用场所

(1) 用于变比小于2的电力系统。由于自耦变压器具有上述优缺点，致使在高电压、大容量而电压相近的电力系统中，应用愈来愈广泛。

(2) 自耦变压器常用于实验室作为可变电源。

(3) 油浸自耦变压器常用于异步电动机的降压起动。

四、自耦调压器

把自耦变压器的副绕组作成可调的，就成了自耦调压器。自耦调压器的绕组缠绕在环

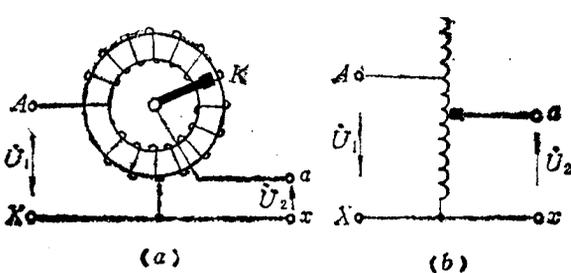


图 6-7 自耦调压器

(a) 结构示意图; (b) 电路图

超过几百伏。这种调压器常用于实验室。

形铁芯上，副边分接头经滑动触头 K 引出，如图6-7所示。通过手柄改变滑动触头 K 的位置，就改变了副绕组匝数，达到调节输出电压 U_2 的目的。当 U_1 一定时， U_2 的大小可从零调到稍大于 U_1 的数值。例如， $U_1 = 220V$ ， $U_2 = 250V$ 。

由于调节过程中，滑动触头是沿着绕组裸露的表面与绕组接触因而会产生火花故容量一般不大，只有几十千伏安，电压也不

第三节 仪用互感器

电力系统中测量高电压、大电流时使用的特殊变压器，称为仪用互感器。测量高电压

用的仪用互感器，称为电压互感器。测量大电流用的仪用互感器，称为电流互感器。为了使仪表规格统一化，电压互感器副边额定电压都是100V，电流互感器副边的额定电流都是5A。亦即是接在电压互感器副边的电压表量程是100V，接在电流互感器副边的电流的量程是5A。这样，使用互感器后，等于把这些低量程电表的量程扩大了，同时使工作人员与高电压回路隔离，以保证安全。

一、电压互感器

电压互感器的主要结构和工作原理，与普通双绕组变压器基本相同。一次绕组匝数多，并联在被测高电压线路上，二次绕组匝数少（一般只有几匝），接在高阻抗的电压表或功率表的电压线圈上。因此，电压互感器是一台接近于空载运行的单相降压变压器，如图6-8所示。

电压互感器一、二次侧电压之比，称为电压变比。如果忽略原、副绕组漏抗压降，则额定电压之比为

$$k_u = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$U_1 = k_u U_2 \quad (6-14)$$

即被测电压 U_1 等于互感器二次侧电压 U_2 乘以变比 k_u 。一般测量 U_2 的电压表是按 $k_u U_2$ 来刻度的，因此表上的读数就是被测的一次电压 U_1 。

电压互感器的精度由变比误差和相位误差来衡量。实际运行的电压互感器，由于原、副边有阻抗压降和空载电流，因此实际电压变比不等于额定电压变比，致使电压互感器产生变比误差和相位误差 δ_u ，如图6-9所示。所谓变比误差，是指一次侧电压 U_1 与二次侧电压折算值 U_2' 之间的算术差。相位误差是指 U_1 与 U_2 之间的相位差 δ_u 。为了提高电压互感器的精确度，必须减小激磁电流和原、副边的漏阻抗。因此，应尽量减小磁路中的气隙，铁芯采用导磁率较高的硅钢片制成，并使铁芯不饱和（磁密约为0.6~0.8T）。采用以上措施后，可以提高精度，但误差还是存在的。按变比误差相对值的百分数，电压互感器的精度可分为0.2、0.5、1.0、3共四级。

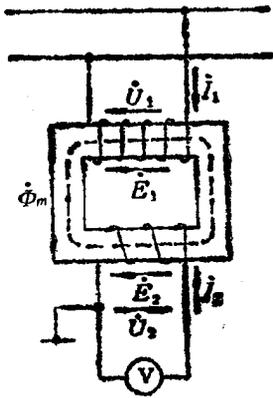


图 6-8 电压互感器

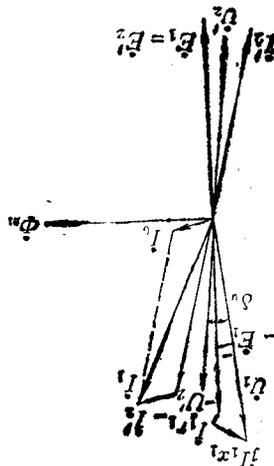


图 6-9 电压互感器相量图

使用电压互感器应注意的事项如下：

(1) 副边不允许短路。电压互感器正常运行时接近空载，如果副边短路，则电流变得很大，绕组因过热而烧坏。

(2) 为保证操作人员安全，以防二次侧出现过电压，铁芯和二次绕组一端必须可靠接地。

(3) 电压互感器容量很小，二次侧并接的电压线圈不宜过多，否则超过额定容量，电流 I_2 和 I_1 都增大，原、副边阻抗压降增大。从相量图可知，误差加大，降低了电压互感器的精确度等级。

二、电流互感器

电流互感器的一次绕组匝数 N_1 很少，串接于被测电路中。二次绕组匝数 N_2 较多，它与测量仪表或继电器的电流线圈短接。电流线圈的阻抗很小，故电流互感器相当于一台处于短路运行状态的单相变压器，如图6-10所示。

电流互感器正常运行时的磁势方程式，与普通变压器一样，即

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1$$

或

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0$$

电流互感器一次电流与二次电流之比，称为电流变比。如果忽略激磁电流 I_0 ，则电流变比为

$$k_i = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

$$I_1 = k_i I_2$$

即被测电流 I_1 等于二次侧电流 I_2 乘以电流变比 k_i 。一般测量电流 I_2 的电流表是按 $k_i I_2$ 来刻度的，因此电流表的读数就是被测的一次电流 I_1 。

电流互感器与电压互感器一样，存在着变比误差和相位误差。变比误差是指 I'_2 与 I_1 的算术差。相位误差是指 I_1 与 I'_2 之间的相角差 δ_i ，如图6-11所示。

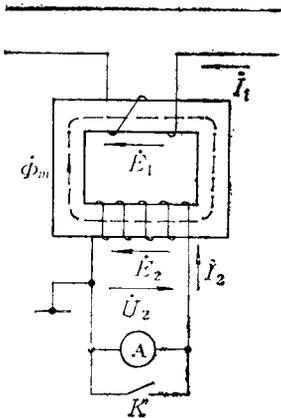


图 6-10 电流互感器

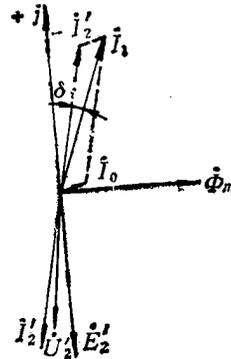


图 6-11 电流互感器的相量图

根据误差的大小，电流互感器分为五级：0.2、0.5、1.0、3.0、10。0.5 级的电流互

感器表示在额定电流时，误差最大不超过 $\pm 0.5\%$ 。

使用电流互感器应注意的事项如下：

(1) 二次侧绝对不允许开路。因为 $I_1 N_1 \approx - I_2 N_2$ ，如果副边开路， $I_2 = 0$ ，失去了去磁作用，这时线路电流 I_1 就成了激磁电流，比正常激磁电流 I_0 大几百倍，使铁芯磁密及损耗急剧上升，导致铁芯过热。同时，很大的磁通将在二次绕组中产生过电压，危及人身安全或击穿绕组绝缘。

(2) 铁芯及二次绕组一端必须可靠接地，以防高压侵入，危及人身安全。

(3) 互感器二次侧所接的仪表阻抗，不应超过互感器额定负载的欧姆值，否则二次电流减小，铁芯磁通和空载电流增大，从而增大误差，降低互感器的精确度。

第四节 电 焊 变 压 器

交流电弧焊机，称为电焊变压器，在生产上应用广泛。电焊变压器是一种特殊的具有陡降外特性的降压变压器，一般由 220/380V 降低到电弧点火电压，约为 60~90V。电焊变压器工作时，常从空载到短路或从短路到空载，负载急剧地变化着。为了维持点燃着的电弧稳定而连续地工作，保证电焊质量，对电焊变压器有以下几点要求：

(1) 空载时，具有足够大的点弧电压，大约需 60~90V，以便容易引燃电弧。为了安全操作，空载电压一般不得超过 90V。

(2) 负载（焊接）时，要具有迅速下降的外特性，以保证焊接时有稳定的输出电流，维持点燃后的电弧稳定而连续工作。这时输出电压一般不超过 30V。

(3) 短路（焊条碰在工件上）时，短路电流不应过大，一般不超过额定值的两倍。

(4) 焊接电流应是可调的，以适应不同焊接件及不同规格焊接时的需要。

为了满足上述要求，电焊变压器的结构必须具有以下特点：

(1) 具有较大的漏磁通，以得到较大漏抗和急剧下降的外特性；

(2) 漏抗是可调的。

增大和改变漏抗的方法很多，常用的有串联可变电抗法和磁分路法。

带电抗器的电焊变压器，如图 6-12 所示。电焊变压器的二次侧与可变电抗器串联，电抗器中的气隙可用螺杆调节。如图 6-13 所示，当气隙增大时，电抗器的电抗减小，焊接电流增大，如曲线 1；反之焊接电流减小，如曲线 2，从而使电焊变压器获得可调的陡降外特性。

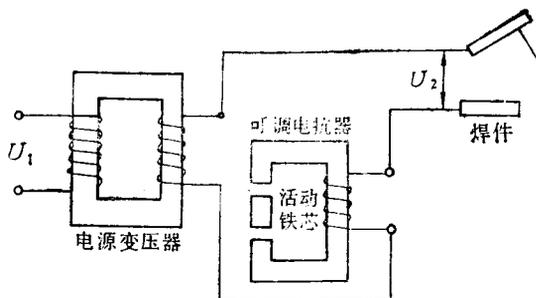


图 6-12 串联电抗器的电焊变压器原理

在生产实践中，常把变压器和电抗器设计在一个铁芯上，构成具有磁分路结构的电焊变压器，如图 6-14 所示。所谓磁分路电焊变压器，就是在变压器一次绕组与二次绕组的两铁芯之间，有一个分路磁阻（动铁芯），它通过螺杆可以来回调节。当磁分路铁芯移出

时，就等于没有磁分路，一、二次绕组漏抗减小，电焊变压器工作电流增大，外特性比较平坦；当磁分路铁芯移入时，一、二次绕组漏磁通经过磁分路而闭合，漏磁通和漏抗增大，漏抗压降增大，负载电压迅速下降，焊接电流减小，外特性变得陡峭。显然，通过移动磁分路铁芯位置，就可以调节漏抗大小，获得不同程度陡降的外特性，以满足各种厚度焊件及不同规格焊件的需要。在二次绕组中还备有分接头，以便调节空载起弧电压。

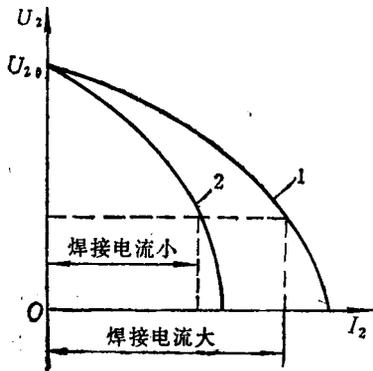


图 6-13 可调节的电焊变压器外特性

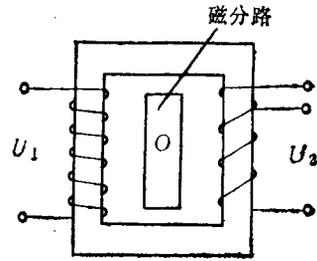


图 6-14 磁分路电焊变压器

第五节 小结

(1) 三绕组变压器的工作原理与双绕组变压器基本相同，都是利用电磁感应原理制成，借助于高压、中压、低压侧三个匝数不等的绕组来实现变压。

(2) 三绕组变压器每个绕组容量不一定相等，其额定容量是指容量最大的一个绕组的容量。

(3) 三绕组变压器主磁通是指同时与三个绕组交链的磁通。漏磁通包括与本绕组交链的自漏磁通和同时与两个绕组相交链的互漏磁通。所以三绕组变压器等值电路中的各侧电抗是等值电抗，由自漏抗和互漏抗组成。

(4) 一台三绕组变压器能代替两台双绕组变压器，因此体积小、占地少、经济、维护方便，在需要几种电压等级输电的发电厂及变电站得到了广泛应用。

(5) 自耦变压器的特点是原、副绕组不仅有磁的联系，而且有电的直接联系，功率不仅能通过电磁感应由原边传递到副边，而且能通过电路直接从原边传递到副边。所以，自耦变压器的设计容量小于额定容量。它们之间的关系是

$$S_{Aa} = S_{a\beta} = \left(1 - \frac{1}{k_a} \right) S_N$$

因而用料省、损耗小、效率高、体积小、重量轻、便于运输。其缺点是短路电流大，过电压保护较复杂。变比 k_a 越接近 1，优点越突出，因此在 $k_a < 2$ 的高电压、大容量电力系统中得到了广泛应用。

(6) 自耦调压器是通过改变滑动触头的位置来改变绕组的匝数，以达到调压的目的。

(7) 用来测量高电压的互感器称为电压互感器。用来测量大电流的互感器称为电流互感器。采用互感器不仅能扩大仪表的量程，而且能使工作人员与高电压电路隔离，以保证人身安全。

(8) 电压互感器原边与被测电路并联，副边与高阻抗电压线圈连接，因此电压互感器实质上是一台接近空载运行的单相降压变压器。电流互感器原边与被测电路串联，副边经阻抗很小的电流线圈而短路，因此电流互感器相当于一台处于短路运行的单相升压变压器。

(9) 电压互感器绝对不允许副边短路，电流互感器绝对不允许副边开路。为了安全，副边都必须可靠接地。

(10) 电焊变压器为了保证点燃着的电弧能稳定而连续地工作，应具有急剧下降的外特性。为此，必须增大电焊变压器的漏抗，且漏抗是可调的。增大和调节漏抗的方法很多，常用的有串联可变电抗和磁分路法。

思考题及习题

6-1 电力系统在什么情况下采用三绕组变压器？在什么情况下采用自耦变压器？为什么？

6-2 三绕组变压器的额定容量是怎样确定的？三个绕组的额定容量有哪几种配合方式？

6-3 自耦变压器有什么特点？与普通变压器相比，有哪些优缺点？常用在什么场合？

6-4 为什么自耦变压器的设计容量小于额定容量？

6-5 电流互感器与电压互感器的接线有什么不同？为什么？

6-6 电流互感器与电压互感器的功能是什么？误差是怎样产生的？有几种标准等级？这些标准等级的含义是什么？

6-7 使用电流互感器和电压互感器应注意些什么？为什么电流互感器的副边绝对不允许开路运行？而电压互感器的副边绝对不允许短路运行？

6-8 对电焊变压器有哪些要求？为什么？电焊变压器是怎样满足这些要求的？

第七章 变压器的过渡过程

当变压器所带负载或外施电源电压的大小变化不大时，可以看成是稳态运行。分析时，可认为磁通、电压和电流的幅值是不变的。但是，当变压器突然甩负荷、空载合闸到电网或副边突然短路时，就会破坏正常稳定运行状态，使变压器从一种稳定运行状态过渡到另一种稳定运行状态，这个变化过程，称为过渡过程。虽然这个过渡过程时间很短，但对变压器的影响却很大。例如，变压器突然短路，会出现很大的短路电流和强大的机械力，使变压器绕组和结构遭到破坏。因此，研究变压器过渡过程产生的原因及变化规律，对变压器的设计、制造和运行保护，都是很重要的。

第一节 变压器空载合闸时的瞬变过程

变压器空载投入电网时，由于铁芯饱和及剩磁的影响，空载合闸电流很大，可能引起继电保护误动作或变压器不能顺利投入电网。下面分析空载合闸时电流增大的原因。

一、变压器空载合闸时的暂态磁通

图7-1所示是变压器空载合闸时的接线图，二次侧开路，一次侧接在正弦电压 u_1 上。接通电源后，一次侧电压方程式为

$$u_1 = i_0 r_1 + N_1 \frac{d\phi}{dt} = U_{1m} \sin(\omega t + \alpha) \quad (7-1)$$

式中 U_{1m} ——电源电压的幅值；

α ——合闸时电源电压的初相角；

ϕ ——交链一次绕组的总磁通；

r_1 ——一次绕组的电阻。

由于铁芯饱和的影响， i_0 与 ϕ 的关系是非线性的，因此式(7-1)是一个非线性微分方程。由于电阻压降 $i_0 r_1$ 很小，在分析过渡过程的起始阶段，可忽略电阻不计。但是，电阻 r_1 的存在是瞬变分量衰减的主要原因，因此在后一阶段的衰减过程中，必须考虑 r_1 的作

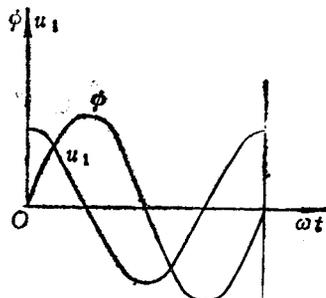
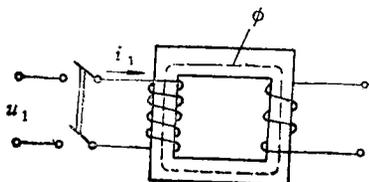


图 7-1 变压器空载投入电网 图 7-2 $t=0, \alpha=90^\circ$ 或 $u_1=U_{1m}$ 时磁通变化曲线

用。为了求解方便，假定铁芯不饱和且无剩磁，并略去电阻 r_1 ，则式(7-1)可简化为

$$N_1 \frac{d\phi}{dt} = U_{1m} \sin(\omega t + \alpha) \quad (7-2)$$

由式(7-2)可得

$$\begin{aligned} d\phi &= \frac{U_{1m}}{N_1} \sin(\omega t + \alpha) dt \\ \phi &= -\frac{U_{1m}}{\omega N_1} \cos(\omega t + \alpha) + C \\ &= -\Phi_m \cos(\omega t + \alpha) + C \end{aligned} \quad (7-3)$$

式中 C ——积分常数，由起始条件决定。

根据空载合闸时铁芯无剩磁的假设，得到 $t=0$ 时， $\phi=0$ ，将这个起始条件代入式(7-3)，得

$$\begin{aligned} 0 &= -\Phi_m \cos \alpha + C \\ C &= \Phi_m \cos \alpha \end{aligned} \quad (7-4)$$

将 $C=\Phi_m \cos \alpha$ 代入式(7-3)，得

$$\phi = -\Phi_m [\cos(\omega t + \alpha) - \cos \alpha] \quad (7-5)$$

上式表明，在变压器空载合闸的过渡过程中，磁通变化的大小，与合闸时电压的初相角有关。下面讨论两种极限情况。

1. 当 $t=0$ ， $\alpha=90^\circ$ 时合闸

由式(7-5)得

$$\phi = -\Phi_m \cos(\omega t + 90^\circ) = \Phi_m \sin \omega t \quad (7-6)$$

其变化曲线如图7-2所示。

式(7-6)说明，当 $\alpha=90^\circ$ 时合闸，磁通立即进入稳定状态，无过渡过程，是合闸的最好时机。

2. 当 $t=0$ ， $\alpha=0^\circ$ 时合闸

由式(7-5)得

$$\phi = \Phi_m (1 - \cos \omega t) = \Phi_m - \Phi_m \cos \omega t \quad (7-7)$$

磁通变化曲线如图7-3所示。

由图7-3可见，在合闸后半周期($\omega t = \pi$)时，总磁通达到最大值，其值是稳态最大值的两倍，即

$$\phi_{max} = 2\Phi_m \quad (7-8)$$

实际上，铁芯都具有剩磁，一般剩磁为稳态运行主磁通幅值 ϕ_m 的20%~30%，因此，空载合闸时磁通的最大值可达稳态运行时主磁通幅值的2.2~2.3倍。

二、空载合闸时的激磁涌流

由前面的分析可知，空载合闸过程主要表现为磁通的过渡过程，瞬变磁通的大小主要取决于合闸时电源电压的初相角(外加电压的大小)。当 $t=0$ ， $\alpha=0^\circ$ 时，合闸情况最严重，主磁通幅值是稳态主磁通幅值的2.2~2.3倍，铁芯呈现高度饱和，合闸激磁电流剧

增，一般可达正常激磁电流的100倍左右，是额定电流的5~6倍，此时的激磁电流称为激磁涌流。

实际上，由于变压器原绕组的电阻 r_1 要产生铜损，激磁涌流会随时间而衰减，如图7-4所示。衰减的快慢由时间常数 $T=L_1/r_1$ 决定，其中 r_1 是原绕组的电阻， L_1 是原绕组的自感。小容量变压器只需经过几个周波就可以达到稳定值，巨型变压器由于 L_1 较大，衰减较慢，但一般也不超过20s。

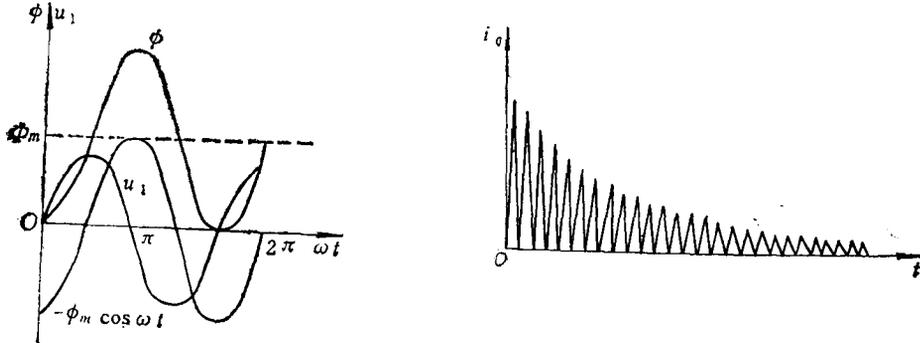


图 7-3 $t=0, \alpha=0^\circ (u_1=0)$ 时的磁通变化曲线图 7-4 激磁涌流波形图

由于空载合闸激磁涌流维持的时间短，对变压器本身没有直接危害，但可能引起变压器原边过电流保护误动作，因此变压器继电保护装置必须躲开合闸时的激磁涌流。在巨型变压器中，为了减小冲击电流（激磁涌流）和加速冲击电流的衰减，合闸时常常在原绕组中串入一个附加电阻，合闸后再将该电阻切除。

第二节 变压器副边突然短路时的瞬变过程

由于变压器一次侧接的是电源额定电压，当二次侧发生突然短路时，其短路电流是很大的。此时，激磁电流比短路电流小得多，可略去不计，变压器等值电路就是一个简单的 $R、L$ 串联电路，它由短路电阻 $r_k=r_1+r_2'$ 和短路电抗 $x_k=x_1+x_2'$ 串联组成，如图7-5所示。因而可用电工基础中 $r、L$ 串联电路过渡过程的分析方法，来分析变压器副边突然短路时的过渡过程。

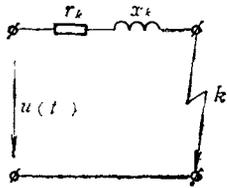


图 7-5 变压器副边突然短路时的简化等值电路

一、突然短路时的短路电流

根据图7-5所示的简化等值电路，一次侧的电压方程式为

$$u_1 = U_m \sin(\omega t + \alpha) = i_k r_k + L \frac{di_k}{dt} \quad (7-9)$$

这是一个常系数一阶微分方程，它的解由稳态分量和暂态分量两部分组成，即

$$i_k = i_k' + i_k'' \quad (7-10)$$

式中 i_k' ——短路电流的稳态分量；

i_k ——短路电流的暂态分量。

变压器发生短路时，一般都已带上负载，但因负载电流比突然短路电流小得多，可略去不计，认为短路是在空载情况下发生的，即令 $t=0$ 时， $i_k=0$ ，根据这个起始条件，解式(7-9)得

$$i_k = i_k' + i_k'' = \frac{U_{1m}}{\sqrt{r_k^2 + x_k^2}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - \frac{U_{1m}}{\sqrt{r_k^2 + x_k^2}} \sin(\alpha - \varphi_k) e^{-\frac{r_k}{L_k} t} \quad (7-11)$$

式中 φ_k ——短路阻抗角， $\varphi_k = \text{tg}^{-1} \frac{x_k}{r_k}$ 。

对于大型变压器， $x_k \gg r_k$ ，因此 $\varphi_k \approx 90^\circ$ ，于是

$$i_k = \sqrt{2} I_k [(\cos \alpha) e^{-\frac{r_k}{L_k} t} - \cos(\omega t + \alpha)] \quad (7-12)$$

式中 I_k ——稳态短路电流有效值， $I_k = \frac{U_1}{\sqrt{r_k^2 + x_k^2}}$ 。

式(7-12)表明，突然短路时短路电流的大小，与电压 u_1 的初相角有关。下面讨论两种极限情况。

(1) 当 $t=0$ ， $\alpha=90^\circ$ 时短路。由式(7-12)得

$$i_k = \sqrt{2} I_k \sin \omega t \quad (7-13)$$

式(7-13)表明，当 $\alpha=90^\circ$ 时发生突然短路，短路电流立即达到稳定值，无过渡过程。

(2) 当 $t=0$ ， $\alpha=0$ 时短路。由式(7-12)得

$$i_k = \sqrt{2} I_k [e^{-\frac{r_k}{L_k} t} - \cos \omega t] \quad (7-14)$$

从式(7-14)可看出，最严重的情况是 $\alpha=0^\circ$ 时发生突然短路，此时电压 u_1 与各电流的波形，如图7-6所示。短路电流瞬时值在 $t = \frac{\pi}{\omega}$ 时，达到最大值 $i_{k \max}$ ，即

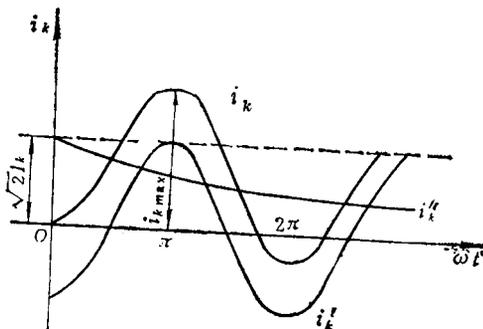


图 7-6 $\alpha=0^\circ$ 时突然短路的电流变化曲线

$$\begin{aligned}
 i_{\max} &= \sqrt{2} \bar{I}_k \left[e^{-\frac{r_k}{L_k} \cdot \frac{\tau}{\omega}} - \cos \pi \right] \\
 &= \sqrt{2} \bar{I}_k \left[1 + e^{-\frac{r_k}{L_k} \cdot \frac{\tau}{\omega}} \right] = k_y \sqrt{2} \bar{I}_k \quad (7-15)
 \end{aligned}$$

其中 $k_y = 1 + e^{-\frac{r_k}{L_k} \cdot \frac{\tau}{\omega}}$

在小容量变压器里, $k_y = 1.2 \sim 1.3$; 在大容量变压器里, $k_y = 1.5 \sim 1.8$ 。

将式(7-15)用标么值表示, 则

$$i_{k_{\max}} = \frac{i_{\max}}{\sqrt{2} I_{1N}} = k_y \frac{I_k}{I_{1N}} = k_y \frac{U_{1N}}{I_{1N} z_{k*}} = k_y \frac{1}{z_{k*}} \quad (7-16)$$

上式表明, 短路电流幅值的标么值 $i_{k_{\max}}$, 与短路阻抗 z_{k*} 成反比, 短路阻抗越小, 短路电流越大。如果 $z_{k*} = 0.06$, 则

$$i_{k_{\max}} = (1.5 \sim 1.8) \times \frac{1}{0.06} = 25 \sim 30 \quad (7-17)$$

式(7-17)表明, 变压器副边突然短路时, 短路电流可达额定电流的 25~30 倍。

二、突然短路电流对变压器的影响

突然短路电流很大, 不仅会使绕组发热, 更严重的是要产生强大的电磁力, 可能损坏绕组。

1. 电磁力的影响

变压器突然短路时, 短路电流可达额定电流的 25~30 倍。由于电磁力与短路电流的平方成正比, 因此突然短路时, 变压器受到的电磁力是正常运行时的几百倍。如果在设计、制造变压器时, 不注意加强受力结构, 这样大的电磁力往往会使变压器绕组扯断或拧弯, 以致损坏绕组绝缘。由于圆形绕组能承受较大的径向力而不变形, 因此一般电力变压器的绕组总是作成圆筒形的。连续式绕组比圆筒式绕组承担轴向力的能力强, 因此大容量的变压器, 都采用连续式绕组, 并用提高漏阻抗标么值 z_{k*} 来降低短路电流的数值。

2. 发热影响

由于铜损与电流平方成正比, 因此变压器突然短路时的铜损是正常运行时的几百倍, 使绕组温度急剧上升。但由于变压器都装有可靠的速断保护, 一般在温度上升到危险值之前, 继电保护动作, 将变压器电源断开, 所以因突然短路过热而烧坏变压器的情况较少。

第 三 节 小 结

(1) 变压器空载合闸过程, 主要表现为磁通的过渡过程。瞬变磁通的大小, 取决于合闸时电源电压的初相角。当 $t = 0$, $\alpha = 90^\circ$ 时合闸, 磁通立即进入稳定值, 无过渡过程。当 $t = 0$, $\alpha = 0^\circ$ 时合闸, 情况最严重, 主磁通幅值是稳态主磁通幅值的 2.2~2.3 倍, 铁芯深度饱和, 激磁电流剧增, 是正常激磁电流的 100 倍左右, 此激磁电流称为激磁涌流。

(2) 激磁涌流虽然比较大, 但由于维持的时间短, 对变压器本身没有直接危害, 但

可能引起变压器过流保护误动作，因此变压器保护装置必须躲开合闸时的激磁涌流。

(3) 变压器副边突然短路时的简化等值电路是一个 R 、 L 串联的简单电路，可用电工基础中 R 、 L 串联电路过渡过程的分析方法，分析变压器突然短路时的过渡过程。

(4) 变压器副边突然短路时的过渡过程，主要表现为电流的过渡过程。突然短路电流的大小，取决于短路时电源电压的初相角。当 $t=0$ ， $\alpha=90^\circ$ 时发生突然短路，短路电流立即达到稳定值，无过渡过程。当 $t=0$ ， $\alpha=0^\circ$ 时发生突然短路，短路电流的幅值是额定电流的 20~30 倍。

(5) 变压器突然短路时，铜损和电磁力都是正常运行时的几百倍，可能使变压器绕组遭到损坏。在设计和制造变压器时，必须加强受力结构，使变压器绕组能承受住强大电磁力的冲击。

(6) 激磁涌流和突然短路电流都是瞬变电流。激磁涌流是由于空载合闸时，铁芯高度饱和产生的，突然短路电流是由于负载阻抗突然减至零引起的。前者对变压器本身没有危害，后者对变压器绕组有破坏性的作用。

思考题及习题

7-1 当电网电压为正弦波时，在什么瞬间合闸，激磁电流最大？是正常激磁电流的多少倍？

7-2 激磁涌流对变压器有危害吗？为什么？

7-3 变压器在什么瞬间突然短路，短路电流最大？是额定电流的多少倍？对变压器有何危害？

7-4 为什么电力变压器的绕组都采用圆形绕组？

7-5 有一台三相变压器， $S_N=60000\text{kVA}$ ， $U_{1N}/U_{2N}=220/11\text{kV}$ ， $Y, d11$ (Y/Δ -11) 连接组， $r_{k*}=0.08$ ， $x_{k*}=0.072$ ，试求：

(1) 高压边的稳态短路电流值和标么值；

(2) 在最不利情况下发生突然短路时，短路电流最大值。

第二篇 交流电机的绕组、电势和磁势

第八章 交流电机的绕组和电势

第一节 交流绕组的构成原则和分类

绕组是电机实现能量转换的重要部件，是电机的核心。

一、交流绕组构成的原则

(1) 在导体数一定的情况下，尽可能获得较大的基波电势和基波磁势；

(2) 电势和磁势波形力求接近正弦波；

(3) 三相绕组对称，即每相绕组线圈数相等，且 A 、 B 、 C 三相绕组在空间互差 120° 电角度，以获得对称的三相电势；

(4) 端部连线应尽可能短，以节约用铜，并减少绕组铜损；

(5) 绕组有足够的绝缘强度和机械强度，散热条件好；

(6) 绕制、安装、检修方便。

二、绕组的分类

交流绕组种类很多，下面介绍几种常见的分类方法：

按槽内层数分类： $\left\{ \begin{array}{l} \text{单层绕组} \\ \text{双层绕组} \end{array} \right.$

按相数分类： $\left\{ \begin{array}{l} \text{单相绕组} \\ \text{三相绕组} \end{array} \right.$

按线圈形状分类： $\left\{ \begin{array}{l} \text{迭绕组} \\ \text{波绕组} \\ \text{同心式绕组} \\ \text{链式绕组} \\ \text{交叉式绕组} \end{array} \right.$

按每极每相槽数分类： $\left\{ \begin{array}{l} \text{整数槽绕组} \\ \text{分数槽绕组} \end{array} \right.$

交流电机绕组虽然种类很多，但现代主要采用三相双层绕组。汽轮发电机和大、中型异步电动机的定子绕组，一般都采用双层迭绕组；水轮发电机的定子绕组和绕线式异步电动机的转子绕组，常采用双层波绕组；单层绕组仅用于小型异步电动机中。因此本章只讨论双层绕组。

三、交流绕组的一般知识

1. 线圈

线圈是组成绕组的基本元件。线圈有多匝的，也有单匝的。一组串联的线匝，通常是同轴的，并具有公共绝缘。将绕制成型的线圈嵌入铁芯内，线圈沿铁芯轴向的两个直线部分，

称为线圈的有效边；在槽外用于连接两个有效边的部分，称为线圈端部。画绕组图时，为了简单起见，通常都以单匝表示一个线圈，如图 8-1 所示。

2. 极距 τ

沿定子铁芯内圆每个磁极所对应的圆周距离，称为极距。极距一般用槽数表示，即

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \quad (8-1)$$

或
$$\tau = \frac{Z}{2p} \text{ (槽/极)}$$
 (8-2)

式中 D ——定子铁芯内径；

p ——磁极对数；

Z ——定子总槽数。

3. 线圈节距 y

一个线圈的两个有效边之间的跨距，称为线圈节距，节距一般用槽数来表示。 $y = \tau$ 称为整节距， $y < \tau$ 称为短节距， $y > \tau$ 称为长节距。整距线圈感应电势最大，短距和长距线圈能改善电势和磁势波形，但长距线圈端部连线长，很少使用，为了节约端部连线用铜量，大、中型电机一般都采用短距线圈。

4. 电角度

电机圆周的几何角度是 360° ，称为机械角度。根据电磁原理，若磁场在电枢圆周按正弦规律分布，一对磁极的电角度为 360° ，当电机有 p 对磁极时，则电枢圆周应为 $p \times 360^\circ$ 电角度，即

$$\text{电角度} = p \times 360^\circ \quad (8-3)$$

5. 槽间电角度 α

槽间电角度是指定子铁芯相邻两槽对应点之间的电角度。若电机磁极对数为 p ，定子总槽数为 Z ，则槽间电角度为

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Z} \quad (8-4)$$

6. 每极每相槽数 q

每相绕组在每个磁极下连续占有的槽数，称为每极每相槽数。当电机的磁极对数为 p ，相数为 m 时，则每极每相槽数 q 为

$$q = \frac{Z}{2pm} \quad (8-5)$$

7. 单层绕组和双层绕组

单层绕组是沿槽深方向只有一个线圈边的绕组。

双层绕组是沿槽深方向有两个线圈边的绕组。

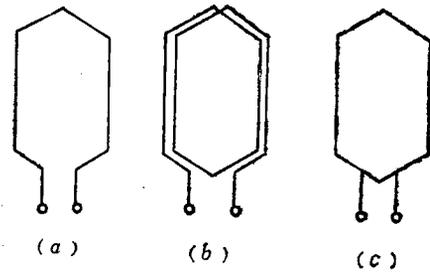


图 8-1 线圈
(a) 单匝线圈；(b) 多匝线圈；
(c) 多匝线圈简化图

8. 相带

每极每相槽数 q 连续占有的区域，称为相带。相带一般用电角度表示。电机每一个磁极的电角度为 180° ，若被三相绕组均分，则每个极下每相槽数连续占有的电角度为 60° ，称为 60° 相带。交流电机一般采用 60° 相带，也可采用 30° 和 120° 相带。

9. 极相组

将每极每相的 q 个线圈顺着电流的方向串联起来，构成的线圈组，称为极相组。若电机磁极对数为 p ，相数为 m ，则电机有 $2pm$ 个极相组。

第二节 槽电势星形图

当把电枢上各槽内导体按正弦规律变化的电势分别用相量表示时，这些相量构成一个辐射星形图，称为槽电势星形图。

三相同步发电机定子槽内导体沿圆周分布情况，如图 8-2 所示。假设磁通密度沿气隙圆周按正弦规律分布，转子沿顺时针方向旋转，定子槽内感应电势将随时间按正弦规律变化，而且每个槽内导体感应电势有效值相等。但由于各槽在空间彼此相差 α 电角度，因此各槽导体的感应电势在时间上也彼此相差 α 电角度。若将定子铁芯上均匀分布的 Z 个槽按顺序编号，每个槽导体感应电势用同样号码的相量表示，便可作出槽电势星形图。下面用一个实例来进行说明。

图 8-3 是一台 4 极 24 槽双层绕组电机槽电势星形图。根据题设，槽间电角度 $\alpha = 30^\circ$ 。1 号槽导体电势用相量 1 表示，2 号槽导体电势用相量 2 表示，则在图示转子的转向下，相量 2 比相量 1 滞后 30° 。同理，相量 3 比相量 2 滞后 30° ，依次类推，就可画出图 8-3 所示的槽电势星形图。由图可见，13、14、15……等相量分别与 1、2、3……等相量重合，这是由于它们在磁极下分别处于对应的位置，感应电势因同相位而重合。如果电机有 p 对磁极，则有 p 个重迭的槽电势星形图。槽电势星形图有助于正确连接绕组的线圈及计算绕组电势的大小。

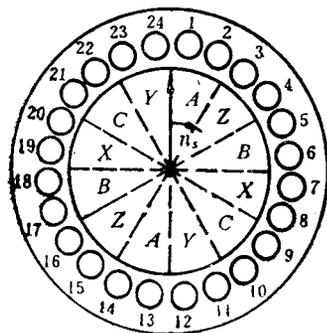


图 8-2 同步发电机定子槽内导体分布情况

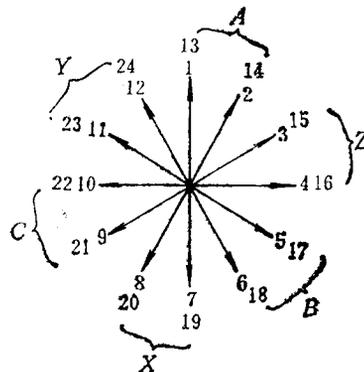


图 8-3 槽电势星形图

第三节 三相双层迭绕组

双层绕组分为迭绕组和波绕两组种型式，图 8-4 (a) 是迭绕组，(b) 是波绕组。迭

绕组通常为多极的分布绕组，其线圈的两个线端相互靠近，相串联的两个线圈处在磁场中相近的位置上，由于串联线圈是后一个迭在前一个上面，故称为迭绕组。波绕组是分布绕组的一种，其线圈的两个线端位置相距约两个极距，相串联的两个线圈分别处在相隔约两个或更多的极距下，由于相串联的两个线圈外形似波浪形，因此称为波绕组。

现代电机一般都采用双层绕组，只有小容量异步电机的定子绕组才采用单层绕组，这是由它们各自所具有的优缺点所决定的。

单层绕组主要优点是：

- (1) 绕组元件少，嵌线方便；
- (2) 槽内不用加层间绝缘，槽内空间利用率比较好。这一点对小容量电机十分重要，因为小容量电机槽内空间小。

单层绕组的主要缺点是：

- (1) 不能作短距绕组，对磁势和电势波形的改善不如双层绕组；
- (2) 端部交错，弯曲变形较大，不易整形。

与单层绕组相比，双层绕组具有如下优点：

- (1) 可以选择最有利的节距，并同时采用分布绕组来改善电势和磁势的波形；
- (2) 所有线圈具有同样尺寸，便于生产机械化；
- (3) 可以组成较多的并联支路数；
- (4) 端部形状排列整齐，有利于散热和增强机械强度。

因此，单层绕组只适用于小容量异步电动机的定子绕组，大、中型同步电机和异步电机的定子绕组都采用双层绕组。

所谓双层绕组，就是每一个槽内有上、下两个线圈边。线圈的一个边嵌在某个槽的下层，另一个边则嵌在相隔 y_1 槽（线圈节距所跨的槽）的上层，如图8-5所示。

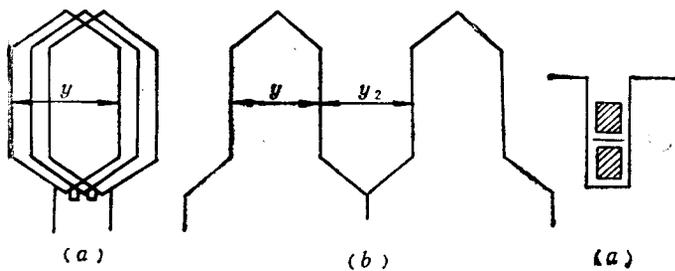


图 8-4 线圈的型式
(a) 迭绕组；(b) 波绕组

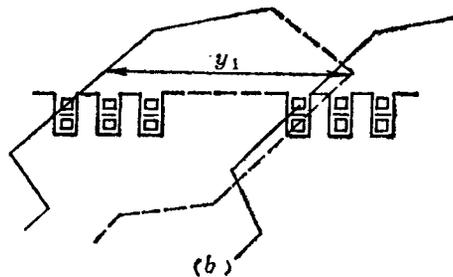


图 8-5 双层绕组图
(a) 槽内导体分布；(b) 线圈的嵌放

一、三相双层迭绕组展开图

将电机电枢从某齿的中心沿轴向剖开，并展成平面的绕组连接示意图，称为绕组的展开图。在双层绕组的展开图中，上层边用实线表示，下层边用虚线表示，并标注槽号。槽号也表示该槽上层边的线圈号，因此线圈号与该线圈上层边所在的槽号一致。

为了改善电势波形和节约端部连线的用铜量，双层绕组一般都采用短矩绕组。现以 4

极、36槽、 $y_1 = \frac{7}{9}\tau$ 的电机绕组为例，绘制并联支路数 $a=1$ 的三相双层短距迭绕展开图。作图步骤如下：

(1) 根据已知条件进行下列计算：

极距

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{36}{4} = 9 \text{ (槽)}$$

槽间电角度

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{2 \times 360^\circ}{36} = 20^\circ$$

每极每相槽数

$$q = \frac{Z}{3 \times 2p} = \frac{36}{12} = 3 \text{ (槽)}$$

线圈节距

$$y_1 = \frac{7}{9}\tau = \frac{7}{9} \times 9 = 7 \text{ (槽)}$$

(2) 画槽、编号、分相带。将整个电枢表面划分为 $2p$ 个磁极，依次标上 N 、 S 、 N 、 S 极性。再将每极内的电枢表面划分为三个相带，整个电枢表面共12个相带，相带按 A 、 Z 、 B 、 X 、 C 、 Y 顺序标注，如图8-6所示。

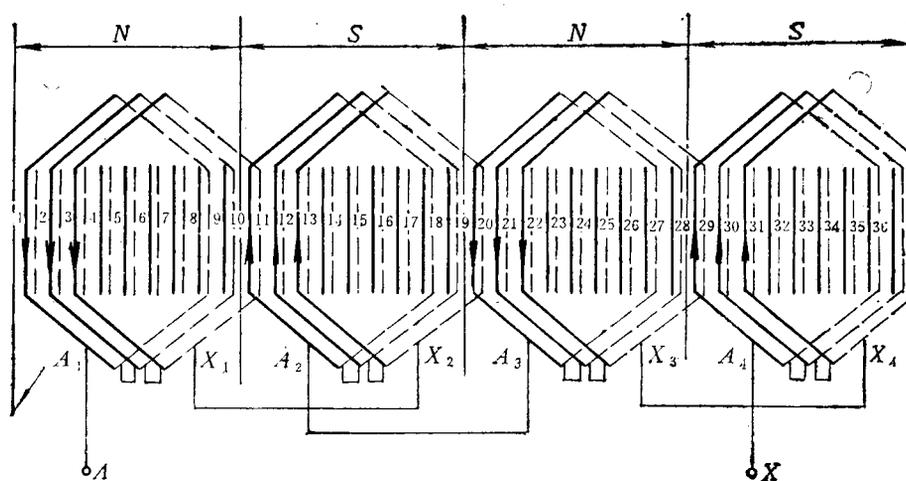


图 8-6 三相双层迭绕短距 A 相绕组展开图

(3) 根据线圈节距 $y_1 = \frac{7}{9}\tau = 7$ (槽)，将相应的线圈边逐个连接成线圈。

例如，A相1号槽的上层边与8号槽(7+1=8)的下层边连接起来，构成1号线圈；2号槽的上层边与9号槽的下层边连接起来，构成2号线圈。余类推，一共可得到36个线圈。

(4) 将每极下同一相的 q 个线圈，顺着电流的方向串联起来，即1号线圈的尾与2号线圈的头相连，2号线圈的尾与3号线圈的头相连，便构成极相组。每个极下有3个极相组，4个极共有12个极相组。

(5) 根据所要求的并联支路数, 将每个极下同一相的极相组顺着电流的方向串联或并联起来, 便构成相绕组。由于 N 极与 S 极下的极相组相电势 (电流) 方向相反, 为了使整个绕组的电势成相加关系, 相邻极相组应反相串联, 即采用“尾连尾”、“头连头”的连接规律。这时, A 相所包括的 12 个线圈的串联次序如图 8-7 所示。

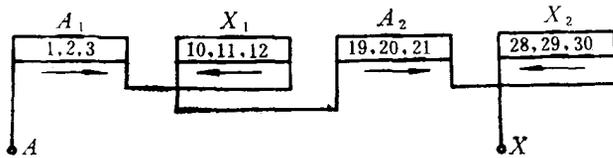


图 8-7 三相双层迭绕组的组间连接图

(6) 用同样的方法将 B 相和 C 相线圈连接起来, 构成 B 相和 C 相绕组。 A 、 B 、 C 三相绕组的头应互差 120° 电角度。

二、端部接线图

展开图虽然最详细最完整地表示了定子绕组的连接方法, 但是绘制起来比较麻烦, 看图也不方便, 所以在实际工程中, 常常采用图 8-8 所示的端部接线图。

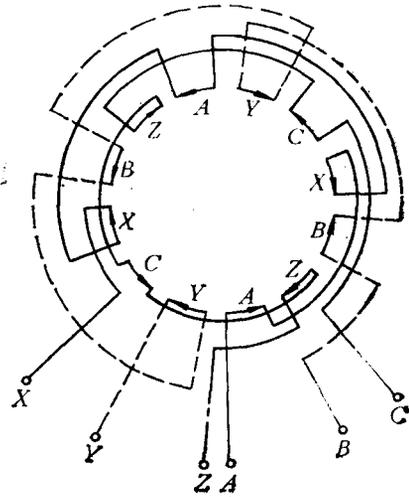


图 8-8 三相双层迭绕端部接线图

假设各相电流的正方向从首端流入, 末端流出, 则相邻极相组的电流方向是相反的, 接线时只要顺着电流的方向把各极相组串联起来就构成了三相绕组。具体绘图步骤如下:

(1) 将定子圆周等分成 $2pm$ 个圆弧, 每一个圆弧代表一个极相组。圆弧的两个端头分别表示一个极相组的头和尾。圆弧中的箭头表示电流的方向, 而相邻极相组电流方向相反, 因此相邻两个圆弧箭头方向相反。

(2) 按照 A 、 Z 、 B 、 X 、 C 、 Y 的顺序, 将所有圆弧依次分相, 每一个圆弧代表 60° 电角度。

(3) 根据 A 、 B 、 C 三相绕组的头在空间互差 120° 的原则, 确定三相绕组的首端。

(4) 顺着箭头的指向分别把各相绕组所对应的圆弧连接起来, 就构成了三相绕组。

(5) 将 A 、 B 、 C 三相绕组接成 Y 或 Δ

双层迭绕组的优点是: 短距时能节省端部用铜和便于得到较多的并联支路数。缺点是: 极相组之间连线较长, 在多级电机中这些连接线用铜量很大。因此, 中、小型同步电动机、异步电动机和大型汽轮发电机的定子绕组都采用双层迭绕组。

第四节 三相双层波绕组

波绕组的特点是: 几个相连接的线圈成波浪形前进, 如图 8-9 所示。绘制波绕组展开图的步骤与绘制迭绕组展开图的步骤基本相同, 但线圈之间的连接顺序是不相同的。

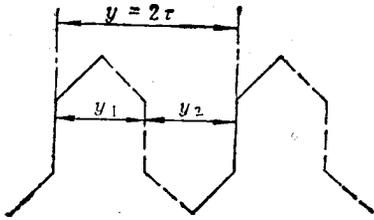


图 8-9 波绕组

一、波绕组的节距

波绕组有第一节距、第二节距、合成节距之分。

(1) 第一节距 y_1 。一个线圈两个有效边之间的距离，称为第一节距，节距常用槽数来表示。

(2) 第二节距 y_2 。第一个线圈的下层边与其在电路上紧连的第二个线圈的上层边之间的距离，称为第二节距。

(3) 合成节距 y 。两个在电路上相邻线圈上层边之间的距离，称为合成节距。

显然，合成节距 $y = y_1 + y_2$ 。它说明每串联一个线圈时，绕组沿绕行方向前进多少槽。由于波绕组是依次把同极性下的线圈串联起来，每次前进约一对磁极，故对整数槽波绕组来说，合成节距 y 通常选为一对极距，即

$$y = \frac{Z}{p} = 2mq \quad (槽) \quad 8-6$$

二、双层波绕组展开图

在绘制双层波绕组展开图时，画槽、编号、分相带与双层迭绕组完全一样，但绕行时要特别注意的是，对于每极每相槽数 q 等于整数的绕组，当合成节距选为一对极距，即 $y = \frac{Z}{p} = 2mq$ 时，在绕组沿圆周串联 q 个线圈后绕完一周，绕组将回到原来出发的槽而自行闭合，无法继续绕下去。为了继续前绕，每绕完一周，就需要人为地前移或后退一个槽。这样连续绕行 q 周，就把所有 N 极下属于同一相的线圈依次串联成一个线圈组 ($A-A'$ 组)。同理，把所有 S 极下属于同一相的线圈串联成另一线圈组 ($X-X'$ 组)。最后根据需要把 $A-A'$ 和 $X-X'$ 两组线圈串联或并联起来，构成一相绕组。

现以 $m = 3$ ， $2p = 4$ ， $Z = 36$ (槽)， $y_1 = 9$ (槽) 的双层波绕组为例说明其具体绕法。

合成节距

$$y = \frac{Z}{p} = \frac{36}{2} = 18 \quad (槽)$$

第二节距

$$y_2 = y - y_1 = 18 - 9 = 9 \quad (槽)$$

槽间电角度

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{2 \times 360^\circ}{36} = 20^\circ$$

每极每相槽数

$$q = \frac{Z}{2pm} = \frac{36}{2 \times 2 \times 3} = 3 \quad (槽)$$

为了清晰起见，只绘 A 相绕组展开图。假设 A 相绕组从槽 3 的上层边开始 (实线) 根据 $y_1 = 9$ 应与槽 12 的下层边相连，构成一个线圈。然后按 $y = 18$ ，再将它与槽 21 ($3 + 18$)

$=21$ 的上层边相连。又根据 $y_1=9$ 继续与槽 30 的下层边相连。这样连续地连接两个线圈后，恰好在定子内圆绕行一周。如果按 $y_2=9$ ，槽 30 的下层边应接到槽 3 的上层边，绕组自行闭合而无法继续绕下去。为了能继续前绕，在绕第二周时，要人为地缩小一个槽，取 $y_2-1=8$ ，即槽 30 的下层边与槽 2 的上层边相连，从槽 2 上层边开始第二周的连接，连接顺序是 2 上 \rightarrow 11 下 \rightarrow 20 上 \rightarrow 29 下。又将 y_2 缩小一槽，从 1 槽上层边开始第三周的连接，其连接顺序是 1 上 \rightarrow 10 下 \rightarrow 19 上 \rightarrow 28 下。就这样，串连完了同极性（假设是 N 极）下 A 相的六个线圈，构成线圈组 $A-A_1$ ， A 是头， A_1 是尾。

同理，将所有 S 极下属于同一相的六个线圈串联起来，构成另一线圈组 $X-X_1$ ，然后用组间连线把 $A-A_1$ 和 $X-X_1$ 串联或并联起来，构成相绕组。 A 相绕组的连接次序如图 8-10 所示。由于 $A-A_1$ 线圈组与 $X-X_1$ 线圈组电流方向相反，因此，这两组线圈必须反向连接，即“尾接尾。”

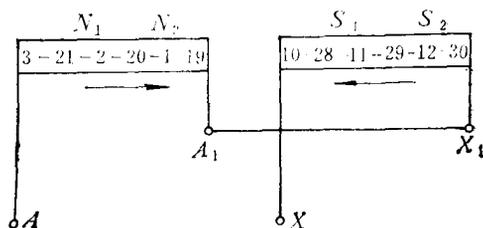


图 8-10 双层波绕组的组间连接图

三相双层波绕组 A 相展开图，如图 8-11 所示。同理，可绘出 B 相和 C 相绕组的展开图。值得注意的是 A 、 B 、 C 三相绕组的头，在空间必须相隔 120° 电角度。与迭绕组相比较，波绕组的优点是：

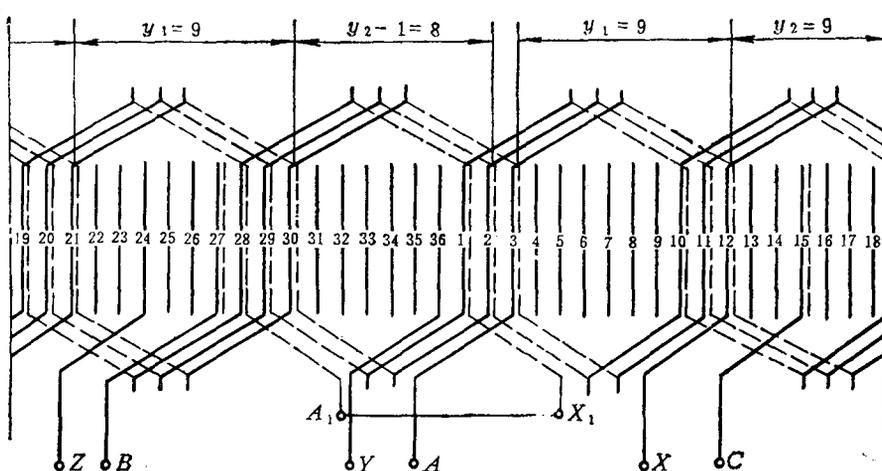


图 8-11 三相双层波绕组 A 相展开图

- (1) 可以减少线圈组之间的连接线，节约用铜量；
- (2) 结构比较坚固，适用于旋转的转子绕组。故常用于水轮发电机定子绕组和绕线

式异步电动机的转子绕组。

波绕组的线圈一般是用铜条做成的单匝线圈。

第五节 分数槽绕组简介

每极每相的平均槽数不是整数的绕组，称为分数槽绕组。在整数槽绕组即每极每相槽数 q 为整数的绕组中，当采用短距和分布绕组时能改善电势波形。在大容量低转速水轮发电机中，由于极数很多，极距很小，极距内不可能安排很多槽，每极每相槽数 q 不可能大，因为如果槽数增多，会使绝缘占的空间增加，降低铜、铁有效材料的利用率，使电机的体积、重量和成本增大。而当槽数不增加时，若 q 为较小的整数，不仅不能利用分布效应来削弱谐波电势，而且齿谐波电势要增大，使电势波形畸变。这时，如果采用分数槽绕组，就能改善电势波形。所以多极的水轮发电机和感应电动机定子绕组，常采用分数槽绕组。

事实上，每相在每极下所占槽数只能是整数，不能是分数。因此，分数槽绕组实际上是每相在每极下所占的槽数不相等，有的极下多一个槽，有的极下少一个槽，而 q 是一个平均值。例如 $Z=30$ ， $2p=4$ ，每极每相槽数

$$q = \frac{Z}{2pm} = \frac{30}{2 \times 2 \times 3} = 2 \frac{1}{2} = \frac{5}{2}$$

$q = \frac{5}{2}$ 是指在 2 个磁极下每相占 5 个槽，如果 N 极下占 3 个槽，S 极下占 2 个槽，平均每极每相占 $\frac{5}{2}$ 个槽。

分数槽绕组也分成单层绕组和双层绕组、迭绕组和波绕组。

分数槽绕组的连接方法比较复杂，这里就不再进行了。

第六节 交流绕组的电势

本节以同步发电机为例，讨论在正弦分布磁场下绕组电势的波形、频率及其大小，其结论也适用于异步电机的交流绕组。推导电势的大小时，首先讨论一个线圈电势，然后再导出极相组电势、相电势和线电势。

同步发电机原理示意图，如图 8-12 (a) 所示。当转子磁场沿逆时针方向旋转时，定子导体因被磁场切割而产生感应电势。下面讨论感应电势的频率、波形及大小。

一、感应电势的频率 f

如图 8-12 (a) 所示，定子某槽中有一根导体 A ，若转子以恒定转速 n 沿逆时针方向旋转，当转子转过一对磁极时，导体 A 中的感应电势就变化一个周期。转子转过两对磁极时，导体 A 中的感应电势变化两个周期。若转子以每分钟 n 转的速度旋转，磁极对数为 p ，则每分钟电势变化 np 个周期。感应电势每秒变化的周期数叫频率，因此频率为

$$f = \frac{pn}{60} \quad (8-7)$$

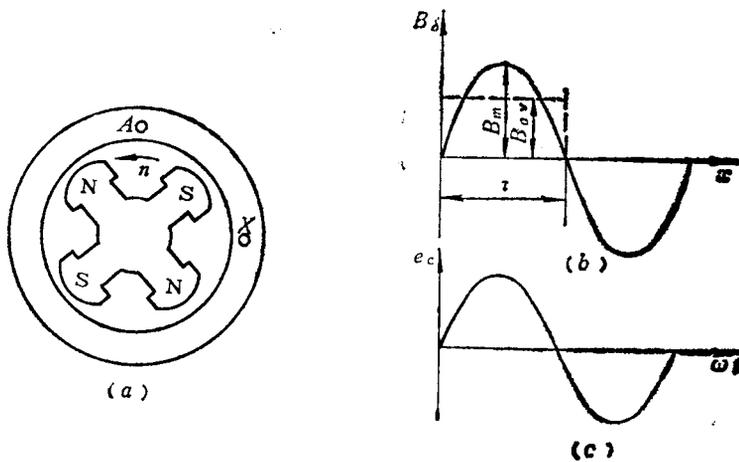


图 8-12 导体电势与气隙磁密波形
(a) 四极同步发电机； (b) 主磁场气隙磁密分布； (c) 导体电势波形

二、感应电势波形

根据电磁感应定律，导体中感应电势的瞬时值 e 为

$$e = B_{\delta} L v \quad (8-8)$$

式中 B_{δ} ——电机气隙中的磁通密度；

L ——导体的有效长度；

v ——磁场与导体之间相对运动的线速度。

对于已经制成的同步发电机， v 和 L 均为常数，所以导体感应电势波形完全取决于气隙磁密的波形。我们讨论的前题是气隙磁场按正弦规律分布，因此感应电势的波形是正弦波，如图 8-12 (c) 所示。当然，实际的同步发电机，气隙磁密不是一个完全的正弦波，由它产生的感应电势除基波外，还有各次高次谐波，这里讨论的电势波形实际上是基波电势波形。

三、感应电势的大小

设 $B_{\delta 0}$ 为一个磁极内磁通密度的平均值，则感应电势的平均值 $E_{\delta 0}$ 为

$$E_{\delta 0} = B_{\delta 0} L v \quad (8-9)$$

$$\text{而 } v = \pi D \frac{n}{60} = 2p\tau \frac{n}{60} = 2f\tau \quad (8-10)$$

式中 D ——定子内径；

τ ——极距。

将式 (8-10) 代入式 (8-9)，得

$$E_{\delta 0} = 2f\tau B_{\delta 0} L \quad (8-11)$$

又 $B_{\delta 0} L \tau = \phi$ 为每极磁通，故式 (8-11) 可改写为

$$E_{\delta 0} = 2f\phi \quad (8-12)$$

从平均值求有效值，要乘以波形系数 k_w ，于是电势的有效值 $E_{\delta 1}$ 为

$$E_{c1} = k_a E_{av} \quad (8-13)$$

对于正弦波, $k_a = 1.11$, 将它代入式(8-13)得

$$E_{c1} = 1.11 E_{av} = 1.11 \times 2f\phi = 2.22f\phi \quad (8-14)$$

上式表明, 导体电势的有效值, 与每极磁通量和频率的乘积成正比。当频率一定时, 电势与每极磁通的大小成正比。当磁通的单位为韦, 频率的单位为赫时, 电势的单位为伏。

1. 单匝线圈电势 E_{t1}

单匝线圈电势, 简称匝电势。匝电势与线圈节距有关, 下面分别讨论整距线圈和短距线圈的匝电势。

(1) 整距线圈匝电势。对于整距线圈 ($y_1 = \tau$), 如果线匝的一个有效边位于 N 极中心, 则另一个有效边位于 S 极的中心, 如图 8-13 (a) 中的实线所示。两个有效边感应电势瞬时值的大小相等, 方向相反。但沿回路方向, 两个有效边的电势大小相等, 方向相同, 故线匝电势为两个有效边电势的算术和。按图示的正方向, 两有效边电势向量 \dot{E}_{c1} 和 \dot{E}'_{c1} 的方向相反, 它们在时间上相差 180° , 如图 8-13 (b) 所示。根据基尔霍夫第二定律,

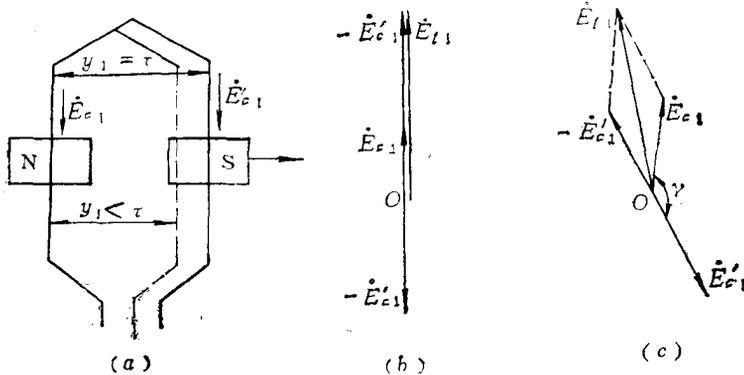


图 8-13 线匝及电势相量图

(a) 线匝: (b) 整距线匝电势相量; (c) 短距线匝电势相量

线匝电势为

$$\dot{E}_{t1} = \dot{E}_{c1} - \dot{E}'_{c1} = 2\dot{E}_{c1}$$

有效值为

$$E_{t1} = 2E_{c1} = 2 \times 2.22f\phi = 4.44f\phi \quad (8-15)$$

上式表明, 整距线圈匝电势是一个有效边电势的两倍。

(2) 短距线匝电势和节距因数。整距线圈虽然匝电势最大, 但电势中含有较大的高次谐波分量。为了改善电势波形, 大、中型电机均采用短距绕组。

短距绕组 $y_1 < \tau$, 如图 8-13 (a) 中的虚线所示。当线圈的一个边位于 N 极中心时, 另一个边不位于 S 极中心, 而在小于极距的某一槽内。若将线圈两个有效边的距离用 γ 角来表示, 则 $\gamma < 180^\circ$, 因此匝电势为

$$E_{t1 (y_1 < \tau)} = 2E_{c1} \sin \frac{\gamma}{2} = 4.44f\phi \sin \frac{\gamma}{2} \quad (8-16)$$

比较式 (8-15) 与式 (8-16) 可知, 短距线匝电势小于整距线匝电势。短距线匝电势与整距线匝电势的比值, 称为节距因素, 用 k_{y_1} 表示, 其值为

$$k_{y_1} = \frac{\text{短距线匝电势}}{\text{整距线匝电势}} = \frac{2E_{c_1} \sin \frac{\gamma}{2}}{2E_{c_1}} = \sin \frac{\gamma}{2} \quad (8-17)$$

于是式 (8-16) 可改写成

$$E_{t_1} (\gamma_1 < \tau) = 4.44 k_{y_1} f \Phi \quad (8-18)$$

节距因素 $k_{y_1} < 1$, 它反映了采用短距绕组后, 电势减小的程度。

(3) 线圈电势 E_c 。设线圈的匝数为 N_c , 由于线圈内各匝电势大小同相, 所以由 N_c 匝串联成的线圈电势为

$$E_c = 4.44 k_{y_1} N_c f \Phi \quad (8-19)$$

2. 极相组电势及分布因素

极相组电势的大小与各线圈的分布情况有关。

(1) 集中绕组的极相组电势。 q 个线圈在每极下只占用一个槽的绕组, 称为集中绕组。集中绕组 q 个线圈的电势大小相等, 方向相同, 因此 q 个线圈串联后的极相组电势, 应为一个线圈电势的 q 倍, 即

$$E'_q = q E_c \quad (8-20)$$

(2) 分布绕组的极相组电势。为了改善电势波形, 每极每相的 q 个线圈分布在 q 个槽中, 各线圈电势虽然有效值相等, 但相位互差一个槽间电角度 α 。因此, 极相组电势不是线圈电势的 q 倍, 应是 q 个线圈电势的相量和。现以三相、4 极、36 槽电机绕组为例来进行分析。

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Z} = \frac{Z \times 360^\circ}{36} = 20^\circ$$

$$q = \frac{Z}{2pm} = \frac{36}{2 \times 2 \times 3} = 3$$

根据 α 和 q , 可以用相量加法求出极相组电势, 如图 8-13 所示。图中 o 为极相组电势相量多边形的外接圆心, R 为半径。由三角形 $o a b$ 可求出每个线圈电势为

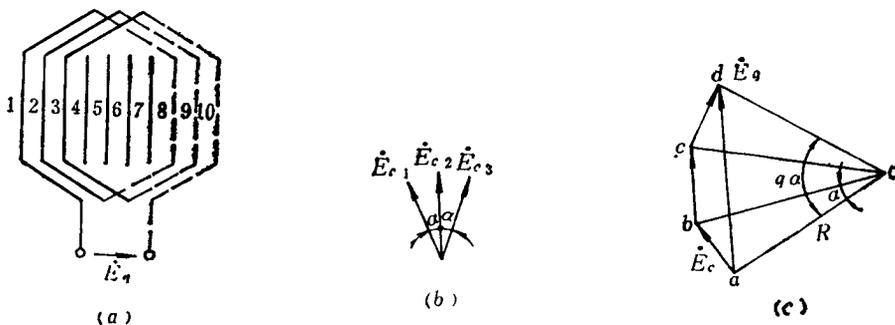


图 8-14 极相组及其电势

$$E_c = 2R \sin \frac{\alpha}{2} \quad (8-21)$$

由三角形 $o a d$ 求出极相组电势为

$$E_q = 2R \sin \frac{q\alpha}{2} \quad (8-22)$$

分布绕组极相组电势 E_q 与集中绕组极相组电势 E'_q 之比，称为分布因数，用 k_{q1} 来表示其值为

$$k_{q1} = \frac{E_q}{E'_q} = \frac{2R \sin \frac{q\alpha}{2}}{2q R \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (8-23)$$

$$E_q = k_{q1} E'_q \quad (8-24)$$

分布因数 $k_{q1} < 1$ ，它反映了采用分布绕组后，感应电势减小的程度。

将式(8-20)代入式(8-24)，得

$$\begin{aligned} E_q &= k_{q1} q E_c = 4.44 k_{q1} \cdot k_{y1} \cdot q N_c f \Phi \\ &= 4.44 k_{w1} N_q f \Phi \end{aligned} \quad (8-25)$$

式中 k_{w1} ——绕组因数， $k_{w1} = k_{y1} k_{q1} < 1$ ；

N_q ——极相组串联的匝数。

绕组因素 $k_{w1} < 1$ ，它反映了电机采用短距、分布绕组后电势减小的程度。

3. 相电势和线电势

按设计需要，将各个磁极下属于同一相的极相组串联或并联起来构成一定的支路数，每条支路电势就是相电势。设一相绕组（一条支路绕组）的串联总匝数为 N ，则每相电势为

$$E_\phi = 4.44 N k_{w1} f \Phi \quad (8-26)$$

由于双层绕组每相有 $2p$ 个极相组，每个极相组有 qN_c 匝线圈，当并联支路数为 a 时，每相绕组串联匝数为

$$N = \frac{2pqN_c}{a} \quad (8-27)$$

单层绕组每相只有 p 个极相组，每个极相组仍有 qN_c 匝线圈，当并联支路数为 a 时，每相绕组串联数为

$$N = \frac{pqN_c}{a} \quad (8-28)$$

式(8-26)和变压器相电势公式相比，公式中多乘了一个绕组因数 k_{w1} ，这是由于交流电机采用短距、分布绕组的结果， $k_w < 1$ ，使感应电势减小了。

线电势与三相绕组的连接方式有关，对于三相对称绕组，三相绕组连接成 Y 时，线电势是相电势的 $\sqrt{3}$ 倍。三相绕组连接成 Δ 时，线电势等于相电势。

第七节 定子绕组始末端的判断方法

在交流电机的定子槽中，对称地嵌放着 $A-X$ 、 $B-Y$ 、 $C-Z$ 三相绕组。定子三相绕组共有六个出线头， A 、 B 、 C 表示三相绕组的头， X 、 Y 、 Z 表示三相绕组的尾。三相绕

组的头（始端）和尾（末端）可以同时互换，即将 A 、 B 、 C 标注为相应的 X 、 Y 、 Z ，而将 X 、 Y 、 Z 标注为相应的 A 、 B 、 C 。而三相绕组的任一相（只此一相）始末端是不能标注错的，否则接成 Δ 形运行时将产生很大的环流。因此我们在使用电机时，应首先用试验的方法，检查电机出线盒上各相始、末端的标记是否正确。

三相绕组一共有六个出线端，首先用万用表的“ Ω ”档测任意两个线头之间的电阻，如果电表有读数，就表明这两个接线头属于同一相绕组。如果电表读数“ ∞ ”，这两个线头就不属于同一相绕组。

测出每一相绕组的两个接线端头后，先任意标注三相绕组的始端 A 、 B 、 C ，末端 X 、 Y 、 Z 。判断始、末端时，先将 A 相绕组的末端 X 与 B 相绕组的末端 Y 相连，即同名端相连，然后将此串联绕组接到低于相绕组额定电压的交流电源上，并同时测量 C 相绕组的电压，如图 8-15(a) 所示。

如果 C 相绕组的电压表读数为零，则两串联绕组是同名端相连， A 、 B 两相绕组的标记是正确的。因两相绕组同名端相连后接到交流电源上， A 相绕组的电流是从始端流向末端， B 相绕组的电流是从末端流向始端，如图 8-15(b) 所示。把电流方向标注在图 8-15(b) 绕组导体中，应用右螺旋定则，画出两相电流所产生的合成交变磁场。这时， C 相绕组正好处在磁场的轴线上，无磁通交链，因此 C 相绕组不产生感应电势，伏特表读数为零。

如果伏特表有读数，则两个串联绕组是异名端相连，即 X 与 B 相连，如图 8-16(a) 所示。这时 A 、 B 两相绕组的电流都是从始端流向末端，两相电流产生的合成磁场如图 8-16(b) 所示。由图可见， C 相绕组因与交变的合成磁场相交链而产生感应电势，伏特表上就有读数。

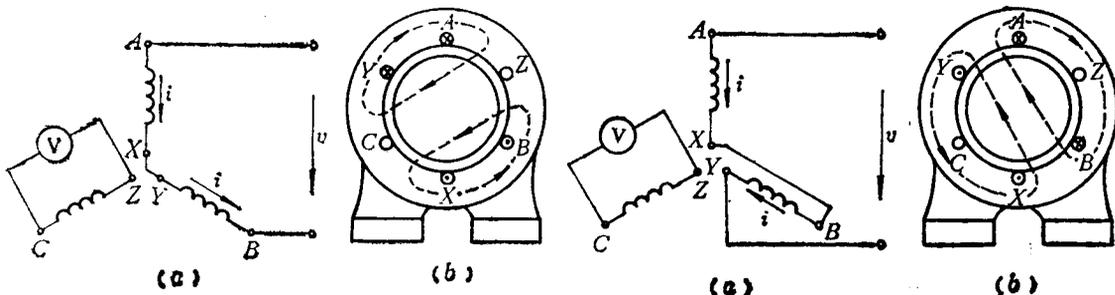


图 8-15 两相绕组的同名端相连
(a) 绕组连接图；(b) 合成磁场分布图

图 8-16 两相绕组的异名端相连接
(a) 绕组接线图；(b) 合成磁场分布图

用同样的方法，再做一次试验，可以确定 C 相绕组的始末端。

第八节 小结

(1) 交流电机的绕组和电势理论，是同步电机和异步电机的共同理论基础。本章是电机学难点之一，绕组部分最好在下厂实习时，结合实物现场教学。

(2) 三相绕组的构成原则是：三相绕组必须对称，即三相绕组在空间互差 120° ，且每相绕组匝数相等；在保证电势波形接近于正弦波的情况下，尽可能获得较大的相电势，

这是通过合理选择短距因素和分布因素来实现的；应力求节省材料，工艺方便。

(3) 三相双层、短距、分布绕组能改善电势和磁势波形，线圈制作方便，端部排列整齐，有利于散热和增强机械强度，因此大、中型交流电机均采用这种绕组。单层绕组嵌线方便，槽的利用率高，故在容量较小的电机中得到广泛应用。

(4) 双层短距迭绕组能节省端部用铜和得到较多的并联支路数，因此在中、小型同步电机、异步电机和大型汽轮发电机的定子绕组中，得到广泛应用。双层波绕组可以减少线圈组之间连接线的用铜量，且结构比较坚固，故常用于水轮发电机的定子绕组和绕线式异步电动机的转子绕组。

(5) 交流绕组相电势 $E_{\phi} = 4.44k_{w1}Nf\Phi$ ，电机制造好后， k_{w1} 、 N 、 f 均为常数，相电势 E_{ϕ} 与每极磁通 Φ 成正比。

思考题及习题

8-1 何为对称三相绕组？为什么三相绕组必须对称？

8-2 为什么水轮发电机的定子一般采用双层波绕组？汽轮发电机的定子一般采用双层迭绕组？

8-3 试绘出 $Z=24$ ， $2p=4$ ， $y_1 = \frac{5}{6}\tau$ ， $a=2$ 的双层迭绕 A 相绕组展开图和端部接线图。

8-4 为什么大、中型交流电机均采用短距、分布绕组，而不采用整距、集中绕组？

8-5 交流电机相电势公式与变压器相电势公式有什么异同之处？为什么？

8-6 为什么在低速水轮发电机中常用分数槽绕组？

8-7 有一双层三相短距绕组， $Z=24$ ， $2p=2$ ， $y_1=10$ ，试求：

(1) 画出支路数 $a=2$ 的 A 相迭绕组展开图；

(2) 算出短距因数、分布因数和绕组因数。

第九章 交流电机绕组的磁势

当电流通入绕组时，绕组就会产生磁势。所谓磁势，就是绕组中的全电流，即安培匝数。交流绕组磁势与交流绕组电势一样，是同步电机和异步电机的理论基础。磁势既是空间的函数，又是时间的函数，比较复杂。为了易于学习，本书按照由浅入深、由简到繁的原则，先分析一个整距线圈的磁势，然后引入线圈组磁势，单相脉动磁势，三相旋转磁势。

第一节 单相交流绕组的磁势——脉动磁势

一、整距线圈磁势（全距线圈磁场）

图9-1所示是一台两极隐极式同步电机示意图。定子铁芯内只有一个整距线圈。当线圈中通入电流 i_a 时（电流从X端流入，A端流出，线圈周围便产生一个两极磁场。根据右螺旋定则，磁场的方向如图中箭头所示。对于定子来说，下端是N极，上端是S极。由于电机结构是对称的，因此磁场的分布也是对称的。

假设线圈的匝数为 N_c ，通入线圈电流的有效值为 I_c ，则闭合回路磁势的幅值，等于该磁路所包围的全电流（安培匝数）的幅值，即 $\sqrt{2}I_c N_c$ 。由图9-1可见，每一条磁力线都要通过定子铁芯和转子铁芯，并两次穿过气隙。由于气隙磁阻远大于铁芯磁阻，故铁芯磁阻可忽略不计，于是全部磁势作用在两个气隙中。又因气隙是均匀的，所以作用在每一个气隙中的磁势幅值 $F_{c,m}$ ，为总磁势幅值的一半，即

$$F_{c,m} = \frac{1}{2} \sqrt{2} I_c N_c \quad (9-1)$$

如果把N极的磁势取为正，S极的磁势取为负，则沿定子内圆周分布的磁势波形为矩形波，如图9-2所示。

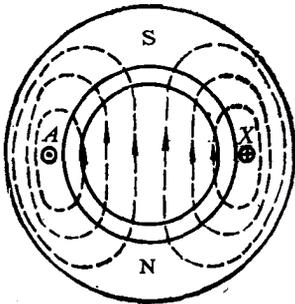


图 9-1 整距线圈所产生的磁势

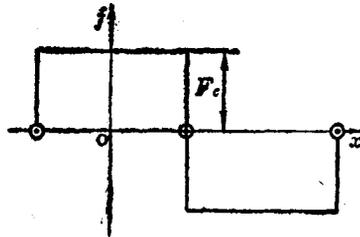


图 9-2 整距线圈的矩形磁势波

沿空间分布的矩形波，按傅里叶级数展开，可以分解为基波和一系列奇次谐波，表达式为

$$F_{cm}(x) = F_{c1m} \cos \frac{\pi}{\tau} x + F_{c3m} \cos 3 \frac{\pi}{\tau} x + F_{c5m} \cos 5 \frac{\pi}{\tau} x + \dots \quad (9-2)$$

式中 $\frac{\pi}{\tau} x$ —— 长度为 x 的空间电弧度；

F_{c1m} —— 基波幅值；

F_{c3m} 、 F_{c5m} —— 分别为 3 次、5 次谐波幅值。

因基波幅值是矩形幅值的 $\frac{4}{\pi}$ 倍，故基波幅值为

$$F_{c1m} = \frac{4}{\pi} \times \frac{1}{2} \sqrt{2} I_c N_c = 0.9 I_c N_c \quad (9-3)$$

谐波磁势对电机有很多不良影响，因此在设计电机时要采取很多措施削弱谐波磁势，但这里不作分析。我们只讨论基波磁势。

基波磁势沿空间分布为正弦波，如图 9-3 (a) 所示。

从数字的角度看，磁势空间正弦波与电流时间正弦波一样，可以用相量来表示，如图 9-3 (b) 所示。相量的长度等于正弦波的幅值后，相量的位置就是正弦波幅值所在的位置，即相量 F_m 的方向与绕组的轴线重合。

二、线圈组的磁势

假设电机采用的是整距绕组，且 $q=3$ ，则 $q=3$ 的线圈组的合成磁势波等于各线圈矩形波迭加而成，如图 9-4 所示。由于是分布绕组，三个线圈在空间互差 α 电角度，故迭加后的线圈组的合成磁势波呈阶梯形，比较接近正弦波。实际的电机，一般都采用短距的分布绕组，使气隙磁势更接近于正弦波。矩距分布绕组对磁势的影响与对电势的影响相似，既改善了磁势波形，又使合成磁势减小。减小的程度由绕组因数 k_w 的大小决定。考虑绕组因数 k_w 对磁势的削弱作用后， q 个分布线圈产生的合成磁势（线圈组磁势）的基波幅值为

$$F_{q1m} = k_{w1} q F_{c1m} = 0.9 k_{w1} q N_c I_c \quad (9-4)$$

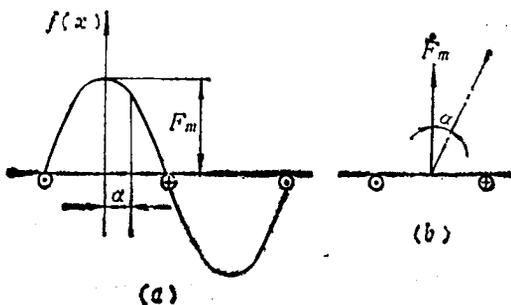


图 9-3 磁势空间相量

(a) 磁势波形；(b) 磁势相量

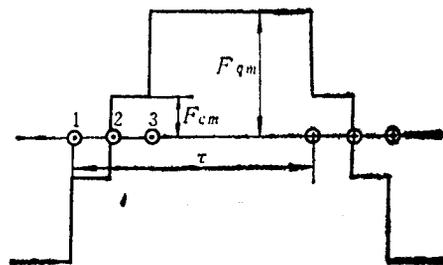


图 9-4 线圈组产生的阶梯形磁势波

三、单相交流绕组磁势——脉动磁势

由于每对磁极下的磁势和磁阻组成一个对称的分支磁路，所以相绕组磁势就等于每对极下每相的线圈组磁势。

对于单相绕组，每极对下每相只有一个线圈组，所以相绕组磁势就等于线圈组磁势，其基波的幅值为

$$F_{q,1m} = 0.9k_{w1} q N_c I_c \quad (9-5)$$

对于双层绕组，每对极下，每相有 2 个线圈组（N 极下 q 个线圈串联成一个线圈组，S 极下 q 个线圈又串联成一个线圈组），所以相绕组磁势幅值为

$$F_{q,1m} = 0.9k_{w1} (2 q N_c) I_c \quad (9-6)$$

式(9-5)和式(9-6)中的电流 I_c ，是线圈中流过的电流，也就是每条支路里的电流。 N_c 是每个线圈的匝数。但电机使用说明书或铭牌上给出的是线电流（可以换算成相电流）和每相绕组串联匝数，为了使磁势计算公式在实际应用时更为简单、方便，相绕组磁势一般采用相电流有效值和每相串联匝数 N 来表示。如果绕组的支路数为 a ，则 $I_c = \frac{I}{a}$ 。

在单层绕组中，每相有 $p q$ 个线圈，每个线圈有 N_c 匝，因此每相串联匝数为

$$N = \frac{p q N_c}{a}, \quad q N_c = \frac{a}{p} N$$

在双层绕组中，每相有 $2 p q$ 个线圈，每个线圈有 N_c 匝，则每相串联匝数为

$$N = \frac{2 p q N_c}{a}, \quad 2 q N_c = \frac{a}{p} N$$

将上述关系分别代入式(9-5)和(9-6)，则单相绕组合成磁势的基波幅值通式为

$$F_{\phi,1m} = 0.9k_{w1} \frac{a}{p} N \frac{I}{a} = 0.9k_{w1} \frac{IN}{p} \text{ (安匝/极)}$$

如果坐标原点取在相绕组的轴线处，且相电流按余弦规律变化，则单相磁势方程的完整表达式为

$$f_{\phi,1}(x, t) = F_{\phi,1m} \cos \frac{\pi}{\tau} x \cos \omega t \quad (9-7)$$

式(9-7)表明，单相交流绕组产生的磁势在空间按余弦规律分布，大小随时间 ωt 按正弦规律变化。当电流为零时，磁势波各点为零。当电流为正的最大值时，磁势波各点为最大值。当电流为负的最大值时，磁势波各点为负的最大值。磁势幅值随着时间的变化在正的最大值和负的最大值之间脉动，其脉动频率等于电流的频率，如图9-5所示。这种轴线位置在空间固定不动、幅值大小随时间变化的磁势，称为脉动磁势。

四、脉动磁势的分解

根据三角函数公式

$$2 \cos \alpha \cos \beta = \cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)$$

可将式(9-7)分解为

$$f_{\phi,1} = F_{\phi,1m} \cos \frac{\pi}{\tau} x \cos \omega t = \frac{1}{2} F_{\phi,1m} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \omega t \right) + \frac{1}{2} F_{\phi,1m} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x + \omega t \right)$$

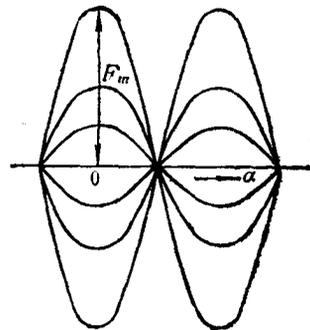


图 9-5 脉动磁势波形

$$= f'_{\phi_1}(x, t) + f''_{\phi_1}(x, t) \quad (9-8)$$

在式(9-8)中,等式两边在数量上是完全相等的,但等式两边所代表的物理意义是完全不相同的。等式左边的表达式代表脉动磁势,等式右边是方向相反的两个行波表达式,代表旋转方向相反的两个旋转磁势。

首先分析等式右边的第一项

$$f'_{\phi_1}(x, t) = \frac{1}{2} F_{\phi_1 m} \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x - \omega t\right) \quad (9-9)$$

这是一个向 x 正方向移动的行波表达式。下面取两个瞬时进行分析。

当 $t=0$ 即 $\omega t=0$ 时

$$f'_{\phi_1}(x, 0) = \frac{1}{2} F_{\phi_1 m} \cos \frac{\pi}{\tau} x$$

当 $t=t_1$ 即 $\omega t=\theta$ 时

$$f'_{\phi_1}(x, t_1) = \frac{1}{2} F_{\phi_1 m} \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x - \theta\right)$$

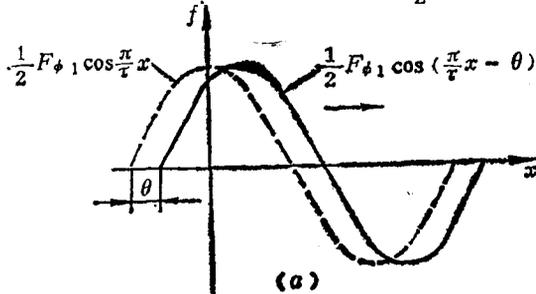
这两个瞬时磁势分布曲线如图9-6所示。由图可见,当时间由 t 增加到 t_1 时,磁势分布曲线沿着 x 的正方向前进 θ 电角度。如果把每个瞬时的磁势波都画出来,便可观察到随着时间的增加,磁势波在沿着 x 的正方向移动,故称为正向旋转磁势。

下面再分析等式右边的第二项

$$f''_{\phi_1}(x, t) = \frac{1}{2} F_{\phi_1 m} \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x + \omega t\right) \quad (9-10)$$

当 $t=0$, 即 $\omega t=0$ 时

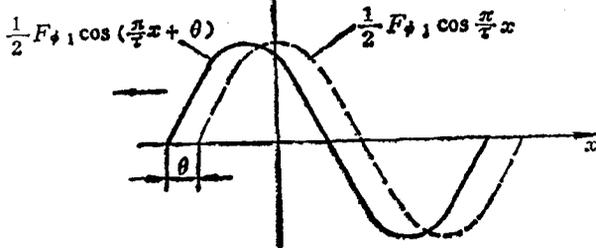
$$f''_{\phi_1}(x, 0) = \frac{1}{2} F_{\phi_1 m} \cos \frac{\pi}{\tau} x$$



当 $t=t_1$, 即 $\omega t=\theta$ 时

$$f''_{\phi_1}(x, \theta) = \frac{1}{2} F_{\phi_1 m} \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x + \theta\right)$$

这两个瞬时的磁势分布曲线,如图9-6(b)所示。



将这两个瞬时的磁势波进行比较,当经过时间 t_1 时,磁势分布曲线沿 x 的反方向前进 θ 电角度,所以 $f''_{\phi_1}(x, t)$ 是一个反向旋转磁势。

下面进一步分析行波移动的速度 v 。如把观察点选在磁势波幅值上,则要求式(9-9)的余弦值等于1,即 $\omega t -$

$\frac{\pi}{\tau} x = 0$, $x = \frac{\tau}{\pi} \omega t$, 将距离 x 对时间 t 求导数,就可求出行波移动的速度

图 9-6 旋转磁势波

(a) 正向旋转磁势; (b) 反向旋转磁势

度

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{\tau}{\pi} \omega = 2f\tau \quad (\text{rad/s}) \quad (9-11)$$

由于 x 是沿电枢圆周的空间距离，而圆周长 $\pi D = 2p\tau$ ，所以旋转磁场的旋转速度为

$$n = \frac{2f\tau}{2p\tau} = \frac{60f}{p} \quad (\text{r/min}) \quad (9-12)$$

旋转磁势转速 n 与同步电机的转子转速相等，故称为同步转速。

综上所述，交流绕组产生的磁势是一个脉动磁势。一个脉动磁势可以分解成两个转速相等 ($n = \frac{60f_1}{p}$)、旋转方向相反的旋转磁势，每一个

旋转磁势的幅值为脉动磁势幅值的 $\frac{1}{2}$ 。这个结论不仅可以用上面的数学法进行论证，还可以借助于空间相量进行分析，如图 9-7 所示。图中 F_m 是脉动磁势的空间向量，这个脉动磁势可以分解为两个大小相等、转速相同旋转方向相反的旋转磁势 $f_m^{(+)}$ 和 $f_m^{(-)}$ 。脉动磁势的轴线在空间固定不动，位于相绕组的轴线上。脉动磁势的相量始终等于两个旋转磁势的相量之和。当脉动磁势为最大时，两个旋转磁势正好转到与脉动磁势相互重合的位置。当脉动磁势减小时，两个旋转磁势相互离开。由于两者转速相同，离开的角度相对于纵轴总是对称的。当脉动磁势为零时，两个旋转磁势正好转到相反的位置，如图 9-7 所示。

磁势产生磁场，所以一个脉动磁场也可以分解为两个旋转磁场。

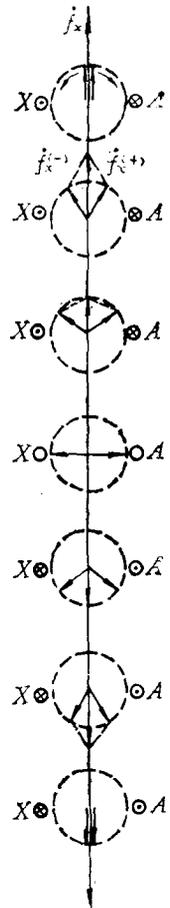


图 9-7 一个脉动磁势分解为两个旋转磁势

第二节 三相绕组的磁势——旋转磁势

由于现代电力系统采用的是三相制，所以绝大多数同步电机和异步电机也是三相的。因此，分析三相交流绕组磁势是研究交流电机的理论基础。常用的分析方法有分析法、相量法和图解法。本书只介绍分析法和图解法两种。

在三相交流电机的定子铁芯里，安放对称的三相绕组，它是由三个单相绕组构成的。每一个单相绕组产生一个脉动磁势，三个绕组产生的合成磁势是一个旋转磁势，可用下面两种方法进行分析。

一、分析法

当对称的三相绕组通入对称的三相交流电时，三相绕组在空间上互差 120° 电角度，通入的三相电流在时间上也互差 120° 电角度，即

$$\left. \begin{aligned} i_A &= I_m \cos \omega t \\ i_B &= I_m \cos \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) \\ i_C &= I_m \cos \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right) \end{aligned} \right\} \quad (9-13)$$

若把空间坐标的原点取在A相绕组的轴线上，并把A相绕组电流出现极大值时作为时间的起点，则各相脉动磁势的基波表达式为

$$\left. \begin{aligned} f_{A1} &= F_{\phi 1m} \cos \frac{\pi}{\tau} x \cos \omega t \\ f_{B1} &= F_{\phi 1m} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \frac{2}{3} \pi \right) \cos \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) \\ f_{C1} &= F_{\phi 1m} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \frac{4}{3} \pi \right) \cos \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right) \end{aligned} \right\} \quad (9-14)$$

式中， $F_{\phi 1m}$ 是各相脉动磁势的基波幅值； $\cos \frac{\pi}{\tau} x$ 、 $\cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \frac{2}{3} \pi \right)$ 、 $\cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \frac{4}{3} \pi \right)$ 分别表示A、B、C三个单相基波磁势的空间分布规律； $\cos \omega t$ 、 $\cos \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right)$ 、 $\cos \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right)$ 则分别表示这三个单相基波磁势随时间的变化规律。

利用三角函数公式

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} \cos (\alpha - \beta) + \frac{1}{2} \cos (\alpha + \beta)$$

将式(9-14)进行分解，得

$$\left. \begin{aligned} f_{A1} &= \frac{1}{2} F_{\phi 1m} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \omega t \right) + \frac{1}{2} F_{\phi 1m} \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x \right) \\ f_{B1} &= \frac{1}{2} F_{\phi 1m} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \omega t \right) + \frac{1}{2} F_{\phi 1m} \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x - \frac{4}{3} \pi \right) \\ f_{C1} &= \frac{1}{2} F_{\phi 1m} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \omega t \right) + \frac{1}{2} F_{\phi 1m} \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x - \frac{2}{3} \pi \right) \end{aligned} \right\} \quad (9-15)$$

式(9-15)中，共有六个旋转磁势，其中有三个为正向旋转磁势，另外三个为反向旋转磁势。三个反向旋转磁势在时间上同相位，在空间上互差120°电角度，所以三个反向旋转磁势的合成磁为零。而三个正向旋转磁势，在时间上和空间上都同相位，所以合成磁势的幅值为单相脉动磁势幅值的 $\frac{3}{2}$ 倍。故三相绕组产生的合成磁势为

$$\begin{aligned} f_1 &= f_{A1} + f_{B1} + f_{C1} = \frac{3}{2} F_{\phi 1m} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \omega t \right) \\ &= F_1 \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \omega t \right) \end{aligned} \quad (9-16)$$

式中 F_1 ——三相基波合成磁势的幅值， $F_1 = \frac{3}{2} F_{\phi 1m}$ 。

式(9-16)表明，对称三相交流电通入对称三相绕组时，三相交流绕组产生的合成磁势是一个旋转磁势，旋转磁势的幅值为脉动磁势幅值的 $\frac{3}{2}$ 倍，旋转的转速由式(9-12)

可知仍为同步转速，即 $n = \frac{60f_1}{p}$ 。

二、图解法

用上面的分析法研究三相合成磁势严谨、准确，但不够形象。下面我们再用简单的、形象的图解法来观察旋转磁场的形成，以加深对旋转磁场的理解。

1. 旋转磁场的产生

三相对称电流波形如图9-8所示。交流电机定子上的三相对称绕组在空间如图9-9所示。A—X、B—Y、C—Z三相绕组在空间互差120°电角度。

假定电流从绕组的首端流入为正，末端流入为负。电流的流入端用⊗表示，流出端用⊙表示。

三相对称电流通入三相对称绕组时，将产生一个旋转磁场。下面选择几个瞬时来进行分析和论证。

当 $\omega t=0$ 时，A相电流具有正的最大值，电流从首端A流入，以⊗表示，从末端流出，以⊙表示。B相和C相电流为负，所以电流均从绕组的末端流入，首端流出，故末端Y和Z以⊗表示，首端B和C以⊙表示，如图9-9(a)所示。由此可见，合成磁场的轴线正好在A相绕组的轴线上。

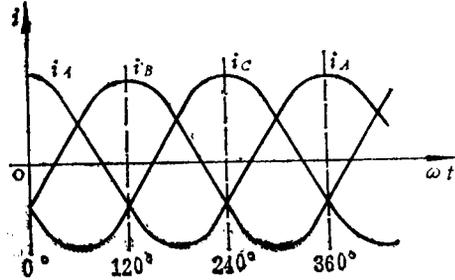


图 9-8 三相对称电流波形

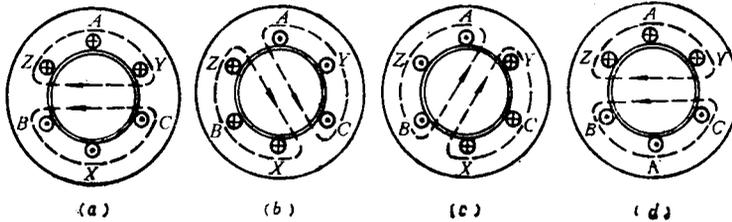


图 9-9 两极旋转磁场

当 $\omega t=120^\circ$ 时，B相电流为正的最大值，所以B相电流从首端B流入，以⊗表示，从末端Y流出，以⊙表示。A相和C相电流为负，所以A、C两相电流均从末端流入首端流出，故末端X和Z以⊗表示，首端A和C以⊙表示，如图9-9(b)所示。由此可见，此时合成磁场的轴线位于B相绕组的轴线上，磁场方向已从 $\omega t=0$ 时的位置逆时针方向旋转了120°。

当 $\omega t=240^\circ$ 时，C相电流为正的最大值，A相和B相电流为负，此时合成磁场轴线位于C相绕组的轴线上，磁场方向从起始位置逆时针方向旋转了240°，如图9-9(c)所示。

当 $\omega t=360^\circ$ 时，A相电流又出现正的最大值，B相和C相电流为负，此时合成磁场轴线又位于A相绕组的轴线上，磁场方向从起始位置逆时针方向旋转了360°，即电流变化一个周期，磁场旋转一周，如图9-9(d)所示。

由图9-9可以清楚地看出，三相交流电产生的合成磁场是一个旋转磁场。

2. 旋转磁场的旋转方向

如果三相绕组通入的是正序电流，电流出现正的最大值的顺序是A→B→C，如图9-8所示。由前面的分析可知，当A相电流出现最大值时，合成磁场的轴线位于A相绕组的轴线上。当B相电流出现最大值时，合成磁场的轴线位于B相绕组的轴线上。当C相电流出现最大值时，合成磁场的轴线位于C相绕组的轴线上，这就是说，合成磁场的旋转方向也是从A→B→C。

如果三相绕组通入的是负序电流，电流出现正的最大值的顺序是 $A \rightarrow C \rightarrow B$ ，旋转磁场的旋转方向也是 $A \rightarrow C \rightarrow B$ 。

由此可知，只要改变电流相序，就可以改变旋转磁场的方向。就是说，旋转磁场的方向取决于电流的相序，它总是从超前电流相转向滞后电流相。

第 三 节 小 结

(1) 单相交流绕组磁势是一个脉动磁势。脉动磁势在空间按余弦规律分布，各点磁势的大小随时间按正弦规律变化，所以脉动磁势既是空间的函数，也是时间的函数。

(2) 脉动磁势具有以下特点：

- 1) 基波磁势幅值 $F_{1\phi m} = 0.9k_{w1} \frac{IN}{p}$ (安匝/极)；
- 2) 脉动磁势幅值始终位于相绕组的轴线上；
- 3) 一个脉动磁势可以分解为两个大小相等、方向相反的旋转磁势，每一个旋转磁势的幅值为脉动磁势幅值的一半。

(3) 三相对称交流电通入三相对称绕组后，三相交流绕组的合成磁势是一个旋转磁势。旋转磁势具有如下特点：

- 1) 旋转磁势的幅值为脉动磁势幅值的 $\frac{3}{2}$ 倍；
- 2) 旋转磁势的轴线始终位于出现最大电流值的那相绕组的轴线上；
- 3) 旋转速度为同步转速，即 $n = \frac{60f}{p}$ ；
- 4) 旋转的方向取决于电流的相序，它始终从超前电流相转向滞后电流相，所以改变电流相序就可以改变旋转磁场的方向。

(4) 单相脉动磁势的幅值随时间按正弦规律变化，而三相对称电流通入三相对称绕组产生的旋转磁势的幅值是个常数，因此三相合成磁势是一个圆形旋转磁势。

(5) 电流通入绕组后产生磁势，因此无论是脉动磁势还是旋转磁势的幅值，都正比于每极下的有效安匝数 $k_{w1} IN$ 。

(6) 电势和磁势是同一绕组中发生的电磁现象，采用短距分布绕组能同样地改善电势和磁势波形，又同样地使电势和磁势减小，减小的程度取决于绕组因数 k_{w1} ，这是共性。不同的是电势仅是时间的函数，而磁势既是时间的函数又是空间的函数。

思 考 题 及 习 题

9-1 脉动磁势和旋转磁势各有哪些特性？它们之间的主要区别是什么？又有什么联系？

9-2 交流电机定子三相绕组通入正序电流和通入负序电流时，产生的磁场有何不同？试画图说明。

9-3 一台已经运行的三相异步电动机，将其定子三相绕组的三个头任意对调两根后，再接到电源上，问旋转磁场的方向是否改变？为什么？

9-4 交流电机定子三相绕组接上电源后，如果有一相断线，则绕组产生什么性质的磁势？为什么？

9-5 有一台交流电机， $2p=6$ ，定子为双层绕组， $Z=54$ 槽， $y_1=7$ 槽， Y 连接，每一个线圈有10匝，通入绕组电流的有效值为10A、50Hz。试求：

(1) 基波旋转磁势的幅值；

(2) 基波旋转磁势的转速。

9-6 有一个两相绕组，在空间互差 90° 电角度。如果通入这两相绕组的电流在时间相位上也互差 90° 电角度，试用图解法证明这两相绕组的磁场是一个旋转磁场。

9-7 产生脉动磁场和旋转磁场的条件各是什么？

第三篇 异步电动机及电力拖动

第二篇介绍了交流绕组的电势和磁势，本篇将利用这些基本理论来分析异步电动机的工作原理和运行性能。

异步电动机分为单相异步电动机和三相异步电动机。三相异步电动机又分为鼠笼式异步电动机和绕线式异步电动机两种。本篇以三相鼠笼式异步电动机为重点，简介异步电动机的结构，分析异步电动机的工作原理及运行性能，学习异步电动机的起动、调速、制动、反转等电力拖动知识。

异步电动机与变压器有本质的区别，但也存在着很多相似的地方。例如，异步电动机的定子相当于变压器的原边，转子相当于变压器的副边，所以分析变压器内部电磁关系的基本方法（电压方程组、相量图、等值电路）也适用于异步电动机。

第十章 三相异步电动机的结构及工作原理

第一节 异步电动机的用途

交流电机分为同步电机和异步电机两大类。无论是同步电机还是异步电机的定子铁芯里，都对称地嵌放着三相绕组。当三相对称电流通入三相对称绕组时，定子就产生一个旋转磁场，其转速 $n_1 = \frac{60f_1}{p}$ 称为同步转速。转子转速 n_2 等于定子旋转磁场转速的电机，即

$n_2 = n_1 = \frac{60f_1}{p}$ 的电机称为同步电机。转子转速不等于但接近定子旋转磁场转速的电机，称为异步电机。异步电机与所有电机一样，是可逆的，可以作发电机运行，也可以作电动机运行，但主要作电动机使用。所谓电动机就是把输入的电能转换成旋转的机械能的电机。用它去拖动各种生产机械。异步电动机是通过定子旋转磁场和转子感应电流相互作用而工作的，所以又称为感应电动机。

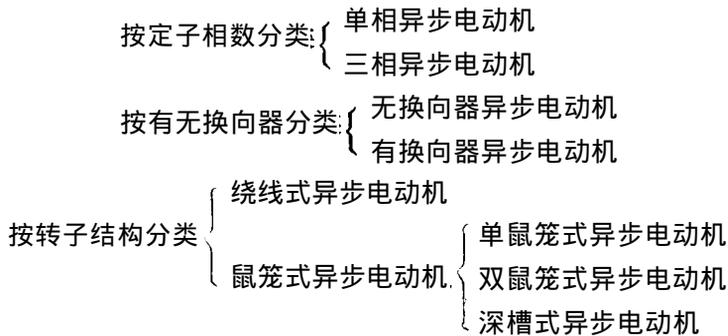
异步电动机是各行各业中应用最广泛的一种电动机，容量由几十瓦到几千千瓦。例如，在工业方面：用于拖动中小型轧钢设备、各种金属切削机床、轻工机械、矿山上的卷扬机和鼓风机等。在农业方面：用于拖动水泵、脱粒机、粉碎机和其它农副产品加工机械等。在人民日常生活中，异步电动机也使用得很广泛。例如：电扇、洗衣机、电冰箱、空调机、冷冻机及各种医疗机械等都使用异步电动机来拖动。据统计，异步电动机的容量，占总动力负载的85%以上。随着工农业的发展，机械化、自动化水平的不断提高，异步电动机的应用将越来越广泛。这充分说明，异步电动机在国民经济建设中占有重要的地位。

异步电动机之所以能得到如此广泛的应用，是因为它具有结构简单、造价低廉、坚固耐用、运行可靠、效率高和检修、维护方便等一系列优点。其缺点是起动力矩较小、调速性能较差、要从系统吸取感性无功功率使系统功率因数降低。所以异步电动机的应用也受到了一些限制。例如，对调速性能要求高的电车、电气机车等机械，必须使用调速性能好的直流电动机来拖动。对大容量、恒转速运转的空气压缩机、球磨机、逆风机等机械负载，一般采用能改善系统功率因数的同步电动机来拖动。

第二节 异步电动机的分类及主要结构

一、异步电动机的分类

异步电动机的种类很多，从不同的角度看，有不同的分类方法，一般可以分为以下几类。



二、异步电动机的主要结构

异步电动机主要分为鼠笼式和绕线式两大类。鼠笼式异步电动机结构如图 10-1 所示。绕线式异步电动机结构如图 10-2 所示。

异步电动机的结构主要由固定不动的定子和旋转的转子两部分组成。转子装在定子腔内，为了保证转子在定子内自由转动，定子和转子之间有一个很小的间隙，称为空气隙。此外还有轴承、端盖等部件。

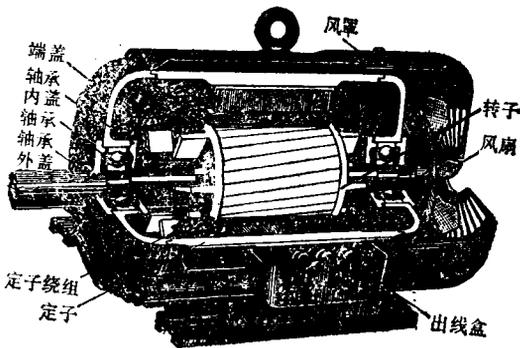


图 10-1 鼠笼式异步电动机

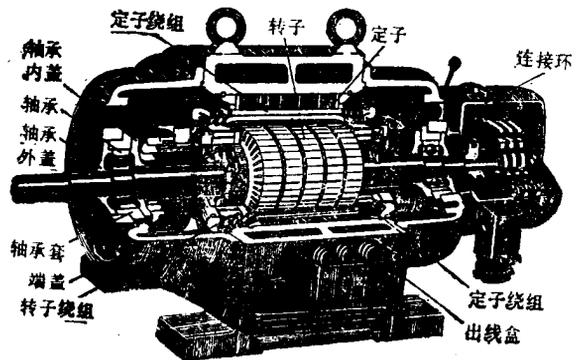


图 10-2 绕线式异步电动机

1. 定子

异步电动机的定子由机座、定子铁芯、定子绕组三部分组成。

(1) 机座。机座是电机的外壳。一般用铸铁铸成，大型电机的机座用钢片焊接而成。机座主要用来固定定子铁芯和端盖。

(2) 定子铁芯。定子铁芯是电机磁路的一部分。为了减小涡流和磁滞损耗，定子铁芯由涂有绝缘漆的 0.5mm 厚的硅钢片迭压而成，安装在机座内。定子铁芯迭片冲有嵌放绕组的槽，故又称为冲片。中小型电机的定子和转子铁芯都采用整圆冲片，如图10-3所示。大中型电机常采用扇形冲片拼成一个圆。

为了冷却铁芯，在容量较大的电机中，定子铁芯分成很多段，每两段之间留有径向通风槽，作为冷却空气的通道。

定子铁芯由导磁率很高的硅钢片迭成，起导磁作用，以减小激磁电流。

(3) 定子绕组。异步电动机的定子绕组由很多线圈连接而成。中小型异步电动机的线圈由绝缘的铜线或铝线绕制而成，大中型异步电动机的定子线圈用截面较大的扁铜线绕好后，再包上绝缘。一般小型异步电动机采用单层绕组，大中型异步电动机采用双层短距分布绕组。定子三相绕组对称地嵌放在定子铁芯槽中。

定子绕组的作用是：通电后产生旋转磁场，该磁场与转子感应电流相互作用产生电磁转矩，带动转子旋转，将电能转变成旋转的机械能。

2. 转子

异步电动机的转子由转轴、转子铁芯、转子绕组三部分组成。整个转子靠轴承和端盖支承着。

(1) 转轴。转轴一般用中碳钢制成，其作用是固定转子铁芯和传递功率。

(2) 转子铁芯。转子铁芯也是电机磁路的一部分。整个铁芯成圆柱形，一般用 0.5mm 厚的硅钢片迭压而成。转子铁芯冲片如图10-4所示。转子铁芯固定在转轴或转子支架

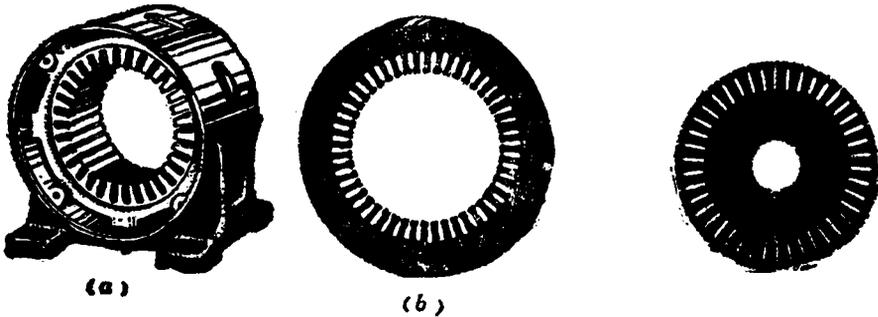


图 10-3 定子机座和铁芯冲片

图 10-4 转子铁芯冲片

(a) 定于机座：(b) 定于铁芯冲片

上。转子铁芯与定子铁芯一样，起导磁作用，以减小定子激磁电流，提高电机功率因数。

(3) 转子绕组。按照转子绕组结构的不同，异步电动机的转子绕组分为鼠笼式和绕线式两种。

1) 鼠笼式转子。在转子铁芯的每一个槽中，插入一根铜条，这些铜条的两端各用一个铜制的端环短接（焊接而成），形成多相短路绕组。如果将转子铁芯抽出，整个转子绕组的外形象一个老鼠笼子，故称为鼠笼式转子，如图10-5(a)和(b)所示。

在近代电机中，小型异步电动机的笼型转子一般都是铸铝式的，如图10-5(c)所示。这种转子的导条和端环都是用溶化了的铝一次浇铸而成。采用铸铝式的转子不仅可以用铝代铜，而且工艺简单，生产效率高。但当电机容量较大时（大于100kW），由于铸铝转子质量不容易保证，一般采用插铜条的鼠笼式绕组，如图10-5(b)所示。

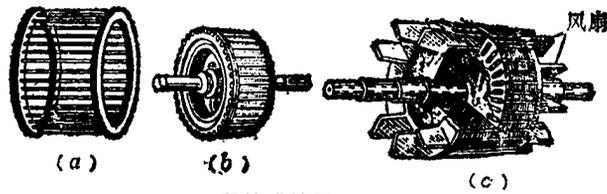


图 10-5 鼠笼式转子

(a) 鼠笼；(b) 鼠笼式转子；(c) 铸铝转子

2) 绕线式转子。绕线式转子绕组与定子绕组相似，在转子铁芯槽内嵌放着对称的三相绕组。绕线式转子采用的是波绕组，一般作星形联接，三相绕组的末端连在一起，首端分别引至轴上的三个彼此绝缘的集电环上。集电环用铜制成，并固定在转轴上。转子绕组通过集电环和电刷与外电路的可变电阻串联，如图10-6所示。转子绕组回路串入外加电阻的目的是为了改善电机的起动性能和调节转速。有的绕线式异步电动机，在端盖上还装有提刷手柄装置。当电机起动后而又不需要调速时，可移动手柄，将电刷提起，让它离开集电环表面，同时将三个集电环彼此短接，这样可以避免运转过程中电刷与滑环之间的电损耗和磨擦损耗。

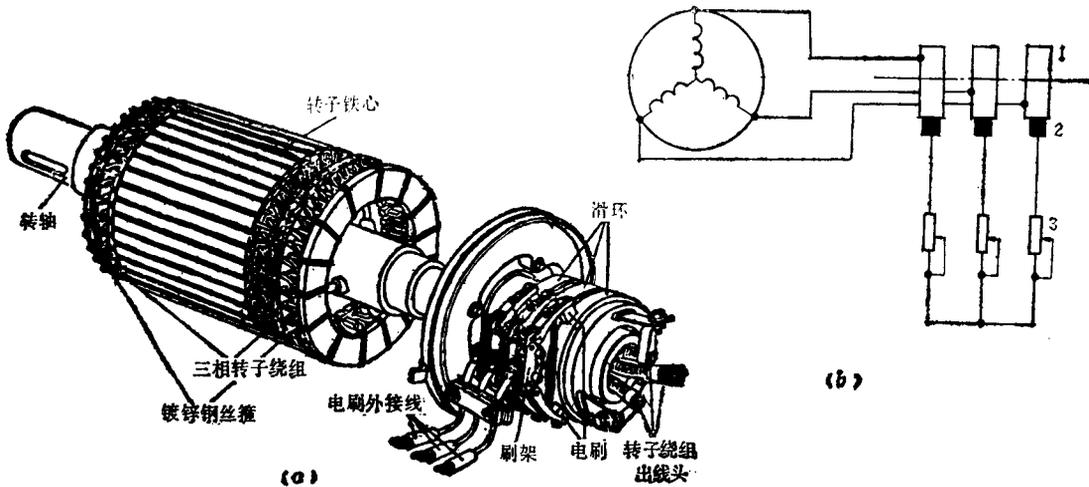


图 10-6 绕线式异步电动机的转子及接线

(a) 绕线式转子；(b) 接线示意图

1—集电环；2—电刷；3—可变电阻

3. 气隙

异步电动机的气隙一般为0.2~1.5mm左右，比同步电机和直流电机的气隙小得多。这是因为异步电动机的激磁电流是由电网供给的，气隙越大，磁阻越大，产生额定磁通所需

要的激磁电流就越大，而激磁电流基本上是无功性质的电流，致使电机的功率因数越低。为了提高功率因数，应尽量把电机气隙作得小些。但是也不能太小，因气隙太小，定子与转子可能发生磨擦和碰撞。

由于异步电动机有气隙存在，异步电机磁路的磁阻比变压器磁路的磁阻大得多，因此激磁电流也大得多。变压器激磁电流为额定激磁电流的 $2\% \sim 10\%$ ，而异步电动机的激磁电流为额定电流的 $20\% \sim 50\%$ ，甚至更高，所以异步电动机功率因数很低。

第三节 异步电动机的工作原理

一、工作原理

异步电动机的定子铁芯里嵌放着对称的三相绕组， $A-X$ ， $B-Y$ ， $C-Z$ ，转子是一个多相闭合绕组，转子上的小圆圈表示转子导体，如图 10-7 所示。三相绕组通以对称的三相电流后，就产生旋转磁场，该磁场以同步转速 n_1 沿着顺时针方向旋转，闭合的转子导体因切割定子旋转磁场而产生感应电势和感应电流。感应电势方向用右手定则确定。转子感应电流与定子磁场相互作用产生电磁力 F ，电磁力的方向由左手定则确定。电磁力形成电磁力矩，拖着转子沿着旋转磁场的转向旋转，将输入的电能转变成转子轴上旋转的机械能，如果电动机轴上带有机机械负载（如金属切削机床），则机械负载随着电动机的旋转而旋转。

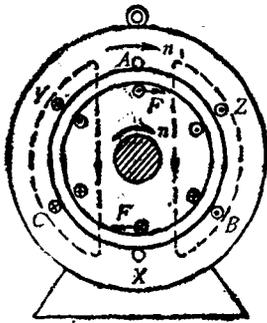


图 10-7 异步电动机工作原理图

由图 10-7 可见，转子转动的方向与旋转磁场转向相同，但转子的转速 n 不能等于旋转磁场转速 n_1 ，如果转 $n = n_1$ ，转子与定子旋转磁场之间就没有相对运动，导体就不能切割磁力线，转子绕组中就无感应电势，也无感应电流，电磁力矩为零，电机就要停转。因此，转子转速 n 小于同步转速 n_1 是异步电动机工作的必要条件。转子转与速定子旋转磁场转速不同步，故称为异步电动机。

二、转差率 s

同步转速 n_1 与转子转速 n 之差 $\Delta n = n_1 - n$ 与同步转速 n_1 的比值称为转差率，用 s 表示，即

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

异步电动机带额定负载运行时，电机转速接近同步转速，所以转差率很小，一般 s 在 $0.01 \sim 0.06$ 之间变化。

转差率反映了转速与旋转磁场转速之间的相对速度。电机的转速、定子和转子电流、电磁力矩、转子感应电势、频率、转子阻抗等物理量和参数都随转差率 s 的变化而变化，而且根据 s 的大小和正负还可以判断异步电动机的各种运行状态，所以转差率是异步电动

机很重要的一个变量。

三、异步电动机的三种运行状态

异步电动机可以作电动机运行，也可以作发电机运行及电磁制动运行，但一般作电动机运行。两极（ N ， S 极）异步电动机的三种运行状态如图10-8所示。

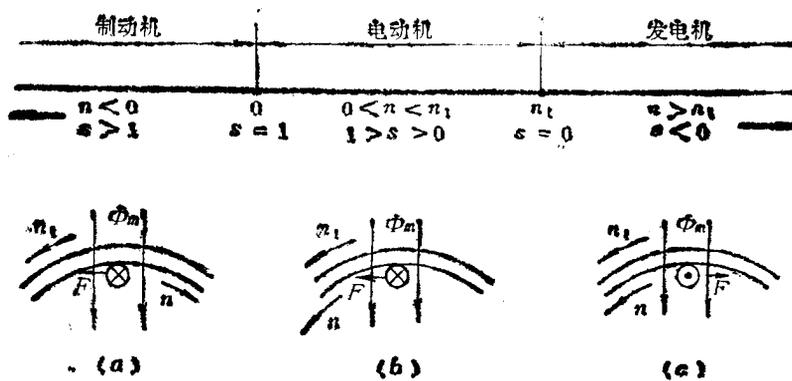


图 10-8 异步电机的三种运行状态

1. 电动机运行

从异步电动机工作原理的分析可知，当异步电机的转速 n 与旋转磁场的转速 n_1 同方向，且 $n < n_1$ 时，异步电机作电动机运行，如图10-8 (b) 所示。此时，旋转磁场以 $\Delta n = n_1 - n > 0$ 的速度切割转子导体，转子导体便产生感应电势和感应电流。转子电流与定子旋转磁场相互作用产生电磁力 F 并形成电磁转矩。电磁力的方向由左手定则确定，它与转子的转向相同，拖动转子旋转并克服负载的制动力矩而对负载输出机械功率。这说明异步电机作电动机运行时，定子从电网吸收电功率，转子向负载输出机械功率。

作电动机运行时，电机的实际转速取决于负载的大小。当电机起动尚未转动时， $n = 0$ ， $s = \frac{n_1 - 0}{n_1} = 1$ ；当异步电动机处于理想空载运行（无空载损耗时的运行）时， $n = n_1$ ， $s = \frac{n_1 - n_1}{n_1} = 0$ 。理想空载运行实际上是不存在的，所以异步电机作电动机运行时，转速和转差率的变化范围分别为 $n_1 > n > 0$ 和 $0 < s < 1$ 。

2. 发电机运行

如果异步电动机的转子上不是接的机械负载，而是用一台原动机拖动异步电动机顺着旋转磁场的方向旋转，且使转速 $n > n_1$ ， $s = \frac{n_1 - n}{n_1} < 0$ 。此时，旋转磁场以 $\Delta n = n_1 - n < 0$ 的速度切割转子导体， $\Delta n < 0$ 就意味着旋转磁场切割转子导体的相对方向与电动机运行状态时相反。因此，转子感应电势、感应电流及电磁力矩的方向也跟随反向，如图10-8 (c) 所示。这时，电磁力矩的方向与转子旋转方向相反，企图阻止转子旋转，故称为制动力矩。为了让转子能继续转下去，并保持 $n = n_1$ ，原动机必须不断地向电机输入机械功率以克服电磁力矩的制动作用。由于转子电流改变了方向，定子电流也随之而改变

方向，说明电机向电网输出电功率，电机处于发电机运行。

3. 电磁制动运行

如果用外力（如起重机放下重物）拖动电机逆着旋转磁场的转向旋转，如图10-8(a)所示。转子逆着磁场方向旋转，转速为负值（ $-n < 0$ ）， $s = \frac{n_1 - (-n)}{n_1} = \frac{n_1 + n}{n_1} > 1$ ，则旋转磁场以高于同步转速的速度 $\Delta n = n_1 + n$ 切割转子导体。旋转磁场切割转子导体的相对方向与电动机运行时相同，因此转子感应电势、感应电流及电磁力矩方向与电动机运行时相同，但电磁力矩与转子旋转方向相反，它对电动机的旋转起制动作用，使电机处于电磁制动运行状态。为了克服电磁制动力矩，外力必须对电机的转子供给机械功率，同时电机的定子又从电网吸收电功率，以反抗机械力矩的作用。也就是说，电机制动运行时，定子从电网吸收电功率，转子从外力吸收机械功率，这两部分功率都在电机内部以损耗的方式转化成热能消耗了。

综上所述，根据异步电机转速和转差率的大小及正负能判断异步电机的不同运行状态。异步电机的三种运行状态的转速、转差率的变化范围如图10-8所示。

第四节 异步电动机的铭牌及额定值

每台电机的机座上都有一块铭牌，铭牌上标注了电机的型号、额定值和额定运行情况下的有关技术数据。按铭牌上所规定的额定值和工作条件运行，称为额定运行。铭牌上的额定值及有关技术数据是正确设计、选择、使用和检修电机的依据。图10-9是三相异步电动机的一块铭牌。

三相异步电动机					
型号	Y90L-4	电压	380V	接法	Y
容量	1.5kW	电流	3.7A	工作方式	连续
转速	1400r/min	功率因数	0.79	温升	75℃
频率	50Hz	绝缘等级	B	出厂年月×年×月	
×××电机厂		产品编号	重量	公斤	

图 10-9 三相异步电动机的铭牌

一、型号

型号是表示电机名称、规格、防护型式、转子类型等所采用的产品代号。我国电机型号一般采用大写印刷体的汉语拼音字母和阿拉伯数字组成。其中汉语拼音字母是根据电机的全名称选择有代表意义的汉字，再用该汉字的第一个拼音字母组成。常用的字母含义是：

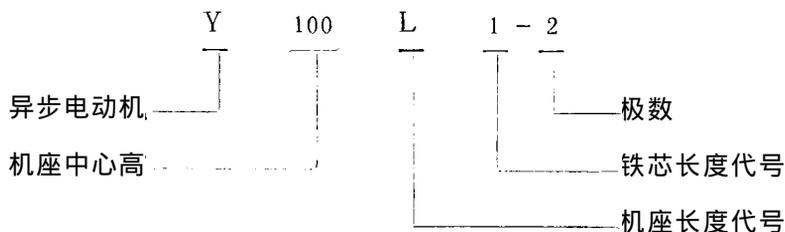
J——交流异步电动机；

Y——异步电动机（新系列）；

O——封闭式（没有O是防护式）；

- R——绕线式转子（没有R为鼠笼式转子）；
- S——双鼠笼式转子；
- C——深槽式转子；
- Z——冶金和起重用的铜条鼠笼式转子；
- Q——高起重转矩；
- L——铝线电机；
- D——多速；
- B——防爆；

现以 Y 系列异步电动机为例说明型号中各字母及阿拉伯数字所代表的含义。



二、额定值

额定值是制造厂对电机在额定工作条件下所规定的一个量值，即铭牌上的值。

1. 额定电压 U_N

在额定运行时，规定加在定子绕组上的线电压称为额定电压，单位为 V 或 kV。

2. 额定电流 I_N

在额定运行时，电动机的线电流称为额定电流，单位为 A 或 kA。

3. 额定功率 P_N

在额定运行时，电动机轴上输出的机械功率称为额定功率。其值为：

$$P_N = \sqrt{3} U_N I_N \eta_N \cos \varphi_N$$

式中 η_N ——电动机在额定运行时的效率；

$\cos \varphi_N$ ——电动机的额定功率因数。

4. 额定转速

在额定运行时，电动机的转子转速称为额定转速，单位 r/min。

5. 额定频率 f_N

额定运行时，电动机定子侧电流、电压的频率称为额定频率，单位为 Hz。我国电网的频率为 50Hz。

6. 接法

在额定电压下运行时，定子三相绕组应采用的联接方法。定子三相绕组共有六个出线端，三相绕组的首端分别用 D_1 、 D_2 、 D_3 表示，三相绕组的末端分别用 D_4 、 D_5 、 D_6 表示，通常把这六个出线端接在机座上的接线盒中，其排列次序如图 10-10 所示。定子三相绕组既可以接成 Y，如图 10-11 所示，也可以接成 Δ ，如图 10-12 所示。究竟是采用哪种接法，要根据电源电压和电机铭牌上标注的联接方法而定。无论是采用 Y 形还是 Δ 形联接，

定子绕组承受的相电压应相等。有些电机铭牌上标有两个电压值和两种接法：额定电压为380/220V、接法为Y/△。这表明定子每相绕组的额定电压是220V。如果电源线电压是220V，定子三相绕组应接成△；如果电源线电压是380V，定子三相绕组应接成Y。使用电动机时，必须按铭牌上的规定接法进行联接，绝对不允许接错，否则会造成严重事故。例如，如果将规定为Y形接法错接成△形，则每相绕组承受的电压增加 $\sqrt{3}$ 倍，电动机很快被烧坏。

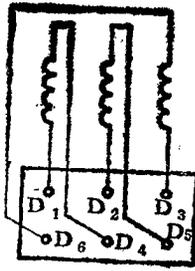


图 10-10 接线盒中六个引线端的排列次序

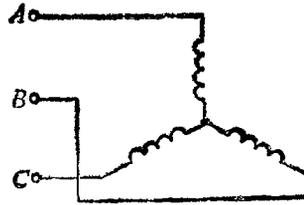


图 10-11 定子绕组的星形连接

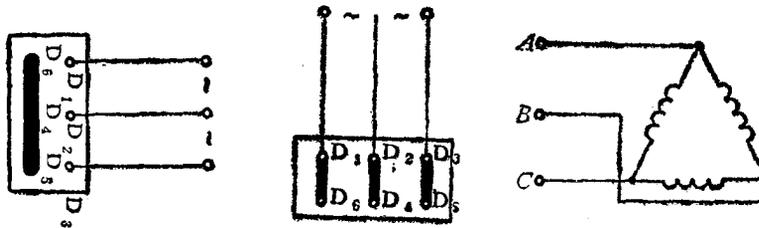


图 10-12 定子绕组的三角形连接

7. 绝缘等级与温升

绝缘等级与温升见本书第二十四章第二节。

绕线型异步电动机的铭牌上，还标有转子绕组的开路电压和转子额定电流，作为选用启动电阻的依据。

请读者注意：电机铭牌上给出的额定电压和额定电流都是线值，而不是相值。

第五节 国产三相异步电动机的常见产品

我国生产的异步电动机种类很多，目前正式生产的中、小型异步电动机系列达60余种。下面简单介绍一些常见的产品系列。

1. Y系列

Y系列IP44为小型鼠笼全封闭自冷式三相异步电动机。用于金属切削机床、通用机械、矿山机械、农业机械、运输机械、压缩机、传送带、磨床、粉碎机、小型起重机等。

Y系列电动机是80年代初期（82年定型设计）的新产品，其综合性能比60年代生产的JO₂和70年代生产的JO₃、JO₄老系列好，因此Y系列电机是JO₂、JO₃、JO₄电机的换代

产品。Y系列电动机用B级绝缘和冷轧无取向硅钢片（ D_{23} ）作铁芯，并采取了很多减小电机噪声及振动的措施。在设计中，对功率等级、安装尺寸、额定值和性能、外壳防护等级、冷却方式、结构及安装型式、线端标记与旋转方向、噪声限制等方面符合IEC标准。因此，Y系列电动机具有体积小、重量轻；效率高、节能效果好；振动小、噪声低；起动力矩大、起动性能好；运行可靠、外型美观等优点，深受用户欢迎。

Y系列异步电动机的技术指标、性能要求、噪声、振动等方面都进入了世界同类产品的先进行列，有些方面还超过国际先进水平。例如，Y系列异步电动机的效率可达88.265%，比西门子公司公司的LLA₄系列高1.56%，总之，Y系列新产品的的设计是先进的、合理的，运行是经济的、可靠的。Y系列新产品的定型设计和推广使用，标志着我国电机事业向前迈进了一大步。Y系列电机是小型异步电动机使用最广的一种产品，据统计，全国生产的小型异步电动机占全国电动机容量的70%，因此Y系列产品的诞生对提高国民经济效益是有很大作用的。

在总结Y系列电动机设计、运行经验的基础上，目前正在进行16个派生系列的设计、研究工作，其中重点是高效电机、船用电机和隔爆型电机，使Y系列电机能适应各方面的要求。高效率电机比普通电机具有效率高的特点，其效率比Y系列提高3%，损耗比Y系列降低20%以上。降低损耗、提高效率的途径是增加有效材料，以降低绕组铜损；采用较好的磁性材料和工艺措施，以降低铁芯损耗；缩小风扇，以降低通风损耗；改进设计和工艺以削弱高次谐波，降低杂散损耗。

2. JQ₂和JQO₂系列

JQ₂和JQO₂系列是高起动转矩异步电动机。用在起动静止负载或惯性负载较大的机械上。

3. JS、JSQ系列

本系列为中型鼠笼式三相异步电动机，其中JS系列采用单笼铸铝式转子，JSQ系列采用双笼转子。本系列电机主要用来拖动通风机、压缩机、水泵、粉碎机、切削机床、运输机械及其它设备。

4. JR、JR₂、JR₃、JRO₂、JRQ系列

这些系列均为防护式三相绕线式异步电动机。这类电机的特点是：起动电流较小；起动力矩较大；功率因数较高；可在一定范围内调速。因此，要求较大起动转矩或起动惯量较大的生产机械可选用这类电机，如起重机，卷扬机等。

5. JSL₂、JRL₂系列

这两个系列是中型立式水泵用的三相异步电动机，其中JSL₂是鼠笼式，JRL₂是绕线式。

6. JZ₂、JZR₂系列

JZ₂是鼠笼式，JZR₂是绕线式，这两个系列都是起重和冶金使用的三相异步电动机。

7. JD₂、JDO₂系列

这两个系列是防护式和封闭式多速异步电动机。主要用于各种金属切削机床和木工机床等设备中，如车床、钻床、铣床、磨床等。

8. JK、JKZ系列

该系列电机为高速中型鼠笼式异步电动机，可用于压缩机、鼓风机、水泵等机械负载。

9. JZT系列

该系列是电磁调速异步电动机。

除前面介绍的一些常见系列外，我国还生产了很多特殊用途的派生系列异步电动机，如JB系列防爆电机，JM系列木工电机，JG系列辊道电机、JQS系列潜水电机等。

第六节 小 结

(1) 异步电动机的主要结构是定子、转子和气隙。定于三相绕组通入三相交流电后产生旋转磁场，转子绕组切割定子旋转磁场而感应电流，转子感应电流与定子旋转磁场相互作用产生电磁转矩，拖动转子旋转，将电能转变成旋转的机械能。

(2) 转子转速小于同步转速是异步电动机工作的必要条件。

(3) 异步电动机的转向与旋转磁场的转向相同，而旋转磁场的转向取决于电流的相序，因此改变电流相序就可以使电动机反转。

(4) 转差率 $S = \frac{n_1 - n}{n_1}$ ，它是异步电机的一个重要变量。

(5) 异步电机有三种运行状态，但一般作电动机运行。异步电机分为鼠笼式和绕线式两种，它们定子结构相同但转子结构不同。绕线式转子绕组是对称的三相绕组，而鼠笼式转子绕组是对称的多相短路绕组。

(6) Y系列小型鼠笼式异步电动机是80年代初期的新产品。它具有体积小，造价低；损耗小，效率高；振动小，噪声低；起动力矩大，运行可靠等优点。该系列电机的技术指标、性能要求都进入了世界同类产品先进行列，深受用户欢迎。

思 考 题 及 习 题

10-1 简述异步电机的工作原理。

10-2 什么叫转差率？为什么异步电动机的转速不能等于同步转速？

10-3 有一台异步电动机，如果 $p=3$ ， $s=5\%$ ， $f=50\text{Hz}$ ，问电机的同步转速和额定转速各是多少？

10-4 有一台异步电动机，额定功率为50kW，额定转速为950r/min时，求电机的磁极对数和额定转差率。如果转速为900r/min时，转差率又是多少？

10-5 如果电源电压是380V，电动机铭牌上的额定电压是380/220V 接法是Y/△。问该电机应接成Y形还是△形？为什么？如果接错了，有何危害？

10-6 有一台三相异步电动机，额定功率 $P_N=75\text{kW}$ ，额定电压 $U_N=380\text{V}$ ，△连接，额定功率因数 $\cos\varphi_N=0.75$ ，额定效率 $\eta_N=92\%$ ，试求电动机的额定电流和绕组电流各为多大？

第十一章 三相异步电动机的运行原理

本章主要分析异步电动机运行时的基本电磁关系，从而导出电势及磁势平衡方程式、等值电路及相量图，这些是分析异步电动机的理论基础。然后，从功率平衡关系引出电磁转矩公式，进而分析异步电动机的机械特性和运行特性。

第一节 三相异步电动机的空载运行

异步电动机的轴上没有带机械负载的运行，称为空载运行。空载运行时，电动机的转速接近同步转速，即 $n \approx n_1$ 。此时，定子旋转磁场与转子之间的相对运动几乎为零，因而转子感应电势 $E_2 \approx 0$ 转子感应电流 $I_2 \approx 0$ 。这时的定子电流称为空载电流，用 I_0 表示。空载电流基本上用来激励旋转磁场，所以，励磁电流近似等于空载电流。

一、主磁通和漏磁通

1. 主磁通 Φ_m

异步电动机定子电流激励的磁通绝大部分穿过气隙，并同时与定、转子绕组相交链的磁通称为主磁通，用 Φ_m 表示。由于 Φ_m 同时交链定、转子绕组，因而同时在定、转子绕组中产生感应电势，转子电流与 Φ_m 相互作用产生电磁力矩，拖动电机旋转，将电能转变成旋转的机械能。显然， Φ_m 在实现电机内部能量转换时起了主要作用，故称为主磁通。

主磁通的路径为：定子铁芯→气隙→转子铁心→气隙→定子铁心，如图11-1(a)所示。

2. 漏磁通 Φ_1

定子电流除产生主磁通 Φ_m 外，还同时产生仅与定子绕组交链而不进入转子磁路的磁通，这部分磁通为定子漏磁通，用 Φ_1 表示。根据漏磁通所经过的路径不同，定子绕组漏磁通由槽漏磁通[如图11-1(b)所示]端部漏磁通[如图11-1(c)所示]和谐波漏磁通三部分组成。

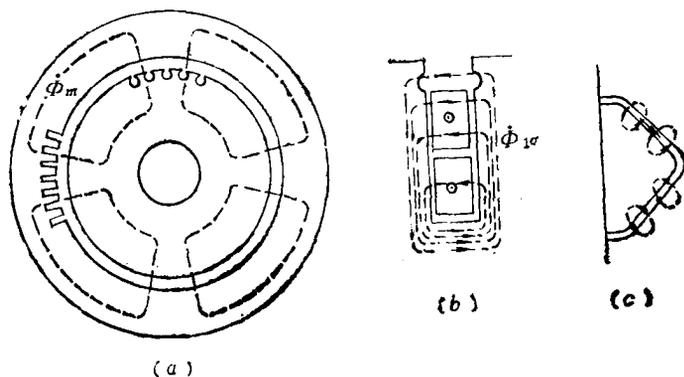


图 11-1 主磁通路径和定子漏磁
(a) 主磁通路径；(b) 槽漏磁；(c) 端部漏磁

二、感应电势

1. 定子绕组电势 E_1

定子三相电流产生的主磁通 Φ_m 是一个旋转磁通，定子绕组因切割旋转磁场而产生感应电势 E_1 。 E_1 滞后磁通 $\Phi_m 90^\circ$ 所以其复数表达式为

$$E_1 = -j4.44k_{w1}N_1f\Phi_m \quad (11-1)$$

式中 k_{w1} ——定子绕组因数；

N_1 ——定子绕组匝数。

异步电动机的定子相当于变压器的原边，转子相当于变压器的副边，因此与变压器空载时一样，感应电势 $-E_1$ 可以用激磁电流 I_0 在激磁阻抗上的压降来表示，即

$$-E_1 = I_0 (r_m + jx_m) = I_0 z_m \quad (11-2)$$

式中 r_m ——激磁电阻，它是反应铁心损耗的等值电阻；

x_m ——激磁电抗，它是对应主磁通的电抗；

z_m ——激磁阻抗 $z_m = r_m + jx_m$ 。

2. 定子绕组的漏电势 $E_{1\sigma}$

定子绕组的漏磁通是一个交变磁通，定子绕组因交链这个交变漏磁通而产生一个漏电势，用 $E_{1\sigma}$ 表示。漏电势可以用激磁电流 I_0 在漏抗 x_1 上的压降来表示。由于 $E_{1\sigma}$ 滞后 $I_0 90^\circ$ ，所以漏电势为

$$E_{1\sigma} = -jI_0 x_1 \quad (11-3)$$

式中 x_1 ——定子漏抗，它是对应定子漏磁通的电抗。

因为 $x_1 = 2\pi f L_{1\sigma}$ 。

而

$$L_{1\sigma} = \frac{\psi}{I_0} = \frac{N_1 \Phi}{I_0}$$

$$\Phi = \frac{F_0}{R_m} = \frac{I_0 N_1}{R_m}$$

所以

$$x_1 = 2\pi f \frac{N_1}{I_0} \times \frac{I_0 N_1}{R_m} = 2\pi f \frac{N_1^2}{R_m} \quad (11-4)$$

式中 $L_{1\sigma}$ ——定子绕组漏电感；

R_m ——漏磁路的磁阻；

N_1 ——定子绕组每相匝数。

式(11-4)表明，漏抗 x_1 随每相绕组匝数的平方而变化，匝数越多，漏抗越大。磁阻越大，漏抗越小。

3. 定子绕组的电阻压降 U_{1r}

定子电流 I_0 通过定子绕组时， I_0 在电阻 r_1 上的压降称为电阻压降，其值为

$$U_{1r} = I_0 r_1 \quad (11-5)$$

式中 r_1 ——定子绕组每相电阻。

三、电压方程式及等值电路

根据基尔霍夫第二定律，定子绕组每一相电路的电压平衡方程式为

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1r} + \dot{U}_{1e} = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_0 x_1 + \dot{I}_0 r_1 \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 (r_1 + jx_1) \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 z_1\end{aligned}\quad (11-6)$$

式中 $z_1 = r_1 + jx_1$ ，为定子每相绕组的漏阻抗。

$\dot{I}_0 z_1$ 是电机空载运行时定子绕组的阻抗压降，占额定电压的 $2\% \sim 5\%$ 。为了使问题简化，作定性分析时，可忽略不计，则

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 = j4.44k_{w1}N_1 f \dot{\Phi}_m \quad (11-7)$$

电机每极主磁通为

$$\Phi_m = \frac{U_1}{4.44k_{w1}N_1 f}$$

当电机制造好以后， k_{w1} 、 N_1 、 f 均为常数，主磁通 Φ_m 与电源电压成正比。如果电源电压 U_1 不变， Φ_m 也不变，即 $\Phi_m = \text{常数}$ （实际上， Φ_m 不是常数，但变化很小，可认为是常数），称为常磁通概念，它是分析电机运行的理论基础。

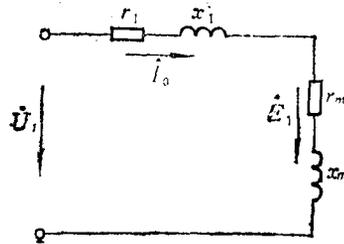


图 11-2 异步电动机空载时的等值电路

注意，式 11-6 中的电源电压 U_1 是相电压而不是线电压。与式 (11-6) 对应的等值电路如图 11-2 所示。

第二节 三相异步电动机的负载运行

异步电动机空载运行时，转子转速接近同步转速，即 $n \approx n_1$ ，转子电流 $I_2 \approx 0$ ，定子电流近似等于激磁电流，即 $I_0 = I_m$ 。

当异步电动机带上负载时，可以观察到：转子速度下降，转子电流 I_2 增大，定子电流 I_1 和输入功率 P_1 随负载的增加（也就是 I_2 的增加）而自动增大。为了解释这种现象，需要分析负载运行时电机内部的电磁过程、转子磁势的性质及其对定子磁势的影响。

一、负载时的转子磁势

1. 转子绕组基波磁势幅值

当异步电动机带上负载时，转子转速减小， $n < n_1$ ，旋转磁场以 $\Delta n = n_1 - n$ 的相对速度切割转子导体，转子绕组便产生感应电势 E_2 和感应电流 I_2 。在 I_2 的作用下，产生转子磁势 F_2 。转子磁势幅值可以仿照定子磁势幅值 F_{1m} 写出，即

$$\begin{aligned}F_{1m} &= \frac{m_1}{2} \times 0.9k_{w1} \frac{N_1}{p} I_1 \\ F_{2m} &= \frac{m_2}{2} \times 0.9k_{w2} \frac{N_2}{p} I_2\end{aligned}\quad (11-8)$$

式中 m_1 、 m_2 ——分别是定、转子绕组的相数；
 N_1 、 N_2 ——分别是定、转子绕组串联的匝数；
 k_{w1} 、 k_{w2} ——分别是定、转子绕组的绕组因数；
 I_1 、 I_2 ——分别是定、转子绕组的相电流。

2. 转子磁势的转向

如果定子磁场 Φ_m 以 n_1 的速度沿 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 相序逆时针方向旋转，则转子绕组感应电势和感应电流的相序也为 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 。由于旋转磁场的转向总是从超前电流相转向滞后的电流相，故转子磁势转向也是从 $A \rightarrow B \rightarrow C$ ，即转子磁势 F_2 与定子磁势 F_1 转向相同。

3. 转子旋转磁势的转速

设转子的转速为 n ，则旋转磁场以 $\Delta n = n_1 - n = sn_1$ 的相对速度切割转子，转子将产生感应电势。转子感应电势的频率为

$$f_2 = \frac{\Delta n p}{60} = \frac{p(n_1 - n)}{60} = \frac{pn_1}{60} \times \frac{n_1 - n}{n_1} = sf_1 \quad (11-9)$$

转子磁极对数恒等于定子磁极对数，所以转子电流产生的旋转磁势相对于转子本身的转速为

$$n_2 = \frac{60f_2}{p_2} = \frac{60sf_1}{p} = sn_1 = n_1 - n \quad (11-10)$$

式中 p_2 ——转子磁极对数， $p_2 = p$ 。

由于转子本身以转速 n 旋转，故转子磁势相对于定子以转速 $n_2 + n$ 旋转，而

$$n_2 + n = n_1 - n + n = n_1 \quad (11-11)$$

式(11-11)表明，转子磁势相对于定子磁势的转速为同步转速，因此，转子磁势与定子磁势之间没有相对运动，也就是说，它们是相对静止的。由于 F_1 与 F_2 总是保持相对静止，所以，异步电动机在任何转速下均能产生恒定的电磁转矩，并进行能量转换。

【例 11-1】 有一台两对磁极的异步电动机，接到 50Hz 的交流电源上，若转子的转差率 $s = 4\%$ ，试求：

- (1) 转子电流的频率 f_2 ；
- (2) 转子转速 n ；
- (3) 转子磁势相对于转子本身的转速 n_2 ；
- (4) 转子磁势相对于定子的转速 n_1 。

解：两对磁极电机的同步转速为

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ (r/min)}$$

- (1) 转子电流的频率为

$$f_2 = sf_1 = 0.04 \times 50 = 2 \text{ (Hz)}$$

- (2) 转子的转速为

$$n = n_1 (1 - s) = 1500 \times (1 - 0.04) = 1440 \text{ (r/min)}$$

- (3) 转子磁势相对于转子本身的转速为

$$n_2 = \frac{60f_2}{p} = \frac{60 \times 2}{2} = 60 \text{ (r/min)}$$

(4) 转子磁势相对于定子的转速为

$$n + n_2 = 1440 + 60 = 1500 \text{ (r/min)}, \text{ 即为同步转速。}$$

二、磁势平衡

由于定子磁势 F_1 和转子磁势 F_2 在空间保持相对静止，因此，异步电动机负载运行时，作用在气隙上的合成磁势应为 $F_1 + F_2$ 。

当外施电压恒定时，异步电动机空载与负载运行时的磁通基本不变，因此，激励这一磁通的空载磁势与负载时的合成磁势应相等，即

$$F_1 + F_2 = F_0$$

$$\text{或} \quad F_1 = F_0 + (-F_2) \quad (11-12)$$

式(11-12)表明，异步电动机负载运行时，定子磁势包括两个分量，其中 F_0 是用来产生主磁通 Φ_m 的励磁磁势，而 $(-F_2)$ 是用来抵消转子磁势 F_2 对主磁通的影响，是定子磁势的负载分量。所以，负载磁势分量与转子磁势大小相等，方向相反。

三、定子电流及电流比

根据旋转磁场的有关结论，可写出励磁磁势、定子磁势、转子磁势的幅值公式为

$$\left. \begin{aligned} F_{0m} &= \frac{m_1}{2} \times 0.9k_{w1} \frac{N_1}{p} I_0 \\ F_{1m} &= \frac{m_1}{2} \times 0.9k_{w1} \frac{N_1}{p} I_1 \\ F_{2m} &= \frac{m_2}{2} \times 0.9k_{w2} \frac{N_2}{p} I_2 \end{aligned} \right\} \quad (11-13)$$

将式(11-13)代入式 11-12 整理后得

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \frac{m_2 N_2 k_{w2}}{m_1 N_1 k_{w1}} \dot{I}_2 = \dot{I}_0 - \frac{\dot{I}_2}{k_i} = \dot{I}_0 + \dot{I}_{1rs} \quad (11-14)$$

式中 k_i —— 异步电动机的电流比， $k_i = \frac{m_1 N_1 k_{w1}}{m_2 N_2 k_{w2}}$ 。

式(11-14)表明，定子电流 I_1 由两个分量组成，其中 I_0 为励磁分量，用来产生主磁通 Φ_m ， I_{1rs} 是定子电流的负载分量，它与转子电流成正比，但方向相反，用来抵消转子电流对主磁通 Φ_m 的去磁作用。所以，转子电流增大时，定子电流必须相应地增大，以补偿转子磁势的去磁作用，维持主磁通 Φ_m 不变。

四、转子绕组的电势平衡方程式

主磁通 Φ_m 在以同步转速切割定子绕组的同时，也以 $\Delta n = n_1 - n$ 的相对速度切割转子绕组，转子每相绕组将产生感应电势 E_2 ，其复数表达式为

$$E_2 = -j4.44k_{w2}N_2f_2\Phi_m \quad (11-15)$$

转子绕组漏磁通 $\Phi_{2\sigma}$ 在每相绕组内感应漏电势 $E_{2\sigma}$ ，将漏电势用电压降表示，则

$$E_{2\sigma} = -jI_2x_2 \quad (11-16)$$

式中 x_2 —— 转子每相绕组漏电抗。

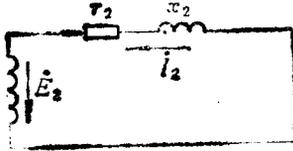
转子电流通过转子绕组时，在转子绕组的电阻上将产生电压降，其值为

$$U_{20} = I_2 r_2 \quad (11-17)$$

式中 r_2 —— 转子绕组每相电阻。

由于转子绕组是闭合的 因此 端电压 U_2 为零。根据基尔霍夫第二定律，可写出转子绕组电压平衡方程式为

$$\begin{aligned} \dot{E}_2 - \dot{I}_2 r_2 - j \dot{I}_2 x_2 &= 0 \\ \dot{E}_2 &= \dot{I}_2 r_2 + j \dot{I}_2 x_2 = \dot{I}_2 (r_2 + j x_2) = \dot{I}_2 z_2 \quad (11-18) \end{aligned}$$



式中 z_2 —— 转子绕组的漏阻抗， $z_2 = r_2 + j x_2$ 。

与式(11-18)相对应的等值电路如图11-3所示。

示。

图 11-3 转子转动时的等值电路

五、转子绕组的电势和电流

异步电动机的转差率 s 随负载的变化而变化，转子电流的频率、阻抗、感应电势和电流也随之发生变化。为了得出这些物理量与转差率之间的关系，下面对转子不动和转子转动两种情况分别进行讨论。

1. 转子不动时的情况

转子不动时， $n=0$ ， $s=1$ ，定子旋转磁场以同步转速 n_1 切割转子导体，产生感应电势 E_{20} ，其感应电势的频率为

$$f_{20} = \frac{p n_1}{60} = f_1 \quad (11-19)$$

转子感应电势为

$$E_{20} = 4.44 k_{w2} N_2 f_1 \Phi_m \quad (11-20)$$

转子绕组漏抗为

$$x_{20} = 2\pi f_1 L_{2\sigma} \quad (11-21)$$

转子绕组电流为

$$I_{20} = \frac{E_{20}}{\sqrt{r_2^2 + x_{20}^2}} \quad (11-22)$$

转子功率因数为

$$\cos \varphi_{20} = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + x_{20}^2}} \quad (11-23)$$

定子与转子相电势之比称为电压比，用 k_e 表示，则

$$k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{k_{w1} N_1}{k_{w2} N_2} \quad (11-24)$$

异步电动机的电压比与变压器的电压比类似，但不同的是异步电动机的电压与绕组因数有关。

异步电动机转子不动时的情况与变压器副边短路时的运行情况相同。

2. 转子转动时的情况

前面已分析过，异步电动机转子转动时，转子电流的频率与转差率成正比，即

$$f_2 = sf_1$$

由于转子电流频率 f_2 随 s 而变化, 因此转子电势、电流、电抗、功率因数都将随 s 的变化而变化, 即

$$E_2 = 4.44k_w N_2 f_2 \Phi_m = sE_{20} \quad (11-25)$$

$$x_2 = 2\pi f_2 L_{2\sigma} = sx_{20} \quad (11-26)$$

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2}} = \frac{sE_{20}}{\sqrt{r_2^2 + (sx_{20})^2}} \quad (11-27)$$

$$\cos\varphi_2 = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2}} = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_{20})^2}} \quad (11-28)$$

式(11-25)表明, 异步电动机转子感应电势 E_2 与转差率 s 成正比。因 s 越大, 定子旋转磁场切割绕组的相对速度越大, 所以转子感应电势 E_2 也越大。

式(11-26)表明, 转子绕组漏抗 x_2 与转差率 s 成正比。因 $x_2 = 2\pi f_2 L_{2\sigma} = 2\pi s f_1 L_{2\sigma}$, 所以 s 越大, x_2 也越大。

式(11-27)和(11-28)表明, 转子电流和转子电路的功率因数 $\cos\varphi_2$ 都随转差率 s 的变化而变化。当 s 增大时, I_2 增大, $\cos\varphi_2$ 减小。

I_2 和 $\cos\varphi_2$ 随转差率 s 的变化曲线如图 11-4 所示。

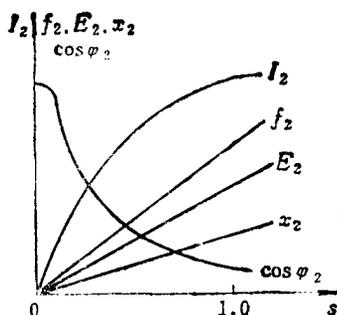


图 11-4 转子各量与转差率的关系

【例 11-2】有一台四极异步电动机, 额定频率为 50 Hz, 额定转速为 1425 r/min 转子电路的参数: $r_2 = 0.02 \Omega$, $x_{20} = 0.08 \Omega$, $k_s = \frac{E_1}{E_2} = 10$, 当 $E_1 = 200 \text{ V}$ 时, 试求:

- (1) 转子不动时, 转子绕组每相的 E_{20} 、 I_{20} 、 $\cos\varphi_{20}$ 和 f_{20} ;
- (2) 在额定转速时, 转子绕组每相的 E_2 、 I_2 、 $\cos\varphi_2$ 和 f_2 。

解:(1) 转子不动时

$$\text{转子电势 } E_{20} = \frac{E_1}{k_s} = \frac{200}{10} = 20 \text{ (V)}$$

$$\text{转子电流 } I_{20} = \frac{E_{20}}{\sqrt{r_2^2 + x_{20}^2}} = \frac{20}{\sqrt{0.02^2 + 0.08^2}} = 242.5 \text{ (A)}$$

转子功率因数

$$\cos\varphi_{20} = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + x_{20}^2}} = \frac{0.02}{\sqrt{0.02^2 + 0.08^2}} = 0.242$$

转子电势频率

$$f_{20} = f_1 = 50 \text{ (Hz)}$$

(2) 额定转速时

$$\text{同步转速 } n_1 = \frac{60f_1}{p} = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ (r/min)}$$

$$\text{额定转差率 } s_N = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{1500 - 1425}{1500} = 0.05$$

$$\text{转子电势频率 } f_2 = sf_1 = 0.05 \times 50 = 2.5 \text{ (Hz)}$$

$$\text{转子电势 } E_2 = sE_{20} = 0.05 \times 20 = 1 \text{ (V)}$$

$$\text{转子漏抗 } x_2 = sx_{20} = 0.05 \times 0.08 = 0.004 \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$\text{转子电流 } I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2}} = \frac{1}{\sqrt{0.02^2 + 0.004^2}} = 49 \text{ (A)}$$

$$\text{功率因数 } \cos\varphi_2 = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2}} = \frac{0.02}{\sqrt{0.02^2 + 0.004^2}} = 0.98$$

从以上计算可知，电动机起动时（转子不动），功率因数低，起动电流大，约为额定电流的 5 倍（ $242.5 \div 49 \approx 5$ ）。电机额定运行时，转子电势频率很低，功率因数较高。但必须注意， $\cos\varphi_2$ 是转子电路的功率因数。电动机的功率因数应为定子电路的 $\cos\varphi_1$ 。

第 三 节 折 算

异步电动机的定子电路和转子电路之间只有磁的耦合而无电的直接联系，如图 11-5 所示。异步电动机正常运行时，定子电流的频率为 f_1 ，转子电流的频率 $f_2 = sf_1$ ，且定、转

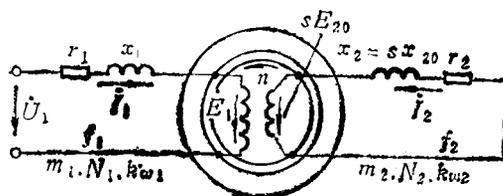


图 11-5 异步电动机定、转子磁耦合电路示意图

子绕组的相数、有效匝数、绕组因数均不相同，因而转子和定子两个电路不能联在一起，致使定量计算（电流、功率、力矩的计算）十分困难。为了便于分析和简化计算，必须象变压器一样，把定、转子之间磁的耦合变成电的直接联系，即把定、转子两个独立电路连成一个等值电路。为了导出异步电动机的等效电路，需要首先进行“频率折算”和“绕组折算”。

一、频率折算

异步电动机定子各物理量的频率是 f_1 ，转子各物理量的频率 $f_2 = sf_1$ ，不同频率的物理量不能联立求解，也不能相量相加。因此，作定量计算时，必须首先进行频率折算。

折算就是进行等值变换。所谓频率折算，就是用一个静止的转子电路来代替实际的旋转的转子电路，使转子电势、电流的频率 $f_2 = sf_1$ 与定子电势、电流的频率 f_1 相等，即 $f_2 \cdot sf_1 = f_1$ 。所谓等效就是频率折算前后转子磁势 F_2 不变（同幅值、同相位、同转速）。前面已经分析过，转子对定子的影响是通过 F_2 来实现的。由于频率折算时，遵循了折算前后 F_2 不变的原则，所以这个静止的等效转子电路可以代替实际的转子电路。

转子转动时的电流为

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_{20}}{r_2 + jx_2} = \frac{s\dot{E}_{20}}{r_2 + jsx_{20}} \quad (11-29)$$

将式(11-29)的分子和分母同除以 s ，则

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_{20}}{\frac{r_2}{s} + jx_{20}} = \frac{\dot{E}_{20}}{r_2 + \frac{1-s}{s}r_2 + jx_{20}} \quad (11-30)$$

式(11-29)与式(11-30)所表示的转子电流大小相等，相位相同，是一种等值变换，但是它们所代表的物理意义却不相同。式(11-29)代表转子旋转时的情况， $E_2 = sE_{20}$ 是转子转动时的电势，其频率为 $f_2 = sf_1$ ，漏抗与转差率成正比。式(11-30)代表转子已变换成静止时的等效情况，转子电势 E_{20} 、漏抗 x_{20} 都是对应于频率 f_1 的量，与转差率 s 无关。比较式(11-29)和式(11-30)可知，在不动的转子电路中将转子电阻 r_2 改为 $\frac{r_2}{s}$ 。

或者说在不动的转子电路中串入一个附加电阻 $\frac{1-s}{s}r_2$ ，就可以使不动时的转子电流、转子磁势的大小和相位与转动时完全一样。也就是说，这台静止不动的异步电动机可以等效地代替实际旋转的异步电动机。代替后转子频率与定子频率相等，使分析大大简化。

经过频率折算后的异步电动机定、转子的等值电路图如图11-6所示。这个电路与一个具有纯电阻负载时的变压器电路相似。

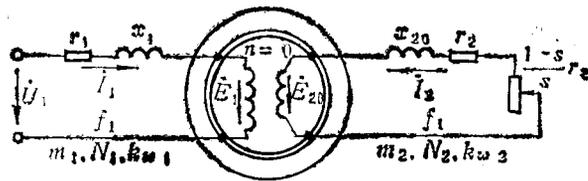


图 11-6 频率折算后异步电动机的定、转子等值电路图

附加电阻 $\frac{1-s}{s}r_2$ 在转子电路中将消耗功率，而在实际电机的转子中并不存在这项电阻损耗，但要产生轴上的机械功率。由于静止的转子与旋转的转子等效，有功功率应相等，因此消耗在电阻 $\frac{1-s}{s}r_2$ 中的电功率 $m_2 I_2^2 \frac{1-s}{s}r_2$ 就代替了实际电机轴上所产生的总的机械功率（这就是附加电阻 $\frac{1-s}{s}r_2$ 的物理意义）。即 $\frac{1-s}{s}r_2$ 是异步电动机轴上总机械功率的等效电阻。

二、绕组折算

经过频率折算后，定、转子电势的频率相等，但定子和转子绕组的相数、每相串联匝数和绕组因数仍不相同，因此需要进行绕组折算。所谓绕组折算，就是用一个和定子绕组具有同样相数 m_1 、匝数 N_1 和绕组因数 k_{w1} 的等效绕组，去代替相数为 m_2 、匝数为 N_2 和绕组因数为 k_{w2} 的实际转子绕组。所谓等效就是折算前后，转子磁势、有功损耗、无功储能

等均保持不变。

1. 电流折算

折算前后，转子磁势应保持不变，即

$$0.9 \frac{m_1}{2} \times \frac{N_1 k_{w1}}{p} I'_2 = 0.9 \frac{m_2}{2} \times \frac{N_2 k_{w2}}{p} I_2$$

$$I'_2 = \frac{m_2 N_2 k_{w2}}{m_1 N_1 k_{w1}} I_2 = \frac{1}{k_i} I_2 \quad (11-31)$$

式中 $k_i = \frac{m_1 N_1 k_{w1}}{m_2 N_2 k_{w2}}$ —— 异步电动机的电流变比。

2. 电势的折算

折算前后转子总的视在功率应保持不变，即

$$m_1 E'_2 I'_2 = m_2 E_2 I_2$$

$$E'_2 = \frac{N_1 k_{w1}}{N_2 k_{w2}} E_2 = k_e E_2 \quad (11-32)$$

式中 $k_e = \frac{N_1 k_{w1}}{N_2 k_{w2}}$ —— 异步电动机的电压变比。

3. 阻抗的折算

折算前后转子绕组铜损应保持不变，即

$$m_1 I_2'^2 r_2' = m_2 I_2^2 r_2$$

$$r_2' = \frac{m_2 I_2^2}{m_1 I_2'^2} r_2 = \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{N_1 k_{w1}}{N_2 k_{w2}} \right)^2 r_2 = k_i k_e r_2 = k r_2 \quad (11-33)$$

式中 $k = k_i k_e$ —— 异步电动机的阻抗变比。

折算前后转子无功功率应保持不变，即

$$m_1 I_2'^2 x_2' = m_2 I_2^2 x_2$$

$$x_2' = \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{N_1 k_{w1}}{N_2 k_{w2}} \right)^2 x_2 = k_i k_e x_2 = k x_2 \quad (11-34)$$

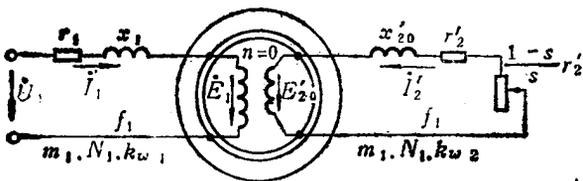


图 11-7 绕组折算后异步电动机的定、转子等值电路图

转子是虚拟的等效运算状态。折算后的定、转子电路图如图 11-7 所示。

第四节 等值电路及相量图

异步电动机经过频率折算后，定、转子便具有相同的频率 $f_2 = f_1$ 。经过绕组折算后，定、转子感应电势相等，即 $E'_2 = E_1$ 。由于经过折算后定、转子绕组感应电势的大小和频率都相等，因此可以把定、转子绕组对应的等电位点连接起来，合并成一个等值电路。

一、基本方程组及 T 型等值电路

如图 11-8 所示，经过频率及绕组折算后，电动机的基本方程组为

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + jx_1) \\
 \dot{E}_1 &= -\dot{I}_0 (r_m + jx_m) \\
 \dot{E}_1 &= \dot{E}'_{20} \\
 \dot{E}'_{20} &= \dot{I}'_2 z'_2 = \dot{I}'_2 \left(r'_2 + \frac{1-s}{s} r'_2 + jx'_{20} \right) \\
 \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 &= \dot{I}_0
 \end{aligned} \right\} \quad (11-35)$$

根据上面的方程组可以画出异步电动机的 T 形等值电路，如图 11-8 所示。这个 T 形等值电路与变压器接有纯电阻负载时的 T 形等值电路相似，其负载电阻为 $\frac{1-s}{s} r'_2$ 。

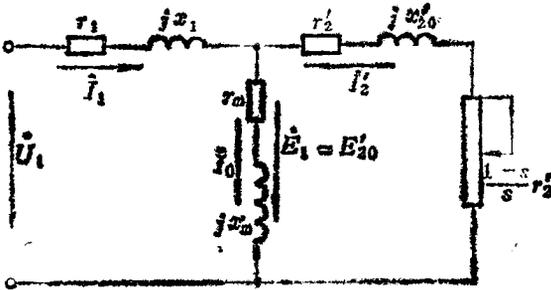


图 11-8 异步电动机的 T 形等值电路

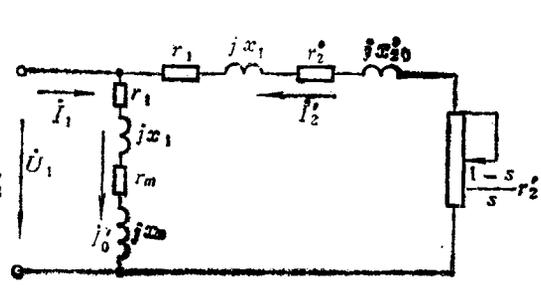


图 11-9 异步电动机的简化等值电路

二、简化等值电路 (Γ 形等值电路)

Γ 形等值电路是一个混联电路，计算起来比较复杂。因此在实际应用时，常把激磁支路移到电源端，等值电路就简化为单纯的并联电路，使计算更为简化。所以这种电路称为简化等值电路，也叫做 Γ 形等值电路，如图 11-9 所示。

异步电动机与变压器一样，可以把 T 形等值电路中间的激磁支路移到电源端，变成 Γ 形等值电路。在变压器中，由于 z_m 很大， I_0 和 z_1 很小，所以把激磁支路移到电源端，不会引起过大的误差。但在异步电动机中，由于 z_m 较小， I_0 较大，定子漏抗 z_1 比变压器的也大，所以激磁支路直接移到电源端，将引起较大的误差，特别是对小型电机，常不能满足工程上所需要的准确度。因此，为了消除误差，激磁支路应引入定子漏抗 z_1 ，主回路中的定子漏抗应乘以修正系数 c_1 ，转子漏抗应乘以 c_2 。但对 40kW 以上的异步电动机，用图 11-9 所示的 Γ 形等效电路，可以满足准确度的要求。激磁回路串入定子漏抗 z_1 ，用来校正所加电压增大对激磁电流的影响。

从等值电路可以看出，当异步电动机空载运行时， $n=n_1$ ， $s=0$ ，负载电阻趋于无穷大， $I'_2 \approx 0$ ，这时的定子电流基本上是激磁电流 I_0 ，故电动机空载运行时的功率因数很低。当电动机在额定负载运行时，转差率 $s \approx 0.05$ ， $\frac{r'_2}{s}$ 约为 r'_2 的 20 倍左右，转子电路呈阻性，转子功率因数较高，可达 0.8~0.85。

三、相量图

根据式 (11-35) 基本方程式，可以作出异步电动机的相量图，如图 11-10 所示。作图

的方法和步骤与变压器完全一样，这里不再赘述。由图可见，异步电动机的相量图与变压器具有纯电阻负载时的相量图相同。

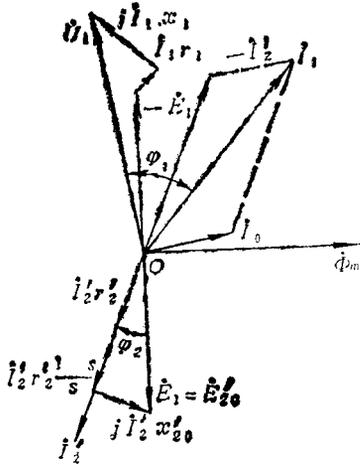


图 11-10 异步电动机的相量图

相量图直观地反映了异步电动机各物理量的大小和相位关系，因此作定性分析时常用相量图。等值电路如实地反映了异步电动机内部的电流、功率、转矩等物理量之间的相互关系，因此作定量计算时常用等值电路。需要注意的是：由等值电路计算出来的所有定子边的各物理量，均为电机中的实际值，由等值电路计算出来的转子电势、电流、阻抗等则为折算值。

如果要得到转子的实际值，还必须利用式 (11-31) ~ (11-34) 折算回去。由于折算是在功率不变的条件下进行的，因此用折算值计算的转子功率、损耗和转矩均与实际值相同。

第五节 异步电动机的功率及转矩平衡方程式

异步电动机将电能转变成机械能是通过转子上产生的电磁力矩而实现的。因此，电磁力矩是分析异步电动机性能的一个十分重要的物理量。这一节将用等值电路来分析电动机的能量转换过程、功率及转矩平衡方程式。

一、功率平衡方程式

在电源电压作用下，由电网供给异步电动机的有功功率称为输入功率，其值为

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (11-36)$$

式中 m_1 —— 定子绕组相数；

U_1 —— 定子绕组相电压；

I_1 —— 定子绕组相电流；

$\cos \varphi_1$ —— 异步电动机的功率因数。

输入功率中的一部分消耗在定子电阻 r_1 上，称为定子绕组铜损，其值为

$$p_{O_{u1}} = m_1 I_1^2 r_1 \quad (11-37)$$

另一小部分消耗于铁心中的涡流及磁滞损耗，称为铁损，其值为

$$p_{Fe} = m_1 I_0^2 r_m \quad (11-38)$$

输入功率 P_1 减去定子铜损和铁损以后，剩下的大部分功率借助气隙旋转磁场，通过电磁感应由定子传递到转子，这部分功率称为电磁功率，其值为

$$P_M = P_1 - p_{O_{u1}} - p_{Fe} \quad (11-39)$$

由图 11-8 等值电路可知

$$P_M = m_1 E_2' I_2' \cos \varphi_2 = m_1 I_2'^2 r_2' + m_1 I_2'^2 \frac{1-s}{s} r_2' \quad (11-40)$$

电磁功率一部分消耗在转子绕组电阻 r_2' 上, 称为转子绕组铜损, 其值为

$$p_{Cu2} = m_1 I_2'^2 r_2' \quad (11-41)$$

电磁功率减去转子铜耗以后, 余下的大部分功率消耗在附加电阻 $\frac{1-s}{s} r_2'$ 上, 称为轴上的总机械功率, 其值为

$$P_o = m_1 I_2'^2 \frac{1-s}{s} r_2' \quad (11-42)$$

异步电动机转动时, 还存在着轴承摩擦及风阻摩擦等所引起的机械损耗 p_o 和杂散损耗 p_Δ 。总机械功率减去机械损耗和杂散损耗以后就是电机轴上实际输出的机械功率。其值为

$$P_2 = P_o - (p_o + p_\Delta) \quad (11-43)$$

综上所述可得功率平衡方程式为

$$P_2 = P_1 - (p_{Cu1} + p_{Fe} + p_{Cu2} + p_o + p_\Delta) = P_1 - \Sigma p \quad (11-44)$$

式中 Σp ——电机的总损耗, $\Sigma p = p_{Cu1} + p_{Fe} + p_{Cu2} + p_o + p_\Delta$ 。

与功率平衡方程式 (11-44) 相对应的

功率流程图如图 11-11 所示。

二、转子铜损与电磁功率之间的关系

$$\left. \begin{aligned} \frac{p_{Cu2}}{P_M} &= \frac{m_1 I_2'^2 r_2'}{m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s}} = s \\ p_{Cu2} &= s P_M \end{aligned} \right\} \quad (11-45)$$

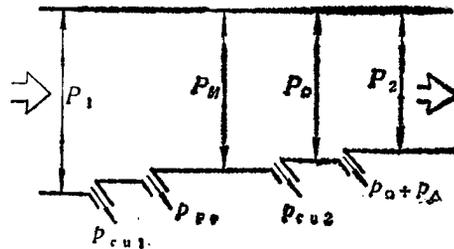


图 11-11 异步电动机的功率流程图

式(11-45)表明:

(1) 转子铜损等于电磁功率 P_M 与转差率 s 的乘积。 s 越大, 转子铜损越大, 效率越低。为了提高效率, 异步电动机正常运行时的转差率很小, 一般 $s = 0.01 \sim 0.05$ 。

(2) 改变转子电阻就可以改变转差率, 即改变转子回路电阻就可以调速。

三、转矩平衡方程式

因为机械功率等于转矩乘以机械角速度 ($\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ rad/s) 所以将式 (11-43) 两边除以转子的机械角速度 Ω , 整理就可以得出相应的转矩方程式

$$\left. \begin{aligned} \frac{P_o}{\Omega} &= \frac{P_2}{\Omega} + \frac{p_o + p_\Delta}{\Omega} \\ M &= M_2 + M_{o+\Delta} = M_2 + M_o \end{aligned} \right\} \quad (11-46)$$

即

式中 M ——电磁转矩, $M = \frac{P_o}{\Omega}$;

M_2 ——电动机输出的机械转矩, $M_2 = \frac{P_2}{\Omega}$;

$M_{\omega+d}$ ——机械及杂散损耗转矩， $M_{\omega+d} = \frac{p_{\omega} + p_d}{\Omega}$ 。

M_0 ——空载转矩。

式(11-46)表明，电动机的电磁转矩减去轴上的空载阻力矩后，才是电动机轴上的输出力矩。

第六节 异步电动机的电磁转矩

一、电磁转矩的物理表达式

式(11-40)表明异步电动机的电磁功率为

$$P_M = m_1 E_2' I_2' \cos \varphi_2$$

因此，电磁转矩为

$$M = \frac{P_M}{\Omega_1} = \frac{m_1 E_2' I_2' \cos \varphi_2}{\frac{2\pi n_1}{60}} \quad (11-47)$$

式中 Ω_1 ——旋转磁场的同步角速度 (rad/s)。

$$\Omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{2\pi f_1}{p}$$

转子感应电势

$$E_2' = 4.44 k_{w1} N_1 f_1 \Phi_m$$

将 Ω_1 和 E_2' 之值代入式(11-47)，

$$\begin{aligned} M &= \frac{4.44 k_{w1} m_1 N_1 f_1 \Phi_m I_2' \cos \varphi_2}{2\pi f_1 / p} \\ &= C_M \Phi_m I_2' \cos \varphi_2 \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \end{aligned} \quad (11-48)$$

式中 C_M ——电磁力矩常数， $C_M = \frac{4.44 k_{w1} m_1 N_1 p}{2\pi}$ 。

式(11-48)表明，电磁力矩是由气隙主磁场和转子有功电流相互作用产生的，且电磁力矩的大小与主磁场及转子电流的有功分量成正比。正常运行时，电源电压 U_1 、电压频率 f_1 和定子绕组匝数 N_1 是不变的， Φ_m 基本上是一个常数，因此电磁转矩与电流有功分量成正比。要想增大电磁转矩，就必须增大转子电流的有功分量，即不仅要增大转子电流而且要提高转子电路的功率因数。为了增大起动力矩，起动时常在转子回路中串入电阻，以提高转子电路功率因数。

公式(11-48)对定性分析异步电动机运行中发生的一些物理现象是很有用的，但作定量计算时并不方便，因运行技术数据中不包括主磁通 Φ_m ，鼠笼式转子电流是无法测量的。为了计算方便，需要进一步推导电磁转矩与电源电压、频率、转差率、电机参数之间的关系。

二、电磁力矩的参数表达式

综上所述，电磁力矩为

$$M = \frac{P_m}{\Omega_1} = \frac{3(I_2')^2 \frac{r_2'}{s}}{2\pi f_1/p} \quad (11-49)$$

由图 11-9 等值电路求得转子电流

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_{20}')^2}} \quad (11-50)$$

将式(11-50)代入式(11-49)得

$$M = \frac{3pU_1^2 \frac{r_2'}{s}}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_{20}')^2 \right]} \quad (11-51)$$

式(11-51)是作定量计算时常用的公式。计算时要特别注意的是电源电压 U_1 是相电压而不是线电压。

第七节 异步电动机的机械特性

一、转矩特性

由式(11-51)可知, 当电源电压 $U_1 = \text{常数}$, 电压频率 $f_1 = \text{常数}$ 时, 电磁力矩 M 是转差率 s 的函数, 电磁力矩 M 与转差率 s 之间的关系曲线即 $M = f(s)$ 曲线称为力矩特性, 如图 11-12 所示。

当 $s=0$ 时, 转子转速等于同步转速, 转子电流为零, 电磁力矩也等于零。当 s 开始从零增大时, $\frac{r_2'}{s}$ 很大则 $\frac{r_2'}{s} \gg r_1$, $\frac{r_2'}{s} \gg$

($x_1 + x_{20}'$), 因此, r_1 和 $(x_1 + x_{20}')$ 可

略去不计, 电磁力矩随 s 的增大而增大。当电磁力矩达到最大值 M_{\max} 以后, s 较大, $\frac{r_2'}{s}$ 较小, 则 $\frac{r_2'}{s} \ll (x_1 + x_{20}')$, 因此 $\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)$ 可略去不计, 电磁力矩随 s 的增大而减小。当 $s=1$ 时, 电磁力矩降到起动力矩 M_{st} 。

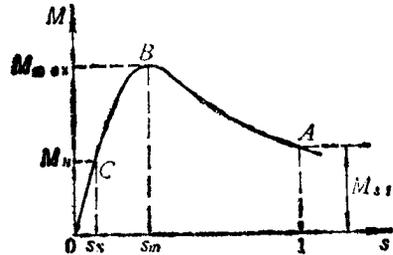


图 11-12 异步电动机的转矩特性曲线

二、额定转矩 M_N

异步电动机带额定负载时的输出转矩称为额定转矩, 用 M_N 来表示, 其值为

$$M_N = \frac{P_N \times 10^3}{2\pi n_N/60} = 9550 \frac{P_N}{n_N} \quad (\text{N}\cdot\text{m}) \quad (11-52)$$

式中 P_N —— 异步电动机的额定功率, kW;

n_N —— 异步电动机的额定转速, r/min。

三、最大转矩和过载能力

1. 最大转矩 M_{\max}

由式(11-51)可见, 电磁转矩有一个最大值, 此最大值称为最大转矩, 用 M_{\max} 表

示。电机正常运行时，只要负载转矩不超过电机的最大转矩，电机就可以短时过载运行，因此最大转矩可以反映电机过载能力的大小。如果负载转矩大于最大转矩，电机就不能继续转动，所以最大转矩又称为停转转矩。

将式(11-51)中的电磁转矩 M 对转差率 s 微分，并让

$$\frac{dM}{ds} = 0$$

便可求出产生最大转矩时的转差率 s_m ， s_m 称为临界转差率，其值为

$$s_m = \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_{20})^2}} \quad (11-53)$$

将式(11-53)代入式(11-51)中，便可求得最大电磁转矩

$$M_{max} = \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 [r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_{20})^2}]} \quad (11-54)$$

因为 $r_1 \ll (x_1 + x'_{20})$ ， r_1 可略去不计，所以 s_m 和 M_{max} 分别为

$$\left. \begin{aligned} s_m &= \frac{r'_2}{x_1 + x'_{20}} \\ M_{max} &= \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 (x_1 + x'_{20})} \end{aligned} \right\} \quad (11-55)$$

综上所述，最大电磁转矩具有以下特点：

(1) 当电源频率和电机参数一定时，异步电动机的最大转矩与电源电压的平方成正比，即 $M_{max} \propto U_1^2$ ，但临界转差率 s_m 与电源电压无关。

(2) 最大电磁转矩 M_{max} 的大小与转子回路内的电阻 r'_2 的大小无关，但临界转差率 s_m 与 r'_2 成正比， r'_2 增大， s_m 增大。因此，在转子回路串入电阻可以改变转矩特性曲线，如图11-13所示。因此绕线式异步电动机的转子回路常常串有可变电阻，通过调节可变电阻来改变转矩特性，达到改善起动性能和调节转速的目的。

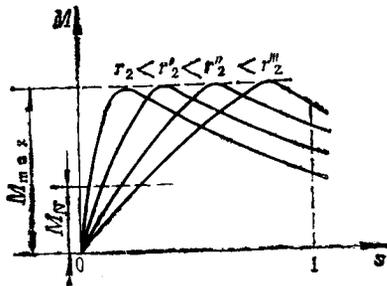


图 11-13 不同 r'_2 时的转矩特性曲线

(3) 如果忽略电阻 r_1 ，当电源电压 U_1 和频率 f_1 不变时，最大转矩 M_{max} 与电机参数 $(x_1 + x'_{20})$ 成反比。

(4) 如果忽略电阻 r_1 ，当电源电压不变时，最大电磁力矩与频率的平方成反比，

$$\text{即 } M_{max} \propto \frac{1}{f_1^2}$$

2. 过载能力 k_m

电动机的最大转矩与额定转矩之比称为

过载能力，用 k_m 表示，即

$$k_m = \frac{M_{max}}{M_N} \quad (11-56)$$

如果负载转矩大于电动机的最大转矩，电动机就要停转，为了保证电动机不因短时过载而停转，要求电动机具有一定的过载能力。国家标准规定，普通三相异步电动机的过载能力

$k_m=1.8\sim 2.2$ ，Y系列异步电动机的过载能力 $k_m=2\sim 2.2$ ，起重和冶金用电动机的过载能力 $k_m=2.2\sim 2.8$ 或更高。

四、起动转矩

当电动机刚与电源接通，转子还未转动（ $s=1$ ）时的转矩称为起动转矩，用 M_{st} 表示。起动转矩大于轴上的负载转矩，电动机就能起动，否则不能起动。

将 $s=1$ 代入式(11-51)，可得起动转矩

$$M_{st} = \frac{m_1 p U_1^2 r_2'}{2\pi f_1 [(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2]} \quad (11-57)$$

式(11-57)表明：

- (1) 当 f_1 和电机参数一定时，起动转矩与电源电压的平方成正比，即 $M_{st} \propto U_1^2$ 。因此，改变电源电压，可以改变转矩特性曲线，如图11-14所示。
- (2) 当电源电压和频率一定时，漏抗（ $x_1 + x_2'$ ）越大， M_{st} 越小。
- (3) 起动转矩与转子回路电阻 r_2' 成正比，因此在转子回路串入电阻可以增大起动力矩。当转子回路电阻与电机的漏抗相等时，起动力矩等于最大力矩。因此，要想在电机起动时得到最大力矩，必须将转子电阻增加到与电机漏抗相等即

$$R_2' = r_2' + r_f' = x_1 + x_2, \quad (11-58)$$

式中 r_f' ——转子回路的外串电阻；

R_2' ——转子回路总电阻。

- (4) 起动转矩随频率的增大而减小。

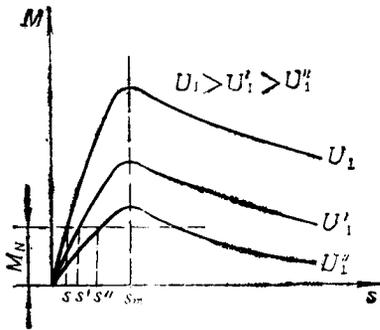


图 11-14 电源电压不同时的转矩特性曲线

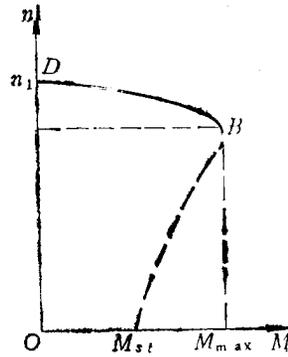


图 11-15 异步电动机的机械特性

五、机械特性

当异步电动机的电源电压 U_1 和电压频率 f_1 保持不变时，电动机的转速与电磁力矩之间的关系曲线 $n=f(M)$ 称为机械特性。只要将图11-12的转矩特性曲线 $M=f(s)$ 的横坐标和纵坐标对调，并利用 $n=(1-s)n_1$ 将转差率 s 换成对应的转子转速 n ，就可以得到 $n=f(M)$ 机械特性曲线，如图11-15所示。

机械特性分为固有机械特性和人为机械特性两种。

1. 固有机械特性

当异步电动机的定子加额定电压、额定频率，转子回路不另串附加电阻、附加电抗或附加电容时的机械特性称为固有机械特性，如图11-15所示。通常，异步电动机稳定运行在曲线DB段上。从这段曲线可以看出，由于转子绕组本身的电阻 r_2 较小，所以转矩有较大变化时，转速变化并不大，这种机械特性称为硬特性。

2. 人为机械特性

为了适应不同机械负载对电机转矩及转速的需要，为了改善电机的起动和调速性能，可以通过改变电源电压，频率和转子回路电阻等方法来改变机械特性，这种机械特性称为人为机械特性。

(1) 改变电源电压 U_1 的人为机械特性。

增加或减小电压都可以改变机械特性，但由于异步电动机在额定状态运行时，磁路已开始进入饱和，不宜再升高电压来改变机械特性。所以，这里只讨论降低定子端电压 U_1 时的人为机械特性。

由于异步电动机的同步转速 n_1 与电源电压 U_1 的大小无关，因此降低电源电压 U_1 不会引起 n_1 的变化，即是说不同电压 U_1 的人为机械特性都通过 o 点，对应的转速为 n_1 ，如图11-16所示。又因 $M \propto U_1^2$ ，所以最大转矩 M_{max} 和起动转矩 M_{st} 都随 U_1 的降低成平方的减小，但最大转矩对应的转差率 s_m 与电源电压 U_1 无关，所以电压变化时， s_m 不变。不同电压 U_1 的人为机械特性如图11-16所示。

(2) 转子回路串入附加电阻 R_f 的人为机械特性。

绕线式异步电动机可利用在转子回路串附加电阻的方法来人为地改变机械特性，其接线图如图11-17所示。

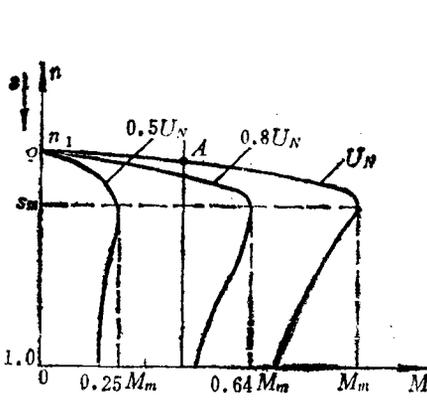


图 11-16 改变异步电动机定子电压 U_1 的人为机械特性

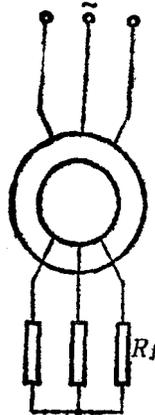


图 11-17 三相绕线式异步电动机转子回路串电阻接线图

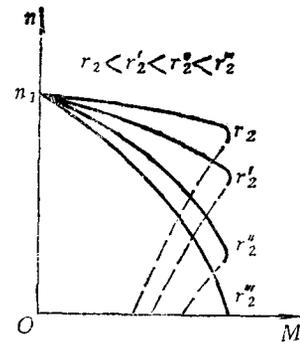


图 11-18 绕线型电动机 r_2 不同时的机械特性

由于异步电动机的同步转速 n_1 与转子回路电阻的大小无关。因此，改变转子回路电阻的各条人为机械特性曲线都通过 n_1 点。转子回路串联的电阻越大，曲线越向下倾斜，机械特性曲线变得越软，如图11-18所示。

转子回路串电阻的人为机械特性很重要，绕线式异步电动机就是利用转子回路串电阻的方法来改善电动机的起动和调速性能的。

改变电源电压的频率和电机的磁极对数都可以改变电机的机械特性，这里不再赘述了。

第八节 异步电动机的工作特性

异步电动机吸收电能，输出机械能。从使用方面来说，机械负载需要它具有一定的转矩和转速；从电网方面来说，要求电动机具有一定的效率和功率因数。为了保证电动机能可靠、经济地运行，能很好地满足生产机械的需要，国家标准对电动机工作特性指标都作了具体规定。

标志异步电动机运行性能的主要指标有：额定效率 η_N 、额定功率因数 $\cos\varphi_N$ 、额定温升 θ_N 、最大转矩倍数 $\frac{M_{max}}{M_N}$ 、起动转矩倍数 $\frac{M_{st}}{M_N}$ 、起动电流倍数 $\frac{I_{st}}{I_N}$ 等。其中 η_N 和 $\cos\varphi_N$ 属性能指标， $\frac{M_{max}}{M_N}$ 表示电动机的过载能力， $\frac{M_{st}}{M_N}$ 、 $\frac{I_{st}}{I_N}$ 表示电动机起动性能的技术指标， θ_N 是表征电动机工作可靠性的主要数据。

异步电动机在额定电压及额定频率时，转速 n 、效率 η 、定子电流 I_1 、输出力矩 M_2 、功率因数 $\cos\varphi_1$ 等与输出功率 P_2 的关系曲线，称为异步电动机的工作特性，如图 11-19 所示。

异步电动机的工作特性可以通过直接加载试验测得，也可以利用等值电路计算获得。

一、转速特性 $n=f(P_2)$

异步电动机的转速与输出功率之间的变化曲线 $n=f(P_2)$ ，称为转速特性。

根据式(11-45)，电动机的转差率和转速为

$$s = \frac{p_{0\omega_2}}{P_M} = \frac{m_1 I_2'^2 r_2'}{m_1 E_1 I_2' \cos\varphi_2}$$

$$n = n_1 (1 - s)$$

空载时，输出功率 $P_2 = 0$ ，转子电流 $I_2' \approx 0$ ， $p_{0\omega_2} \approx 0$ ，因此 $s \approx 0$ ， $n \approx n_1$ 。当负载增加，即输出功率 p_2 增加时，转子电流 I_2' 增大，转子铜损及电磁功率相应增大，但转子铜损 $p_{0\omega_2}$ 与转子电流的平方成正比，而电磁功率 P_M 近似与转子电流的一次方成正比， $P_{0\omega_2}$ 比 P_M 增加得快，所以随着 P_2 的增大，转差率 s 增大，转速 n 下降。为了保证电动机有较高的效率，转子铜损不能过大，因此，额定负载时的转差率很小。一般 $s_N = 1.5\% \sim 5\%$ 。这表示额定转速仅比同步转速低 $1.5\% \sim 5\%$ 。所以转矩特性 $n=f(P_2)$ 是一条微微向下倾的曲线，具有较硬的特性。

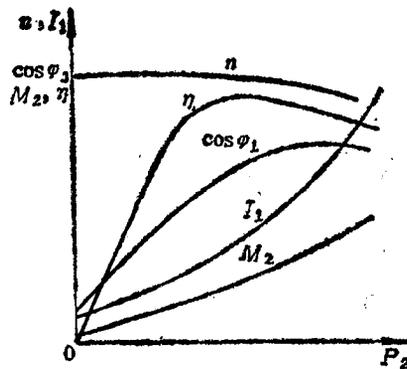


图 11-19 异步电动机的工作特性

二力矩特性 $M_2 = f(P_2)$

异步电动机的输出力矩 $M_2 = \frac{P_2}{\Omega}$ 。空载时, $P_2 = 0$, $M_2 = 0$, 随着 P_2 的增加, n 略有下降, 故曲线 $M_2 = f(P_2)$ 微微有点上翘, 如图 11-19 所示。

三、定子电流特性 $I_1 = f(P_2)$

定子电流 I_1 与输出功率 P_2 之间的关系曲线 $I_1 = f(P_2)$ 称为定子电流特性。

电动机定子电流

$$I_1 = I_0 + (-I_2')$$

空载时, 转子电流 $I_2 \approx 0$, 定子电流 I_1 几乎全部为激磁电流 I_0 。当负载增大时, 转子转速下降, 转子电流增大, 转子磁势增大, 为了补偿转子磁势的去磁作用, 定子磁势和定子电流随之而增大, 如图 11-19 所示。

四、功率因数特性 $\cos\varphi_1 = f(P_2)$

异步电动机定子功率因数 $\cos\varphi_1$ 与输出功率 P_2 之间的关系曲线 $\cos\varphi_1 = f(P_2)$ 称为功率因数特性。

从等值电路可见, 异步电动机是一个感性负载, 必须从电网吸取无功电流建立磁场, 所以异步电动机的功率因数 $\cos\varphi_1$ 总是滞后的。

空载运行时, 异步电动机的定子电流近似地等于无功激磁电流, 所以空载时的功率因数很低, 一般 $\cos\varphi_0 \leq 0.2$ 。负载后, 转子输出的机械功率增加, 定子电流中的有功分量增大, 电动机的功率因数随之提高。一般电动机接近额定负载时, 功率因数达到最高值。额定功率因数 $\cos\varphi_N = 0.74 \sim 0.93$ 。2极 Y 系列小型异步电动机的额定功率因数 $\cos\varphi_N = 0.84 \sim 0.89$, 4 极 Y 系列小型异步电动机 $\cos\varphi_N = 0.76 \sim 0.89$ 。

五、效率特性 $\eta = f(P_2)$

电动机的效率 η 与输出功率 P_2 之间的关系曲线 $\eta = f(P_2)$ 称为效率特性。

异步电动机的效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{P_2 + \sum p}$$

式中 $\sum p$ ——异步电动机的总损耗, 包含铁损, 机械损耗, 定、转子铜损和杂散损耗。

空载时, 输出功率 $P_2 = 0$, 因此效率 $\eta = 0$, 随着负载的增大, 输出功率增大, 效率随之增大。当可变损耗 (定、转子铜损及杂散损耗之和) 等于不变损耗 (铁损与机械损耗之和) 时, 效率达到最高值。

由于各种电机效率的计算公式都是一样的, 各种损耗的性质也基本相同, 所以异步电动机的效率曲线与变压器基本相似。但由于异步电动机是旋转的, 存在着机械损耗, 所以异步电动机的效率比变压器低。一般异步电动机的额定效率 $\eta_N = 74\% \sim 93\%$, 最大效率发生在 $(0.7 \sim 1.1) p_N$ 范围内。一般容量越大, 额定效率越高。

由于异步电动机的效率与功率因数都在额定负载附近达到最大值, 因此选用电动机时, 应使电动机的容量与负载相匹配。如果电动机的容量比负载大, 不仅增加了购买电机本身的费用, 而且使电机长期处于轻负载下运行, 效率及功率因数都较低, 很不经济, 反

之，如果电动机容量选得比负载小，则电动机会因过载而发热，影响寿命甚至损坏电机。

第九节 小结

本章主要讨论了正常运行时，异步电动机内部的电磁过程，从而导出电势平衡、磁势平衡、等值电路及相量图。这些内容是分析异步电动机的理论基础。本章应用这些理论分析了异步电动机的机械特性和运行性能。

(1) 异步电动机的定子相当于变压器的原边，转子相当于变压器的副边，所以异步电动机的原理及分析方法在很多方面与变压器相似。但它们之间有本质的区别，其主要区别是：

- 1) 变压器原、副边感应电势的频率相同，而异步电动机定子与转子感应电势的频率不相等 转子频率 $f_2 = sf_1$ ，即是说转子频率不仅与定子频率有关，而且与电机转速有关；
- 2) 变压器的磁场是脉动磁场，而异步电动机的主磁场是旋转磁场；
- 3) 变压器只能传递能量，没有能量转换，而异步电动机既有能量传递也有能量转换。异步电动机转子绕组是闭合的， $U_2 = 0$ ，故不输出电能而输出机械能。

(2) 由于异步电动机定子和转子旋转磁场总是保持相对静止的，所以异步电动机在任何转速下均能产生恒定的电磁转矩，实现电能与机械能的转换。

(3) 异步电动机的电压变比为：

$$k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{k_{w1} N_1}{k_{w2} N_2}$$

电流变比为

$$k_i = \frac{m_1 N_1 k_{w1}}{m_2 N_2 k_{w2}}$$

(4) 为了作出异步电动机的等值电路，必须进行频率折算、电压折算、电流折算和阻抗折算。

频率折算就是用一个频率为 f_1 的静止的等效转子电路，来等效地代替频率为 $f_2 = sf_1$ 的实际旋转的转子电路，使转子电势频率与定子电势相等，即

$$f_2 = sf_1 = f_1$$

绕组折算

$$I_2' = \frac{1}{k_i} I_2$$

$$E_2' = k_e E_2$$

$$r_2' = k_i k_e r_2 = k r_2$$

$$x_2' = k_i k_e x_2 = k x_2$$

$$z_2' = k_i k_e z_2 = k z_2$$

(5) 异步电动机的基本方程式组为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + jx_1)$$

$$\dot{E}_1 = -\dot{I}_0 (r_m + jx_m)$$

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_0$$

$$\dot{E}'_0 = \dot{I}'_2 z'_2 = \dot{I}'_2 \left(r'_2 + \frac{1-s}{s} r'_2 + jx'_{20} \right)$$

$$\dot{I}'_0 = \dot{I}_1 + (-\dot{I}'_2)$$

(6) 根据异步电动机的基本方程组, 可以作出异步电动机的T型等值电路, 这个T型等值电路与变压器接有纯电阻负载时的T型等值电路相似, 其负载电阻为 $\frac{1-s}{s} r'_2$ 。

(7) 异步电动机的相量图与变压器具有纯电阻负载时的相量图相似。

(8) 消耗在附加电阻 $\frac{1-s}{s} r'_2$ 中的电功率 $m_2 I_2^2 \frac{1-s}{s} r'_2$ 代替了实际电机轴上所产生的总的机械功率, 因此 $\frac{1-s}{s} r'_2$ 是电动机轴上总机械功率的等效电阻。

(9) 转子铜损等于电磁功率与转差率 s 的乘积, 即 $p_{Cu2} = sP_M$, 为了减小铜损, 提高电机效率, 异步电动机正常运行时的转差率 s 很小, 一般 $s = 0.01 \sim 0.05$ 。

(10) 有关计算公式

$$M = C_M \Phi_m I'_2 \cos \varphi_2$$

$$M = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{r'_2}{s}}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x'_{20})^2 \right]}$$

$$M_N = 9550 \frac{P_N}{n_N}$$

$$M_{\max} = \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 [r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_{20})^2}]}$$

$$s_m = \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_{20})^2}}$$

$$k_m = \frac{M_{\max}}{M_N}$$

$$M_{st} = \frac{m_1 p U_1^2 r'_2}{2\pi f_1 [(r_1 + r'_2)^2 + (x_1 + x'_{20})^2]}$$

异步电动机的电磁力矩与电源电压的平方成正比, 与频率 f 有关, 为了保证异步电动机安全、稳定运行、要求外施电压和频率基本恒定。

(11) 异步电动机转速与电磁力矩之间的关系曲线称为机械特性 $n = f(M)$ 。改变电源电压、频率和转子回路电阻都可以改变机械特性, 以适应不同机械负载对电机转矩及转速的需要及改善电机的起动和调速性能。

(12) 当 $U_1 =$ 常数、 $f_1 =$ 常数时, 转速 n 、效率 η 、定子电流 I_1 、输出力矩 M_2 、功率因数 $\cos \varphi_1$ 等与输出功率 P_2 之间的关系曲线称为工作特性。即

$$n = f(P_2) \quad \text{转 速 特 性}$$

$\eta = f(P_2)$ 效率特性

$I_1 = f(P_2)$ 定子电流特性

$M_2 = f(P_2)$ 输出转矩特性

$\cos\varphi_1 = f(P_2)$ 功率因数特性

由于异步电动机的效率和功率因数都是在额定负载附近达到最大值，因此选用电动机时，应使电动机的容量与负载匹配。异步电动机低负荷运行时，效率和功率因数都很低，极不经济，因此不允许异步电动机长期轻载运行。

思考题及习题

11-1 当异步电动机的机械负载增大时，电动机的转速 n 、定子电流 I_1 和转子电流 I_2 如何变化？为什么？

11-2 在分析异步电动机时，转子边要进行哪些折算？为什么要进行这些折算？如何折算？

11-3 异步电动机的等值电路与变压器带什么负载时的等值电路相似？异步电动机等值电路中的附加电阻 $\frac{1-s}{s}r_2'$ 的物理意义是什么？能不能用电抗或电容代替这个附加电阻？

11-4 异步电动机带额定负载运行时，若电源电压大于额定电压过多，电动机的主磁通 Φ_m 、激磁电流 I_0 、功率因数 $\cos\varphi_1$ 、电机效率 η 和转速 n 如何变化？若电源电压低于额定电压过多， Φ_m 、 I_0 、 $\cos\varphi_1$ 、 η 和 n 又如何变化？

11-5 异步电动机运行时，如果负载转矩增加，电动机的转矩为什么也相应增加？当负载转矩大于最大转矩 M_{max} 时，电动机将发生什么情况？

11-6 一台三相异步电动机的额定电压 $U_N = 380/220V$ ，定子绕组的接法 Y/Δ ，试问：

(1) 如果将定子绕组接成 Δ ，接于 380V 三相电源上，能否带负载或空载运行？为什么？

(2) 如果将定子绕组接成 Y 形后，再接在 220V 的三相电源上，能否带负载或空载运行？为什么？

11-7 一台鼠笼式异步电动机，如果把转子抽出，或把转子堵住，并在定子绕组上加额定电压，会产生什么后果？

11-8 一台三相异步电动机的输入功率为 8.6kW，定子铜损 $p_{Cu1} = 4.25W$ ，铁损 $p_{Fe} = 210W$ ，转差率 $s = 0.034$ ，试求电动机的电磁功率 P_M 、转子铜损 p_{Cu2} 及机械功率 P_o 。

11-9 有一台异步电动机的铭牌数据如下：额定功率 2.8kW，额定电压 220/380V，额定电流 10.9/6.3A，额定转速 $n_N = 1370r/min$ ，额定频率 50Hz， $\cos\varphi_1 \approx 0.84$ ，试求：

(1) 额定负载时的效率 η_N ；

(2) 额定转矩 M_N ；

(3) 额定转差率 s_N ；

(4) 电机的极对数。

11-10 有一台三相六极异步电动机的数据为：额定电压 $U_N=380\text{V}$ ，额定转速 $n_N=957\text{r/min}$ ，额定频率 $f_N=50\text{Hz}$ ，定子绕组 Y 连接，定子电阻 $r_1=2.08\Omega$ ，转子电阻折算值 $r'_2=153\Omega$ ，定子漏抗 $x_1=3.12\Omega$ ，转子漏抗折算 $x'_2=4.52\Omega$ 。试求：

- (1) 额定转矩 M_N ；
- (2) 最大转矩 M_{max} ；
- (3) 过载能力 k_m ；
- (4) 临界转差率 s_m 。

11-11 有一台三相四极异步电动机， Y 连接，额定容量 $P_N=150\text{kW}$ ，额定电压 $U_N=380\text{V}$ ，额定转速 $n_N=1460\text{r/min}$ ，过载能力 $k_m=3.1$ 。试求：

- (1) 额定转差率；
- (2) 额定转矩；
- (3) 最大转矩。

11-12 有一台三相绕线式异步电动机， $U_N=380\text{V}$ ，定子 Y 连接， $f_1=50\text{Hz}$ ， $2p=4$ ， $n_N=1440\text{r/min}$ ， $x_1+x'_2=2.24\Omega$ ， $r_1=0.71\Omega$ ， $k_i=k_e=1.1$ ，试求：

- (1) 起动力矩 M_{st} ；
- (2) 最大力矩 M_{max} ；
- (3) 临界转差率 s_m ；
- (4) 如果要使起动时有最大力矩，转子每相应串入多大电阻？

11-13 有一台过载能力 $k_m=2$ 的异步电动机，带额定负载运行。如果因电网故障，电源电压突然下降到 $0.6U_N$ ，问此时电动机能否继续运行？

第十二章 三相异步电动机的电力拖动

以交流电动机为原动机的电力拖动系统称为交流电力拖动系统。交流电动机有异步电动机和同步电动机两种类型。异步电动机因结构简单、造价低、性能好、运行可靠而被广泛使用，因此，交流电力拖动系统中的电动机主要是三相异步电动机。

本章主要研究三相异步电动机电力拖动的起动、调速和制动运行。三相异步电动机的起动方法很多，对于不同类型的电动机，针对拖动的具体负载，选用合适的起动方法是本章的重点。

第一节 异步电动机的起动性能

三相异步电动机加上对称三相电压时，电动机从静止状态转动起来，然后逐渐升速到额定转速的过程称为起动过程，简称起动。起动过程很短，通常只有几分之一秒到几秒，带负载起动的的时间较长，有长达十余秒者。

一、标志异步电动机起动性能的主要指标

(1) 起动转矩倍数 $\frac{M_{st}}{M_N}$;

(2) 起动电流倍数 $\frac{I_{st}}{I_N}$;

(3) 起动时间;

(4) 起动设备的简单性和可靠性。

在为各种生产机械选配电动机时，既要求电动机具有足够大的起动转矩，使生产机械能够很快地达到额定转速而正常工作，又希望起动电流不要太大，以免电网产生过大的电压降落而影响接在同一电网上其它用电设备的正常工作。因此，我们总是希望在起动电流比较小的情况下获得比较大的起动转矩。

二、起动电流 I_{st} 和起动转矩 M_{st}

1. 起动电流 I_{st} 的大小

起动时，即电动机刚接通电源瞬间，转子是静止的， $n=0$ ， $s=1$ ，定子旋转磁场以同步转速 n_1 切割转子导体，转子感应电势 E_{20} 达到最大值，转子电流（起动电流）也达到最大值。根据磁势平衡原理，定子电流也相应增大。此时的定、转子电流称为起动电流。一般转子起动电流为额定电流的 5~8 倍，定子起动电流为额定电流的 4~7 倍。即

$$\left. \begin{aligned} I_{st2} &= (5 \sim 8) I_{2N} \\ I_{st1} &= (4 \sim 7) I_{1N} \end{aligned} \right\} \quad (12-1)$$

式中 I_{st2} ——异步电动机转子起动电流，A 或 kA;

I_{st} ——异步电动机定子起动电流，A或kA；

2. 起动转矩 M_{st} 的大小

异步电动机起动时，虽然转子电流很大，但由于转子功率因数很低，起动力矩不大，一般起动转矩为额定转矩的 $0.95 \sim 2$ 倍，即

$$M_{st} = (0.95 \sim 2) M_N \quad (12-2)$$

因为电磁力矩 $M = C_M \Phi_m I_2' \cos \varphi_2$ ，转子功率因数 $\cos \varphi_2 = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2}}$ ，起动时， $n=0$ ， $s=1$ ， $f_2 = sf_1 = f_1$ ， $x_{20} = 2\pi f_1 L_2$ ，远大于转子电阻 r_2 ，转子功率因数角 $\varphi_{20} = \text{tg}^{-1} \frac{x_{20}}{r_2}$ 接近 90° ， $\cos \varphi_2$ 很小，所以起动时，虽然转子的起动电流很大，但起动电流的有功分量 $I_{st} \cos \varphi_{20}$ 很小，起动转矩并不大。

起动时，如果起动力矩等于或大于电动机轴上负载力矩 M_2 的 1.1 倍 即 $M_{st} \geq 1.1 M_2$ ，电动机方可起动，否则电动机不能起动。

三、起动电流对电网的影响

由于异步电动机起动过程是很短暂的，一般能在几秒钟内完成，所以起动电流不会使电动机过热而损坏。但是起动电流将在输电线上产生很大的电压降，使负载端母线电压下降 影响接在同一电网上其它用电设备的正常工作。例如接在同一母线上的电灯变暗，控制设备可能失常，电动机转速下降，严重时，可能使电动机的最大转矩 M_{max} 降低到小于负载转矩，致使电动机停转。

综上所述，异步电动机起动时的主要问题是起动电流大，起动力矩小。当电机容量较大而供电电源容量较小时，需设法减小起动电流。为此，电动机起动时，应根据不同情况（电动机容量大小和电源容量大小）采用不同的起动方法。因此，一起动是异步电动机电力拖动中的一个重要问题。

第二节 鼠笼式异步电动机的起动

鼠笼式异步电动机常用的起动方法有两种：1) 全电压直接起动；2) 降压起动。

一、全电压直接起动

全电压直接起动就是用闸刀开关或接触器把电动机直接接到具有额定电压的电源上起动，如图12-1所示。

电动机能否采用直接起动，主要取决于电网容量和电动机容量的大小。如果供电变压器容量较大，电动机容量较小，异步电动机可以直接起动。如果电网容量不够大，电动机容量较大时，则不允许电动机直接起动。因为在此种情况下直接起动，起动电流会使电网电压显著下降，影响接在同一电网上的其它用电设备正常工作。为此，通常规定：用电单位如有专用变压器供电，在电动机起动频繁时，电动机容量不超过变压器容量的 20% ；而在不经常起动时，电动机容量不超过变压器容量的 30% 。上述两种情况下，允许电动机直接起动。如果没有专用供电变压器（电动机与照明负荷共用一台变压器），允许直接起动

的电动机的最大容量，应以电网的电压降不超过(10~15)%为原则。在发电厂中，由于电源容量大，所以厂用电动机一般都采用直接起动。随着电网容量的不断增大，直接起动将得到更加广泛的使用。

直接起动方法的优点是不需要专门的起动设备，操作简单，起动时间短，应尽量采用直接起动。由于起动电流与电源电压成正比，如果电源容量不够大，且不能采用直接起动时，必须采取降低电源电压的办法限制起动电流，即采用降压起动法。

二、降压起动

将 $s=1$ 代入式(11-50)和(11-51)，则起动电流和起动转矩的表达式为

$$\left. \begin{aligned} I'_{st1} \approx I'_{st2} &= \frac{U_1}{\sqrt{(r_1+r'_2)^2+(x_1+x'_2)^2}} \\ M_{st} &= \frac{3pU_1^2 r'_2}{2\pi f_1 [(r_1+r'_2)^2+(x_1+x'_2)^2]} \end{aligned} \right\} \quad (12-3)$$

式(12-3)表明，起动电流与电源电压成正比，当电源容量不够大，电动机全压起动引起电压下降15%以上时，应采用降压起动法，以减小起动电流。常用的降压起动法有：

1. 定子回路串电抗器降压起动

三相异步电动机定子回路串电抗器降压起动接线如图12-2所示。图中 X 为电抗器。

起动时，接触器触点1C闭合，2C断开，电抗器串入定子回路，电动机开始起动。待电机转速上升到额定转速时，接触器触点2C闭合，切除电抗器，电动机在全电压下正常运行。

串入电抗器后，加在电动机上的电压如果减小到原来的 $\frac{1}{k}$ ，则最初起动电流（以后简称起动电流）也减小到原来的 $\frac{1}{k}$ 。

由于最初起动转矩（以后简称起动转矩）与电源电压的平方成正比，所以起动转矩便减小到 $\frac{1}{k^2}$ 。

在定子回路串联电抗器降压起动，起动电流与起动电压成正比地减小了，但起动力矩与起动电压成平方地减小了。所以这种起动方法常用于空载或轻载起动的高压电动机。

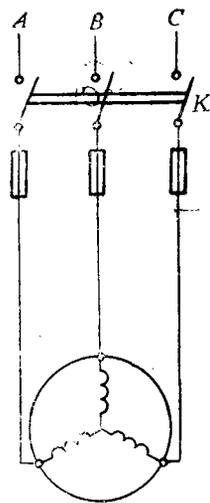


图 12-1 直接起动接线图

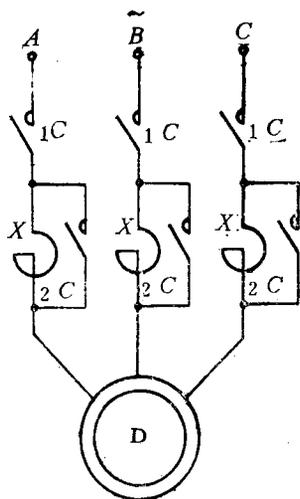


图 12-2 三相异步电动机定子串电抗器起动接线图

2. 星—三角(Y—Δ) 转换降压起动

图12-3为星—三角转换降压起动接线图。起动时，接触器触点1C闭合接通电源后，接触器触点2C闭合，此时定子绕组接成Y形，电动机开始起动。当转速升高到接近额定转速时，接触器触点2C断开、3C闭合，定子绕组改接成Δ形，电动机在额定电压下正常运行。

设电源电压为 U_1 ，电动机每相阻抗为 z ，起动时定子三相绕组接成Y，每相绕组所加电压为 $U_1/\sqrt{3}$ ，起动时的线电流（等于相电流）为

$$I_{stY} = \frac{U_1}{\sqrt{3}z} \quad (12-4)$$

如图12-4(a)所示。

如果用Δ形接法直接起动时，每相绕组所加电压为 U_1 ，此时的线电流为

$$I_{st\Delta} = \frac{\sqrt{3}U_1}{z} \quad (12-5)$$

如图12-4(b)所示。

上述两种起动方法起动电流的比值为

$$\frac{I_{stY}}{I_{st\Delta}} = \frac{U_1/\sqrt{3}z}{\sqrt{3}U_1/z} = \frac{1}{3} \quad (12-6)$$

式(12-6)表明，采用Y—Δ起动时，起动电流为接成Δ形直接起动时的 $\frac{1}{3}$ 。

由于起动转矩与电源电压的平方成正比，所以采用星—三角转换起动时，起动转矩也降到直接起动（三角形接法）时的 $\frac{1}{3}$ 。即

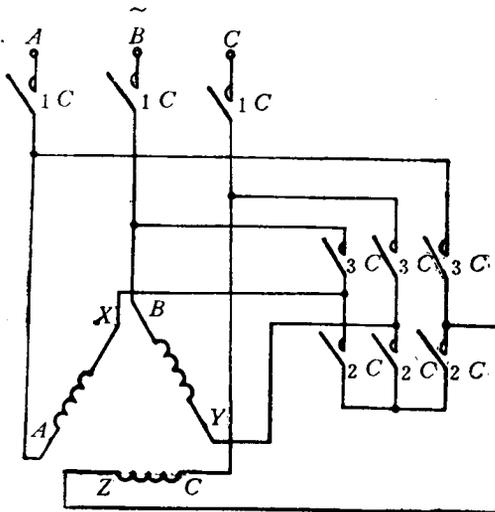


图 12-3 Y—Δ 起动接线图

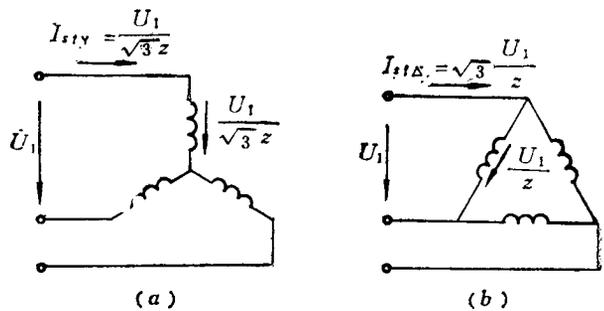


图 12-4 Y—Δ 起动时电压及电流

$$\frac{M_{stY}}{M_{st\Delta}} = \left(\frac{U_1 / \sqrt{3}}{U_1} \right)^2 = \frac{1}{3} \quad (12-7)$$

式(12-6)和式(12-7)表明,采用Y-Δ转换降压启动时,启动电流和启动转矩降低的倍数相同,都是直接启动的 $\frac{1}{3}$ 。

当启动时的负载力矩 M_2 等于或小于额定力矩的 $\frac{1}{3}$ 时,而且可靠性系数取 1.1 ($M_2 \leq \frac{M_{stY}}{1.1} = \frac{M_N}{1.1 \times 3} = 0.3M_N$)时,可采用Y-Δ转换降压启动。

星-三角转换启动的优点是启动设备简单,只需要一个Y-Δ转换开关(做成Y-Δ启动器),成本低,因此对于空载或轻载启动的机械负载应优先采用Y-Δ转换启动。但由于Y-Δ启动的电动机定子绕组六个出线端头都要引出来,对于高压电动机有一定的困难,因此我国采用Y-Δ方法启动的电动机额定电压都是380V,Δ形接线。为了便于推广Y-Δ启动方法,Y系列4kW以上的电动机,定子绕组都设计成Δ形接法,电压为380V。

3. 自耦变压器降压启动

自耦变压器降压启动,就是利用一台自耦变压器来降低加在电动机定子绕组上的端电压,其原理接线如图12-5所示。启动时,自耦变压器的高压侧接电网,低压侧接电动机。启动后电动机直接与电网相接,同时将自耦变压器切除。

启动时,接触器触点1C闭合,电动机的定子绕组通过自耦变压器接到三相电源上降压启动。当转速升高到接近额定转速时,接触器触点1C断开、2C闭合,自耦变压器被切除,电动机直接与电网相接,在额定电压下正常运行。

设电网电压为 U_1 、自耦变压器的变比为 k_a 。经过自耦变压器降压后,加在电动机上的

电压为 $\frac{1}{k_a}U_1$,此时,电动机的启动电流 $I_{st\alpha}$ 与电压成正比地减小,为额定电压下直接启动时启动电流 I_{st} 的 $1/k_a$,即

$$I_{st\alpha} = \frac{1}{k_a} I_{st} \quad (12-8)$$

式中 I_{st} ——在额定电压下直接启动时的启动电流;

$I_{st\alpha}$ ——降压后电动机的启动电流。

由于电动机接在自耦变压器的低压侧,而自耦变压器的高压侧接在电网上,故电网所供给的启动电流 $I'_{st\alpha}$ 应是 $I_{st\alpha}$ 的 $\frac{1}{k_a}$ 倍,即

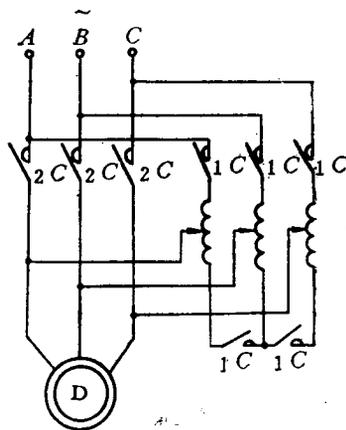


图 12-5 自耦变压器降压启动接线图

$$I'_{st\alpha} = \frac{1}{k_a} I_{st\alpha} = \frac{1}{k_a^2} I_{st} \quad (12-9)$$

式(12-8)和式(12-9)表明,利用自耦变压器降压起动,电网供给的起动电流减小到 $\frac{1}{k_a^2}$ 倍。

采用自耦变压器降压起动时,加在电动机上的电压为电动机额定电压的 $1/k_a$ 倍,而起动力矩与电源电压的平方成正比,所以起动力矩减小到 $1/k_a^2$ 倍。例如,将电动机接在自耦变压器80%的抽头上,起动电流减小到全电压起动时的64%,起动转矩也减小到直接起动时的64%。

自耦变压器的副绕组通常有几个抽头,使副边电压为原边电压的40%、60%、80%。根据所需起动转矩选择不同的抽头。

这种起动方式的优点是不受电动机绕组连接方式的影响,且可按容许的起动电流和所需的起动转矩选择合适的抽头。其缺点是起动设备费用较高,体积大,故一般适用于Y- Δ 起动不能满足要求的容量较大的电动机。

4. 延边三角形起动

延边三角形起动是近几年来出现的一种新型降压起动方法。这种起动方法只用于正常工作时三角形连接的电动机。这种电动机定子绕组每相有三个出线端:首端、尾端和中间抽头,如图12-6所示。其中 D_1 、 D_2 、 D_3 为首端, D_4 、 D_5 、 D_6 为尾端, D_7 、 D_8 、 D_9 为中间抽头。定子绕组的一部分 D_7-D_4 、 D_8-D_5 、 D_9-D_6 接成 Δ 形,另一部分 D_1-D_7 、 D_2-D_8 、 D_3-D_9 接成Y形,用符号“ Δ ”表示,如图12-6(a)所示。起动结束后,绕组改接成 Δ 形,在额定电压下正常运行,如图12-6(b)所示。

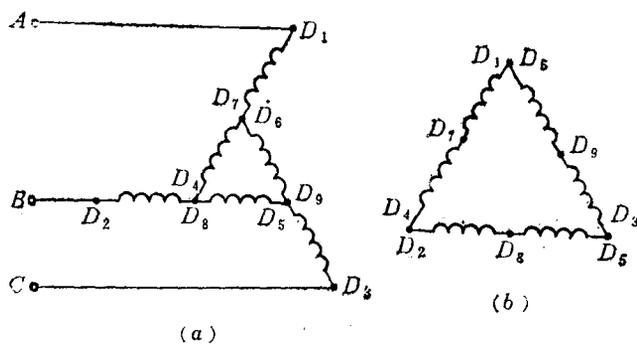


图 12-6 延边三角形起动接线图
(a) 起动时; (b) 正常运行时

起动时,首端 D_1 、 D_2 、 D_3 接电源,电动机每相绕组(例如 D_1-D_4)所承受的电压小于 Δ 接法的 U_1 ,大于Y接法时的 $U_1/\sqrt{3}$ 。因此,延边三角形起动时,其起动电流和起动转矩比 Δ 接法全电压起动时小,但比Y- Δ 降压起动时大。由图12-6(a)可知,每相绕组所承受的电压将随电机绕组抽头(D_7 、 D_8 、 D_9)位置的不同而改变其大小。抽头越靠近尾端,Y连接部分比例越大,每相绕组电压越低。因此,可以采用不同抽头比例来满

足不同机械负载对起动转矩的要求。

延边三角形起动，是通过电动机本身绕组的改接实现降压的，不需要专门的起动设备，故很经济，且适用于频繁起动。但绕组抽头多，结构较复杂。

综上所述，三相鼠笼式异步电动机降压起动方法的特点如表12-1所示。

表 12-1 电动机各种降压起动特性

减小倍数	起 动 电 流	自耦变压器	Y-Δ开关	电 抗 器
	电机本身的起动电流	$1/k_a$	$1/\sqrt{3}$	$1/k_a$
	电网所供给的起动电流	$1/k_a^2$	1/3	$1/k_a$
	起 动 转 矩	$1/k_a^2$	1/3	$1/k_a^2$

【例 12-1】一台三角形连接的电动机，如果在额定电压下直接起动，则流过每相绕组的起动电流 $I_{st} = 20.84\text{A}$ ，电网供给的起动电流 $I'_{st} = \sqrt{3} \times 20.84 = 36.1\text{A}$ ，起动转矩 $M_{st} = 26.39\text{N}\cdot\text{m}$ ，试求下面三种情况下的起动电流和起动转矩。

(1) 用 Y-Δ 降压起动；

(2) 用变比 $k_a = 2$ 的自耦变压器降压起动；

(3) 用串联电抗器降压起动，并假定此时电动机所承受的电压与用自耦变压器降压起动时一样。

解 (1) 用 Y-Δ 降压起动

电动机起动电流

$$I_{stY} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{st} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 20.84 = 12.03 (\text{A})$$

电网供给的起动电流

$$I'_{stY} = I_{stY} = 12.03 (\text{A})$$

起动转矩

$$M_{stY} = \frac{1}{3} M_{st} = \frac{1}{3} \times 26.39 = 8.8 (\text{N}\cdot\text{m})$$

(2) 用变比 $k_a = 2$ 的自耦变压器降压起动

电动机的起动电流

$$I_{sta} = \frac{1}{k_a} I_{st} = \frac{1}{2} \times 20.84 = 10.42 (\text{A})$$

电网供给的起动电流

$$I'_{sta} = \sqrt{3} \frac{1}{k_a} I_{sta} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 10.42 = 9.02 (\text{A})$$

起动转矩

$$M_{st\sigma} = \frac{1}{k_{\sigma}^2} M_{st} = \frac{1}{2^2} \times 26.39 = 6.6 \text{ (N}\cdot\text{m)}$$

(3) 用串联电抗器起动

由于采用串联电抗器降压起动与采用自耦变压器降压起动时的起动电压相等，故电动机的起动电流与起动转矩应相同，即电动机的起动电流 $I_{st} = 10.42\text{A}$ 起动转矩 $M_{st} = 6.6\text{N}\cdot\text{m}$ 。但由于电动机是 Δ 形连接，故电网供给的起动电流为 $\sqrt{3} I_{st}$ ，即为 $\sqrt{3} \times 10.42 = 18.05\text{A}$ 。

【例 12-2】 有一台鼠笼式三相异步电动机， $P_N = 28\text{kW}$ ， Δ 连接， $U_N = 380\text{V}$ ， $I_N = 58\text{A}$ ， $\cos\varphi_N = 0.88$ ， $n_N = 1455\text{r/min}$ ， $I_{st}/I_N = 6$ ， $M_{st}/M_N = 1.1$ ， $k_M = 2.3$ 。供电线路要求起动电流 $I_{st1} \leq 150\text{A}$ ，负载起动力矩 $M_{fs} = 73.5\text{N}\cdot\text{m}$ ，试问：

(1) 能否采用 $Y-\Delta$ 起动？

(2) 若采用自耦变压器降压起动，抽头有 55%、64%、75% 三种，应选用哪个抽头？

解(1) 用 $Y-\Delta$ 降压起动

电动机额定转矩

$$M_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{28}{1455} = 183.78 \text{ (N}\cdot\text{m)}$$

正常起动要求起动转矩不应小于 M_{st1} ，其值为

$$M_{st1} = 1.1 M_{fs} = 1.1 \times 73.5 = 80.85 \text{ (N}\cdot\text{m)}$$

$Y-\Delta$ 起动时的起动电流

$$I_{stY} = \frac{1}{3} I_{st} = \frac{1}{3} \times 6 \times 58 = 116 \text{ (A)}$$

$$I_{stY} < I_{st1}$$

$Y-\Delta$ 起动时的起动转矩

$$M_{stY} = \frac{1}{3} M_{st} = \frac{1}{3} \times 1.1 \times 183.78 = 67.39 \text{ (N}\cdot\text{m)}$$

$$M_{stY} < M_{st1}, \text{ 不能采用 } Y-\Delta \text{ 起动。}$$

(2) 用自耦变压器降压起动

抽头为 55% 时，其起动电流和起动转矩为

$$I'_{st} = 0.55^2 I_{st} = 0.55^2 \times 6 \times 58 = 105.27 \text{ (A)}$$

$$I'_{st} < I_{st1}$$

$$M'_{st} = 0.55^2 M_{st} = 0.55^2 \times 1.1 \times 183.78 = 61.15 \text{ (N}\cdot\text{m)}$$

$$M'_{st} < M_{st1}, \text{ 不能采用 55\% 的抽头。}$$

抽头为 64% 时，其起动电流和起动转矩为

$$I'_{st} = 0.64^2 I_{st} = 0.64^2 \times 6 \times 58 = 142.5 \text{ (A)}$$

$$I'_{st} < I_{st1}$$

$$M'_{st} = 0.64^2 M_{st} = 0.64^2 \times 1.1 \times 183.78 = 82.8 \text{ (N}\cdot\text{m)}$$

$M'_{st} > M_{st1}$, 能采用 64% 的抽头。

抽头为 73% 时, 其起动电流和起动转矩为

$$I'_{st} = 0.73^2 \times 6 \times 58 = 185.45 \text{ (A)}$$

$I'_{st} > I_{st1}$, 不能采用 73% 的抽头。

【例 12-3】 有一台 Δ 连接的异步电动机 $U_N = 380\text{V}$, $I_N = 20\text{A}$, $\cos\varphi_N = 0.87$, $I_{st}/I_N = 7$, $M_{st}/M_N = 1.4$, 试问:

(1) 当负载转矩 $M_L = 0.5M_N$ 时, 能否采用 $Y-\Delta$ 起动?

(2) 当负载转矩 $M_L = 0.5M_N$ 时, 如果采用自耦变压器降压起动, 试确定自耦变压器的电压抽头 (设有三个抽头: 100%、80%、60%)。

(3) 采用自耦变压器降压起动时, 电网供给的起动电流是多少?

解 (1) $Y-\Delta$ 起动

正常起动时, 要求起动转矩不小于 M_{st1} , 而

$$M_{st1} = 1.1 \times 0.5 M_N = 0.55 M_N$$

$Y-\Delta$ 起动时的起动电流和起动转矩为

$$I_{stY} = \frac{1}{3} I_{st} = \frac{1}{3} \times 7 \times 20 = 46.67 \text{ (A)}$$

$$M_{stY} = \frac{1}{3} M_{st} = \frac{1}{3} \times 1.4 M_N = 0.467 M_N$$

$M_{stY} < M_{st1}$, 不能半载起动。

(2) 自耦变压器降压起动

当 $M'_{st} \geq 0.55 M_N$ 时, 就可以正常起动。

$$\frac{M'_{st}}{M_{st}} = \left(\frac{U'}{U_N}\right)^2$$

$$\text{即 } \frac{0.55 M_N}{1.4 M_N} = \left(\frac{U'}{U_N}\right)^2$$

$$U' = \sqrt{\frac{0.55}{1.4}} U_N = 0.6 U_N, \text{ 故应选 } 60\% \text{ 的电压抽头。}$$

(3) 电网供给的起动电流

$$I'_{st} = k_a^2 I_{st} = 0.6^2 \times 7 \times 20 = 50 \text{ (A)}$$

第三节 绕线式异步电动机的起动

绕线式异步电动机通常采用在转子回路串入电阻的方法进行起动。从前面分析可知起动电流

$$I_{st} = \frac{E_{20}}{\sqrt{r_2^2 + x_{20}^2}}$$

起动转矩

$$M_{st} = C_M \Phi_m I_{st} \cos\varphi_{20}$$

功率因数

$$\cos\varphi_{20} = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + x_{20}^2}}$$

以上几式表明，转子回路中串入电阻后，可以减小起动电流，提高功率因素。如果选择的电阻适当，可使 $\cos\varphi_{20}$ 增加的效果大于 $I_{s,t}$ 的减小，致使转子电路中电流的有功分量 $I_{s,t}$ 、 $\cos\varphi_{20}$ 增加，起动转矩增大。如果串入起动电阻 $r_{s,t}$ 后，其转子每相总电阻满足式 (12-10) 的要求，则起动转矩可达最大转矩值，即

$$s_{s,t} = \frac{r_2' + r_{s,t}'}{x_1 + x_{20}'} = 1 \quad (12-10)$$

所以，要使起动时获得最大转矩 ($M_{s,t} = M_{max}$)，转子回路串入电阻的计算值 $r_{s,t}'$ 为

$$r_{s,t}' = (x_1 + x_{20}') - r_2' \quad (12-11)$$

转子回路串入电阻的实际值 $r_{s,t}$ 为

$$r_{s,t} = \frac{r_{s,t}'}{k_a k_i} \quad (12-12)$$

绕线式异步电动机常用以下两种串入电阻的方法进行起动。

一、转子回路串变阻器分级起动

绕线式异步电动机转子回路串变阻器分级起动接线如图 12-7 所示。接成 Y 形的三相起动电阻，经过电刷、集电环引入到绕线转子回路中。由于转子回路电阻增加，起动电流减小，功率因数提高，起动转矩增大。这是绕线式异步电动机的一个最大优点。

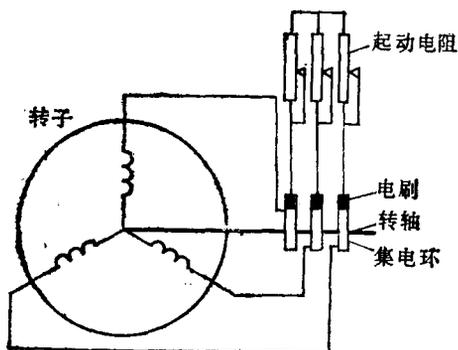


图 12-7 绕线转子串电阻起动

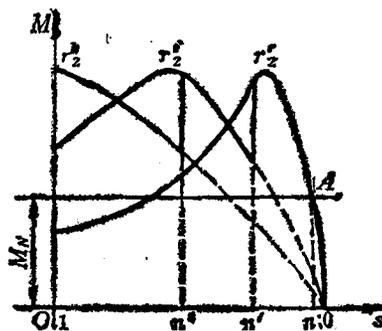


图 12-8 转子回路中串接起动变阻器时的起动过程

为了缩短起动过程，增大电动机在整个起动过程中的转矩，随着起动后转速的升高，应把串入的起动电阻逐级切除。串入转子回路的电阻不同，出现最大转矩的转差率也不同，所以在分段切除起动电阻的过程中，可以得到一组机械特性曲线，如图 12-8 所示。起动时将起动电阻全部串入。起动后，转速上升，当转速由零上升到 s_2 时，切除一段电阻，使串入电阻由 r_2'' 减小到 r_2' ，此时电动机的电磁转矩又回到最大值，如图 12-8 所示。之后，随着转速的升高，逐级切除串入的电阻，直到最后全部切除，转子绕组被短接为止。此时，转速上升到正常转速，起动过程结束。对于有举刷装置的电动机，起动完毕后，还应把电刷从滑环上举起，以减少电刷的摩擦损耗，从而提高电动机的运行效率。

小容量起动变阻器用金属电阻丝绕成，大容量变阻器用铸铁片或水电阻箱作成。

绕线式异步电动机的优点是能在转子回路串入电阻，减小起动电流，增大起动转矩，提高功率因数，还可以在小范围内进行调速。因此，对于起动困难的机械（如吊车、卷扬机、铲土机）常采用绕线式异步电动机。它的缺点是结构复杂、造价高、效率较低。而且在起动过程中，当逐段减小起动电阻时，转速突然增大，会在机械上产生冲击。当电机容量较大时，转子电流很大，起动设备庞大，操作维护都不方便。为了克服这些缺点，现在大、中容量电动机，一般采用频敏变阻器作为起动电阻。频敏变阻器的优点是转子回路电阻随转速的上升而自动减少，使电动机能平稳地起动。

二、转子回路串频敏变阻器起动

1. 结构

频敏变阻器实际上是一个特殊的三相铁芯电抗器。其结构如图12-9所示，主要由铁芯和绕组两部分组成。一般作成三柱式，每一个柱上有一个绕组。频敏变阻器的铁芯由几片或十几片较厚（30~50mm）的E形钢板或铁板制成，铁芯间有可调的气隙。三个铁芯上绕有丫接法的三相绕组。

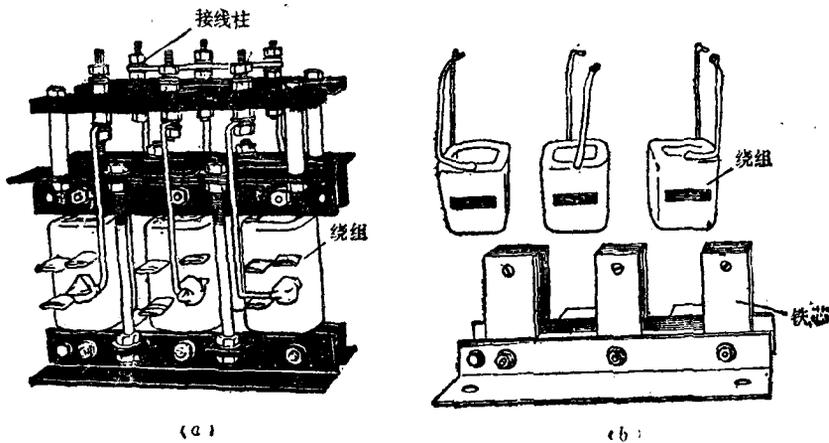


图 12-9 频敏变压器
(a) 外形；(b) 绕组与铁芯

2. 工作原理

绕线式转子串频敏变阻器的起动线路如图12-10所示。当电动机起动时，转子中的三相交流电通过频敏变阻器，在铁芯中产生交变磁通。由于频敏变阻器的铁芯迭片是厚的钢板，而不是相互缘绝的硅钢片，所以铁芯损耗很大。铁损越大， r_m 也越大。我们知道，一个交流铁芯线圈可以用一个等值电路来表示，如图12-11所示。其中 r_1 是每相绕组的电阻， r_m 是反映铁芯损耗的等值电阻， x_m 是对应于铁芯绕组的电抗。

由于铁芯的涡流损耗与频率的平方成正比，当电机刚起动时，转子电流的频率较高（ $f_2 = f_1 = 50 \text{ Hz}$ ），频敏变阻器的铁芯损耗及其等值电阻 r_m 较大，起到了限制起动电流和增大起动转矩的作用。起动后，随着转子转速的逐渐上升，转子电流的频率（ $f_2 = sf_1$ ）逐渐减小，频敏变阻器的铁芯损耗随之减小，反映铁芯损耗的等值电阻 r_m 也跟随减小。也

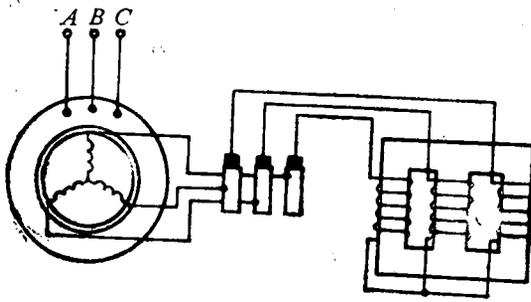


图 12-10 绕线型转子串频敏变阻器的起动线路

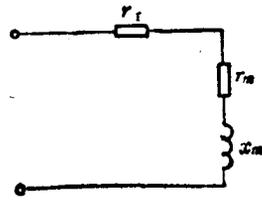


图 12-11 频敏变阻器的等值电路

就是说，随着转速逐渐上升， r_m 自动减小，所以电动机可以得到恒定转矩的起动特性，实现电动机无级平滑起动。

转子回路串频敏变阻器起动有以下优点：

- (1) 起动力矩大，起动电流小，而且可以通过改变其线圈匝数或铁芯的气隙来调节其等值阻抗，以满足不同起动性能的要求；
- (2) 能实现无级平滑起动，没有机械冲击；
- (3) 起动设备结构简单，寿命长，使用维护方便。

其缺点是：

- (1) 功率因数较低， $\cos\varphi \leq 0.75$ ；
- (2) 由于功率因数低，其起动力矩只能达到最大力矩的 (50~60) %。

为了使单组频敏变阻器的体积、重量不致过大，当电动机容量大到一定程度时，可由多组频敏变阻器连接使用。

【例12-4】 有一台绕线式异步电动机，定、转子绕组均为Y联接，其额定数据是： $P_N=30\text{kW}$ ， $U_N=380\text{V}$ ， $n_N=722\text{r/min}$ ， $r_1=0.143\Omega$ ， $x_1=0.262\Omega$ ， $r_2'=0.134\Omega$ ， $x_2'=0.328\Omega$ ，电势比及电流比 $k_e=k_i=1.342$ 。

试求：

(1) 要求 $M_{st}=M_{max}$ ，转子回路中每相应接入多大起动电阻 (Y接法)，并计算起动电流和起动力矩。

(2) 若转子绕组直接短接，计算此时的起动电流和起动转矩。

解 (1) 当 $M_{st}=M_{max}$ 时，转子回路总电阻应为

$$r_2' + r_{st}' = \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}$$

串入起动电阻的折算值为

$$\begin{aligned} r_{st}' &= \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2} - r_2' \\ &= \sqrt{0.143^2 + (0.262 + 0.328)^2} - 0.134 = 0.473(\Omega) \end{aligned}$$

串入起动电阻的实际值为

$$r_{st} = \frac{r_{st}'}{k_e k_i} = \frac{0.473}{1.342^2} = 0.262(\Omega)$$

起动转矩为

$$M_{st} = \frac{m_1 p U_1^2 (r_2' + r_{st}')}{2\pi f_1 [(r_1 + r_2' + r_{st}')^2 + (x_1 + x_{20}')^2]}$$

$$= \frac{3 \times 4 \times 220^2 \times 0.60}{2\pi \times 50 \times [(0.143 + 0.134 + 0.473)^2 + (0.262 + 0.328)^2]}$$

$$= 1233 \text{ (N}\cdot\text{m)}$$

起动电流为

$$I_{st} = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_2' + r_{st}')^2 + (x_1 + x_{20}')^2}}$$

$$= \frac{220}{\sqrt{(0.143 + 0.134 + 0.473)^2 + (0.262 + 0.328)^2}} = 266 \text{ (A)}$$

(2) 若转子绕组直接短接, $r_{st} = 0$, 此时的起动电流为

$$I_{st} = \frac{220}{\sqrt{(0.143 + 0.134)^2 + (0.262 + 0.328)^2}} = 337.5 \text{ (A)}$$

起动转矩为

$$M_{st} = \frac{3 \times 4 \times 220^2 \times 0.134}{2\pi \times 50 \times [(0.143 + 0.134)^2 + (0.262 + 0.328)^2]} = 583.4 \text{ (N}\cdot\text{m)}$$

第四节 深槽式和双鼠笼式异步电动机

从异步电动机起动和运行性能的分析中可知, 起动时, 适当增大转子电阻, 可以减小起动电流, 增大起动转矩, 改善起动性能。所以起动时, 总希望转子电阻大一些。而正常运行时, 为了减少转子铜损, 提高电机效率, 又希望转子电阻小一些。在绕线式异步电动机中, 这点是不难做到的。但是, 在普通的鼠笼式电机中, 转子是闭路的, 无法串入电阻。为了解决这个问题, 人们从改进转子槽形入手, 利用电流的“集肤效应”制成具有能改善起动性能的深槽式和双鼠笼式异步电动机。这两种电机基本保持了结构简单、坚固耐用, 维护方便等优点, 又具有起动时转子电阻自动增大, 正常运行时自动减小的特性。

一、深槽式异步电动机

1. 结构特点

深槽式异步电动机的定子与普通异步电动机完全相同, 但转子槽形不同, 转子槽形具有深而窄的特点。为增大“集肤效应”, 槽深 h 与槽宽 b 之比为

$$\frac{\text{槽深}}{\text{槽宽}} = \frac{h}{b} = 10 \sim 20$$

当转子导条中通过电流时, 槽漏磁通分布如图 12-12 (a) 所示。槽底部分导条所交链的漏磁通多, 接近槽口部分导条所交链的漏磁通少, 因而槽底导体的漏抗大, 而槽口部分导体的漏抗小。

2. 工作原理

起动时, $s = 1$, 转子频率较高, $f_2 = sf_1 = f_1$, 转子漏抗远远大于电阻 ($x_2 \gg r_2$), 转子电流基本上按电抗成反比分配。由于槽口漏抗小于槽底漏抗, 所以, 导条中电流密度

的分布自上而下逐步减小，大部分电流集中在导体的上部，如图 12-12 (b) 所示，这种现象称为集肤效应。其效果相当于导体有效截面减小，如图 12-12 (c) 所示。因而转子有效电阻增大，改善了起动力性能。

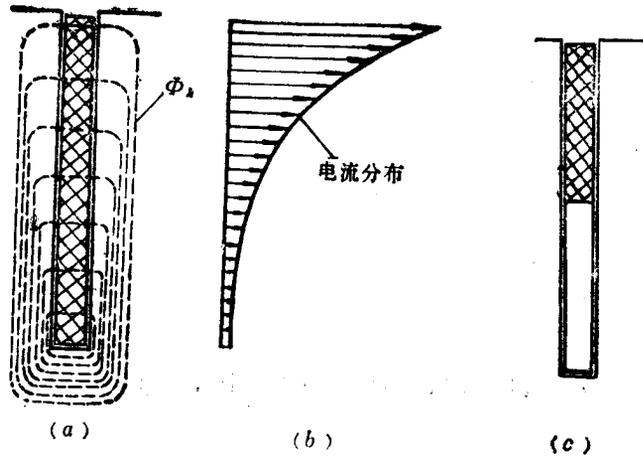


图 12-12 深槽式转子绕组中漏磁通和电流的分布
(a) 漏磁通的分布, (b) 电流分布: (c) 起动时的有效导体截面

集肤效应的强弱与转子电流的频率和槽形尺寸有关，频率越高，槽形越深，集肤效应就越显著。

当电机转入正常运行时，转子电流频率变得很低，一般为 $1 \sim 3 \text{ Hz}$ 。此时转子漏抗远远地小于电阻 ($x_2 \ll r_2$)，集肤效应消失，转子电流按电阻均匀分配，转子电阻自动减小，基本上等于直流电阻，所以正常运行时，不会增加转子铜损，保持电机有较好的工作性能。

二、双鼠笼异步电动机

1. 结构特点

这种电机的结构特点是转子上有两套分开的鼠笼绕组，即上笼（外笼）和下笼（内笼），两笼之间由狭长的缝隙隔开，如图 12-13 (a) 所示。

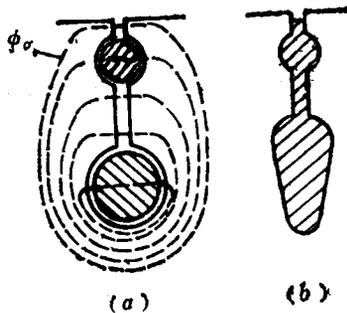


图 12-13 双鼠笼转子

下笼的截面较大，用电阻系数较小的紫铜作成，电阻较小。上笼导体的面积小，通常用电阻系数较大的黄铜或铝青铜作成，电阻较大，故上笼比下笼具有较大的电阻，即 $R_{\text{上}} > R_{\text{下}}$ 。如果上、下笼由同一种材料制成，例如它们都采用铸铝转子，如图 12-13 (b) 所示，则上、下笼导体截面必须选择适当，以保证 $R_{\text{上}} > R_{\text{下}}$ 。从图 12-13 (a) 可见，下笼交链的漏磁通比上笼多，

故下笼的漏抗比上笼大，即 $x_{\text{上}} < x_{\text{下}}$ 。

综上所述，双鼠笼异步电动机的特点是上笼具有较大的电阻和较小的电抗，而下笼则

具有较小的电阻和较大的电抗。

2. 工作原理

起动时, $s=1$, 转子频率较大, $f_2=sf_1=f_1$, 这时, 转子漏抗比电阻大得多, 转子电流的分配主要取决于漏抗。由于下笼漏抗大, 上笼漏抗小, 所以电流主要流过上笼, 即 $I_{2,t;上} \gg I_{2,t;下}$ 。 $M_{s,t;上} = C_M \Phi_m I_{2,t;上} \cos \varphi_{2,t;上} \gg M_{s,t;下} = C_M \Phi_m I_{2,t;下} \cos \varphi_{2,t;下}$, 即上笼起动转矩大。由于上笼在起动时起主要作用, 故称上笼为起动笼。

正常运行时, 转子电流的频率很小, 这时转子的漏抗远远小于电阻, 所以转子电流的分配主要取决于电阻。下笼电阻小, 电流大, 上笼电阻大, 电流小, 即 $I_{2,下} \gg I_{2,上}$ 。又因转子漏抗很小, 两笼的功率因数接近于 1, 即 $\cos \varphi_{2,上} \approx \cos \varphi_{2,下} \approx 1$, 因此, 下笼产生较大的工作力矩, 即 $M_{下} \gg M_{上}$ 。正常运行时, 下笼起主要作用, 故下笼又称为运行笼。

3. 双鼠笼异步电动机的力矩特性曲线

双鼠笼异步电动机的力矩可以看成是上、下两个鼠笼并联运行产生的。图 12-14 中曲线 1 和 2 分别表示上笼和下笼的力矩特性, 曲线 3 是它们的合成力矩。改变上笼和下笼的几何尺寸或所用材料, 可以比较灵活地获得所需要的力矩特性曲线, 比如得到曲线 4, 这方面它优于深槽式异步电动机。

综上所述, 深槽式和双鼠笼异步电动机都具有较好的起动特性 (起动电流较小, 起动转矩较大), 但由于漏抗大, 功率因数较低, 过载能力稍差。它适于作成较高转速较大容量的电动机。100kW 以上的静止负载或惯性负载 (如压缩机、粉碎机、柱塞式水泵等) 常采用双鼠笼和深槽式异步电动机。

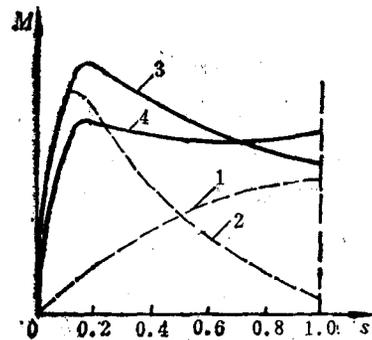


图 12-14 双鼠笼电动机的力矩曲线

第五节 鼠笼式异步电动机的调速

根据生产机械的需要, 人为地改变电动机的转速, 称为调速。

在工农业生产中, 为了保证产品质量和提高经济效益, 常要求生产机械能在不同转速下进行工作, 因而对电动机的调速性能提出了越来越高的要求, 要求电动机能在宽广的范围内平滑地调节转速。虽然异步电动机具有结构简单、造价低、运行可靠、维护方便等优点, 但由于调速性能差, 使用受到了一定限制, 因此, 在许多调速要求较高的电力拖动系统中 (例如轧钢、运输以及起重机械等), 不得不采用价格昂贵、工作可靠性较差的直流电动机。因此, 改善异步电动机的调速性能, 是当前研究的重要课题之一。近年来, 由于大功率可控硅元件的应用, 异步电动机的调速方法有了很大的发展, 但是还没有取得令人满意的成果。下面介绍异步电动机的几种调速方法。

从异步电动机的转速公式

$$n = n_1 (1 - s) = \frac{60f_1}{p} (1 - s)$$

可知，异步电动机的调速方法有下列三种：

- (1) 改变电动机定子绕组的极对数 p ;
- (2) 改变电动机的转差率 s ;
- (3) 改变电源频率 f_1 。

一、变极调速

当电源频率 f_1 不变时，电机的同步转速与极对数成反比，所以改变定子绕组的极对数 p ，就可以改变旋转磁场的转速，从而改变转子的转速。如极对数增加一倍，同步转速下降一半。显然，这种调速是不平滑的，只能一级一级地改变转速。变极调速常用的方法是利用改变绕组接法，在一套定子绕组中得到两种转速，称为单绕组双速电机，其中变速比是 2 : 1 的，称为倍级调速电机，用得最多。

1. 变极调速原理

设定子每相有两组线圈，每组线圈用一个集中线圈来代表。如果把 A 相两组线圈 a_1x_1 和 a_2x_2 正向串联，如图 12-15 (a) 所示，则气隙中形成四极磁场，如图 12-15 (b) 所示；若把绕组中一半线圈 a_2x_2 反接，即 a_1x_1 与 a_2x_2 反向串联，如图 12-16 (a) 所示。或 a_1x_1 与 a_2x_2 反向并联 如图所 12-16 (b) 所示。无论是反向串联还是反向并联，第二组线圈中电流均反向，气隙中形成二极磁场，如图 12-16 (c) 所示。

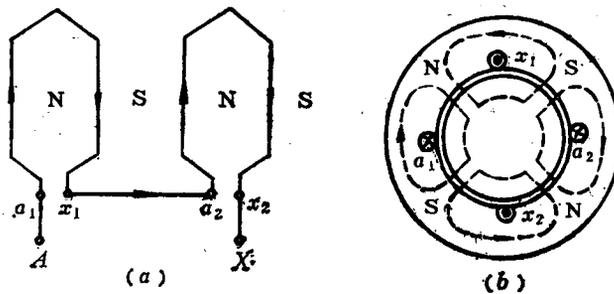


图 12-15 四极三相异步电动机定子 A 相绕组

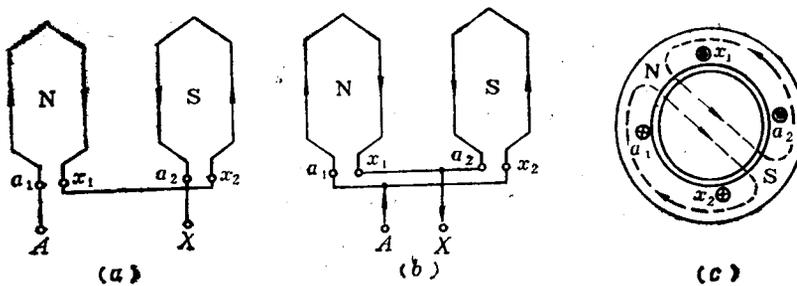


图 12-16 二极三相异步电动机定子 A 相绕组

综上所述，只要鼠笼式异步电动机每相绕组中一半线圈电流反向，即半相绕组反向，则电动机的极对数成倍变化，拖动恒转矩负载运行的电动机转速也接近成倍改变。

2. 变极后的转矩和功率

改变定子绕组接线方式，使半相绕组电流反向，从而实现变极调速的方法很多。双速电动机常用的接线方式有两种：

(1) 绕组从单星形改接成双星形 ($\text{Y}/2\text{Y}$)，如图 12-17 所示。

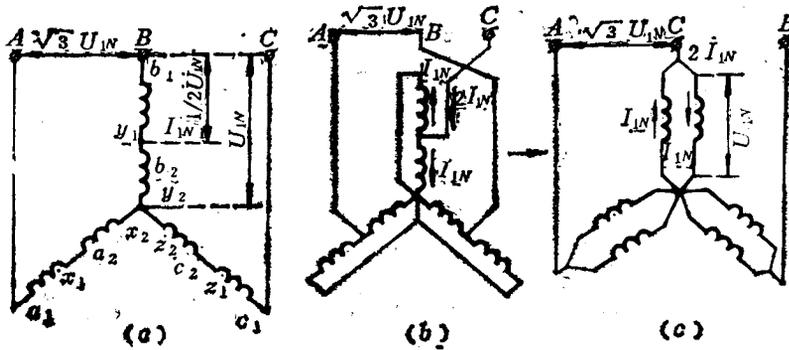


图 12-17 单星形改接成双星形 ($\text{Y}/2\text{Y}$)
(a) Y 接法 ($2p$)； (b) 2Y 接法 (p)； (c) 2Y 接法 (p)

当电动机采用 Y 接法时，每相中的两个半相绕组正向串联，极对数为 $2p$ ，同步转速为 n_1 。当电动机由 Y 改接成 2Y 时，每相中两个半相绕组反向并联，每组中均有一半绕组的电流反向，极对数减少一半，为 p ，同步转速增加一倍，为 $2n_1$ 。

假设电源中电压 U ，和每个线圈中流过的电流 I_N 不变，两种转速下的功率和力矩关系为：

Y 接法时电动机的输出功率为

$$P_2(\text{Y}) = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} \cos\varphi(\text{Y}) \eta(\text{Y}) \quad (12-13)$$

式中 $\cos\varphi(\text{Y})$ ——电动机 Y 接时的功率因数；

$\eta(\text{Y})$ ——电动机 Y 接时的效率。

2Y 接法时电动机的输出功率为

$$P_2(2\text{Y}) = \sqrt{3} U_{1N} (2 I_{1N}) \cos\varphi(2\text{Y}) \eta(2\text{Y}) \quad (12-14)$$

假设电动机从单星形改接成双星形变极调速时，功率因数及效率均保持不变，即 $\cos\varphi(\text{Y}) = \cos\varphi(2\text{Y})$ ， $\eta(\text{Y}) = \eta(2\text{Y})$ ，则

$$\frac{P_2(2\text{Y})}{P_2(\text{Y})} = 2 \quad (12-15)$$

由 Y 变成 2Y 接法的电动机，极对数减少一半，转速和功率都增加一倍，力矩基本不变。

式 (12-15) 表明，在 $\text{Y}/2\text{Y}$ 接法中，高转速 2Y 接法时，电动机轴上的输出功率比低转速 (Y 接法) 时要大一倍。

输出力矩 $M_2 = 2P_2(\text{Y})/\Omega$ ， 2Y 接法时 P_2 增大一倍， $\Omega = 2\pi n_1/60$ 也增加一倍，电动机

的额定力矩保持不变, 即 $M_2(\gamma) = M(\gamma)$, 故 $\gamma/2\gamma$ 接法称为恒力矩调速, 适宜带恒转矩负载, 如起重机、运输皮带等。

(2) 绕组从三角形改接成双星形 $\Delta/2\gamma$, 如图12-18所示。

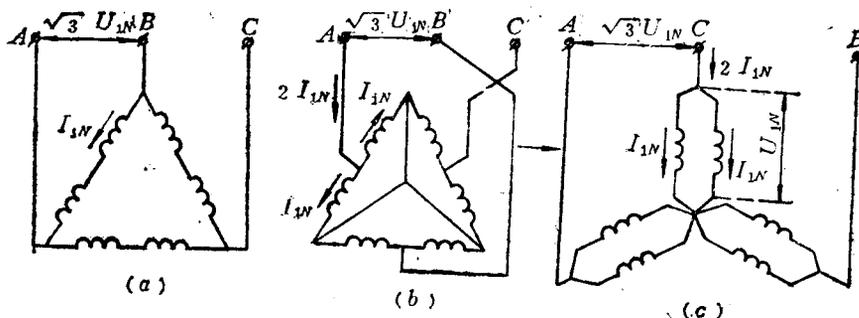


图 12-18 三角形改接成双星形 ($\Delta/2\gamma$)

(a) Δ 接法 ($2p$); (b) 2γ 接法 (p); (c) 2γ 接法 (p)

电动机从三角形改接成双星形, 也能使极对数减少一半, 转速增加一倍。两种转速下功率和力矩的关系为

Δ 接法时的输出功率为

$$P_{2(\Delta)} = \sqrt{3} U_{1N} (\sqrt{3} I_{1N}) \cos \varphi_{(\Delta)} \eta_{(\Delta)} = 3 U_{1N} I_{1N} \cos \varphi_{(\Delta)} \eta_{(\Delta)} \quad (12-16)$$

2γ 接法时的输出功率为

$$\begin{aligned} P_{2(\gamma)} &= \sqrt{3} U_{1N} (2I_{1N}) \cos \varphi_{(2\gamma)} \eta_{(2\gamma)} \\ &= 2 \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} \cos \varphi_{(2\gamma)} \eta_{(2\gamma)} \end{aligned} \quad (12-17)$$

假设两种转速下的功率因数和效率相等, 则

$$\frac{P_{2(2\gamma)}}{P_{2(\Delta)}} = \frac{2 \sqrt{3}}{3} = 1.15 \quad (12-18)$$

式(12-18)表明, 在 $\Delta/2\gamma$ 接法中, 电动机的转速变化一倍, 输出功率只变化了 15%, 故 $\Delta/2\gamma$ 称为恒功率调速。因为 $M_2 = P_2/\Omega$ 所以高速时产生的力矩比低速时几乎小一半。

由 Δ 变成 2γ 接法的电动机, 极对数减少一半, 转速增加一倍, 功率基本不变, 力矩减小一半, 适宜带恒功率负载, 如各种金属切削机床。低速时进行粗切削, 进刀量大需要力矩大; 高速时进行精切削, 进刀量小, 需要力矩小, 而不同转速时, 所需功率接近恒定值。

3. 双速电动机的旋转方向问题

为了保证变极调速时电动机的转向不变, 变极调速的同时, 需要改变绕组的相序或电源的相序。因为要使电动机的转向不变, 就要求旋转磁场的旋转方向不变, 也就是 A 、 B 、 C 三相绕组在空间上互差 120° (电角度) 不变, 图12-19表示出了空间机械角度与电角度之间的关系。显然, 变速前相序为 A 、 B 、 C , 变速后相序为 A 、 C 、 B , 即变速前后相序相反。所以, 在变极调速时, 为了转向不变, 应与电源相接的任意两个出线端头对调

一下，使变极前后方向相同。

二、改变电源频率 f_1 调速

异步电动机的同步转速 $n_1 = 60f_1/p$ ，所以改变电源频率 f_1 时，同步转速 n_1 与 f_1 成正比的变化，转子的转速也随之而改变。故改变电源频率 f_1 可以得到平滑而且范围较广的调速，调速性能好。但变频调速必须配一套专用的变频装置，调速设备复杂，成本高，过去很少采用。近年来由于可控硅技术的发展，为获得变频电源提供了新的途径，促进了变频调速的应用。

三、改变转差率 s 调速

这种调速方法只适于绕线式异步电动机，这部分内容在下一节中进行讨论。

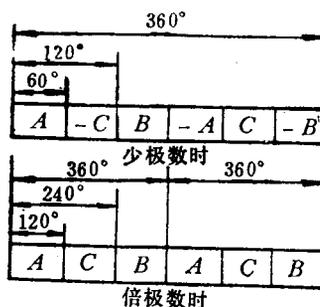


图 12-19 少极对数与倍极对数之间的相带关系

第六节 绕线式异步电动机的调速

绕线式异步电动机是通过调节转子回路串联电阻来改变转差率 s 而实现调速的。通常异步电动机调速电阻就是分级起动的起动电阻。

一、调速原理

绕线式异步电动机拖动恒转矩负载时，改变转子回路串入电阻值的大小，就可以改变机械特性曲线，如图 12-20 所示。串接的电阻越大，产生最大力矩的转差率越大，转速越低，即曲线越向下移。在负载力矩恒定的情况下，增加转子回路电阻，运行点将沿着 A 、 B 、 C 、 D 向下移动，电机转速随之下降。

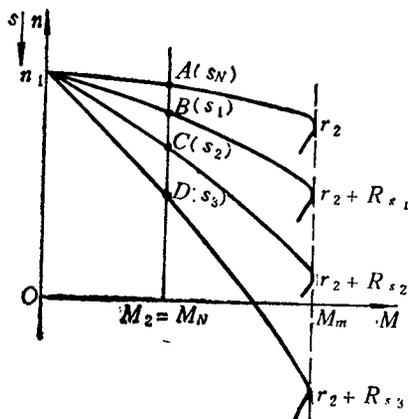


图 12-20 绕线式异步电动机转子串电阻调速

但这种调速方法简单，调速范围较广，因此，在中小容量的电动机中还是用得比较多，例如，交流供电的桥式起重机，几乎全部采用此法调速。

三、调速电阻的计算方法

在恒定负载力矩下调速时，转子回路串入电阻 $r_{s,t}$ 的大小可根据力矩公式很方便地求得。设 s_N 为额定运行时的转差率， s' 为转子串入电阻 $r_{s,t}$ 后的转差率，由于调速过程中负载力矩不变，因此，电动机产生的电磁力矩应不变，即

二、转子串电阻调速的优缺点及应用
绕线式异步电动机在转子回路串电阻调速，其主要缺点是调速电阻上的功率损耗大，而且串入的电阻越大，转差率越高，转子铜损 ($p_{Cu2} = sP_M$) 越大，电机效率就越低，故这种调速方法

$$M = \frac{3U_1^2 \frac{r'_2}{s_N}}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x'_{20})^2 \right]}$$

$$= \frac{3U_1^2 \frac{r'_2 + r'_s}{s'}}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + \frac{r'_2 + r'_s}{s'} \right)^2 + (x_1 + x'_{20})^2 \right]}$$

整理后可得

$$\frac{r'_2 + r'_s}{s'} = \frac{r'_2}{s_N} \quad (12-19)$$

转子回路每相应串入电阻的折算值为

$$r'_s = \frac{s'}{s_N} r'_2 - r'_2 \quad (\Omega) \quad (12-20)$$

转子回路每相应串入电阻为

$$r_s = \frac{r'_s}{k_e k_i} \quad (\Omega) \quad (12-21)$$

【例 12-5】有一台三相四极绕线式异步电动机， $f_1=50\text{Hz}$ ，转子每相电阻 $r_2=0.02\Omega$ ，额定转速 $n_N=1480\text{r/min}$ ，若负载转矩不变，要求把转速降到 1100r/min 。试求每相中应串入多大的电阻？

解 设 s_N 为额定转差率， s' 为转子串入电阻 r_s 后的转差率，由于调速过程中负载力矩不变，故由式(12-19)可得

$$\frac{r'_2 + r'_s}{s'} = \frac{r'_2}{s_N}$$

每相应串入电阻值为

$$r_s = \frac{s'}{s_N} r_2 - r_2 = r_2 \left(\frac{s'}{s_N} - 1 \right)$$

而

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1500 - 1480}{1500} = 0.0133$$

$$s' = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{1500 - 1100}{1500} = 0.266$$

代入上式得

$$r_s = r_2 \left(\frac{s'}{s_N} - 1 \right) = 0.02 \left(\frac{0.266}{0.0133} - 1 \right) = 0.38 \quad (\Omega)$$

第七节 电磁调速异步电动机

电磁调速异步电动机又名滑差电动机。它由鼠笼式异步电动机、电磁滑差离合器和可控硅整流装置三部分组成，如图 12-21(a) 所示。这种电机是通过电磁转差离合器来实现调速的。目前国产的 JZTH 系列电磁调速异步电动机，其连续调速范围为 $120 \sim 1200\text{min}^{-1}$ ，

容量为 $0.6 \sim 100 \text{ kW}$ 。

一、电磁滑差离合器的结构

电磁滑差离合器实质上就是一台电机，其结构有多种形式，但原理都是相同的。它由电枢和磁极两部分组成，它们各自独立旋转。电枢为铸钢制成的空心圆柱体，与异步电动机的转子相连接，直接由异步电动机拖动。磁极为凸极式，由可控硅装置提供的直流电流励磁，磁极转子与生产机械直接连接。

二、电磁转差离合器的工作原理

磁极的励磁绕组通入直流电后产生磁场。当异步电动机带动离合器电枢以转速 n 旋转时，电枢因切割磁极磁场而产生涡流，其方向可用右手定则确定，如图 12-21(b) 所示。涡流与磁极磁场相互作用产生电磁力 f ，其方向由左手定则确定。根据作用力大小相等，方向相反，可以确定磁极转子电磁力 f' 的方向，如图 12-21(b) 所示。在电磁力 f' 的作用下，磁极转子便带着生产机械顺着电枢旋转的方向以转速 n' 旋转。

磁极转子的转速 n' 必须低于异步电动机（即电枢）的转速 n 。因为只有存在着转差（ $n' < n$ ），电枢和磁极转子才会有相对运动，才能产生电磁感应作用，这与异步电动机的原理是相同的。所以称它为电磁转差离合器。其滑差为

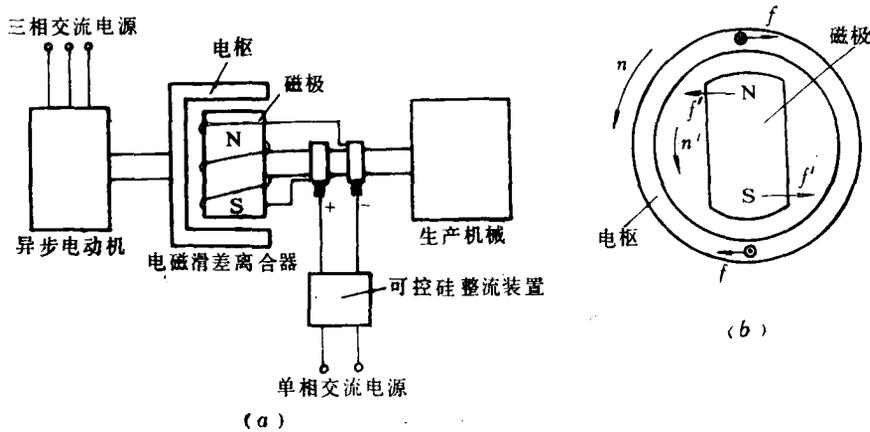


图 12-21 电磁调速异步电动机

(a) 联接原理图；(b) 电磁滑差离合器的工作原理

$$s' = \frac{n - n'}{n} \quad (12-22)$$

$$n' = n(1 - s') \quad (12-23)$$

当负载力矩恒定不变时，调节励磁电流的大小就可以改变电机的转速。如果增大励磁电流，磁场增强，电磁力矩增大，转速上升。反之，如果减小励磁电流，则转速下降。其机械特性如图 12-22 所示。其调速范围一般为 $1:10 (120 \sim 1200) \text{ min}^{-1}$ 或 $1:5 (250 \sim 1250) \text{ min}^{-1}$ 。

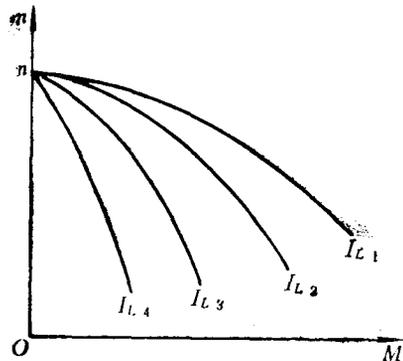


图 12-22 电磁转差离合器的机械特性

三、优缺点及适用范围

这种电机调速平滑，调速范围广，控制功率小，结构简单，维护方便，成本较低，被广泛应用于造纸、印刷、船舶、冶金等工业中。其主要缺点是涡流损失大，效率低，尤其在低速时更为严重，所以它不宜长期在低速下运行。

第八节 异步电动机的制动方法

所谓制动，是指电动机产生的电磁转矩与转子的旋转方向相反。在电力拖动中，经常要求拖动生产机械的异步电动机处于制动运行。为了满足生产上的需要或安全运行，有时要求电动机迅速停车，有时则需要在运行中加一定的制动转矩使电动机低速运行，如起重机下放重物时，电气机车下坡时就需要制动。制动，对于提高劳动生产率和保证设备、人身安全是很重要的。异步电动机常用的制动方法有三种：

- (1) 反接制动；
- (2) 发电机制动；
- (3) 能耗制动。

一、反接制动

异步电动机运行时，如果转子的转向与气隙旋转磁场的转向相反，这种运行状态叫反接制动。实现反接制动有下面两种方法。

1. 正转反接

将正在运行的异步电动机定子绕组的三相供电线任意对调两相，则定子电流相序改变，气隙旋转磁场反转，而电机转子的转向由于有机械惯性不能立即改变，电机便处于 $S \approx 2$ 的电磁制动运行状态 对转子产生较强的制动作用 使电机转速迅速下降到零 此时应立即切断电源，否则电机将反转。为了使反接时电流不致过大，若为绕线式异步电动机，反接时，应在转子回路串入附加电阻。

2. 正接反转

当绕线式异步电动机拖动的起重机下放重物时，其运行状态便是正接反转。这时电动机的定子绕组按作电动机运行时的接法接线（即所谓正接），而利用转子回路串入较大电阻 r_f 来使转子反转。其原理与在转子回路串电阻调速相同，如图 12-23 (a) 所示。当串入转子电阻逐渐增大时，转子转速 n 逐渐减小至零，如图 $a \rightarrow b \rightarrow c$ 所示。此时如 r_f 继续增加，电磁转矩小于负载转矩，电动机开始反转而进入反接制动状态，重物下落。当 r_f 增加到 r_{f3} 时，电动机稳定运行于 d 点，转差率 $s = 1.2$ ，而转子反转的转速为 $0.2n_1$ ，从而保证了重物以较低的速度慢慢下放，而不致把重物损坏。显然，可通过调节转子回路电阻的大小来控制重物下放的速度。

二、发电机制动

如果由于外来因素的影响，使电动机转子转速加速到大于同步转速（ $n > n_1$ ），则电机进入发电机运行状态。发电机制动主要用于变极调速的电动机。当电动机由少数极变换到多数极的瞬间，旋转磁场的转速降低到原来的一半，于是转子转速大于同步转速，电机进

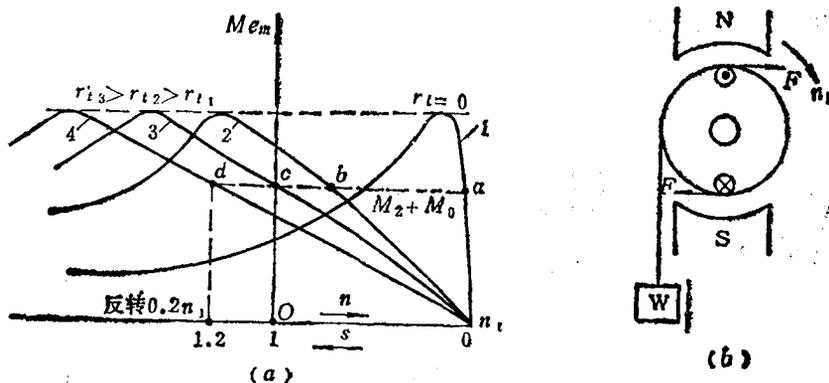


图 12-23 正接反转制动状态

入发电机制动状态运行，制动力矩驱使电动机减速到稳定运行。

当起重机下放重物时，可以利用发电机制动来实现重物平稳地下降到地面，如图 12-24 所示。起重机下放重物时，电机在电动机电磁转矩和重物的重力产生的转矩双重作用下，重物以越来越快的速度下降，当转子转速由于重力的作用超过定子旋转磁场转速 ($n > n_1$) 时，电机进入发电机制动状态运行，电磁转矩方向改变，由驱动力矩变成制动力矩，转子开始减速，直到电机制动力矩与重力矩相平衡时，重物以恒定转速下降到地面。

三、能耗制动

能耗制动就是将异步电动机从交流电源断开，然后在定子绕组上接上一个直流电源。此时，定子绕组产生一个静止的气隙磁场。这时转子对磁场的相对转速就是转子本身的转速

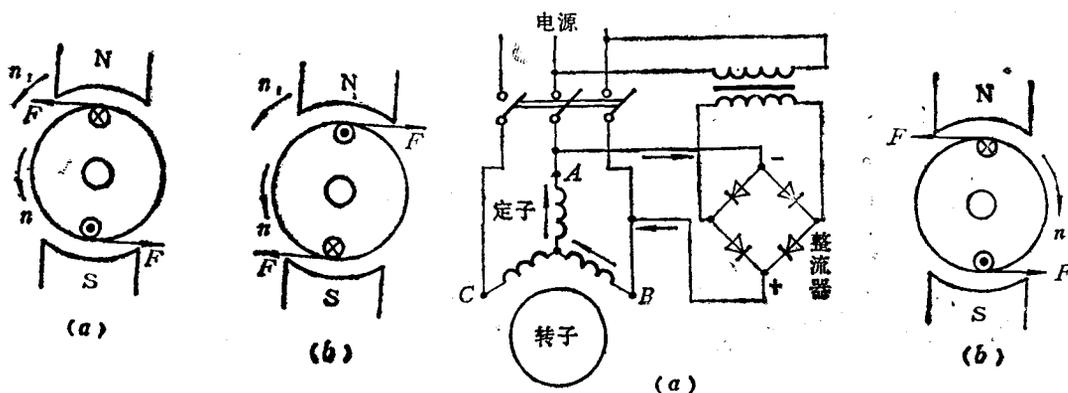


图 12-24 发电机制动

图 12-25 能耗制动

n 。转子导体切割气隙磁场而产生感应电流，该电流与气隙磁场相互作用而产生电磁转矩，该转矩方向与转子转动方向相反，是一个制动转矩，使电机很快停转。这时电机储存的动能全部变成电能消耗在转电子阻上，故称为能耗制动。能耗制动线路图 12-25 所示。

图 12-25 (a) 是能耗制动的一个典型线路图，制动时，定子两相绕组接成串联，

由整流器供给励磁电流。在鼠笼式异步电机中，可通过调节直流励磁来控制力矩的大小。在绕线式异步电机中，可通过调节转子电阻来控制制动力矩的大小。

第九节 小结

(1) 本章讨论了异步电动机的主要问题：启动、调速和制动。异步电动机的启动和调速性能都是比较差的。

(2) 标志异步电动机启动性能的主要指标是启动转矩倍数 M_{st}/M_N 和启动电流倍数 I_{st}/I_N 。对异步电动机启动的主要要求是：启动电流倍数小，启动转矩倍数大。

(3) 鼠笼式异步电动机的启动有直接启动和降压启动两种方法。如果电网容量较大，输电线压降在允许范围内，应尽量采用直接启动，以获得较大的启动转矩。当电网容量较小时，应采用降压启动，以减小启动电流。常用的方法是 Y- Δ 转换降压启动和自耦变压器降压启动。降压启动时，启动电流减小了，启动转矩也减小了，启动性能差，只能用于空载或轻载启动。绕线式异步电动机是通过在转子回路串电阻进行启动的。增大转子电阻对改善启动性能是十分有利的，不但减小了启动电流，而且提高了功率因数，增大了启动转矩。

(4) 双鼠笼和深槽式异步电动机都是利用转子电流的“集肤效应”来改善启动性能的。启动时，由于转子频率很高，转子电流的“集肤效应”使转子的有效电阻增大，从而限制了启动电流，增大了启动转矩。而正常运行时，由于转子电流频率很低，电流的“集肤效应”消失，转子电阻自动减小，保证了电动机正常运行时的效率。

(5) 异步电动机的调速方法很多，如变极调速、改变电源频率调速、改变电源电压调速、转子回路串电阻调速等。其中最常用的是变极调速（对鼠笼式异步电动机）和转子回路串电阻调速（对绕线式异步电动机）。近年来，随着可控硅技术的发展，变频调速逐渐增多。

(6) 变极调速是通过改变定子绕组的连接方法（即通过改变半相子定绕组电流方向）来实现调速的。

(7) 绕线式异步电动机是通过改变串入转子回路电阻的大小而实现调速的。串入的电阻越大，铜损越大，转差率越大，转速越低。

(8) 变频调速虽然能在较广的范围内平滑调速，但需要专用的变频电源装置，过去很少采用。变极调速虽然比较经济，但为有级调速。在转子回路串电阻调速虽然方法简单，但调速电阻上的功率损耗大，调速不经济。综上所述，异步电动机的调速性能是比较差的，如何改善异步电动机的调速性能，是今后电机学研究的重要课题之一。

(9) 异步电动机的制动方法有：反接制动，发电机制动，能耗制动。

思考题及习题

12-1 异步电动机在额定电压下启动时，为什么启动电流很大，而启动转矩不大？

12-2 有一台异步电动机的额定电压为 380/220V，接在 380V 的交流电网上空载起

动,能否采用Y— Δ 降压启动?

12-3 为什么深槽式和双鼠笼式异步电动机能减小启动电流,增大启动转矩?

12-4 为什么绕线式异步电动机在转子回路中串电阻后,能减小启动电流,增大启动转矩?串入的电阻是否越大越好?

12-5 一台异步电动机的额定容量 $P_N=28\text{kW}$,额定电压 $U_N=380\text{V}$,额定效率 $\eta_N=90\%$,额定功率因数 $\cos\varphi_N=0.88$,定子三相绕组为 Δ 接法, $I_{st}/I_N=6$ 。如果采用Y— Δ 启动,启动电流为多少?

12-6 三相异步电动机空载和满载启动时,启动电流和启动转矩是否一样?

12-7 有一台异步电动机,其额定数据如下:

$P_N=10\text{kW}$, $n_N=1460\text{r/min}$, 电压220/380V, $\eta_N=0.868$, $\cos\varphi_N=0.88$, $M_{st}/M_N=1.5$, $I_{st}/I_N=6.5$ 。试求:

- (1) 额定电流;
- (2) 用Y— Δ 降压启动时的启动电流和启动转矩;
- (3) 当负载转矩为额定转矩的60%和25%时,电动机能否采用Y— Δ 降压启动?

12-8 有一台异步电动机的额定数据为: $P_N=10\text{kW}$, $n_N=1460\text{r/min}$, Y接法, $U_N=380\text{V}$, $\eta_N=0.868$, $\cos\varphi_N=0.88$, $M_{st}/M_N=1.5$, $I_{st}/I_N=6.5$ 。试求:

- (1) 额定电流;
- (2) 如果用自耦变压器降压启动,使电动机的启动转矩为额定转矩的80% 试确定变压器应选用的抽头;
- (3) 电网供给的启动电流。

12-9 有一台绕线式异步电动机: $P_N=155\text{kW}$, $I_{1N}=294\text{A}$, $2p=4$, $U_N=380\text{V}$, Y接法。其参数为: $r_1=r'_2=0.012\Omega$, $x_1=x'_2=0.06\Omega$, $K_e=K_t=1.1$ 。该电机启动时,要求启动电流限制在 $3.5I_N$, 试求:

- (1) 在转子回路中,每相应串入多大的启动电阻?
- (2) 这时的启动转矩为多大?

12-10 试述2:1双速异步电动机的变极原理。

12-11 有一台绕线式异步电动机: $2p=4$, $f_1=50\text{Hz}$, 转子每相电阻 $r'_2=0.02\Omega$, $n_N=1475\text{r/min}$, $K_e=K_t=1.342$, 若负载转矩不变,要求把转速下降到 1200r/min ,在转子每相绕组中应串入多大的电阻?

12-12 三相绕线式异步电动机反接制动时,为什么要在转子回路中串入比较大的电阻?

12-13 填空题

- (1) 三相异步电动机的定子绕组接法为_____时,才能采用Y— Δ 启动。
- (2) 深槽式和双鼠笼异步电动机都是利用_____原理来改善启动性能的。
- (3) 鼠笼式异步电动机降压启动时,启动电流_____,启动转矩_____。

(4) 绕线式异步电动机在转子回路串电阻起动时, 起动电流 _____, 起动转矩 _____, 功率因数 _____。

(5) 一台定子绕组为Y接法的三相鼠笼式异步电动机, 如果把定子每相绕组中的半相绕组电流反向, 通入相序不变的三相对称电流, 电动机极对数 _____, 同步转速 _____, 转向 _____。

(6) 绕线式异步电动机拖动恒转矩负载运行时, 增大转子回路串入的电阻, 电机的转速 _____, 过载能力 _____, 电流 _____。

(7) 如将异步电动机接电源的定子三相绕组 _____, 则电动机反转运行。

(8) 异步电动机制动的方法有 _____、_____ 和 _____。

第十三章 三相异步电动机的控制电路

当电动机拖动生产机械做功时，首先遇到的问题就是起动与停止，这就需要对电动机进行控制。实际上，各种生产机械，为了完成一定的工艺过程，要求拖动生产机械的电动机按照生产工艺的要求进行工作。例如，要求电动机正转、反转、快速停车、恒速运转、连续调速、分级调速等，这些都需要对电动机进行控制。

电动机的控制分为手动操作和自动操作两种。手动操作由工作人员直接操作电动机的控制开关。自动操作则是通过继电器、接触器、手动按钮及其它电器组成自动控制回路来实现对电机的控制。

本章简单介绍三相异步电动机控制电路中的常用电器及其图形符号，重点讨论三相异步电动机的起动、停车、正反转、制动的控制方法及控制电路。

第一节 控制电路中主要控制元件

一、刀开关与转换开关

刀开关又叫刀闸，通常用于低压电路中，用来接通或断开电路。

刀开关有单极、双极和多极几种，它的图形符号如图 13-1 所示，其中 (a) 为单极开关，(b) 为三极开关。

由于刀开关速度慢，灭弧困难，只能断开小电流，多用在配电装置上，作为隔离开关使用，也可用于小容量电动机的起停控制。

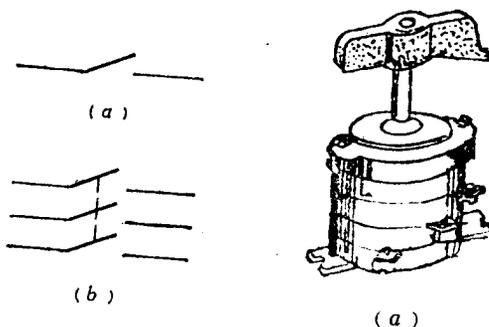


图 13-1 刀开关
(a) 单极；(b) 三极

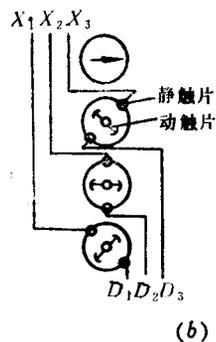


图 13-2 转换开关
(a) 开关外形；(b) 结构原理

二、转换开关

转换开关又叫组合开关，由装在同一根转轴上的单个或多个单极旋转开关迭装而成，如图 13-2 所示。转动手柄，动触片插入相应的静触片中，使电路接通。为了使开关在切断电流时所产生的电弧能迅速熄灭，在刀开关的转轴上装有加速动作的操作机构。

转换开关在控制电路中作隔离开关使用，也可用于小容量电动机的起动、停止或正、反转。

图13-3是转换开关触点图形符号，(a)是常开触点，(b)是常闭触点，(c)是切换触点，

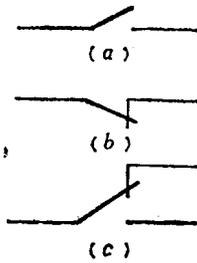


图 13-3 转换开关触点图形符号
(a)常开触点；(b)常闭触点；(c)切换触点

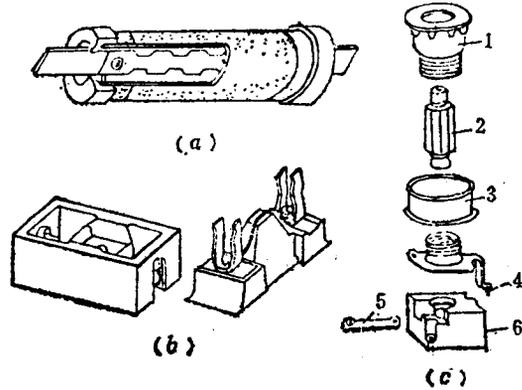


图 13-4 熔断器
(a)管式熔断器；(b)插式熔断器；(c)螺旋式熔断器
1—瓷质螺帽；2—熔件管；3—瓷套；4—上接线触头；
5—下接线触头；6—底座

三、熔断器

熔断器是最简单的短路保护装置。熔断器的熔片或熔丝用电阻率较高而易熔化的合金（如铅锡合金）制成，或用截面较小的良导体铜、银等制成。线路正常工作时，熔断器的熔丝不应熔断，线路发生短路或严重故障时，熔丝立即熔断。图13-4是常用的三种熔断器的结构图。

四、按钮开关

按钮开关常用来接通或断开电流很小的电路，从而控制电动机的起动与停止。图13-5 (a)是手动按钮开关原理图。按钮内部由公共桥式动触点与静触点组成一对常开触点和

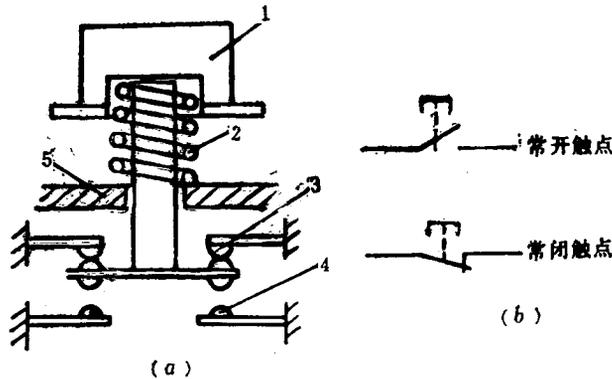


图 13-5 手动按钮
(a)原理图；(b)触点图形符号
1—按钮帽；2—复位弹簧；3—常闭触点；4—常开触点；5—外壳；6—桥式动触点

常闭触点。常开触点指按钮未被按下时处于断开的触点；常闭触点是指按钮未被按下时处于闭合的触点。按下按钮 1，常闭触点 3 先断开，然后常开触点 4 闭合。松手后，触点自动复位。图 13-5 (b) 是按钮触点的图形符号。

五、接触器

接触器利用电磁原理实现电路的通和断开。它操作方便，动作迅速，灭弧性能好，能频繁操作，并能实现远距离操作和自动控制，所以应用广泛。接触器有交流接触器和直流接触器两种。用它来接通或断开大电流电路，多用于电动机控制。

接触器主要由电磁铁、触头和灭弧装置三部分组成。根据用途不同，接触器的触头分为主触头和辅助触头两种。主触头能通过较大电流，接在电动机的主电路中；辅助触头通过电流小，常接在电动机的控制电路中。

图 13-6 (a) 是电磁式交流接触器的原理图，(b) 是交流接触器触点的图形符号。

交流接触器工作原理：当在交流接触器的线圈 1 加上额定交流电压时，在静铁芯 2 里产生磁通，对衔铁 3 便有吸力。当吸力大于弹簧 4 的反作用力时，衔铁被吸引，向静铁芯移动，直至二者相接触为止。在接触器的衔铁上，通过机械连接，装上几对常开、常闭触点。所谓常开触点，是指接触器线圈没有通电时，它的触点处于断开状态；所谓常闭触点，是当接触器线圈没有通电时，它的触点处于闭合状态。当接触器线圈通电后，常开触点才闭合。当接触器线圈断电后，衔铁因受弹簧的反作用力而恢复原来的状态。

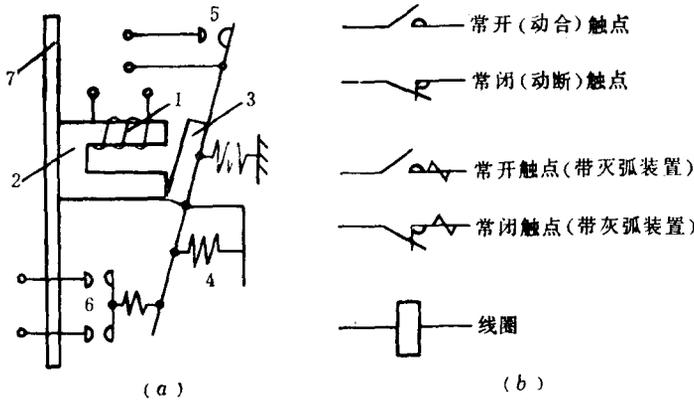


图 13-6 电磁式交流接触器
 (a) 原理图；(b) 触点、线圈图形符号
 1—线圈；2—静铁心；3—衔铁；4—反力弹簧；
 5—主触点；6—辅助触点；7—底座

接触器的主触头用来接通或断开大电流回路。由于主触点在断开大电流回路时容易产生电弧，不能很快地断开电路；同时电弧温度很高，要把触点烧坏。为此，在主触点上加装了灭弧装置。

六、继电器

继电器是电力继电保护装置、热工保护装置和自动控制电路中的基本元件。当加入继电器的物理量达到一定数值时，继电器就自动动作。最常用的继电器有电流继电器、电压

继电器、时间继电器、热继电器、中间继电器等。无论什么继电器都具有触点——或常开触点，或常闭触点，或常开、常闭触点均有。在设计自动控制电路时，可根据实际需要选用不同作用的继电器及其触点类型。

1. 电流继电器

常用的电流继电器有电磁型和感应型两种。电磁型电流继电器由电磁铁 1、线圈 2、衔铁 3 反作用弹簧 4、动触点 5、静触点 6、调节指针 7 和刻度盘 8 等部件组成，如图 13-7 所示。

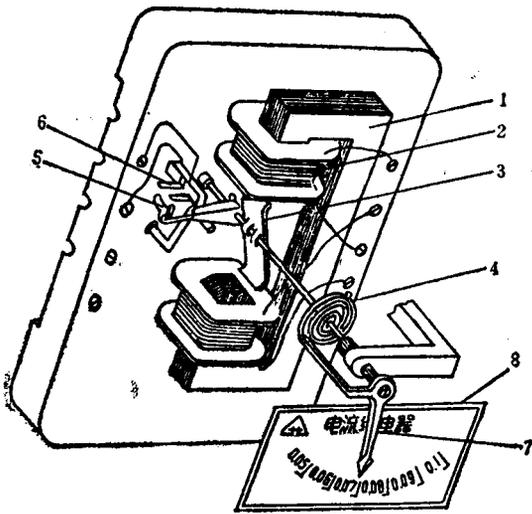


图 13-7 电磁式电流继电器

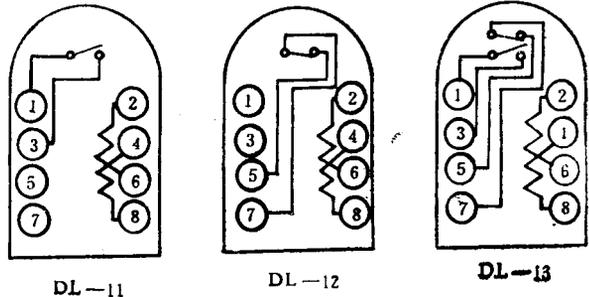


图 13-8 DL-10 系列电流继电器的内部接线

在电磁铁上套有匝数很少而导线较粗的电流线圈，使用时该线圈串联在电流互感器的二次回路中。当通过线圈的电流达到继电器的动作电流时，线圈产生的电磁力克服了弹簧的反作用力，吸动 Z 形衔铁，带动转轴，使动触点与静触点接通（此时称继电器动作），致使由继电器常开触点所控制电路的开关跳闸。

常用电磁型电流继电器为 DL-10 系列，其内部接线如图 13-8 所示。

2. 电压继电器

电压继电器分过电压继电器和低电压继电器两种，前者反应电压升高而动作，后者反应电压降低而动作。电磁式电压继电器的结构、原理和内部接线，基本上与电磁式电流继电器相同。所不同的是电压继电器的线圈匝数多，导线较细，工作时并联在电压回路中。

常用的电磁式电压继电器为 DJ-100 系列，过电压继电器的内部接线如图 13-9 所示。

3. 中间继电器

电流继电器和电压继电器的触点少，切断电流的能力小，一般不能直接去控制开关跳闸。为了弥补这个缺陷，需要有一个中间过渡的继电器，称为中间继电器。中间继电器一般都有好几对触点，其触点的容量也较大。它在继电保护和自动装置中，起了增加触点数目和增大触点容量的作用。

中间继电器一般都按电磁原理构成，其结构如图 13-10 所示。

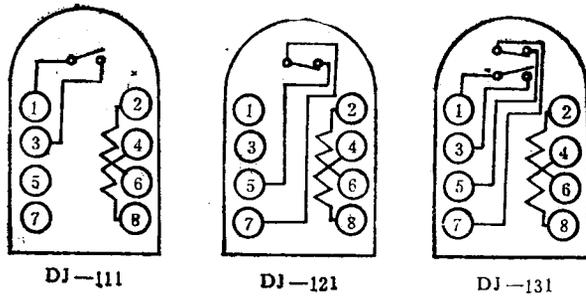


图 13-9 DJ-100 系列过电压继电器内部接线

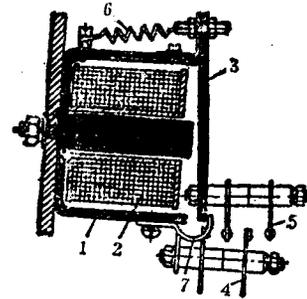


图 13-10 DZ-10 系列中间继电器的结构图

1—电磁铁；2—线圈；3—衔铁；4—静触点；
5—动触点；6—弹簧；7—衔铁行程限制器

当前一级继电器动作时，其触点将中间继电器的线圈与电源接通，电磁铁产生电磁力使衔铁动作，其常开触点闭合，常闭触点断开。当外加电压消失后，衔铁因受弹簧拉力的作用而返回到原来的位置。

4. 时间继电器

时间继电器能使继电保护和自动装置的动作具有既定的延时性，以保证继电保护和自动装置之间的相互配合，实现有选择性动作。

电磁式时间继电器结构如图 13-11 所示。当继电器线圈 1 加入动作电压时，衔铁被瞬时吸入电磁线圈中，扇形齿轮的曲柄杠杆 9 被释放，在主弹簧 11 的作用下，使扇形齿轮 10 按顺时针方向转动，并带动齿轮 13、经摩擦离合器 14，使同轴的主齿轮 15 转动，并传动钟表机构，使动触点 22 以恒速转动，经过一定时间与静触点 23 接触。即是说时间继电器通电后，其延时触点并不立即断开或闭合，而是经过一段时间后，它的常闭触点才断开，常

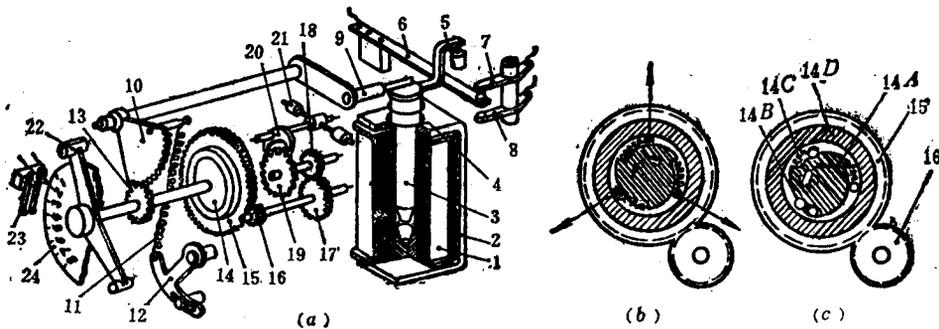


图 13-11 DS-100、DS-120 系列时间继电器结构图

(a) 继电器结构图；(b) 继电器动作时的摩擦离合器；(c) 继电器返回时的摩擦离合器
1—线圈；2—电磁铁；3—衔铁；4—返回弹簧；5—轧头；6—可动瞬时触点；7、8—固定瞬时触点；9—曲柄杠杆；10—扇形齿轮；11—主弹簧；12—改变弹簧的拉力的卡板；13—齿轮；14—摩擦离合器（14A—凸轮）；14—摩擦离合器（14A—凸轮；14B—滚珠；14C—弹簧；14D—套圈）；15—主齿轮；16—钟表机构的齿轮；17、18—钟表机构的中间齿轮；19—摆卡；20—摆卡；21—平衡锤；22—动触点；23—静触点；24—刻度盘

开触点才闭合。它的触点符号如图 13-12 (a) 和 (b) 所示。(a) 是常闭触点延时断开, (b) 是常开触点延时闭合。这种方式称为通电延时。

还有一种延时方式叫断电延时。当继电器的线圈接通电源时, 各触点瞬时动作, 即常闭触点立即断开, 常开触点立即闭合, 没有延时功能。但是当线圈断电时, 各触点延时动作, 即常闭触点延时闭合, 常开触点延时断开。它们的表示符号如图 13-12 (c) 和 (d) 所示。图 (c) 是延时闭合常闭触点图形符号; 图 (d) 是延时断开常开触点图形符号。

各种时间继电器有一定的延时范围。延时的长短可以通过改变静触点的起始位置来进行调节。

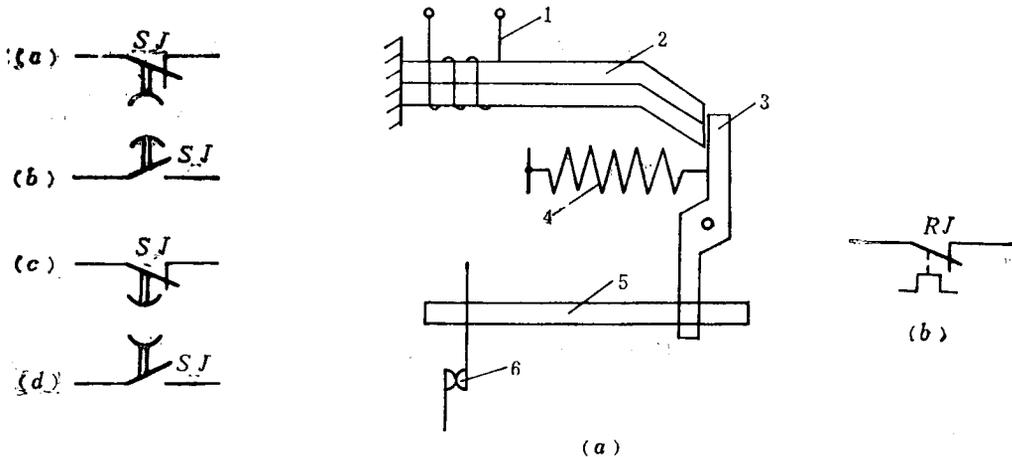


图 13-12 时间继电器触点图形符号

13-13 热继电器
(a) 原理图; (b) 触点图形符号
1—电阻丝; 2—双金属片; 3—扣杆; 4—释放弹簧; 5—连杆; 6—触点

5. 热继电器

热继电器常闭触点的断开, 是通过热量的大小来进行控制的。热继电器的结构及其触点图形符号如图 13-13 所示。图 13-13 (a) 中 2 是双金属片, 它是由两种不同膨胀系数的金属片压制而成的。下层金属片的膨胀系数大, 上层金属片的膨胀系数小。当电流通过双金属片上的电阻丝 1 时, 电阻线圈产生损耗而发热, 双金属片温度升高, 由于两种金属材料膨胀系数不同, 在同样温度下, 下层金属片比上层金属片膨胀得多, 致使双金属片向上弯曲, 扣杆 3 脱扣。在弹簧 4 拉力的作用下, 使连杆 5 从左向右移动, 迫使常闭触点 6 断开。

由于双金属片热惯性强, 发热元件中电流超过允许电流时, 要经过一段时间后, 热继电器的常闭触点才能断开, 所以, 热继电器可以用来保护异步电动机的过载。

第二节 三相异步电动机的控制电路

本节主要介绍用交流接触器和按钮等设备所组成的鼠笼式异步电动机的控制电路。

一、三相异步电动机的点动控制电路

三相异步电动机在拖动生产机械工作时，在有些情况下，要求电动机能瞬时转动，称为点动。例如，刚安装完毕的生产机械需要试车就属于点动。图13-14是最简单的点动控制电路。其操作步骤如下：

(1) 起动：首先合上电源刀开关 DK ，然后按下点动按钮开关 QA ，接触器 C 的线圈带电，其主触点 C 闭合，电动机因接通电源而起动。

(2) 停车：当放开点动按钮开关 QA ， QA 自动复位而处于断开状态，接触器 C 线圈断电，其主触点 C 断开，电动机因切断电源而停转。如果再按 QA ，电动机重新起动。

图13-14中的 RJ 是热继电器，它的常闭触点串联在控制回路中，当电动机过载运行时，时间一长，热继电器动作，它的常闭触点断开，切断控制回路电源，从而保护了电动机不被烧坏。如果是短时过载，然后又恢复正常，热继电器不会动作。

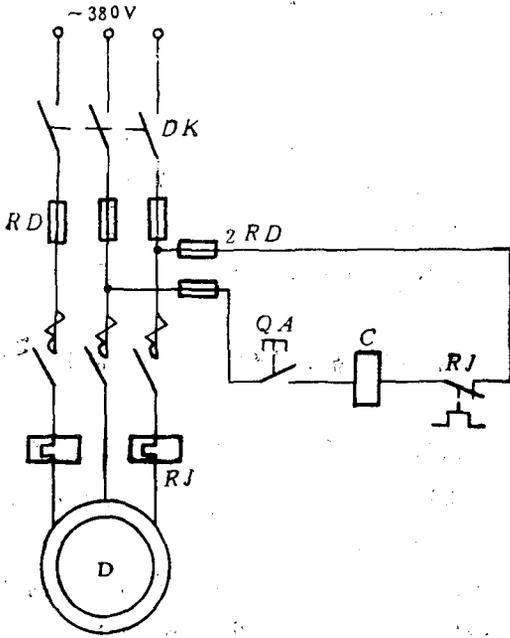


图 13-14 三相异步电动机点动控制电路

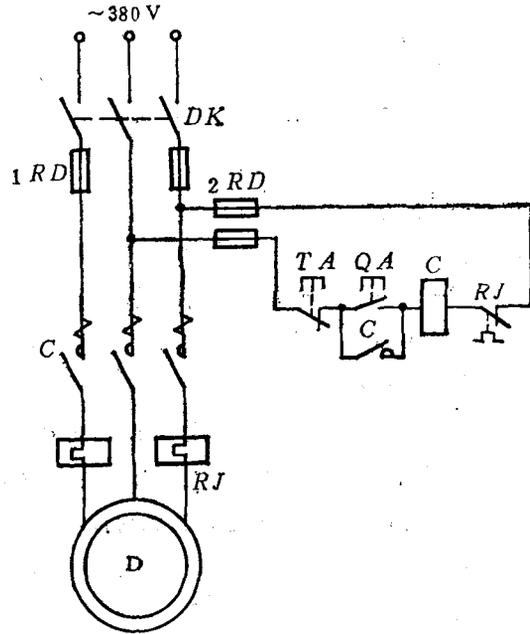


图 13-15 三相异步电动机起动与停车控制电路

二、三相异步电动机的起动与停车控制电路

生产的机械常常需要起动与停车。图13-15是三相异步电动机起动与停车控制电路。

先合上刀开关 DK ，再按下起动按钮 QA ，接触器 C 线圈通电，其主触点 C 闭合，电动机因接通电源而起动。接触器 C 的辅助触点 C 与起动按钮并联，当接触器 C 的线圈通电时，辅助触点 C 闭合。这时，如果放开 QA 按钮，则 QA 自动复位而断开，但是接触器的常开辅助触点闭合，接触器线圈仍然带电，电动机继续运转。

按下停车按钮 TA ， TA 的常闭触点断开，接触器 C 的线圈断电，电动机停车。

三、三相鼠笼式异步电动机正、反转控制电路

在生产上不仅需要控制电动机的起动和停车，有些生产机械还要求电动机能向正、反

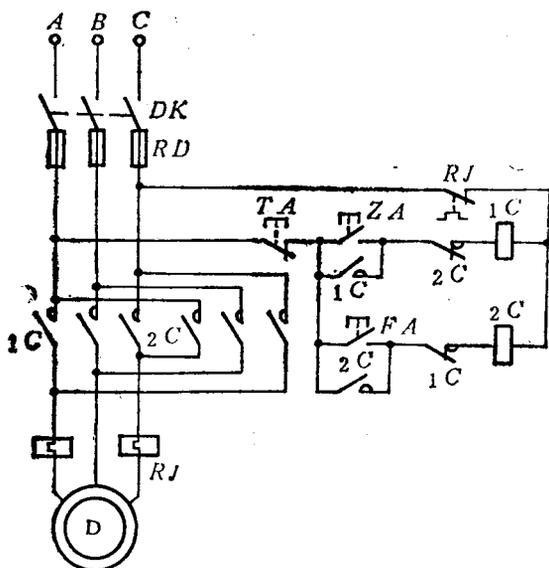


图 13-16 三相异步电动机正反转的控制电路

ZA→接触器常闭辅助触点 2C→接触器线圈 1C→热继电器 RJ 常闭触点→电源 C 相。接触器线圈 1C 带电，其主触点闭合，电动机与电源接通，而且通入电动机定子绕组的电源相序为 A—B—C，电动机起动正转运行。

(3) 停车：按下按钮 TA，正转控制电路断电，接触器 1C 释放，主触点断开，电动机因断电而停转。

(4) 反转：在电动机停转后，再按下反转按钮 FA，反转控制电路通电，接触器 2C 动作，主触点闭合。此时，通入电动机定子绕组电源的相序为 A—C—B，电动机反转。

接触器 1C 的常开辅助触点与按钮 ZA 并联，起自保持（自锁）作用，而 1C 的常闭辅助触点串联在反转控制电路中，起联锁（互锁）作用。当 1C 动作后，它的常闭辅助触点断开了反转控制电路，这时，即使不慎误按反转按钮 FA，接触器 2C 也不会动作，这就防止了因误操作而使两只接触器主触点同时闭合所造成的短路事故。同理，接触器 2C 的常开、常闭辅助触点也有同样的自锁、互锁作用。

两个接触器 1C、2C 中的任一个通电后，它的常闭辅助触点应断开，但是有时遇到该触点已损坏，并未断开，其结果不能实现互锁的目的。为了安全起见，可采用两套互锁措施，即分别把正、反转起动按钮 ZA、FA 的常闭触点串在反、正转接触器 2C、1C 电路中，如图 13-17 所示。

采用上述两套装置互锁后，电动机正、反转控制电路就比较安全可靠了。

如果异步电动机正、反转控制电路是按图 13-17 接线，当电动机已经在正转下运转，要想让它反转，不必按下停车按钮 TA，可直接按下反转按钮 FA，即可实现电动机反转。

四、三相异步电动机 Y—Δ 起动控制电路

为了减小起动电流，异步电动机常采用降压来动。下面介绍 Y—Δ 降压起动控制电

两个方向转动。例如，起重机提升时要求电动机正转，下降时要求电动机反转。发电厂中各种阀门的开启与关闭等都要求电动机既能正转，也能反转。

讨论三相异步电动机工作原理时就已经知道，过通改变三相异步电动机定子电流相序就能实现电动机反转。将电动机接到电源的任意两根导线互相对调，电流相序改变，电动机反转。

图 13-16 是由两只交流接触器组成的三相异步电动机正、反转的控制电路，其操作步骤如下：

(1) 合上刀开关 DK，接通电源；

(2) 起动及正转：按下正转按钮

ZA，正转控制电路通电，电流流经的路径是电源 A 相→停止按钮 TA→正转按钮

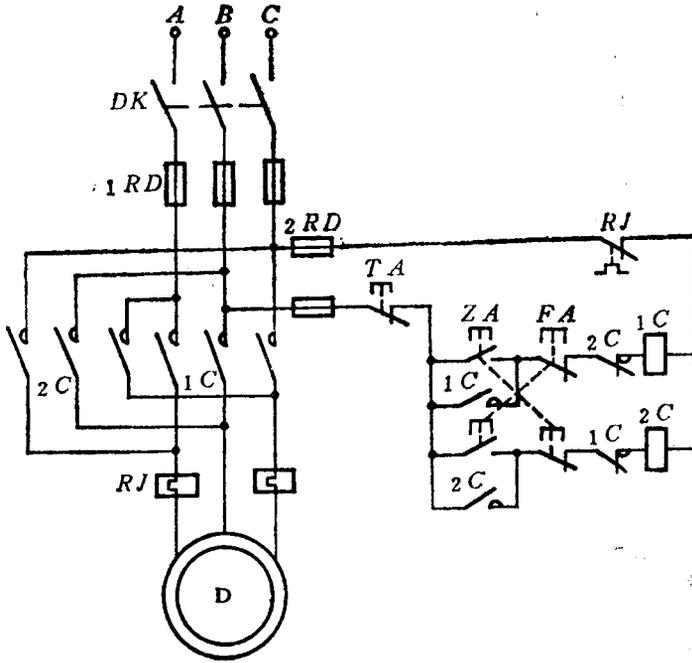


图 13-17 三相异步电动机能互锁的正、反转控制电路

路。

电动机起动时，定子绕组接成 Υ ，待电动机转速接近额定转速时，定子绕组改接成 Δ ，在额定电压下正常运行。

Υ - Δ 起动控制电路如图 13-18 所示，它是用时间继电器来进行控制的。工作过程如下：

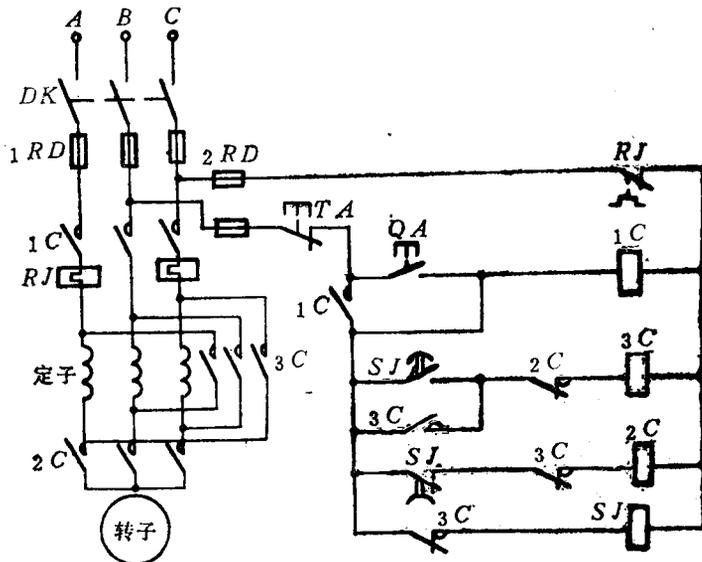


图 13-18 三相异步电动机 Υ - Δ 起动控制电路

合上刀开关 DK 按下起动按钮 QA 接触器 $1C$ 、 $2C$ 和时间继电器 SJ 线圈带电， $1C$ 和 $2C$ 同时动作， $2C$ 主触点闭合，电动机三相绕组接成 Y ； $1C$ 主触点闭合，电动机的三根出线接上电源，于是电动机在 Y 接法下降压起动。经过一定时间后，时间继电器 SJ 的常闭触点断开，接触器 $2C$ 断电，时间继电器常开触点闭合，接触器 $3C$ 通电， $3C$ 主触点闭合，电动机三相绕组联接成 Δ ，在额定电压下正常运行。

在控制电路中，接触器 $2C$ 、 $3C$ 有互锁功能，防止电源短路。

五、三相异步电动机采用自耦变压器降压起动控制电路

起动时，把自耦变压器的原边接在电源上，副边接在电动机的定子绕组上，实现降压起动。经过一定时间后，再把自耦变压器的原副边断开，电动机接在电源上，在额定电压下运行。

自耦变压器降压起动控制电路如图 13-19 所示。控制电路分为自动与手动两种，用转换开关 HK 来实现。当转换开关旋在“ Z ”的位置时，为自动起动；旋在“ S ”的位置时，为手动起动。

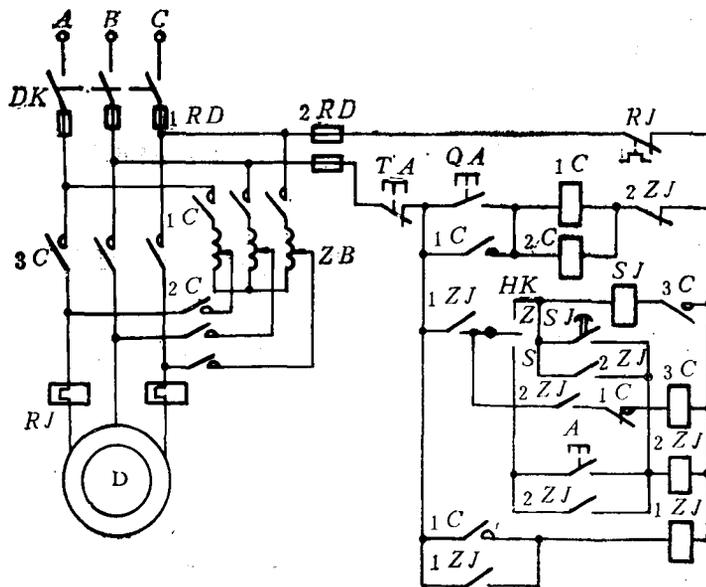


图 13-19 自耦变压器降压起动控制电路

1. 自动起动

自动起动的动作过程如下：

将转换开关 HK 放在自动位置 Z 上，合上刀开关 DK 按下起动按钮 QA ，接触器 $1C$ 、 $2C$ 通电并自锁。接触器 $1C$ 通电后，其主触点闭合。将自耦变压器 ZB 原边接在电源上；接触器 $2C$ 通电后主触点闭合，将 ZB 副边接在电动机定子绕组上，实现了降压起动。接触器 $1C$ 的常开触点接通了中间继电器 $1ZJ$ 的线圈电路， $1ZJ$ 通电，并自锁。中间继电器的常开触点闭合，接通了时间继电器 SJ 的线圈电路。经过一定的延时， SJ 的常开触点闭合，接通了中间继电器 $2ZJ$ 的线圈电路，并自锁。 $2ZJ$ 的常闭触点断开，使接触器 $1C$ 、 $2C$ 断电，

自耦变压器退出电动机主电路。接触器1C断电后，它的常闭触点闭合，接触器3C线圈通电，它的主触点闭合，电动机的定子绕组直接接在三相交流电源上，电动机在额定电压下正常运转。

2. 手动起动

手动起动的动作过程如下：

将转换开关置于手动位置S上，按下起动按钮QA，接触器1C、2C通电，并自锁。它们的主触头闭合，电动机降压起动。接触器1C的常开触头接通了1ZJ的线圈电路，1ZJ并自锁，1ZJ的常开触点闭合。当电动机转速上升到接近额定转速时，按下按钮A，接通了中间继电器2ZJ的线圈电路，并自锁。2ZJ常闭触点断开，接触器1C、2C断电，自耦变压器退出电动机主回路。接触器1C断电后，它的常闭触点闭合，接触器3C线圈通电，它的主触头闭合，电动机在额定电压下运行。

手动起动与自动起动过程基本相同，只是在手动起动时，时间继电器不起作用，自耦变压器不能自动退出，而是操作者通过按下按钮A来退出自耦变压器，使电动机正常运行。

六、三相异步电动机反接制动控制电路

为了提高劳动生产率，有些生产机械（例如车床的主轴，铣床的铣刀等）要求快速停车，拖动这些生产机械的电动机必须具有制动功能。异步电动机常用的制动方法有三种：反接制动，发电机制动，能耗制动。这里只介绍反接制动控制电路。

将正在运行的异步电动机定子绕组的三相供电线任意对调两相后，利用速度继电器，当电动机转速接近于零时切断电动机电源，实现反接制动，快速停车。

为了限制电流，反接制动回路中必须串入电阻R。反接制动控制电路如图13-20所示，其动作过程为：

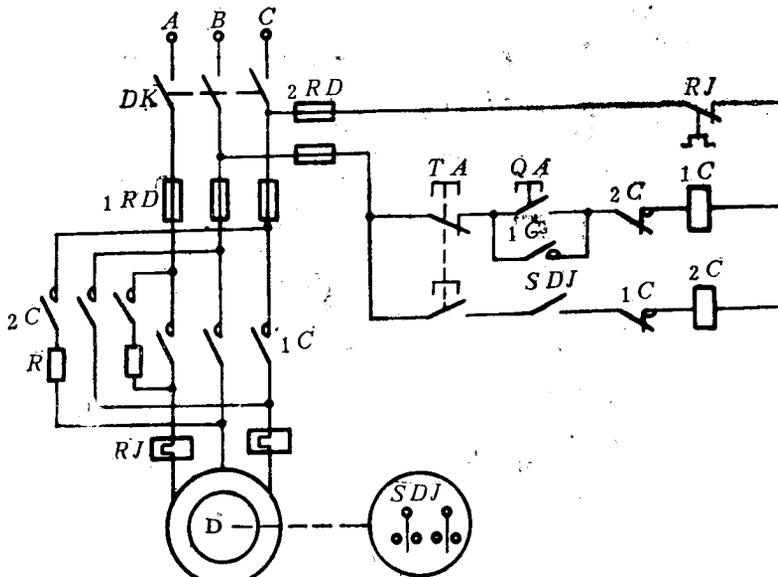


图 13-20 三相异步电动机反接制动控制电路

按下停车按钮 TA ，接触器 $1C$ 线圈断电，它的常闭辅助触点 $1C$ 闭合 接通了 $2C$ 的线圈回路，主触头 $2C$ 闭合，将电源反接，电动机进入反接制动。当电动机转速接近零时，速度继电器 SDJ 的常开触点断开，接触器 $2C$ 的线圈断电，它的主触头 $2C$ 断开，迅速切断电源，反接制动完毕。

第 三 节 小 结

(1) 刀开关、转换开关、按钮开关、接触器、中间继电器、时间继电器、热继电器、速度继电器等，是电动机控制电路中常用的电器。应了解它们的原理、作用和图形符号。

(2) 交流接触器应用电磁原理作成。它的触点分为主触点和辅助触点。当接触器线圈未通电时，凡断开的辅助触点，称为常开触点；处于闭合状态的辅助触点，称为常闭触点。当接触器线圈通电后，常开触点闭合，常闭触点断开。

(3) 对于异步电动机控制电路 读图的基本原则是从上到下 从左到右。

思 考 题 及 习 题

13-1 叙述交流接触器的工作原理。

13-2 简述三相绕线式异步电动机用频敏变阻器 PMR 起动控制电路的动作过程。三相绕线式异步电动机用频敏变阻器起动控制电路如图 13-21 所示。

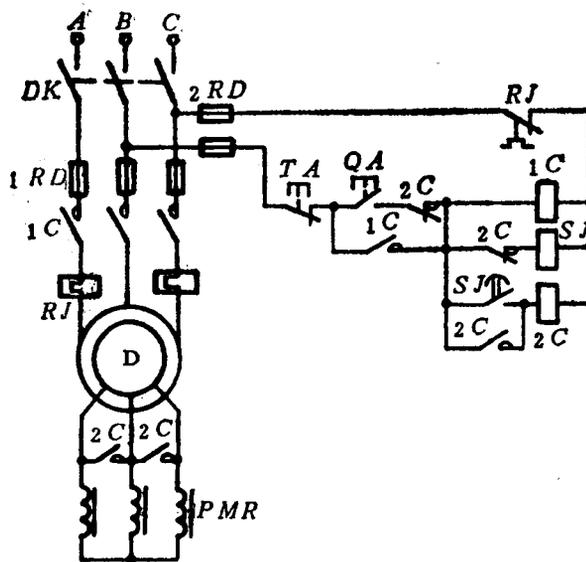


图 13-21 题 13-2 图

第十四章 异步电动机的非正常运行

电力系统有功不平衡会引起频率的波动，无功不平衡会引起电压的波动。而电力系统中的负载是变化的，功率不平衡的情况时有发生，因此，异步电动机有可能在非额定电压或非额定频率下运行。近几年来，由于电力工业的发展满足不了工农业生产的需要，很多省、市严重缺电，造成低电压、低周波运行。本章简单介绍异步电动机在非正常情况下运行特征。

第一节 异步电动机在非额定电压下的运行

实际电压与额定电压之差不超过 $\pm 5\%$ 是允许的，这对电机的运行不会有显著的影响，电动机仍能承担额定负荷。但电压波动超过 $\pm 5\%$ ，将引起电机过热，致使电动机只能轻载运行。

为了充分利用铁芯材料，电动机在额定电压下运行时，铁芯是处于接近饱和状态的。当电压变化时，电机铁芯的饱和程度随之而变化，从而引起激磁电流、效率、功率因数的变化。电压变化时，电磁力矩正比于电压的平方而改变。

下面定性地讨论 $U_1 > U_N$ 和 $U_1 < U_N$ 对电动机的影响。

一、 $U_1 > U_N$ 时

如果电动机在 $U_1 > U_N$ 的情况下工作，电机中的主磁通 Φ_m 将增加，磁路的饱和程度增大，在磁通增加不多的情况下激磁电流 I_0 将大大增加，其结果使电机的功率因数 $\cos\varphi_1$ 下降，定子电流增大，铁芯损耗和定子铜耗增加，从而使电机效率降低，温升提高。为了使电机安全运行，就必须减少负载而处于轻载运行。

二、 $U_1 < U_N$ 时

如果异步电动机在 $U_1 < U_N$ 的情况下工作，主磁通 Φ_m 减小，激磁电流随 Φ_m 的减小而减小，铁损随 Φ_m^2 的降低而减少。电磁力矩随 U_1^2 的降低而减小。如果负载一定，电动机转速下降，差转率 s 增大，转子电流 I_2 增加，转子铜损随 I_2^2 增加而增加。

异步电动机轻载运行时，转子电流 I_2' 和转子铜损很小。在定子电流两个分量 I_0 及 $-I_2'$ 中， I_0 起主要作用。当 U_1 降低时，定子电流 I_1 随 I_0 的减小而减小。由于 I_0 的减小和 $-I_2'$ 增大的结果，定子功率因数提高。在轻载时，铁损起主要作用，因此，效率随铁损的减小而略有提高。

综上所述，电动机轻载运行时，端电压 U_1 降低，对电动机运行是有利的，它使电动机的功率因数和效率提高。所以，在实际应用中，可以将 $Y-\Delta$ 起动的电动机，在轻载时，改成 Y 连接，以改善电机的功率因数和效率。但是，在正常负载情况下， U_1 降低对电动机运行是不利的。因为此时定子电流两个分量中， $-I_2'$ 起主要作用， U_1 降低时，

转差率 s 和转子电流 I_2' 增加，定子电流随之增加。由于 s 增大， r_2'/s 减小，转子回路功率因数角 $\varphi_2 = \text{tg}^{-1} \frac{sX_{20}}{r_2'}$ 增大，转子功率因数 $\cos\varphi_2$ 减小。

负载较大时，虽然由于磁通减小，铁损降低，但因铜损随电流的平方而增加，此时，铜损起主要作用，所以，总损耗还是增加，引起电机绕组过热，效率降低。由于电机的最大电磁转矩 M_{\max} 正比于电压的平方，如果电压降低太多，可能出现 M_{\max} 小于负载力矩而使电机停转。

综上所述，如果异步电动机的负载接近额定值时，端电压 U_1 降低，将使定子和转子电流增大，电机绕组发热，效率降低，功率因数减小。所以，规程规定，电动机在额定负载下运行时，外加电压不得低于额定电压的 5%。一般电动机装有低电压保护装置，当电网电压过低时，使电动机自动切除电源，以保护电机。

第二节 异步电动机在非额定频率下的运行

在大多数情况下，电网频率都是保持额定的。但有时由于发电量不足或电网发生故障时，频率会发生变化。如果频率的变化不超过额定频率 $\pm 1\%$ ，对发电及用电设备（如电动机）不会造成严重的影响，发电机及用电设备仍能正常运行。但如果频率偏差太大，则是不允许的。

如前所述，当不计异步电动机定子绕组中的电压降时， $U_1 = 4.44k_{r1}f_1N_1\Phi_m$ ，而 k_{r1} 、 N_1 均为常数，所以， $U_1 \propto f_1\Phi_m$ 。当保持电压不变（ $U_1 = U_N$ ）时，主磁通 Φ_m 将与频率 f_1 成反比变化，即 $\Phi_m \propto 1/f_1$ 。

当频率高于额定频率（ $f_1 > f_N$ ）时，主磁通 Φ_m 和激磁电流减小，电机的功率因数和效率提高。同时随着频率的增大，电机转速上升，使通风冷却条件得到改善。

当频率低于额定频率（ $f_1 < f_N$ ）时，则主磁通 Φ_m 增大，磁路饱和程度增加，引起电动机功率因数及效率降低。同时，随着频率的降低，电动机的转速减小，使通风冷却条件变坏，致使电动机温升提高。此时，电动机必须轻载运行，否则会过热。

第三节 小结

（1）当异步电动机带额定负载运行时，如果 $U_1 > U_N$ ，磁通增加，由于磁路饱和的影响，激磁电流急剧增加，功率因数变坏，损耗增加，效率降低，温升升高，电机必须轻载运行。如果 $U_1 < U_N$ ，转差率 s 和转子电流 I_2' 增加，功率因数角和铜损增大，引起电机功率因数变小，效率降低。如果电压降低太多，还可能引起电机停转，甚至烧坏。

（2）电动机轻载运行时，端电压 U_1 降低，对电机运行是有利的，它使电机效率提高，功率因数得到改善。所以，在实际应用中，可以将正常运行 Δ 连接的电机，在轻载时改成 Y 连接，以改善功率因数和提高电机效率。

（3）当 $f_1 < f_N$ 时，电动机主磁通、激磁电流、铁芯损耗增加、转速减小，致使电

动机功率因数和效率降低，通风冷却条件变坏，电机温升提高。所以频率降低时，电机必须轻载运行，否则会过热。

为了保证电动机安全、经济运行，要求电源电压和频率基本恒定。电压的波动不得超过 $\pm 5\%$ ，频率的波动不得超过 $\pm 1\%$ 。

思考题及习题

14-1 异步电动机外施电压过高，电机会发热，引起电机过热的原因是什么？

14-2 为什么异步电动机轻载运行时，电压低对电机运行有利，而带额定负载运行时，电压过低会引起电机发热甚至烧坏电机？

14-3 为什么异步电动机外施电源电压的频率波动不允许超过额定频率的 $\pm 1\%$ ？

第十五章 其它异步电动机

前几章讨论了三相异步电动机的结构，工作原理及运行性能。在动力负载中三相异步电动机使用得最广泛，但在只有单相电源的场合，还广泛地使用单相异步电动机。在生产科学试验中常用调压器和移相器。本章简单介绍单相异步电动机、调压器和移相器的特点及工作原理。

第一节 单相异步电动机

单相异步电动机由单相电源供电，因此，它广泛用于家用电器（如电扇、鼓风机、电唱机、洗衣机等）、电动工具、医疗器械及轻工设备中。与同容量的三相异步电动机相比较，单相异步电动机体积较大，效率及功率因数较低，过载能力较差。因此，单相异步电动机只作成微型的，功率一般在几瓦至几百瓦之间。

一、单相异步电动机的结构

单相异步电动机的类型很多，结构也各有不同。但除罩极电动机的定子具有凸出的磁极外，其余各类单相异步电动机定子与普通三相异步电动机相似，转子一般是鼠笼式的。单相异步电动机与三相异步电动机相比，其结构特点是：定子上有两个绕组，一个是主绕组，也叫工作绕组用来产生主磁场；一个是副绕组，也叫起动绕组，用来帮助电动机起动。一般主、副绕组在空间互差 90° 电角度。

工作绕组在电动机运行的过程中，一直接在电源上，而起动绕组一般只在起动时接入电源，当转速达到 $70\% \sim 80\%$ 同步转速时，由离心开关将起动绕组从电源断开，主绕组接在电源上作单相电动机运行。但电容电动机起动后，副绕组仍通过电容器接在电源上，以改善电动机的功率因数。

二、单相异步电动机的工作原理及转矩特性

当单相异步电动机的工作绕组与单相交流电源接通后，单相交流绕组便产生一个脉动磁势。这个脉动磁势可以分解为两个幅值相同、转速相等、方向相反的旋转磁势，如图 15-1 所示。这里，把逆时针方向旋转的磁势 F_+ 称为正序磁场，顺时针方向旋转的磁势 F_- 称为负序磁场。正序和负序旋转磁场均切割转子导体，并分别在转子导体中产生感应电势和感应电流。正序旋转磁场与正序电流相互作用产生正序转矩 M_+ ，企图使转子顺着正序旋转磁场方向旋转。而负序旋转磁场与负序电流相互作用产生负序转矩 M_- ，企图使转子顺着负序旋转磁场方向旋转。显然，正序转矩 M_+ 与负序转矩 M_- 的方向是相反的，这两个转矩叠加起来就是推动电机转动的合成力矩 M 。单相异步电动机的转矩曲线如图 15-2 所示。

从图 15-2 可得出如下结论：

(1) 单相异步电动机的起动转矩为零。起动时， $n=0$ ， $s=1$ ，正序转矩 M_+ 与负

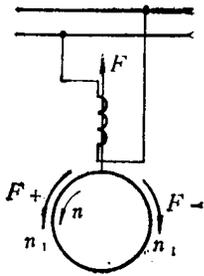


图 15-1 单相交流绕组磁势

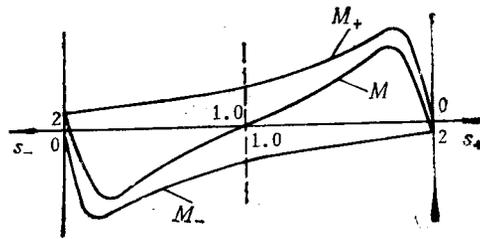


图 15-2 单相异步电动机的转矩特性

序转矩 M_- 大小相等，方向相反，合成起动力矩 M 为零，因此，单相异步电动机不能自行启动；

(2) 在 $s=1$ 的两边，合成力矩曲线是对称的，因此，单相异步电动机没有固定的转向，它运行时的转向取决于启动时的转动方向。当外来的作用力矩使转子正转时，合成力矩为正，转子能维持正向旋转。当外来的力矩使转子反转时，合成力矩为负，在合成力矩作用下，转子能维持反向转动。即电动机的旋转方向取决于电动机启动时的旋转方向。

(3) 由于负序转矩的作用，使合成转矩减小，最大转矩也随之减小，致使电机过载能力较低。

由于单相异步电动机转子中有负序电流，增加了转子铜损。同时由于负序转矩的制动作用，减小了电机的输出功率，所以单相异步电动机的效率较低。单相异步电动机的效率约为同容量的三相异步电动机效率的 $75\% \sim 90\%$ 左右。

综上所述，单相异步电动机各种性能指标都低于三相异步电动机。而单相异步电动机负序磁场的制动作用，是引起性能指标下降的主要原因。

三、启动方法

单相异步电动机的气隙磁场是一个脉动磁场，启动转矩为零，因此，电动机不能自行启动。为了使单相异步电动机能自行启动，必须如同三相异步电动机一样，启动时设法使电机气隙产生一个旋转磁场。常用的方法有分相启动和罩极启动两种。

1. 分相启动

为了启动时在气隙中建立旋转磁场，在单相异步电动机定子上加装一套启动绕组。启动绕组与电容 C 串联后，通过离心开关 K 与工作绕组一起并接在同一电源上，且工作绕组与启动绕组在空间互差 90° 电角度，如图 15-3 (a) 所示。

为了获得圆形旋转磁场和较大的启动转矩，要求启动绕组脉动磁势 $F_{s,p}$ 和工作绕组脉动磁势 F_1 幅值大小相等，在时间相位上互差 90° 。为此，要求启动绕组电流 $I_{s,p}$ 与工作绕组电流 I_1 在时间相位上相差 90° ，如图 15-3 (b) 所示。通常是通过适当选择电容器的电容值的大小来满足这一要求的。

下面分析两相旋转磁场的产生。只要两相绕组在空间相位上互差 90° 电角度，通入两

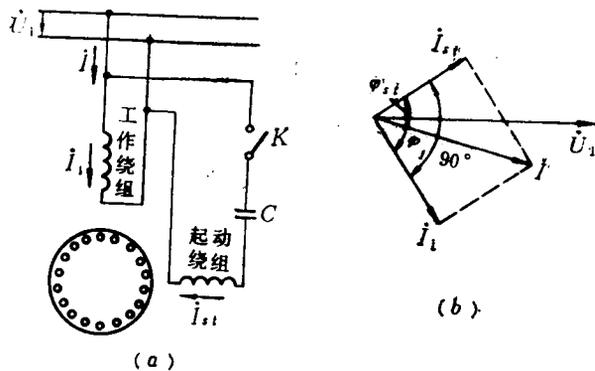


图 15-3 单相电容起动电动机
(a) 接线图; (b) 电压、电流向量图

相绕组的电流在时间相位上互差 90° 。电角度，则两相电流的合成磁场是一个旋转磁场，如图 15-4 (b) (c) (d) 所示。 i_1 为工作绕组中的电流， i_{1t} 为起动绕组中的电流，两个电流随时间按正弦规律变化，如图 15-4 (a) 所示。设从 A 及 A' 流入纸面电流为负，流出为正，取 $\omega t = 0^\circ$ ， $\omega t = 45^\circ$ ， $\omega t = 90^\circ$ 三个瞬时，气隙磁场相量分别如图 15-4 (b)、(c)、(d) 所示。显然，这三个瞬时，两个绕组合成磁势幅值相同，而幅值的位置依次前移了 45° 。即合成磁势在空间上移动的电角度与电流在时间上的相位移相等。电流变化一个周期，磁场就旋转一周。因此，两相电流的合成磁场是一个旋转磁场。

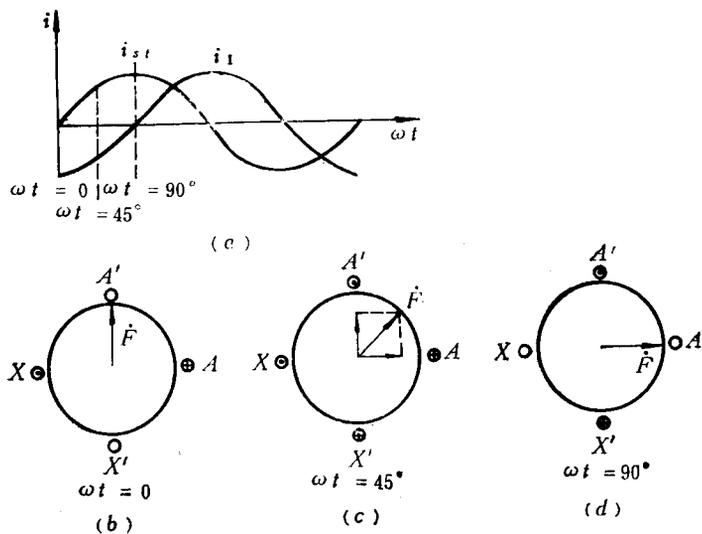


图 15-4 两相旋转磁场的产生

单相异步电动机在气隙磁场的作用下，便能自行起动。

起动绕组是按照短时运行方式设计的，如果长期通电，会因过热而损坏。因此，当电机转速达到同步转速 n_s 的 $75\% \sim 80\%$ 时，由离心开关 K 把起动绕组从电源断开，此时电动机

只有工作绕组接在电源上，作为单相异步电动机运行。这种电动机称为电容起动电动机。

有的单相异步电动机的起动绕组是按长期工作设计的，它不仅供起动用，而且正常运转时也接在电源上。这种电动机称为电容式单相异步电动机，如图15-5所示。图中 C_w 为工作电容， C_{st} 为起动电容。

电容电动机实质上是一台两相异步电动机，两个绕组 B 、 S 在空间相位上互差 90° ，通入两个绕组的电流在时间相位上也互差 90° 电角度。气隙磁场接近圆形磁场，运行情况接近异步电动机，运行性能有较大改善，这种电动机的功率因数、效率及过载能力都比普通单相异步电动机高。

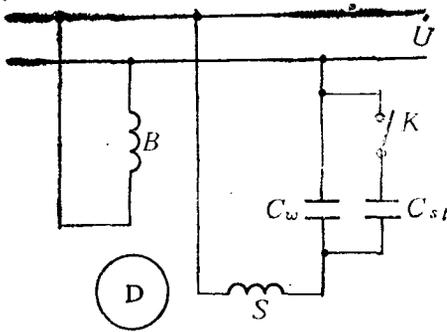


图 15-5 单相电容电动机

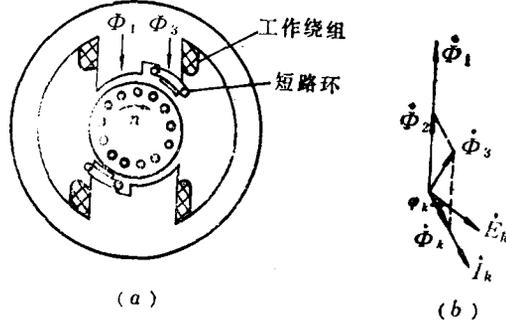


图 15-6 罩极电动机

(a) 结构示意图；(b) 磁通相量图

由于电动机工作时比起动时所需的电容小，所以在电动机起动后，必须利用离心开关 K 把起动电容 C_{st} 切除。

2. 罩极起动

单相罩极式异步电动机的结构分为凸极式和隐极式两种。由于凸极式结构简单些，所以单相罩极式异步电动机的定子铁芯一般都做成凸极式的，由硅钢片叠压而成。转子为鼠笼式转子。定子每个极上套有工作绕组。在磁极表面 $1/3 \sim 1/4$ 的部分有一个凹槽，用短路铜环把这部分罩起来，故称为罩极式异步电动机。它的结构如图15-6所示。

当工作绕组通入单相交流电后，将产生脉动磁通，其中一部分磁通 Φ_1 不穿过短路环，另一部分磁通 Φ_2 则穿过短路环，显然 Φ_1 和 Φ_2 应同相位，因为它们都随工作绕组电流的变化而变化。穿过短路环的合成磁通 Φ_3 应是 Φ_2 和短路环中电流 I_k 所产生的磁通 Φ_k 的相量和即 $\Phi_3 = \Phi_2 + \Phi_k$ 。当 Φ_3 在短路环中脉动时，短路环中将感应出电势 E_k 和电流 I_k 。 E_k 滞后于产生它的磁通 Φ_3 90° ，而电流 I_k 应滞后电势 E_k 一个相位角 φ_k 。设 I_k 产生的磁通为 Φ_k ，则 Φ_k 与 I_k 同相位。 Φ_2 与 Φ_k 相量相加得到的 Φ_3 便是上面讲过的实际穿过短路环的合成磁通 Φ_3 ，如图15-6(b)所示。

从图15-6可见，由于短路环的作用，通过被罩部分的合成磁通 Φ_3 与未罩部分的磁通 Φ_1 之间形成一定的时间相位差。 Φ_3 与 Φ_1 在空间上也有一定的相位差（空间相位差为半个极面占据的空间电角度）。众所周知，只要两个磁场在空间和时间上都存在着相位差，则这两个磁场的合成磁场便是一个旋转磁场，旋转的方向是从超前磁通相转向滞后磁

通相，即合成磁场推移的方向是从未罩部分移向罩极部分，电动机就随着这个方向旋转。

由于罩极电动机的旋转方向总是从未罩部分磁极向罩极部分磁极转动，因此，改变这种电动机旋转方向最简单的方法就是将定子或转子反向安装。

罩极电动机结构简单，制造方便，但起动力矩小，多用于小型电扇、电唱机和录音机中，容量一般在30~40W以下；电容起动电动机和电容电动机主要用于需要较大起动力矩的场合，如吊风扇、压气机、空气调节器中，容量从50W到几百瓦。

第二节 移相器

移相器的结构与三相绕线式异步电动机相似。它相当于一台静止的绕线式异步电动机，它的转子被一套蜗轮杆卡住，不能自由转动，只能移动某一角度。为了连接方便，定、转子三相绕组都接成星形。定子绕组作为原边接到电源，转子绕组作为副边经集电环接到负载。移相器的接线图如图15-7所示。

当定子绕组接上电源后，三相电流便产生一个旋转磁场，并在定、转子绕组中分别感应电势 E_1 和 E_2 ，其大小与各绕组的有效匝数成正比，相位则取决于定、转子绕组轴线之间的相对位置。现以A相为例进行分析，令转子a相绕组轴线与定子A相绕组轴线重合时， $\alpha=0$ ，此时旋转磁场在定子和转子绕组中产生的感应电势同相位。当转子a相绕组顺着

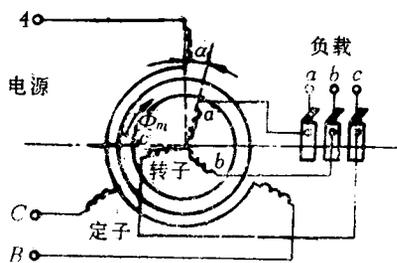


图 15-7 移相器接线图

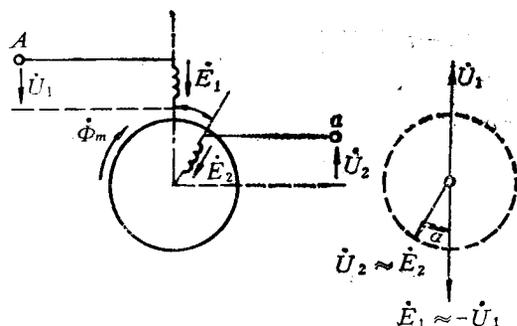


图 15-8 移相器相量图 (A相)

旋转磁场方向移动一个角度 α 时，旋转磁场将先切割定子A相绕组，经 α 电角度后才切割转子a相绕组，所以电势 E_2 滞后电势 E_1 一个相应的电角度 α 。 E_1 与 E_2 之间的相量关系如图15-8所示。

如果忽略一、二次侧阻抗压降，则一、二次端电压的相位关系为

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 \quad (15-1)$$

$$\dot{U}_2 \approx \dot{E}_2 = \frac{\dot{E}_1}{k_e} e^{-j\alpha} \quad (15-2)$$

式(15-2)表明，移相器输出电压 U_2 的大小基本不变，约等于 E_1/k_e ，但其相位是可调的。调节移相器转子绕组相对于定子绕组轴线之间的相对位置，就可以均匀地改变移

相器副边输出电压的相位。

移相器被广泛地应用于继电保护和仪表的试验工作中。

第三节 感应调压器

感应调压器在结构和原理上都与移相器相似，不同之处是定子绕组与转子绕组之间，除了有磁的联系以外还有电的联系。

感应调压器的转子绕组接成星形、并作为一次绕组接到电源，定子绕组作为二次绕组，它的一端与转子绕组相连，另一端接到负载，如图 15-9 所示。

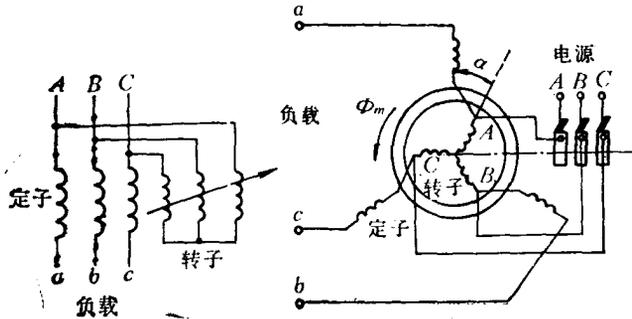


图 15-9 感应调压器接线图

当一次侧接上电源后，经过转子绕组的三相电流便气隙中产生旋转磁场，并分别在转子和定子绕组中产生感应电势 \dot{E}_1 和 \dot{E}_2 ，其大小与各绕组的有效匝数成正比，相位取决于定、转子绕组轴线之间的相对位置。由于三相是对称的，所以可只分析其中一相，如图 15-10 (a) 所示。气隙旋转磁场先切割转子 A 相绕组，经过 α 电角度后再切割定子 a 相绕组，所以 \dot{E}_2 滞后 \dot{E}_1 α 电角度，其相量关系如图 15-10 (b) 所示。如果忽略定、转子绕组的阻抗压降，输出电压 U_2 为定、转子绕组感应电势相量之和，即

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_1 + \dot{E}_2 = \dot{E}_1 + \frac{\dot{E}_1}{k_e} e^{-j\alpha} \quad (15-3)$$

从图 15-10 (b) 可知， U_2 随 α 角的变化而变化，因此，借调节转子位置改变 α 角，就可以平滑地调节输出电压的大小。

当转子绕组与定子绕组的轴线重合时，即 $\alpha = 0^\circ$ ， \dot{E}_1 和 \dot{E}_2 同相，输出电压具有最大数值，即

$$U_{2\max} = E_1 + E_2 = E_1 + \frac{1}{k_e} E_1 \approx U_1 \left(1 + \frac{1}{k_e} \right) \quad (15-4)$$

式中 k_e —— 转子、定子电势变比。

当转子移过 180° ，即 $\alpha = 180^\circ$ 时，则 \dot{E}_1 与 \dot{E}_2 相位相反，输出电压具有最小数值，即

$$U_{2\min} = E_1 - E_2 \approx U_1 \left(1 - \frac{1}{k_e} \right) \quad (15-5)$$

由于感应调压器是静止的，所以它的散热条件差，小型感应调压器用空气冷却，容量较大时，放在油箱内用油冷却。

感应调压器的重量、激磁电流和损耗都比自耦变压器大，但是它没有滑动触头，运行

比较安全可靠，因此在实验室和试验台获得广泛应用。

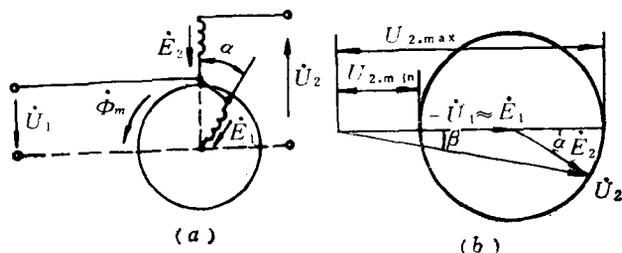


图 15-10 感应调压器

(a) 接线示意图；(b) 相量图

第四节 小结

本章讨论了几种常用的特殊电机——单相异步电动机、移相器和感应调压器。

(1) 单相异步电动机的主要特点是起动转矩为零，且没有固定的转向。因单相交流绕组产生脉动磁场，它可以分解为两个大小相等、方向相反的圆形旋转磁场。单相异步电动机起动时， $n=0$ ，正、反旋转磁场都以同步转速切割转子绕组，在转子绕组中产生同样大小的电势和电流，因此，正向和反向力矩大小相等，方向相反，合成力矩为零，电机不能自动起动。

(2) 单相异步电动机常用的起动方法有分相起动和罩极起动两种。

(3) 由于负载转矩的制动作用，单相异步电动机的性能较差，它的效率、功率因数、过载能力都比同容量的三相异步电动机差。因此，单相异步电动机只作成微型的，一般在几瓦到几百瓦之间。

(4) 移相器和感应调压器可视为静止的绕线式异步电动机。所不同的是感应调压器定、转子之间既有磁的联系，也有电的联系。移相器是通过改变转子位置来改变输出电压的相位。感应调压器是通过改变转子位置来调节输出电压的大小。移相器只能调节输出电压的相位，不能改变输出电压的大小。而感应调压器在改变输出电压大小的同时，输出电压的相位也随之有所改变。

思考题及习题

15-1 单相异步电动机为什么不能自行起动？常用的起动方法有哪些？

15-2 一台星形连接的三相鼠笼式异步电动机，如果一相断线能否起动？如果运行中一相断线，能否继续运行？为什么？

15-3 如何改善电容分相式单相异步电动机的转向？为什么？

15-4 如何改变罩极式单相异步电动机的转向？为什么？

15-5 感应调压器与自耦调压器有何区别？

15-6 将一台 $p=2$ 的绕线式电动机改为移相器，如果要使输出电压的相位改变 360° ，问移相器转子转动的机械角度是多少？

第四篇 同步电机

交流旋转电机主要分为异步电机和同步电机两大类。转子转速 n 不等于定子旋转磁场转速（同步转速） n_1 的电机，称为异步电机。转子转速 n 等于定子旋转磁场转速 n_1 的电机，称为同步电机。同步电机的转速 n 与定子电流频率 f_1 严格保持下面的关系

$$n = n_1 = \frac{60f_1}{p} \quad (16-1)$$

同步电机与所有电机一样，是可逆的。可以作发电机，也可以作电动机，还可以作调相机，但主要作发电机。同步电动机主要用于大容量、不需调速的生产机械中，例如大型电力抽水站多用同步电动机来拖动水泵。

第十六章 同步发电机

将旋转的机械能转变成电能的同步电机，称为同步发电机。同步发电机是发电厂的主要电气设备，现代电力系统中的电能，几乎全部都是同步发电机发出来的。本章简单介绍同步发电机的结构、工作原理、有功功率和无功功率的调节。

第一节 同步发电机的基本结构及分类

一、同步发电机的基本结构

同步发电机主要由激励主磁场的转子和产生感应电势的定子两大部分组成。

1. 定子

同步发电机的定子又称电枢，它与异步电机的定子构造上基本相同，主要由定子铁芯、定子绕组和机座三部分组成。定子的作用是产生感应电势即发出电。

(1) 定子铁芯。定子铁芯由0.5mm或0.35mm厚的硅钢片迭成。当大型同步发电机的铁芯外径大于1m时，用扇形冲片，如图16-1所示。当同步发电机的铁芯外径小于1m时，用整圆冲片。定子铁芯沿轴向分成很多段，每段厚约3~6cm，段与段之间留有1cm宽的通风槽。整个铁芯两端用非磁性的端压板和抱紧螺杆压紧固定于机座上。

(2) 定子绕组。定子绕组又称为电枢绕组，用铜线或铝线制成，均匀地嵌放在定子槽中。汽轮发电机的定子绕组一般为三相双层短矩迭绕组；水轮发电机的定子绕组一般为三相双层短矩波绕组。定子绕组的作用是产生感应电势，发出对称的三相交流电。

(3) 机座。中、小型同步发电机的机座，端盖与异步电机一样，大型同步发电机的

机座一般用钢板焊接而成，用来固定和支撑定子铁芯。

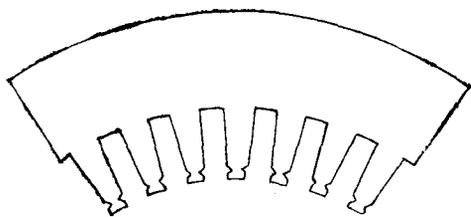


图 16-1 定子扇形冲片

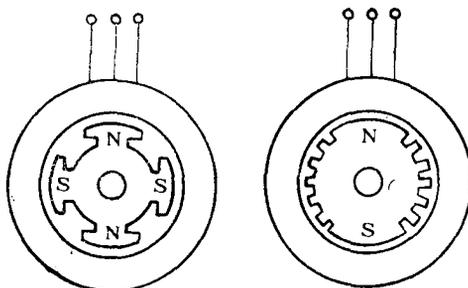


图 16-2 同步发电机的转子结构
(a) 凸极式;(b) 隐极式

2. 转子

转子主要由磁极铁芯和励磁绕组组成，其作用是励磁绕组通直流电以后产生主磁场。

同步发电机的转子有两种结构型式，即凸极式和隐极式。图 16-2 (a) 所示为凸极式转子示意图。沿着转子圆周安装有凸出的磁极。转子磁极铁芯由厚度为 1~1.5mm 的钢板冲制成形。如图 16-3 所示，然后再一片片迭装而成。磁极铁芯上套有励磁绕组。整个磁极利用 T 形尾部固定在磁轭上，如图 16-4 所示。磁极的表面装有类似笼型转子的短路绕组，称为阻尼绕组（在电动机中称为起动绕组）。图 16-5 表示一台装配好的凸极式同步发电机的转子。

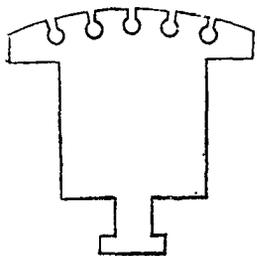


图 16-3 磁极冲片

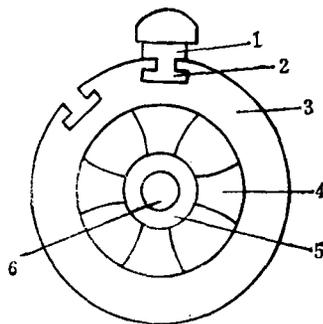


图 16-4 凸极机的磁极和磁轭
1—磁极；2—T 尾；3—磁轭；4—轮辐；5—轮毂；6—转轴

图 16-2 (b) 为隐极式转子示意图。转子上没有凸出的磁极，沿着圆周刻有槽和齿，刻有槽的部分约占圆周的 2/3。励磁绕组就分布在这些槽中。圆周上没有绕组的部分形成所谓大齿，是磁极的中心区域。励磁绕组为若干个线圈组成的同心式绕组。线圈用扁铜线绕制而成。

二、同步发电机的分类

同步发电机分类方式很多，按原动机不同分为两大类。

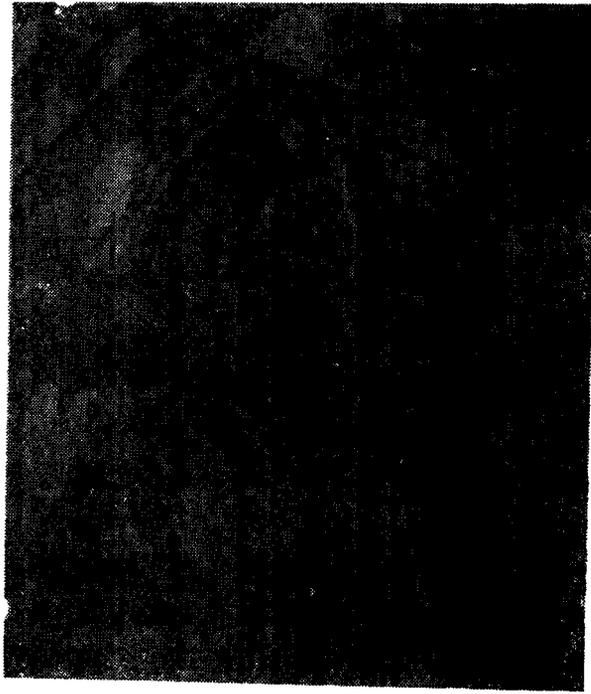


图 16-5 凸极同步发电机的转子

汽轮发电机：通常为卧式，转子是隐极式，原动机是汽轮机；

水轮发电机：通常为立式，转子是凸极式，原动机是水轮机。

汽轮机是一种高速原动机，一般转速为 $3000\text{r}/\text{min}$ 。由于汽轮发电机转速高，转子各部分离心力很大，机械强度要求高，故一般采用隐极式。而水轮机是一种低速原动机，转速可以从几十转/分到数百转/分，依水头高低及流量大小而定。当转速低于 $1000\text{r}/\text{min}$ 时，转子的圆周速度和离心力较小，故一般采用结构和制造都比较简单的凸极式结构。

第二节 同步发电机的工作原理

众所周知，当导线在磁场中作切割磁力线运动时，导线中将有感应电势产生，若将导线连成闭合回路，则回路中就有电流通过。同步发电机就是利用这个电磁感应原理制成的，只是在实际的同步发电机中，不是导线在运动，而是磁场在运动。

一、工作原理

在同步发电机的定子铁芯内，对称地安放着重 $A-X$ 、 $B-Y$ 、 $C-Z$ 三相绕组，如图 16-6 所示。所谓对称三相绕组，就是每相绕组匝数相等，三相绕组的轴线在空间互差 120° 电角度。转子上装有励磁绕组，通直流电后产生主磁场，其磁通如图中虚线所示。磁极的形状决定了气隙磁感应强度基本上按正弦规律分布。所以，当原动机带动转子旋转时，就得到一个在空间按正弦规律分布的旋转磁场。定子三相绕组在空间互差 120° 电角度，因此，三相感应电势在时间上也互差 120° 电角度，发电机发出的是对称三相交流电，即



图 16-6 三相同步发电机示意图

$$\left. \begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t \\ e_B &= E_m \sin (\omega t - 120^\circ) \\ e_C &= E_m \sin (\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (16-2)$$

二、感应电势的频率 f

感应电势的频率取决于电机的磁极对数 p 和转子转速 n 。当转子为一对磁极时，转子旋转一周，定子绕组中的感应电势正好交变一次，即一个周波；当转子有 p 对磁极时，转子旋转一周，感应电势就交变了 p 个周波。设转子的转速为 n (r/min)，则感应电势每秒交变 $\frac{pn}{60}$ 次，即感应电势的频率为

$$f_1 = \frac{pn}{60} \quad (\text{Hz}) \quad (16-3)$$

式(16-3)表明，当同步发电机的极对数 p 、转速 n 一定时，则定子绕组感应电势的频率一定，即转速与频率保持严格不变的关系，这是同步电机的基本特点之一。

我国电力系统的标准频率规定为 50Hz，因此当 $n=3000\text{r/min}$ 时，电机应为一对极；当 $n=1500\text{r/min}$ 时，电机应为两对极，依次类推。

当同步发电机的三相绕组与负载接通时，对称三相绕组中流过对称三相电流，并产生一个旋转磁场，这个旋转磁场的转速 $n_1 = 60f/p$ ，即定子旋转磁场的转速与电机转子转速相等，亦就是同步，故称为同步发电机。

第三节 同步发电机的电枢反应

空载时，同步发电机气隙中只有一个机械旋转磁场，即转子励磁电流产生的主磁场。负载运行时，由于定子三相绕组中有电流通过，产生一个旋转磁场，即电枢磁场（电气旋转磁场）。亦就是说，同步发电机带上负载后，电机的气隙中同时存在着两个旋转磁场，这两个磁场以相同的速度，沿着相同的方向旋转，二者之间无相对运动。由此可知，发电机负载运行时，主磁场与电枢磁场迭加后就构成了气隙的合成磁场。电枢磁场的出现，将使气隙磁场的大小和位置发生变化，电枢基波磁场对主磁场的这种作用称为电枢反应。

电枢反应的性质不仅与定子电流的大小有关，而且与负载的性质有关，即与空载电势 \dot{E}_0 和电枢电流 I_a 之间的夹角 ψ （内功率因数角）有关。下面从特殊到一般的规律，根据负载性质的不同，分四种情况进行讨论。

(1) I_a 与 \dot{E}_0 同相，即 $\psi=0^\circ$ ；

(2) I_a 滞后 \dot{E}_0 90° ，即 $\psi=90^\circ$ ；

(3) I_a 超前 \dot{E}_0 90° ，即 $\psi=-90^\circ$ ；

(4) 一般情况，即 $0 < \psi < 90^\circ$ 。

由于定子三相绕组是对称的，因此可以画出一相（如 A 相）来进行讨论，并选 A 相电流出现极值的瞬间进行研究，定子三相合成磁势的轴线位于 A 相绕组的轴线上。

一、 $\psi=0^\circ$ 时的电枢反应

当 $\psi=0^\circ$ 时， I_a 与 \dot{E}_0 同相位， \dot{E}_0 滞后于主磁通 $\dot{\Phi}_0$ 90° 其相量关系如图 16-7(a) 所示。

当转子转到 16-7(b) 所示的位置时，A 相两个线圈边正好位于磁极中心，切割的磁通密度最大，因此感应电势最大。由于 I_a 与 \dot{E}_0 同相位，此时 A 相电流也达到最大值，电枢磁势轴线位于 A 相绕组的轴线上。由图 16-7(b) 可以看出，当 $\psi=0^\circ$ 时，电枢磁势 F_a 与转子磁势 F_f 在空间正交，故称为交轴电枢反应。

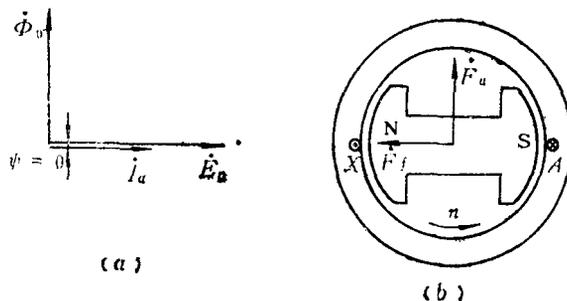


图 16-7 $\psi=0^\circ$ 时的电枢反应

将图 16-7(b) 中的两个相差 90° 的空间磁势 F_a 与 F_f 相加，可求得气隙合成磁势 $F_a = \dot{F}_a + \dot{F}_f$ 。由磁势相量图可知，交轴电枢反应的结果，使气隙合成磁势的轴线发生位移，幅值发生变化。

二、 $\psi=90^\circ$ 的电枢反应

当 $\psi=90^\circ$ 时， I_a 滞后于 \dot{E}_0 90° ， \dot{E}_0 滞后主磁通 $\dot{\Phi}_0$ 90° ，如图 16-8(a) 所示。由于 $\psi=90^\circ$ ，因此只有将转子磁极从图 16-7(b) 的位置逆时针转过 90° 电角度，如图 16-8(b) 所示的位置时，A 相电势为零，电流 I_a 才达到最大值。由图 16-8(b) 可见，当 $\psi=90^\circ$ 时，电枢磁势 F_a 与转子磁势 F_f 的轴线重合，且方向相反，对主磁场起去磁作用，故称为纵轴去磁电枢反应。纵轴去磁电枢反应的结果，使气隙磁场削弱，端电压下降。

三、 $\psi=-90^\circ$ 时的电枢反应

当 $\psi=-90^\circ$ 时， I_a 超前于 \dot{E}_0 90° ， \dot{E}_0 滞后主磁通 $\dot{\Phi}_0$ 90° ，如图 16-9(a) 所示。由于 $\psi=-90^\circ$ ，因此只有转子磁极从图 16-7(b) 的位置顺时针转过 90° 电角度，如图 16-9(b) 所示的位置时，A 相电势为零， I_a 才达到最大值。由图 16-9(b) 可见。当 $\psi=-90^\circ$ 时，

电枢磁势与转子磁势轴线重合，且方向相同，电枢磁势对主磁场起增磁作用，故称为纵轴

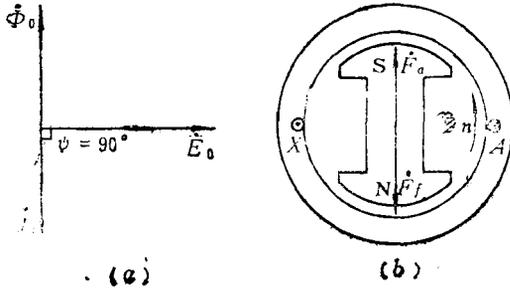


图 16-8 $\psi=90^\circ$ 时的电枢反应

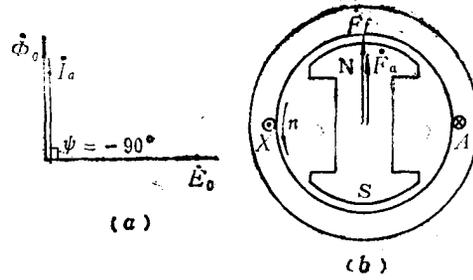


图 16-9 $\psi=-90^\circ$ 时的电枢反应

增磁电枢反应。其结果使主磁场增强，端电压上升。

四、 $0^\circ < \psi < 90^\circ$ 时的电枢反应

由于发电机在一般情况下带的是电阻电感的混合负载，因此电枢电流 I_a 滞后于 \dot{E}_0 一个 ψ 角 ($0 < \psi < 90^\circ$)。此时可以利用相量的分解方法，将 I_a 按 ψ 角分解成 I_q 和 I_d 两个分量， I_q 是电流的有功分量，与 \dot{E}_0 同方向， I_d 是电流的无功分量，滞后于 \dot{E}_0 90° ，如图 16-10 所示。它们有如下关系

$$\dot{I}_a = \dot{I}_d + \dot{I}_q \quad (16-4)$$

$$\left. \begin{aligned} I_d &= I_a \sin \psi \\ I_q &= I_a \cos \psi \end{aligned} \right\} \quad (16-5)$$

由图 16-10 可见， \dot{I}_q 与 \dot{E}_0 同相位，产生交轴电枢反应； I_d 滞后 \dot{E}_0 90° ，产生纵轴去磁电枢反应。因此， I_a 按 ψ 角分解成直轴和交轴两个分量 I_d 和 I_q ，可以理解为电枢磁势 F_a 按 ψ 角分解成作用在直轴磁路的磁势 F_{ad}

及作用在交轴磁路上的磁势 F_{aq} ，且与电流分量式 (16-4) 和式 (16-5) 有相同的形式，即

$$\left. \begin{aligned} \dot{F}_a &= \dot{F}_{ad} + \dot{F}_{aq} \\ F_{ad} &= F_a \sin \psi \\ F_{aq} &= F_a \cos \psi \end{aligned} \right\} \quad (16-6)$$

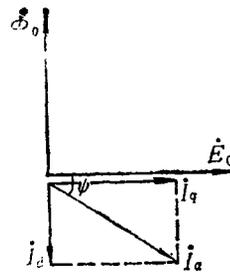


图 16-10 当 $0 < \psi < 90^\circ$ 时的电枢反应

综上所述，当同步发电机带电阻电感混合负载 ($0 < \psi < 90^\circ$) 时，电流的有功分量 I_q 产生交轴电枢反应，电流的无功分量 I_d 产生纵轴去磁电枢反应。电枢反应的结果，既使气隙磁场轴线位移，又使气隙磁场削弱，端电压下降。

五、电枢反应与能量转换

变压器是通过原、副边磁势平衡作用实现能量传递的；同步发电机则是通过电枢磁势与转子磁势的相互作用实现能量转换的。同步发电机带上负载后，电枢电流建立了电枢磁场，它与转子之间不仅有磁的联系，而且有力的作用。转子是在不断克服电磁反作用力矩

的过程中作了功，将输入的机械能转变成电能。

1. 有功电流在电机内部产生电磁力矩

当发电机带有功负载时，有功电流产生交轴电枢反应。交轴电枢反应磁场与转子励磁绕组 R_1 — R_2 中的电流相互作用产生电磁转矩 F_1 — F_2 ，其转向与转子旋转方向相反，如图 16-11 所示，企图阻止转子旋转，因此原动机必须克服电磁阻力矩才能继续旋转而作功。若发电机输出的有功功率越大，则有功电流越大，电磁阻力矩也越大，原动机转矩必须相应增大，即增大水轮机的进水量或汽轮机的进汽量，才能维持发电机转速不变。发电机就是这样通过有功电流在电机内部产生电磁力矩，来实现机械能与电能转换的。

通过上述分析可以得出如下结论：要调节发电机的有功功率输出，必须调节原动机的转矩，即调节水轮机的进水量或汽轮机的进汽量。增大水轮机的进水量或汽轮机的进汽量，发电机输出的有功功率增大；反之，则发电机输出的有功功率减小。

2. 感性无功电流使发电机端电压降低

当发电机带感性无功功率时，发电机定子绕组中流过感性无功电流，此电流产生纵轴去磁电枢反应，如图 16-12 所示。该电流与转子励磁电流相互作用，产生如图 16-12 所示的电磁力 F_1 和 F_2 ，但不形成转矩，因 F_1 和 F_2 是作用在同一直线上的力。由于不能形成转矩，因此无功电流不能实现能量转换。但感性无功电流产生的磁场对转子磁场起去磁作用，使气隙磁场削弱，发电机端电压下降。这就是发电机带感性负载时，端电压下降的主要原因。为了维持端电压不变，必须增加励磁电流。若发电机带的感性无功功率越多，感性无功电流就越大，电枢反应的去磁作用越强，端电压下降得越多，为了维持端电压不变，必须增加更多的励磁电流。

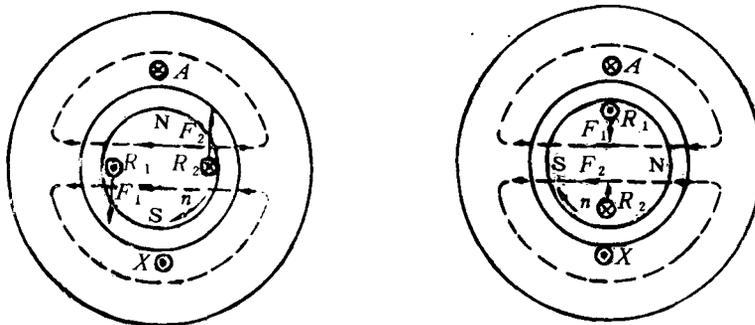


图 16-11 有功电流产生力矩的情况 图 16-12 感性无功电流流过发电机时的情况

综上所述，发电机带感性无功功率时，为了维持端电压不变，必须随着发电机无功功率的变化调节转子励磁电流。也就是说，调节转子励磁电流就可以调节发电机的无功功率输出。

3. 容性无功电流使发电机端电压升高

当发电机带容性无功功率时，发电机定子绕组中流过容性无功电流，此电流产生纵轴增磁电枢反应。该磁场与转子励磁电流相互作用，产生作用在同一直线上的两个力，但不形成转矩，故不能实现能量转换。但这时的电枢磁场对转子磁场起增磁作用，使气隙磁场增强，端电压上升。为了维持端电压不变，必须减小励磁电流。

在电力系统中，同步发电机带上容性负载后，常发现端电压不断升高的现象，这种现象称为同步发电机的“自激”或负载“励磁”。同步发电机在接通高压空载长线路时，由于输电线呈容性（导线与导线间，导线与大地之间形成电容），常发生电压不断升高的“自激”现象。

在一般情况下，发电机既带有功负载又带感性无功负载，因此，既产生交轴电枢反应又产生纵轴去磁电枢反应。交轴电枢反应产生电磁作用力矩，使转速下降；纵轴去磁电枢反应使气隙磁场削弱，端电压下降。为了维持发电机转速不变，必须随着发电机有功功率的变化调节原动机转矩；为了维持发电机端电压不变，必须随着发电机无功功率的变化调节转子励磁电流。

第四节 漏抗和同步电抗

漏抗和同步电抗是同步电机的两个重要参数，其大小对同步电机的性能有很大影响。

一、漏抗 x_{σ}

1. 漏磁通 Φ_{σ}

电枢磁势的基波，除了产生电枢反应磁通外，还产生仅与电枢绕组相交链的漏磁通。

定子漏磁通由三部分组成：

- (1) 槽漏磁通 如图 16-13(a) 所示；
- (2) 端部漏磁通，如图 16-13(b) 所示；
- (3) 高次谐波磁通。高次谐波磁通具有漏磁通的性质，故归入漏磁通。

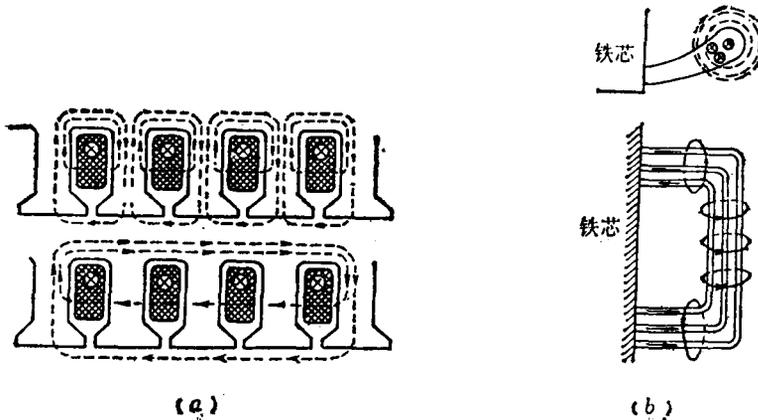


图 16-13 定子漏磁通
(a) 槽漏磁通；(b) 端部漏磁通

2. 漏抗 x_{σ}

在电工基础里曾讨论过，一个磁通对应一个电抗，或者说一个电抗对应一个磁通。在电路中对应于漏磁通的电抗就称为漏抗。

3. 漏电势 \dot{E}_s

漏磁通是一个交变磁通，因此它将在电枢绕组中产生漏电势 \dot{E}_s 。漏电势与漏磁通成正比，而漏磁通又与电枢磁势 F_a 和电枢电流 I_a 成正比，因此漏电势可以用一个电抗压降来表示。由于电势滞后于电流 90° ，所以漏电势可以表示为

$$E_s = -j I_a x_s \quad (16-7)$$

二、电枢反应电抗

对应于电枢反应磁通的电抗，称为电枢反应电抗。

1. 隐极电机的电枢反应电抗

电枢反应磁场是一个旋转磁场，它以同步转速切割定子绕组，并在定子绕组中产生感应电势 \dot{E}_a ，该电势称为电枢反应电势。

由上节分析可知，电枢反应可以归纳为以下关系

$$\dot{I}_a \rightarrow \dot{F}_a \rightarrow \dot{\Phi}_a \rightarrow \dot{E}_a$$

如果不计磁路饱和，则

$$E_a \propto \Phi_a \propto F_a \propto I_a$$

电枢反应磁通 Φ_a 与电枢电流 I_a 同相位，故 \dot{E}_a 滞后 $I_a 90^\circ$ ，与漏电势一样，电枢反应电势可以用电抗压降来表示，即

$$E_a = -j I_a x_a \quad (16-8)$$

式中 x_a ——电枢反应电抗。

式(16-8)表明，当电枢电流 I_a 为定值时，如果 x_a 越大，电枢反应电势 E_a 也越大，电枢磁场也越强。因此，电枢反应电抗 x_a 的大小可以反应电枢磁场的强弱。 x_a 越大，电枢磁场越强； x_a 越小，电枢磁场越弱。

2. 凸极电机的电枢反应电抗

在凸极电机中，定、转子之间的气隙不均匀，因此纵轴与横轴磁路的磁阻不相等，纵轴上磁阻比横轴上磁阻小。所以，同样大小的电枢磁势，作用在直轴磁路上与作用在交轴磁路上，所产生的电枢反应磁通不相等。因此，凸极同步电机有纵轴和横轴磁势之分。可以认为电枢电流的纵轴分量 I_d 建立纵轴电枢反应磁势 F_{ad} ，并产生纵轴电枢反应磁通 Φ_{ad} ，感应出纵轴电枢反应电势 E_{ad} ；横轴电流分量 I_q 建立横轴电枢反应磁势 F_{aq} ，并产生横轴电枢反应磁通 Φ_{aq} ，感应出横轴电枢反应电势 E_{aq} 。

综上所述，凸极同步电机的电枢反应，可以归纳为以下关系：

$$\begin{aligned} \text{纵轴电枢反应} & \quad \dot{I}_d \rightarrow \dot{F}_{ad} \rightarrow \dot{\Phi}_{ad} \rightarrow \dot{E}_{ad} \\ \text{横轴电枢反应} & \quad \dot{I}_q \rightarrow \dot{F}_{aq} \rightarrow \dot{\Phi}_{aq} \rightarrow \dot{E}_{aq} \end{aligned}$$

如果不计磁路饱和，则

$$E_{ad} \propto \Phi_{ad} \propto F_{ad} \propto I_d$$

$$E_{aq} \propto \Phi_{aq} \propto F_{aq} \propto I_q$$

E_{ad} 滞后于 $I_d 90^\circ$ ， E_{aq} 滞后于 $I_q 90^\circ$ 。电枢反应电势也可用电抗压降来表示，即

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{ad} &= -j \dot{I}_d x_{ad} \\ \dot{E}_{aq} &= -j \dot{I}_q x_{aq} \end{aligned} \right\} \quad (16-9)$$

式中 x_{ad} ——纵轴电枢反应电抗；

x_{aq} ——横轴电枢反应电抗。

从图 16-14 可以看出，纵轴气隙比横轴气隙小，因此纵轴磁阻比横轴磁阻小， $x_{ad} > x_{aq}$ 。

对于隐极机，由于纵轴与横轴磁阻相等，因此 $x_{ad} = x_{aq} = x_a$ 。

三、同步电抗

漏抗与电枢反应电抗之和，称为同步电抗。

1. 隐极电机的同步电抗

$$x_s = x_\sigma + x_a \quad (16-10)$$

2. 凸极电机的同步电抗

$$\begin{aligned} \text{纵轴同步电抗 } x_d &= x_\sigma + x_{ad} \\ \text{横轴同步电抗 } x_q &= x_\sigma + x_{aq} \end{aligned} \quad (16-11)$$

因为 $x_{ad} > x_{aq}$ ，所以 $x_d > x_q$ 。

同步电抗反应了电枢磁场和漏磁场对主磁场的作用，特别是反应了电枢反应磁场对主磁场的作用。同步电抗越大，电枢反应磁场越强，对主磁场的影响也越大。

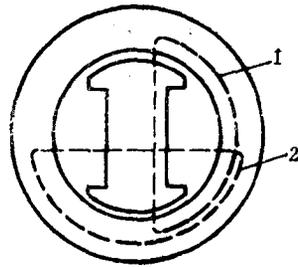


图 16-14 同步电机磁路

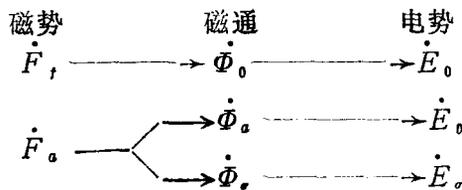
1—直轴磁路；2—交轴磁路

第五节 隐极机的电压方程式及相量图

同步电机运行时，气隙中存在着两个旋转磁场，即转子旋转磁场和电枢旋转磁场。为了分析问题方便起见，在不计磁路饱和影响的情况下，应用迭加原理，可以认为一个磁势独立地产生一个磁通，并在电枢绕组中感应出相应的电势。所以，定子绕组上的感应电势包括：

- (1) 转子磁场 Φ_0 感应的电势 E_0 ；
- (2) 电枢磁场 Φ_a 感应的电势 E_a ；
- (3) 漏磁通 Φ_σ 感应的电势 E_σ 。

上述磁势、磁通、电势之间的关系如下：



除此之外，还有电枢绕组的电阻压降 $I_a r_a$ 。根据基尔霍夫定律，并考虑到三相绕组对称，便可列出一相绕组的电势平衡方程式为

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_a + \dot{E}_\sigma = \dot{U} + \dot{I}_a r_a \quad (16-12)$$

式中 U ——发电机的相电压；

$I_a r_a$ ——电枢一相绕组的电阻压降。

若忽略电枢绕组的电阻压降，电势平衡方程式为

$$E_0 + E_a + E_r = U \quad (16-13)$$

将式(16-7)和式(16-8)代入式(16-13)可得

$$E_0 - jI_a x_a - jI_a x_s = U$$

移项后得

$$E_0 = U + jI_a (x_a + x_s) = U + jI_a x_s \quad (16-14)$$

式(16-14)表明，电势 E_0 等于端电压与同步电抗压降之和。同步电抗 x_s 就是定子绕组的电抗。当负载电流通过定子绕组时，将产生电抗压降，因此负载时，感应电势 E_0 等于端电压 U 与同步电抗压降 $jI_a x_s$ 之和。

根据式(16-14)电压方程式，可以画出图16-15所示的隐极同步发电机的相量图。其作图步骤如下：

(1) 选电压 U 作为参考相量，并画在水平方向上；

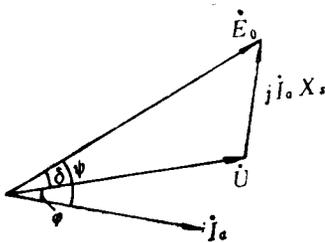


图 16-15 隐极同步发电机相量图

(2) 根据负载的功率因数角 φ ，画出感性负载时的电流相量 I_a ；

(3) 在电压相量 U 的末端，加上同步电抗压降 $jI_a x_s$ ，它超前于电流 I_a 90°电角度；

(4) 端电压 U 与同步电抗压降 $jI_a x_s$

之和，等于感应电势 E_0 。

在图16-15中， E_0 与 I_a 之间的夹角用 ψ 表示，称为内功率因数角。 U 与 I_a 之间的夹角用 φ 表示，称为功率因数角。 E_0 与 U 之间的夹角用 δ 表示，称为功率角，简称功角。

第六节 同步发电机的并联运行

在现代的发电厂里，通常装有很多台发电机，这些发电机是并联运行的。很多发电厂也是并联运行的，组成了强大的电力系统。

所谓并联运行，就是指两个或两个以上的发电厂、两台或两台以上的发电机，分别接在公用的母线上，共同向用户供电，如图16-16所示。

一、并联运行的优点

1. 提高了供电的可靠性

当某一台发电机发生故障或需要检修时，该发电机的负载可以由系统中其它发电机来

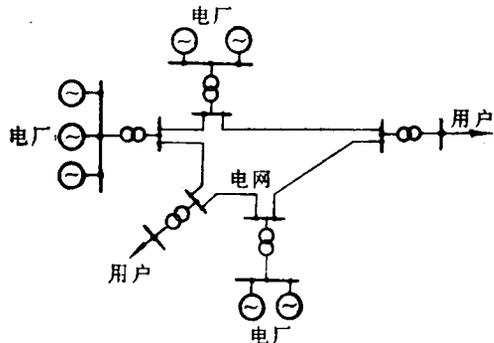


图 16-16 发电厂及发电机的并联运行

承担，从而提高了供电的可靠性。

2. 提高了发电厂的运行效率

电力系统中的负荷是变化的，并联运行后，能根据负荷的变化，调节投入运行的发电机台数，使发电机在较高效率下运行。

3. 合理利用能源，提高电力系统的经济效益

电力系统由火电厂和水电厂联接组成。枯水期间主要由火电厂供电；丰水期间主要由水电厂供电，充分利用水能，达到降低发电成本、提高经济效益的目的。

4. 提高供电质量

很多发电厂并联在一起，组成了强大的电力系统。负载变化时，电网电压和频率的波动小，提高了供电质量。

二、投入并列的条件

为了避免发电机投入电网时，在发电机内部产生冲击电流和强大的机械应力，投入电网的同步发电机应满足下列条件：

- (1) 待并发电机电压 U_F 与电网电压 U 大小相等，即 $U_F = U$ ；
- (2) 待并发电机电压的相位与电网电压的电位相同；
- (3) 待并发电机的频率 f_F 与电网频率 f 相等，即 $f_F = f$ ；
- (4) 待并发电机的相序与电网相序一致。

为什么投入并列时必须满足以上条件呢？下面以隐极发电机为例逐条进行分析。为了便于分析，在讨论其中某一条件不满足时，假定其它条件是符合的。

如果待并发电机电压与电网电压大小不相等，即 $U_F \neq U$ ，则在断路器两端存在着电压差 $\Delta U = U_F - U$ ，如图 16-17 (a) 所示。在 ΔU 的作用下，在发电机与电网所组成的回路中，将产生一个冲击电流 I_h 。根据图 16-17 (a) 所示的正方向，冲击电流为

$$\dot{I}_h = \frac{\Delta \dot{U}}{jx} = \frac{\dot{U}_F - \dot{U}}{jx} \quad (16-15)$$

式中 x ——发电机的电抗。

由于电网容量无穷大，可以认为电网电抗等于零。因此，限制冲击电流的就只有发电机的电抗 x 。

由于发电机电抗 x 很小，所以微小的电压差 ΔU ，都会产生很大的冲击电流，故并联运行时，要求待并发电机电压与电网电压相等。

如果待并发电机电压与电网电压相位不相同，发电机与电网的闭合回路中仍存在着电压差 ΔU ，如图 16-18 所示。当 U_F 与 U 相位相差 180° 时，电压差可达发电机电压的两倍，即 $\Delta U = 2U$ ，此时的冲击电流最大，可达额定电流的 $20 \sim 30$ 倍。在此电流作用下，还要产生强大的冲击力矩，可能损坏电机。

如果发电机频率与电网频率不相同，则 U_F 与 U 两个相量的旋转角速度也不相同，二者之间出现相对运动。假设以系统电压 U 作为参考相量，则待并发电机电压 \dot{U}_F 以速度 $\omega_F - \omega$ 向前旋转如图 16-19 所示。两相量之间的相位差在 $0 \sim 360^\circ$ 之间变化，电压差忽大忽小，在 $0 \sim 2U_m$ 之间变化，这个变化的电压称为拍振电压。在拍振电压的作用下，产生大小和相

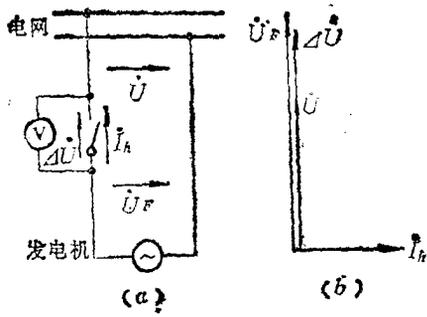


图 16-17 $U_F \neq U$ 时的并联情况
(a) 并联单线图；(b) 电压相量图

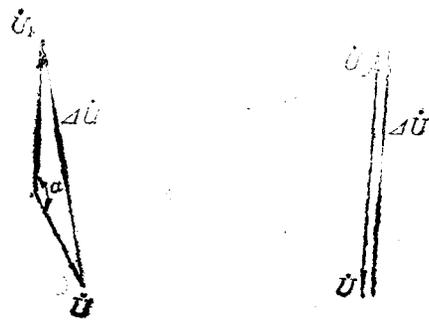


图 16-18 U_F 与 U 相位不同时的并联情况

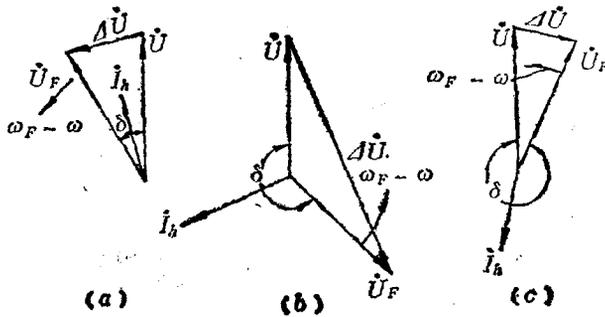


图 16-19 频率不同时的并联情况

位都不断变化的环流 I_h 和大小及方向不断变化的交变力矩，使发电机振动。

如果相序不同，则发电机永远不能拉入同步。在图 16-20 中， U_A 、 U_B 、 U_C 表示电网电压相序， U_{AF} 、 U_{BF} 、 U_{CF} 表示发电机电压相序。因为相序不同，并联时只有一相（如 A 相）同相位，其电压差为零。其它两相不同相位，且电压差 $U_{BF} - U_B = \Delta U_B$ 和 $U_{CF} - U_C = \Delta U_C$ 都很大，是相电压的 $\sqrt{3}$ 倍，产生相当于相间短路的持续电流和强大的电磁力矩，使电机遭到严重的破坏，并且电机永远不能拉入同步。因此，相序不同时，绝对不允许并联运行。

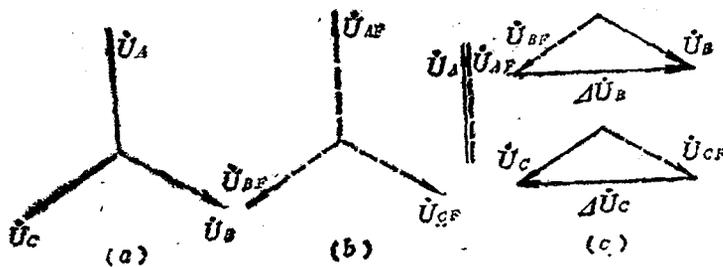


图 16-20 相序不同时的并联情况

三、并列方法

发电机并列方法有两种，即准同期并列法和自同期并列法。

1. 准同期并列法

用准同期并列法进行并列时，先将待并发电机转速升至额定转速，再加励磁，使其端电压升至额定电压。然后比较待并发电机与电网的电压、频率是否相等，如不相等，通过调发电机励磁电流来调发电机的电压，调原动机转速来调发电机频率，一直调到与电网的电压、频率相等时，合上待并发电机与电网之间的断路器。

准同期并列分为手动准同期和自动准同期两种。凡调电压、频率、合断路器由运行人员手动操作完成的，称为手动准同期。当上述三项操作由动自装置完成的，称为自动准同期。

准同期并列必须满足并列运行的几个条件，检查是否符合并列条件一般有三种方法：暗灯法、旋转灯光法和同步表法。暗灯法和旋转灯光法很少采用，故本书只介绍同步表法。

同步表法是在仪表的监视下，调节待并发电机的电压、频率与电网同步，如图 16-21 所示。用两个电压表 V_1 和 V_2 分别检查电网电压和待并发电机电压，如不相同，应增大或减小发电机的励磁电流。用两个频率表 HZ_1 和 HZ_2 分别检查待并发电机和电网的频率，如不相等，应增大或减小原动机的转矩，即调节水轮机的进水量或汽轮机的进汽量，以升高或降低发电机的转速，达到调频的目的。然后用同步表 S （如图 16-22 来检查待并发电机与电网电压的相位是否相同。当待并发电机的频率高于电网频率时，同步表的指针向快的方向旋转。频率相差越多，旋转速度越快。这时，应减小原动机转速，以达到减小发电机频率的目的。反之，同步表的指针向“慢”的方向旋转，表示发电机的转速小于同步转速，应加快发电机的转速。当表的指针旋转缓慢，并在指针接近于红线时，表示待并发电机与电网达到同步，应迅速合闸，完成并列操作。

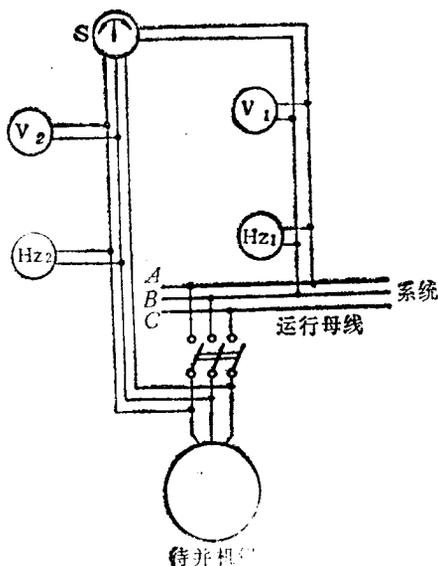


图 16-21 同步表法的原理接线图



图 16-22 同步表的外形

2. 自同期并列法

自同期并列法就是将未励磁的发电机，由原动机拖动到接近同步转速，即与电网频率之差不超过 $0.5 \sim 1 \text{ Hz}$ 时，立即合上待并发电机的并列开关，然后迅速加上励磁，利用电

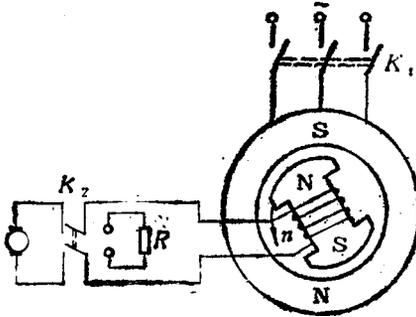


图 16-23 自同期接线示意图

机的“自整步”作用，将电机自动拉入同步。

采用自同期并列时，励磁绕组不能开路。并列前，先将发电机励磁绕组经过约等于10倍的励磁绕组电阻 R 接成闭合回路，如图16-23所示，其目的是为了避免合闸时定子冲击电流在励磁绕组中产生危险的过电压而损坏励磁绕组。

准同期并列的优点是基本上没有冲击电流。缺点是操作复杂；并列的时间长；当电网出现故障时，电压、频率波动大，用此法难于将发电机投入。自同期并列的优点是事故后能迅速合闸；操作简单、迅速。缺点是冲击电流大。自同期并列在水电厂得到广泛应用。

第七节 功角特性及有功功率调节

同步发电机是将转轴上输入的机械功率 P_1 ，通过电磁感应作用，转换成定子的电功率输出。其转换过程如图16-24所示。

一、有功功率平衡

在同步发电机功率的传输过程中，有各种功率损耗。从转轴上输入的机械功率 P_1 中，减去机械损耗 p_D 、定子铁损 p_{Fe} 和励磁绕组中的励磁损耗 p_{Ouf} 以后，剩下来的是通过电磁感应作用从转子传递到定子上的功率，称为电磁功率，用 P_M 表示，即

$$P_M = P_1 - (p_D + p_{Fe} + p_{Ouf}) \quad (16-16)$$

当发电机向电网输出功率时，又在定子绕组中产生铜损 p_{Cu} ，因此电磁功率减去定子绕组铜损后，便是发电机的输出功率，即

$$P_2 = P_M - p_{Cu}$$

对于大容量电机， $p_{Cu} \approx 1\% P_N$ ，可略去不计，则

$$P_M = P_2 = 3UI_a \cos \varphi \quad (16-17)$$

二、功角特性（隐极机） $P_M \approx f(\delta)$

图16-25所示为隐极同步发电机的简化相量图，由图可知

$$P_M = 3UI_a \cos \varphi = 3E_0 I_a \cos \psi \quad (16-18)$$

而

$$I_a x_s \cos \psi = U \sin \delta$$

所以

$$I_a \cos \psi = \frac{U \sin \delta}{x_s} \quad (16-19)$$

将式(16-19)代入式(16-18)，可得

$$P_M = 3 \frac{E_0 U}{x_s} \sin \delta \quad (16-20)$$

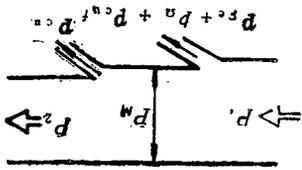


图 16-24 同步发电机的能量图

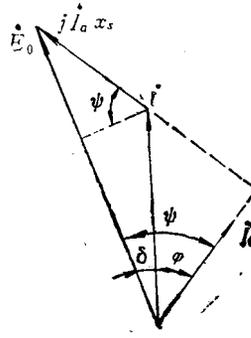


图 16-25 隐极同步发电机简化相量图

当发电机电压 $U = \text{常数}$ ，发电机励磁电流 $i_f = \text{常数}$ 时，电磁功率 P_M 与功角 δ 之间的关系曲线，称为功角特性，如图 16-26 所示。

从功角特性曲线可知，同步发电机的电磁功率 P_M 与功角 δ 成正弦函数关系。当功角 δ 从零逐渐增加到 90° 时，电磁功率 P_M 随功角 δ 的增加而增加；当 $\delta = 90^\circ$ 时，电磁功率达到最大值，即

$$P_{M_{\max}} = 3 \frac{E_0 U}{x_s} \quad (16-21)$$

当功角 δ 从 90° 继续增加到 180° 时，电磁功率随功角的增加而减小。当 $\delta = 180^\circ$ 时，电磁功率为零；当功角超过 180° 时，电磁功率由正变负，说明发电机不再向电网输送有功功率，而从电网吸收有功功率，即电机从发电机运行状态变成电动机运行状态。

从以上分析可知，功角 δ 是研究同步发电机运行状态的一个重要变量，它不仅决定了发电机输出功率的大小，而且能表明电机的运行状态。

三、功角 δ 的物理意义

由图 16-15 可知，功角 δ 是感应电势 \dot{E}_0 与端电压 \dot{U} 之间的夹角。空载电势 \dot{E}_0 由主磁极磁势 F_f 产生，相位比主磁通 Φ_0 滞后 90° ；端电压 U 可视为是定子合成磁势 F_a （电枢磁势 F_a 与转子磁势即主磁极磁势 F_f 之和）产生的，相位比定子合成磁势的磁通 Φ_a 滞后 90° 。因此， δ 又是定子合成磁场轴线与主磁场轴线之间的空间夹角，如图 16-27 所示。于是，

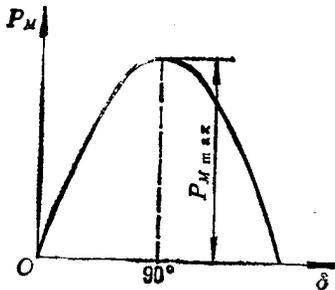


图 16-26 隐极同步发电机的功角特性

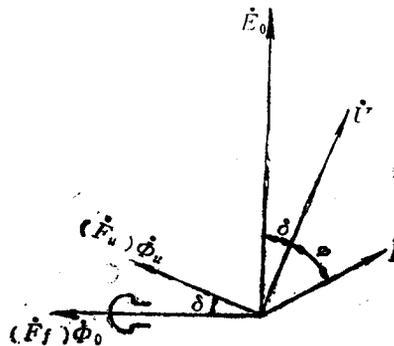


图 16-27 功角的空间含义

功角 δ 具有双重物理意义：它既是空载电势 \dot{E}_0 与端电压 \dot{U} 之间的时间相位差，又是主磁通 $\dot{\Phi}_0$ 与定子合成磁场 $\dot{\Phi}_s$ 之间的空间相位差。

四、有功功率的调节

从有功功率平衡式可知，只有增加原动机的输入功率，才能增加发电机的有功功率输出。同步发电机空载运行时，无有功功率输出，原动机输入的机械功率 P_1 恰好补偿各种损耗，即 $P_1 = p_0$ ，其 p_0 为发电机的空载损耗。此时，原动机的转矩 M_1 与空载转矩 M_0 相平衡，即 $M_1 = M_0$ ，发电机处于平衡状态。当水轮机的进水量或汽轮机的进汽量增加时，原动机输入的机械功率 P_1 增加，则输入功率大于输出功率，即 $P_1 > p_0$ ，剩余功率通过电磁感应从转子传递到定子，变为电磁功率，从定子输出。

有功功率调节，还可以用改变功角 δ 来进行分析。空载时， $P_1 = p_0$ ， $M_1 = M_0$ ， $P_M = 0$ ， $\delta = 0^\circ$ ，转子磁场轴线与定子合成磁场轴线重合。当增加输入功率 P_1 时， $P_1 > p_0$ ， $M_1 > M_0$ ，发电机在剩余转矩下加速。由于无穷大电网的电压和频率均为常数，因此定子合成磁场的转速不变。转子加速后，转子磁场轴线便超前定子合成磁场轴线，功角 δ 逐渐增大，随着功角 δ 的增大，发电机输出的电磁功率增加。当 $P_M = P_1 - p_0$ 时，发电机转子不再加速，处于新的平衡状态稳定运行。

第八节 无功功率调节及 V 形曲线

一、无功功率的调节

以隐极机为例，研究同步发电机无功功率的调节。隐极机的简化电压方程式为

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + j \dot{I}_a x_s$$

为了简单起见，假设在调节无功功率时，发电机输出的有功功率不变，于是

$$\left. \begin{aligned} P_2 &= 3 UI_a \cos\varphi = \text{常数} \\ P_M &= 3 \frac{UE_0}{x_s} \sin\delta = \text{常数} \end{aligned} \right\} \quad (16-22)$$

由于 U 、 x_s 均为常数，因此

$$\left. \begin{aligned} I_a \cos\varphi &= \text{常数} \\ E_0 \sin\delta &= \text{常数} \end{aligned} \right\} \quad (16-23)$$

从下面分析可知，调节发电机转子励磁电流，就可以调节发电机无功功率输出。

当调节励磁电流使 \dot{E}_0 发生变化时，发电机的电枢电流和功率因数也随之发生变化。

从图 16-28 可见，由于有功电流 $I_a \cos\varphi = \text{常数}$ ，电流 I_a 在横轴上的投影不变。因此，电流 \dot{I}_a 端点的轨迹是一条与电压相量 \dot{U} 垂直的直线 AB 。又由于 $E_0 \sin\delta = \text{常数}$ ， \dot{E}_0 在纵轴上的投影不变，因此 \dot{E}_0 端点的轨迹是一条与电压相量平行的直线 \overline{CD} 。

下面分三种情况进行讨论：

(1) 电枢电流 I_{a1} 与端电压 U 同相位，即 $\cos\varphi = 1$ ，此时，电枢电流全部为有功电流，发电机向电网只送有功，不送无功，这种励磁状态称为正常励磁状态。正常励磁状

态所对应的励磁电流 I_{f1} ，称为正常励磁电流。在图 16-28 中， \dot{U} 、 $jI_{a1}x_s$ 和 \dot{E}_{01} 所组成的电压三角形，为 $\cos\varphi=1$ 时的相量图。

(2) 在正常励磁的基础上增加励磁电流，这种励磁状态称为过励。过励时， $I_{f2} > I_{f1}$ ， $E_{02} > E_{01}$ ， $I_{a2} > I_{a1}$ 。此时，电枢电流 I_{a2} 滞后于电网电压 U ，即功率因数滞后，电枢电流 I_{a2} 除有功分量外，还出现了一个滞后的无功电流分量，即发电机既向电网输送有功功率，也输送感性无功功率。在图 16-28 中，由 U 、 $jI_{a2}x_s$ 、 E_{02} 所组成的电压三角形，即为过励状态下的相量图。

(3) 在正常励磁的基础上减小励磁电流，这种励磁状态称为欠励。欠励时， $I_{f3} < I_{f1}$ ， $E_{03} < E_{01}$ ， $I_{a3} > I_{a1}$ 。此时的电枢电流超前于电网电压 U ，即功率因数超前。电枢电流 I_{a3} 除有功电流分量外，还有一个超前的无功电流分量，即发电机既输出有功功率，也输出容性无功功率。在图 16-28 中，由 U 、 $jI_{a3}x_s$ 、 E_{03} 所组成的电压三角形，为欠励下的相量图。

从以上的分析可知，调节发电机的励磁电流，就可以调节发电机的无功功率输出。调励磁电流不仅可以调节无功功率的大小，而且可以改变无功功率的性质。过励时，功率因数滞后，向系统输出感性无功功率，励磁电流越大，输出的无功功率越多。欠励时，功率因数超前，向系统输出容性无功功率，且励磁电流越小，输出的容性无功功率越多。

二、V形曲线

当电压 $U=$ 常数、输出功率 $P_2=$ 常数时，电枢电流 I_a 与励磁电流 I_f 之间的关系曲线，似英文字母 V，故称为 V 形曲线，如图 16-29 所示。

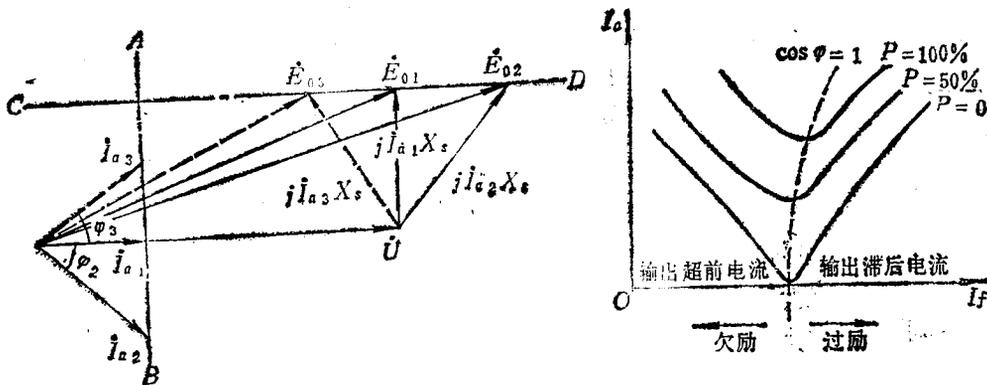


图 16-28 不同激磁时同步发电机的相量图 图 16-29 同步发电机的 V 形曲线

当 $\cos\varphi=1$ 时，定子电流为有功电流，其值最小，电机处于正常励磁状态。在正常励磁的基础上，增大励磁电流，电机过励运行，功率因数滞后，定子电流因含感性无功分量而增大。在正常励磁的基础上，减小励磁电流，电机处于欠励运行，功率因数超前，定子电流因含容性无功电流分量而增大。因此，定子电流 I_a 与励磁电流 I_f 之间的关系曲线似 V 形。

由图可见，在不同的有功功率时，有不同的 V 形曲线。输出的有功功率增大时，定子电流增大（因定子电流的有功分量电流增大），V 形曲线往上移。各条 V 形曲线的最低

点都是 $\cos\varphi=1$ 的点。把这些最低点连接起来，就得到 $\cos\varphi=1$ 时的曲线，如图 6-29 所示。该曲线略微向右倾斜，这说明在增加有功功率的同时，必须相应增加励磁电流才能维持功率因数 $\cos\varphi=1$ ，使电机由原有的正常励磁状态达到新的正常励磁状态。以 $\cos\varphi=1$ 的曲线作为基准，其右边，发电机处于过励运行，功率因数滞后，其左边，发电机处于欠励运行状态，功率因数超前。

V 形曲线左边有一个不稳定区，由于同步发电机欠励运行时，靠近不稳定区，而且欠励运行时，发电机向系统输出容性无功功率，使系统功率因数降低，因此同步发电机一般不在欠励状态下运行。

第九节 小结

(1) 同步发电机是将旋转的机械能转变成电能的电机。它是利用导线切割磁力线产生感应电势的电磁感应原理制成的。

(2) 调节发电机励磁电流，就可以调节发电机的端电压。调节原动机转矩（调节水轮机的进水量或汽轮机的进汽量），就可以改变发电机的频率。

(3) 电枢基波磁场对主磁场的作用称为电枢反应。发电机带有功负载时，产生交轴电枢反应。交轴电枢反应产生电磁阻力矩，是电机实现能量转换的关键。发电机带感性无功功率时，产生纵轴去磁电枢反应，使主磁场削弱，端电压下降。发电机带容性无功功率时，产生纵轴增磁电枢反应，使主磁场增强，端电压上升。因此，纵轴电枢反应是引起发电机端电压变化的主要原因。

(4) 对应于漏磁通的电抗叫漏抗，对应于电枢反应磁通的电抗叫电枢反应电抗，电枢反应电抗与漏抗之和称为同步电抗。

隐极电机的同步电抗为

$$x_s = x_a + x_l$$

凸极电机的同步电抗为

直轴同步电机

$$x_d = x_{ad} + x_l$$

交轴同步电机

$$x_q = x_{aq} + x_l$$

$$x_d > x_q$$

(5) 通过电磁感应，从转子传递到定子的电功率称为电磁功率。隐极同步发电机的电磁功率为

$$P_N = 3 \frac{E_0 U}{x_s} \sin \delta$$

电磁功率 P_N 与功角 δ 之间的关系曲线，称为功角特性。

(6) 调节原动机的转矩，即调节水轮机的进水量或汽轮机的进汽量，就可以改变发电机的有功功率输出。调节励磁电流，就可以改变发电机的无功功率输出。过励时输出感性无功功率，欠励时输出容性无功功率。在一般情况下，电力系统的负载是电阻和电感的混合负载，因此发电机一般在过励状态下运行，向系统输送有功功率和感性无功功率，以

满足负载的需要。

思考题及习题

16-1 同步发电机主要由哪些部分组成？各部分起什么作用？

16-2 叙述同步发电机的工作原理。

16-3 同步发电机的“同步”是什么意思？

16-4 什么叫电枢反应？当负载功率因数 $\cos\varphi=1$ 、 $\cos\varphi=0.8$ 、 $\cos\varphi=0$ 时，各产生什么电枢反应？对电机有什么影响？

16-5 什么叫同步电抗？它的物理意义是什么？试分析下面几种情况对同步电抗的影响：

(1) 电枢绕组匝数增加；

(2) 铁芯饱和程度增加；

(3) 气隙增大；

(4) 励磁绕组匝数增加。

16-6 什么叫功角特性？它说明什么问题？

16-7 试述 φ 、 ψ 、 δ 三个角各代表的物理意义。

16-8 如果同步发电机单独供给一对称负载，且转速保持不变，问发电机运行的功率因数由什么决定？如果这台发电机与无穷大电网并联运行，功率因数又由什么决定？

16-9 如何调节同步发电机的电压和频率？如何调节同步发电机的有功功率和无功功率？

16-10 同步发电机并联运行有什么特点？并列的方法有哪几种？准同期并列的条件是什么？如果并列时，待并发电机电压与系统电压的相位不相同，应如何调节？

16-11 什么叫同步发电机的正常励磁？什么叫过励？什么叫欠励？同步发电机一般在什么状态下运行？为什么？

16-12 采用准同期并列时，如何检查待并同步发电机是否满足了并列运行的条件？如果待并发电机电压低于系统电压，如何调节？如果频率不相等，又如何调节？

16-13 对同步发电机进行并列操作时，如果发现同步表示指针向慢的方向旋转得很快，应如何调节？为什么？

16-14 有一台汽轮发电机与无穷大电网并联运行，额定负载时功角 $\delta=25^\circ$ 。现因，外线发生短路故障，电网电压降低为 $70\%U_N$ ，如果保持有功功率输出不变，并使 δ 保持在 30° 的范围内，应该加大励磁电流使 E_0 上升为原来的多少倍？

16-15 有一台三相同步发电机，额定容量为 5000kVA ，额定电压为 6.3kV ，与电网并联运行，其工作情况是 $U=6.3\text{kV}$ ， $I=400\text{A}$ ， $\cos\varphi=0.8$ （滞后）。试问：

(1) 若保持原动机转矩不变，调节同步发电机的励磁电流，使功率因数变为 $\cos\varphi'=1$ ，试问它的有功功率、无功功率及电流如何变化？

(2) 若保持同步发电机励磁电流不变，调节原动机转矩，使电流变为 $I'=450\text{A}$ ，功率因数为 $\cos\varphi'=0.885$ ，试问有功功率如何变化？

第十七章 同步电动机和同步调相机

同步电动机与所有电机一样，是可逆的，既可以作为发电机用来发电，又可以作为电动机用来拖动机械负载。因此，同步电动机是同步电机的一种运行状态。

同步电动机与异步电动机比较，有两大特点：

(1) 同步电动机转速恒定不变，与负载的大小无关，转子的转速 n_2 与定子旋转磁场的转速 n_1 相等，即

$$n_2 = n_1 = \frac{60f_1}{p} \quad (17-1)$$

(2) 功率因数是可调的。同步电动机可以通过调节转子励磁电流来改变电动机的功率因数。过励时，能向电网输送感性无功功率，改善系统功率因数，这既是同步电动机的特点，也是同步电动机的优点。因此，不需要调速的大容量机械负载，如空气压缩机、球磨机、离心式水泵、送风机等，常用同步电动机来拖动。

第一节 同步电动机的工作原理

同步电机可以作为发电机运行，也可以作为电动机运行。同步电机作发电机运行时，由原动机（水轮机或汽轮机等）输入机械能，通过电磁感应作用，将输入的机械能转变成电能送给负载或电网；当同步电机作电动机运行时，从电网吸收电能，利用通电导体在磁场中受力的原理，将输入的电能变成旋转的机械能。

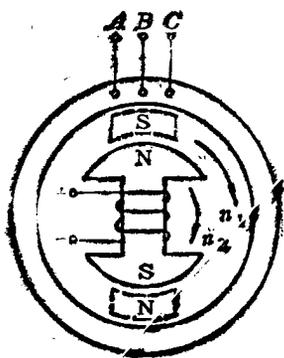


图 17-1 同步电动机的工作原理

旋转，将电能转变成机械能。由于转子转速 n_2 与定子旋转磁场转速 n_1 相等，即 $n_2 = n_1$ ，所以这种电动机称为同步电动机。

同步电动机一般都是凸极式的，它的构造与同步发电机基本相同，主要由不动的定子和旋转的转子两部分组成，如图 17-1 所示。

当定子绕组通入三相交流电时，便产生一个旋转磁场，并以同步转速 $n_1 = \frac{60f_1}{p}$

(r/min) 的速度旋转。转子绕组通入直流电以后，也产生一个磁场。当电动机起动后，根据磁极异性相吸的原理，定子旋转磁场便拖着转子磁极沿着旋转磁场的方向，以同步转速

第二节 同步电动机的电压方程式及相量图

同步电动机的电压平衡方程式和相量图可以通过同步发电机的电压平衡方程式和相

量图转化而来。

一、按发电机惯例作隐极同步电动机相量图

隐极同步发电机电压方程式为

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - j \dot{I}_a x_s \quad (17-2)$$

隐极同步发电机的输出功率为

$$P = 3UI_a \cos \varphi \quad (17-3)$$

电机作发电机运行时，向系统输出电功率，因输出电功率 P 为正值，所以功率因数角 $\varphi < 90^\circ$ 。根据式 (17-2) 和 $\varphi < 90^\circ$ 。可作出隐极同步发电机的相量图，如图 17-2 (b) 所示。当电机作电动机运行时，电机从电网吸收电功率，或者说输出的电功率 P 为负。因为 P 为负值 因此 $\varphi > 90^\circ$ ，即把同步电动机视为一台输出负值电功率的发电机。根据式 (17-2) 和 $\varphi > 90^\circ$ 。可画出同步电动机的相量图，如图 17-2 (c) 所示。

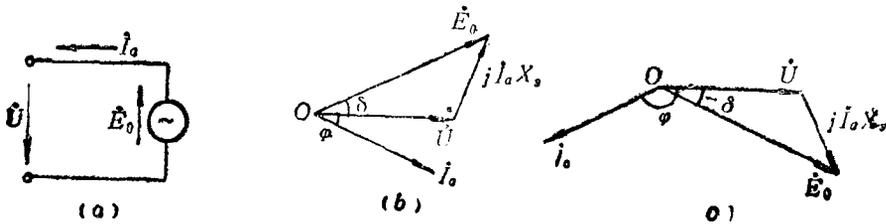


图 17-2 按发电机惯例作电动机相量图

(a) 在发电机状态下规定的正方向；

(b) 发电机状态；(c) 电动机状态

二、按电动机惯例作隐极同步电动机相量图

发电机是一个电源，我们把它向电网输出的电流 I_a 视为正电流，而电动机是一个负载，把它从电网输入的电流 I 视为正电流。因 I_a 与 I 规定的正方向相反，所以 I_a 与 I 的相位相差 180° ，即 $I_a = -I$ 。将 $I_a = -I$ 代入式 (17-2)，便得到同步电动机的电压平衡方程式

$$U = E_0 + j I x_s \quad (17-4)$$

根据式 (17-4) 可以画出同步电动机的相量图，如图 17-3 所示。

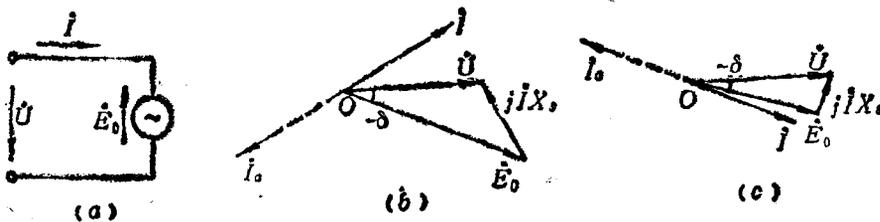


图 17-3 按电动机惯例画隐极同步电动机相量图

(a) 在电动机状态下规定的正方向；

(b) 超前功率因数；(c) 滞后功率因数

三、按电动机惯例作凸极同步电动机相量图

凸极同步电动机与上述隐极同步电动机一样，用电动机观点可直接写出电压平衡方程式

$$U = E_0 + j I_a x_d + j I_q x_q \quad (17-5)$$

式中 I_d ——同步电动机输入电流的直轴分量；

I_q ——同步电动机输入电流的交轴分量。

根据式 (17-5) 可以画出凸极同步电动机在功率因数超前及滞后时的相量图，如图 17-4 所示。

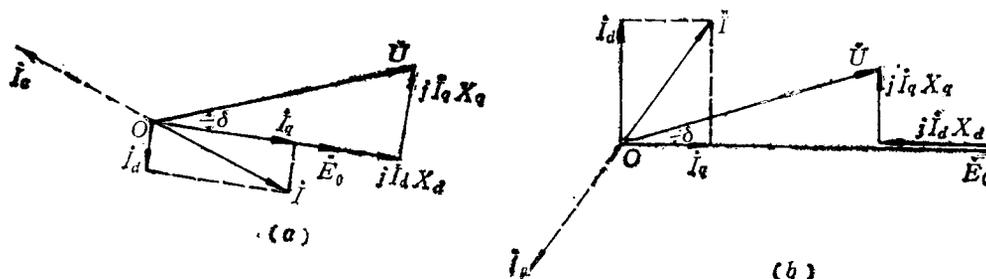


图 17-4 凸极同步电动机向量图

(a) 欠励时吸取滞后电流；

(b) 过励时吸取超前电流

第三节 同步电动机的功率因数特性

同步发电机与无穷大电网并联运行时，如果保持有功功率不变，调节发电机励磁电流，不仅可以调节无功功率的大小，而且可以改变无功功率的性质，即改变发电机的功率因数。同步电动机与同步发电机一样，无功功率的性质，即功率因数是超前还是滞后，取决于同步电动机的励磁状态。因为同步电机处于发电机状态或电动机状态，是对有功功率转换方向而言的。处于发电机状态时，将机械能变成电能；处于电动机状态时，将电能转变成机械能。至于无功功率，无论同步电机是处于发电机运行还是电动机运行，只要是在“过励”状态，电枢绕组中都要流过一个产生去磁作用的无功电流。在“欠励”状态，电枢绕组中都要流过一个产生增磁作用的无功电流。下面借助于相量图进行分析。

一、同步电动机负载时的三种运行状态

同步电动机运行时，转子旋转磁场在定子绕组中产生感应电势 E_0 。电枢旋转磁场在定子绕组中产生感应电势 E_A 。如果忽略漏电势，则电动机的合成电势 $\Sigma E = E_0 + E_A$ 。那么产生这一合成电势的合成磁通 $\Sigma \Phi = \Phi_0 + \Phi_A$ ，且 $\Sigma \Phi$ 超前于 $\Sigma E 90^\circ$ 。

为了分析问题方便起见，作如下假设。

(1) 假设电网电压 U 不变，则

$$U = -\Sigma E = \text{常数} \longrightarrow \Sigma \Phi = \Phi_0 + \Phi_A = \text{常数}$$

(2) 假设负载力矩不变，即电磁力矩和电功率不变。若忽略铜损不计，电磁功率等于输入功率，即

$$P_M = P_1 = 3UI \cos \varphi = \text{常数} \longrightarrow I \cos \varphi = \text{常数}$$

由于 $I \cos \varphi = \text{常数}$ ，电流 I 端点的轨迹在水平线 $D_1 D_2$ 直线上，如图 17-5 所示。

1. 正常励磁

同步电动机在 $\cos \varphi = 1$ 时的励磁状态称为正常励磁状态。正常励磁时，励磁电流为

I_{f0} ，电枢电流 I 全为有功电流，因此 I 与 U 同相位；电枢磁通 Φ_A 与电枢电流 I 同相位；在适当的比例下，电枢磁通 Φ_A 可以表示电枢磁通 Φ_A ，此时的主磁通应为 Φ_0 。在图 17-5 中， Φ_A 、 Φ_0 、 $\Sigma\Phi$ 所组成的磁通三角形为正常励磁时的相量图。

2. 欠励

在正常励磁的基础上减小励磁电流，这时的励磁状态称为欠励。欠励时，主磁通减小，即欠励时的主磁通 $\Phi_{01} < \Phi_0$ ，电枢磁通 $\Phi_{A1} > \Phi_A$ ；电枢电流 $I_1 > I$ ，且 I_1 滞后于电压 U （功率因数滞后），电枢电流除有功分量外， I_1 包含一个滞后的无功电流分量。所以欠励时，同步电动机从电网吸取一个感性无功功率（感性无功电流），或者说向电网输送一个容性无功功率，使系统功率因数降低。在图 17-5 中， Φ_{A1} 、 Φ_{01} 、 $\Sigma\Phi$ 所组成的磁通三角形为欠励时的相量图。

3. 过励

在正常励磁的基础上，增大励磁电流称为过励。过励时，主磁场增强，即主磁通为 $\Phi_{02} > \Phi_0$ ，电枢磁通为 $\Phi_{A2} > \Phi_A$ ，电枢电流 $I_2 > I$ ，且 I_2 超前于电压 U （电动机功率因数超前），电枢电流除有功分量外，还包含一个超前的无功电流分量。亦即过励时，同步电动机从电网吸取容性无功功率，或者说向电网输送感性无功功率，以补偿变压器和异步电动机对电网感性无功功率的要求。这样，发电机就可以少发无功功率，多发有功功率，从而改善系统的功率因数，这是同步电动机最可贵的优点。在图 17-5 中， Φ_{A2} 、 Φ_{02} 、 $\Sigma\Phi$ 所组成的磁通三角形为过励时的相量图。

从以上分析可知，调节励磁电流的大小，不仅可以改变同步电动机功率因数的大小，而且可以改变同步电动机功率因数的性质。欠励时，同步电动机功率因数滞后，从系统吸收感性无功功率，使系统功率因数下降，极不经济，因此同步电动机一般不在欠励状态下运行。过励时，同步电动机功率因数超前，同步电动机在拖动机械负载运转的同时，又向系统输送感性无功功率，改善了系统的功率因数，提高了电力系统的经济效益，所以同步电动机一般都在过励状态下运行。

为了改善系统的功率因数和提高电动机本身的过载能力，同步电动机的额定功率因数一般为 $1 \sim 0.8$ （越前）。

二、同步电动机的 V 形曲线

当负载转矩 $M = \text{常数}$ ，即电磁功率 $P_M = \text{常数}$ 时，电枢电流 I 与转子励磁电流 I_f 之间的关系曲线，称为 V 形曲线，如图 17-6 所示。功率因数 $\cos\varphi = 1$ 时的励磁状态，称为正常励磁，此时定子电流全为有功电流，因此最小。在正常励磁的基础上增大励磁电流，称为过励，过励时，功率因数超前，定子电流因出现容性无功电流而增大。在正常励磁的基础上减小励磁电流，称为欠励。欠励时，功率因数滞后，定子电流因出现感性无功电流分量而增大。即是说，在正常励磁的基础上，无论是增加或减小励磁电流，定子电流均因出现无功电流分量而增大，因此定子电流与励磁电流之间的关系曲线 $I = f(I_f)$ V 似形。

从图 17-6 可见，随着负载的增加，V 形曲线最低点（ $\cos\varphi = 1$ ）向右上方移动。这是因为负载增加，定子电流有功分量就增加，致使 V 形曲线向上方移动。又由于有功电流增加后，电枢反应的去磁作用略有增加，所以随着有功功率的增加，必须相应地增加励磁电

必要在电网的用电端装调相机，并让它在过励状态下运行，就地供给异步电动机和变压器需要的无功功率，避免无功功率远距离输送，以减小线路损耗和提高电网的功率因数。下面举一个例子来说明调相机在电力系统中的作用。

【例 17-1】 某电厂 35kV 母线通过 30km 的输电线，向某工厂 20000kVA 的负载供电，功率因数 $\cos\varphi=0.707$ （滞后），如图 17-7 所示。用电端变压器的变比为 35/6.3kV。为了改善系统的功率因数，在用电端的 6.3kV 母线上，装设一台容量为 7500kvar 的同步调相机过励运行，对负载所需无功功率进行补偿，35kV 输电线路的导线每公里电阻为 0.17Ω ，试求：

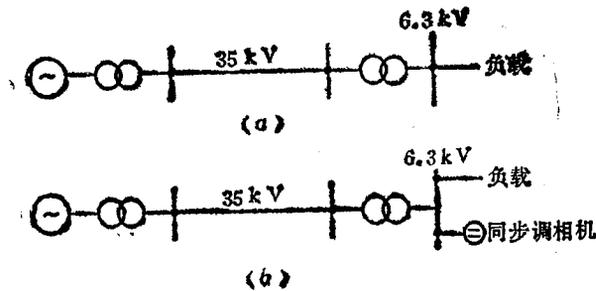


图 17-7 装设同步调相机前、后的系统接线

(a) 未装设调相机时：

(b) 装设调相机后。

- (1) 补偿前变压器低压侧的负载电流 I_2 ；
- (2) 补偿前发电厂向负载输送的有功功率 P 和无功功率 Q ；
- (3) 补偿后负载侧的功率因数 $\cos\varphi'$ ；
- (4) 补偿后变压器低压侧的负载电流 I_2' ；
- (5) 补偿后输电线的功率损失减少了多少。

解 (1) 补偿前低压侧负载电流

$$I_2 = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_2} = \frac{20000}{\sqrt{3} \times 6.3} = 1833 \text{ (A)}$$

(2) 补偿前发电厂向负载输送的有功功率

$$P = \sqrt{3}U_2 I_2 \cos\varphi = S_N \cos\varphi \\ = 2000 \times 0.707 = 14140 \text{ (kW)}$$

补偿前发电厂向负载输送的无功功率

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \\ = \sqrt{20000^2 - 14140^2} = 14144 \text{ (kvar)}$$

(3) 补偿后变压器传送的无功功率

$$Q' = 14144 - 7500 = 6644 \text{ (kvar)}$$

补偿后变压器传递的视在功率

$$S' = \sqrt{P^2 + Q'^2} = \sqrt{14140^2 + 6644^2} = 15621 \text{ (kVA)}$$

补偿后负载侧的功率因数

$$\cos \varphi' = \frac{P}{S} = \frac{14140}{15621} = 0.91$$

(4) 补偿后的负载电流

$$I_2' = \frac{P}{\sqrt{3} U_2 \cos \varphi'} = \frac{14140}{\sqrt{3} \times 6.3 \times 0.91} = 1424 \text{ (A)}$$

(5) 补偿前 35kV 高压侧输电线上的电流

$$I = I_2 / k = 1833 \times \frac{6.3}{35} = 330 \text{ (A)}$$

补偿后 35kV 高压侧输电线上的电流

$$I' = \frac{I_2'}{k} = 1424 \times \frac{6.3}{35} = 256 \text{ (A)}$$

35kV 高压侧输电线路每相的 (每根导线的) 电阻

$$R = 30 \times 0.17 = 5.1 \text{ (} \Omega \text{)}$$

补偿前高压输电线路上的有功功率损耗

$$\Delta P = 3 I^2 R = 3 \times 330^2 \times 5.1 = 1666 \text{ (kW)}$$

补偿后高压输电线路上的有功功率损耗

$$\Delta P' = 3 I'^2 R = 3 \times 256^2 \times 5.1 = 1003 \text{ (kW)}$$

补偿后输电线有功功率损失减少了

$$1666 - 1003 = 663 \text{ (kW)}$$

【例 17-2】有一台发电机向一感性负载供电，有功电流分量 $I_{Fe} = 100 \text{ A}$ ，感性无功电流分量 $I_{\mu} = 1000 \text{ A}$ 。试求；

(1) 没有补偿时，发电机及线路的总电流 I 和功率因数 $\cos \varphi$ ；

(2) 在负载端接入同步调相机后，如将功率因数提高到 $\cos \varphi = 0.8$ 时，线路和补偿机电流各为多少。

(3) 如果将功率因数提高到 $\cos \varphi = 1$ 时，线路电流和补偿机电流又各为多少？

解 (1) 未补偿时发电机及线路总电流

$$I = \sqrt{I_{Fe}^2 + I_{\mu}^2} = \sqrt{100^2 + 1000^2} = 1414 \text{ (A)}$$

功率因数

$$\cos \varphi = \frac{I_{Fe}}{I} = \frac{100}{1414} = 0.71$$

(2) 功率因数提高到 $\cos \varphi = 0.8$ 时，发电机和线路总电流

$$I = \frac{I_{Fe}}{\cos \varphi} = \frac{100}{0.8} = 1250 \text{ (A)}$$

发电机供给的无功电流

$$I_{\nu} = I \sin \varphi = 1250 \times 0.6 = 750 \text{ (A)}$$

调相机供给的感性无功电流

$$I_{\mu}' = 1000 = 750 - 250 \text{ (A)}$$

即调相机应过励运行，供给负载感性无功电流。

(3) 如果将功率因数提高到 $\cos\varphi=1$ 时，发电机及线路总电流。

$$I = I_{Fc} = 1000 \text{ (A)}$$

调相机电流

$$I_d = 1000 - 0 = 1000 \text{ (A)}$$

以上两个例题说明，在负载端装调相机以后，改善了系统的功率因数，减小了输电线路电流和有功功率损耗，提高了系统运行的经济效益。同时由于输出电流减小，输电线电压降 ($\Delta U=Iz$) 减小，负载端电压波动小，从而提高了供电质量，故在大用户的变电站里，常常装有改善功率因数的同步调相机。

2. 调节远距离输电线路电压，维持末端电压恒定

当输电线路很长时，要维持末端电压恒定是困难的。因为电网在感性负载情况下工作时，由于感性负载的去磁作用，引起电网电压下降。当电网轻载时，由于线路电容的效率应（导线与导线之间存在着电容，导线与大地之间也存在着电容），又引起电网电压升高。如果在负载端装上调相机，当电网负载运行时，让调相机过励运行，以补偿电网所需的感性无功功率；当电网轻载运行时，让调相机欠励运行，以补偿电网所需的容性无功功率，可自动维持输电线末端电压基本恒定。

三、调相机的起动

调相机与同步电动机一样，无起动转矩，不能自行起动。其起动方法与同步电动机一样，见下节所述。

第五节 同步电动机的起动

一、同步电动机不能自行起动

同步电动机只有在转子同步转速旋转，定、转子磁场相对静止时，才能产生单一方向的电磁力矩，使电机转动起来。

同步电动机刚起动时，转子尚未转动，即 $n_2=0$ ，转子绕组加入直流电以后，在气隙中产生一个静止不动的磁场。定子绕组通入三相交流电以后，定子磁场以同步转速旋转，因此定、转子磁场之间存在着相对运动两个磁场相互作用所产生的电磁力矩，在一个周期内两次改变方向，如图 17-8 所示，在 1 秒钟内，电磁力矩方向改变 100 次。由于转子有惯性，对此力矩不能立即响应，因此同步电动机不能自行起动。具体分析如下：

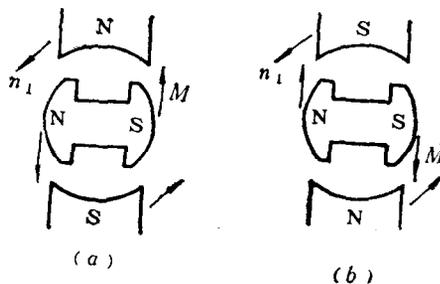


图 17-8 同步电动机起动时
平均电磁转矩为零的说明图

在图 17-8 (a) 所示的这一瞬间，定、转子磁场相互作用所产生的电磁力矩，企图使转子逆时针方向旋转。但由于转子有惯性，在此力矩作用下，不能立刻转动。半个周期以

后($\frac{1}{100}$ s)以后,定子磁场已转过 180° ,如图18-7(b)所示,此时定、转子磁场相互作用所产生的电磁力矩,企图使转子顺时针方向旋转。亦即是说,在一个周期内,转子的平均转矩为零,即起动转矩为零,因此同步电动机不能自行起动。

二、同步电动机的起动方法

由于同步电动机不能自行起动,因此要起动同步电动机,必须借助于其它方法。常用的起动方法有三种:辅助电动机起动法;变频起动法;异步起动法。

1. 辅助电动机起动法

一般选用和同步电动机极数相同,容量为同步电动机容量 $5\% \sim 15\%$ 的异步电动机作为辅助电动机。把辅助电动机投入电网,用辅助电动机将同步电动机拖到接近同步转速,然后用自整步法把同步电动机拉入同步,再切断辅助电动机。

此法的缺点是不能在负载下起动,否则辅助电动机需要的容量太大,增加整个机组设备的投资,是不经济的。因此,一般不用这种方法起动,此法只用于电动机—发电机变流机组或大型同步补偿机的起动。

2. 变频起动法

用此法起动时,同步发电机转子通入励磁电流(直流电),定子需用变频电源供电。变频起动法就是利用变频电源来改变定子旋转磁场转速,以产生同步转矩而起动转子。变频电源的频率在起动开始时调得很低,使定子旋转磁场的转速很慢,定子、转子磁场相互作用能产生一定的平均同步转矩,使转子旋转起来。然后逐渐增大电源频率直到额定频率时为止,在这个过程中,转子的转速将随着旋转磁场的转速而同步上升,直到额定转速。

此法可以获得较大的起动转矩,但需要一个变频电源,投资高,不经济。此外,励磁机必须是非同轴的,因为在低转速下,同轴励磁机无法产生所需的励磁电压。因此,励磁机必须用其它电机来拖动,既不经济,也不方便,故一般不用此法起动。

3. 异步起动法

现代同步电动机的起动,一般都用异步起动法。为此,在同步电动机的转子上,装有与异步电动机鼠笼绕组相似的起动绕组,如图17-9所示。起动绕组用铜条做成,两端用导体短接。

起动时,定子绕组通入对称三相交流电,在气隙中产生旋转磁场。起动绕组因切割旋转磁场而产生感应电势和感应电流,此电流与旋转磁场相互作用产生电磁转矩,使同步电动机按照异步电动机的原理转动起来。然后转速逐渐上升,待转速上升到接近同步转速时,再加上直流励磁,产生转子磁场。定、转子磁场相互吸引,定子旋转磁场拉着转子磁场以同步速度旋转。

从上面的分析可知,同步电动机起动过程可分为两个阶段:

- (1) 异步起动,使电机转速接近于同步转速;
- (2) 加入直流励磁,把转子拉入同步。

由于磁阻转矩的影响,凸极式同步电动机很容易拉入同步,甚至在不加励磁的情况下,有时转子也能拉入同步。因此,为了改善起动性能,同步电动机一般都采用凸极式转

子。

三、注意事项

同步电动机异步起动时，励磁绕组既不能开路，也不能直接短路。因起动时，气隙磁场与转子之间的相对速度很大，励磁绕组匝数又很多，如果励磁绕组开路，将会在励磁绕组上产生危险的过电压，损坏绕组绝缘，造成人身及设备事故。但励磁绕组也不能直接短路，否则励磁绕组电流很大。所以起动时，励磁绕组必须经过一个附加电阻短接，其值为励磁绕组电阻的 5~10 倍，如图 17-10 所示。

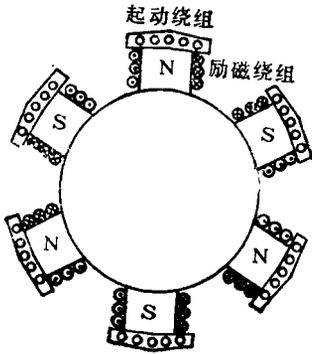


图 17-9 同步电动机的起动绕组

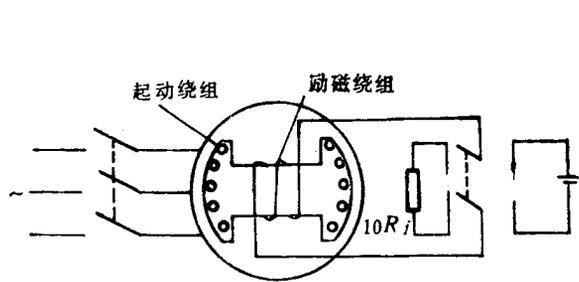


图 17-10 异步起动法接线图

第六节 小结

(1) 同步电动机是交、直流双边励磁电机，转子通直流电产生恒定磁场，定子通三相交流电产生旋转磁场。同步电动机是利用两个磁场异性相吸的原理作成。

(2) 同步电动机的最大优点就是能改善系统功率因数。调节转子励磁电流的大小，不仅可以改变功率因数的大小，而且可以改变功率因数的性质。欠励时，功率因数滞后，使电网功率因数降低；过励时，功率因数超前，使电网功率因数提高，同步电动机一般都在过励状态下运行。

(3) 同步电动机起动时，平均转矩为零，故不能自行起动。因此，要起动同步电动机，必须借助于其它方法。常用的起动方法有三种：用辅助电动机起动；变频起动；异步起动。目前用得最多的是异步起动法。采用异步起动法时，励磁绕组必须串接一个电阻而闭合，其大小为励磁绕组电阻的 5~10 倍。

(4) 不带机械负载，专门送、受无功功率的同步电动机叫调相机。它实际上是一台专发无功功率的发电机，从电网吸收少量有功功率维持空转。调节转子励磁电流，不仅可以调节无功功率的大小，而且可以改变无功功率的性质。欠励时，输出容性无功功率，使系统功率因数恶化；过励时，输出感性无功，提高了系统的功率因数，所以调相机一般都在过励状态下运行。

(5) 为了避免无功功率远距离传送，减小输电线路电流和有功功率损耗，调相机应装在负载端。电力系统装调相机的目的：改善系统功率因数，提高系统经济效益；调节远距离输电线路电压，维持受端电压恒定。

思考题及习题

17-1 为什么同步电动机的转速不随负载的变化而变化？

17-2 试比较同步发电机、同步电动机、同步调相机的共同点及区别。

17-3 如何调节同步电动机的功率因数？要使同步电动机的功率因数从滞后变到超前，应如何调节？

17-4 一台同步电动机半载运行，当增加励磁电流时，电枢电流减小，试问同步电动机原来在什么励磁状态下运行？当时功率因数是超前还是滞后？

17-5 为什么处于过励状态下运行的同步电动机，能提高电网的功率因数？

17-6 同步电动机为什么不能自行起动？试述同步电动机的起动方法、起动过程和注意事项。

17-7 同步电动机在停机时，先切断励磁电源还是先切断交流电源？为什么？

17-8 有一座水电站向远距离用户供电，为改善功率因数，准备装一台调相机，问调相机应装在发电厂还是装为用户附近的变电站？

17-9 某发电厂向一感性负载供电，负载需要的有功电流 I_{re} 为 $1000A$ ，无功电流 I_{μ} 为 $1000A$ 。为了提高功率因数，在用户端安装了一台调相机，并在过励状态下运行，向电网输送感性无功电流 I_{μ} 为 $250A$ ，试求补偿后的功率因数。

17-10 某工厂耗电功率为 $1200kW$ ， $\cos\varphi=0.65$ （滞后），线电压为 $6000V$ ，如该厂需要增加一台 $320kW$ 电动机拖动机械设备，为了将该厂的功率因数提高到 0.8 （滞后），准备采用同步电动机。假设同步电动机的效率为 100% ，试求：

（1）同步电动机的容量应为多少？

（2）同步电动机的功率因数是多少？功率因数是超前还是滞后？

17-11 某工厂在 $6000V$ 电网上吸取 $\cos\varphi=0.6$ 的电功率为 $2000kW$ 。今装一台同步电动机，容量为 $720kW$ ，效率为 0.9 。求 $\cos\varphi$ 改善为 0.8 时，同步电动机的额定电流及同步电动机的功率因数 $\cos\varphi$ 。

17-12 某车间负载功率为 $100kW$ ，功率因数 $\cos\varphi=0.6$ ，现需增加负载 $40kW$ ，如果增加的负载采用同步电动机拖动，并把车间功率因数提高到 0.9 （滞后）。问电动机应运行在过励还是欠励？电动机发出的无功功率是多少？

17-13 某工厂的负载功率为 $1000kW$ ，由容量为 $1800kVA$ 的变压器供电，功率因数为 0.62 （滞后）。该厂现增加 $600kW$ 的新负载。如果新负载由同步电动机带动，其功率因数为 0.75 （超前），问是否需要增加变压器容量？此时全厂的功率因数是多少？

17-14 某发电厂用长 $10km$ 的 $10kV$ 输电线，供给某工厂视在功率 $S=1734kVA$ ，功率因数为 0.6 （滞后）。输电线的导线每公里电阻为 0.2Ω 。为了把发电机功率因数提高到 0.8 （滞后），在用户端装了一台调相机进行无功补偿。试求：

（1）补偿前输电线的电流 I 及有功功率损耗 ΔP ；

（2）调相机容量应是多大？

（3）补偿后输电线的电流及有功功率损耗各减少了多少？

（4）调相机应在欠励还是在过励状态下进行？为什么？

第五篇 直流电机及电力拖动

第十八章 直流电机的工作原理及结构

直流电机包括直流电动机和直流发电机。直流电动机具有良好的起动性能和调速性能。它被广泛地应用在电车、电力机车、轧钢机、起重设备和要求广泛调速的机床等方面。直流发电机作为电源设备应用在充电、励磁、汽车、拖拉机及电解、电镀工业等方面。

随着可控硅技术的发展，特别是大功率可控硅整流元件的出现，可控硅整流有逐步取代直流发电机的趋势，而用整流电源的直流电动机则有着新的发展。

本章介绍直流电机的基本原理、结构及铭牌。

第一节 直流电机的工作原理

一、直流发电机

图18-1表示直流发电机模型。 N 、 S 表示定子上的两个主磁极，主磁极之间的空间内装置一个能转动的电枢，在它上面绕有元件 $abcd$ ，这就是电枢线圈。元件的两端分别连接在两个互相绝缘的半圆铜环上，我们称它为换向器。换向器和电枢固定在同一轴上。电刷压在换向器上，其本身固定在定子上。换向器和电刷间可以相对滑动。因此，当电枢旋转时，线圈所感应的电势可以从电刷导出。

当发电机的电枢被原动机驱动，电枢元件 $ab cd$ 按顺时针方向转动时，其元件有效边 ab 和 cd 切割磁力线而产生感应电势。根据右手定则，在图18-1(a)所示的瞬时，电枢元件感应电势方向为 $a \rightarrow b$ ， $c \rightarrow d$ 。对外电路来说电刷 B 的极性为“+”，电刷 A 的极性为“-”。当电枢转过180°时，如图18-1(b)所示的瞬时，电枢元件感应电势方向改变了，即为 $d \rightarrow c$ ， $b \rightarrow a$ 。但由于换向器的两个半铜环交换了位置，使电刷 B 始终与 S 极下的元件边相接触，电刷 A 始终与 N 极下的元件边相接触，正电刷 B 与负电刷 A 的极性始终不变。这样我们可在电刷 A 、 B 间获得直流电势。显然只有一个线圈元件的直流发电机，电刷间所得到的电势是脉动电势，如图18-2所示。因为电势波动太大，不能用做直流电源。如果将电枢铁芯上的电枢元件和相应的换向片增多，就可减小电势的脉动程度。所以在实际应用的直流电机中，采用了较多的电枢元件，电势脉动已经很小了，可以认为是恒定电势了。

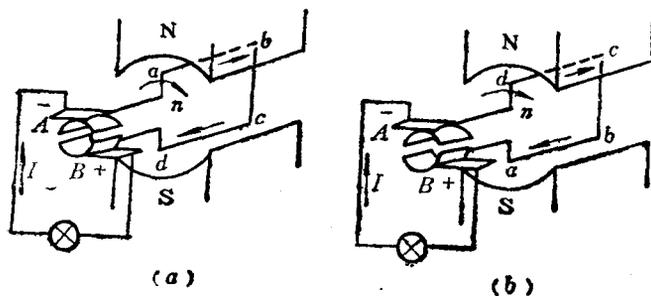


图 18-1 直流发电机工作原理

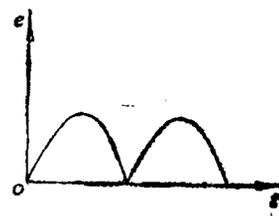


图 18-2 一个电枢元件电势换向后的波形

二、直流电动机

如图 18-3 (a) 所示, 在电机的电刷 A 、 B 上加直流电压, 这时元件中的电流由 d 流向 a 。根据左手定则, 图中电枢线圈将受到顺时针方向的转矩, 称为电磁转矩。当电枢转过 180° 时, 如图 18-3 (b) 所示, 这时电枢线圈中的电流从 a 流向 d , 线圈中的电流改变了方向, 但电磁转矩的方向仍未改变, 保持电枢始终向一个方向旋转, 这就是直流电动机工作原理。

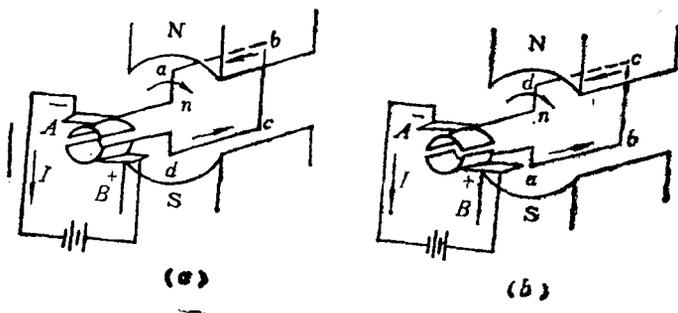


图 18-3 直流电动机工作原理

第二节 直流电机结构简介

直流电机的结构在不断发展, 这里介绍常见直流电机基本结构和了解几个主要部件的构造和作用。

直流电动机和直流发电机在结构上没有什么差别。如果不考虑某些性能的特殊要求, 一台直流发电机只要变更外部条件, 就可以作为直流电动机运行, 反之亦然。

直流电机由静止的定子和旋转的电枢两大部分组成, 在定子和电枢之间存在着气隙。定子的作用是产生主磁场和作为电机的机械支撑。它由主磁极、换向极、机座、端盖和轴承等组成。静止的电刷也固定在定子上。电枢的作用是感应电势, 产生电磁转矩并实现能量转换。它由电枢铁芯、电枢绕组、换向器和转轴等组成。用以加强电机冷却的风扇也装在电机轴上。直流电机的部件图及剖面图如图 18-4 所示。

下面介绍几个主要部件的构造和作用。

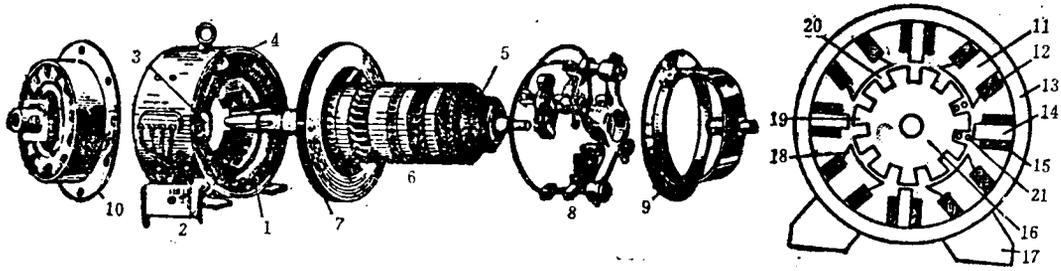


图 18-4 直流电机结构

1—磁极线圈；2—极靴；3—换向极；4—机座；5—换向器；6—电枢；7—风扇；8—刷架；9—后端盖；10—前端盖；11—主磁极；12—磁极线圈；13—磁轭（机座）；14—换向磁极；15—换向极线圈；16—电枢铁芯；17—地脚；18—极靴；19—电枢齿；20—电枢槽；21—电枢绕组

1. 主磁极

主磁极的铁芯用 1.5mm 厚的钢板冲片迭压而成。它的外表面套有用绝缘铜线预先绕制的励磁线圈。当励磁线圈通过直流电流时，就产生主极磁通，磁通过气隙进入电枢。为了使通过气隙的磁通分布均匀些，并使励磁线圈牢固地套在磁极上，在磁极下部扩大为极靴。整个主磁极用螺杆固定在机座上。图 18-5 为主磁极装配图。

2. 换向极

换向极又称附加极。它由铁芯和套在铁芯外面的换向极线圈组成，如图 18-6 所示。大容量直流电机的换向极铁芯，用互相绝缘的薄钢片迭成，中小容量的直流电机的换向极铁芯由整块钢制成。换向极线圈与电枢电路串连，其极性根据要求确定。换向极装置在相邻两主磁极之间的中心线处，用螺杆固定在机座上。换向极的作用是改善换向。

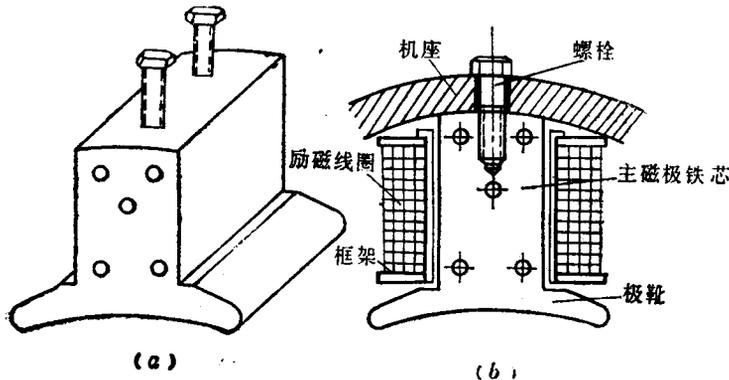


图 18-5 直流电机的主磁极

(a) 主磁极铁芯；(b) 主磁极装配图

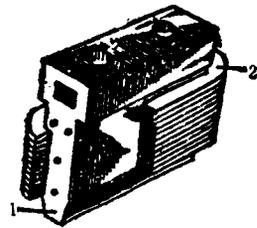


图 18-6 换向极

1—极芯；2—换向磁极线圈

3. 机座

机座一方面用来固定主磁极、换向极和端盖等，借底脚将电机固定在基础上。另一方面作为电机磁路的一部分，其导磁部份又称磁轭。机座一般用铸钢或厚钢板焊接而成，以保证良好的导磁和机械性能。

4. 铁芯枢电

电枢铁芯是磁路的一部分，用来嵌放电枢绕组。为了减少涡流损耗，电枢铁芯用厚度为0.5mm双面涂漆的硅钢冲片迭压而成。为了散热，电枢铁芯上具有轴向通风孔。较大容量的电机还有径向通风沟，这时电枢铁芯沿轴向分成数段，每段长4~10cm，每段间空出10mm作为通风沟。

5. 电枢绕组

电枢绕组用来感应电势和通过电流，使电机实现能量转换。它由绝缘铜线绕制成线圈后嵌入电枢铁芯的槽中。线圈与线圈之间以及上下层线圈之间必须妥善绝缘。为了防止电枢旋转时的离心力使绕组飞出来，线圈在槽中的部分应用槽楔锁住，而伸出槽外的端接部分应用环氧酚醛无纬玻璃丝带扎紧在电枢支架上。线圈的端接头按一定的规律焊接在各换向片上。

6. 换向器

换向器的作用，在直流发电机中是使电枢元件中的交流电势变换为电刷间的直流电势；在直流电动机中是使外加的直流电流变为电枢元件中的交变电流，产生恒定方向的转矩。图18-7为换向器的结构图。它是由冷拉梯形铜排冲剪成若干换向片和同样数目、同样尺寸的片间云母迭压而成的圆柱体。云母片使换向片间绝缘。换向器内圆加工出燕尾槽后，用钢套和螺旋压圈再借助于V形钢环把换向片、片间云母紧固在一起。V形云母环和绝缘套筒的作用是使换向片与钢套、V形钢环间有良好的绝缘。换向片升高部份A处铣有槽，电枢绕组端接部分即焊在槽中。

换向器的状况对电机火花影响较大，因此整个转子完成后应精车换向器外圆，下垫云母片和对换向片进行倒角，保证电刷和换向器间有良好的接触。

7. 电刷装置

电刷装置的作用是使固定的电刷和旋转的换向器保持滑动接触，以获得电刷间的直流电势和电流。电刷装置由电刷、刷握、刷杆及刷杆座等零件组成。图18-8为电刷与刷握装置。电刷放在刷握内，用弹簧压在换向器上。刷握用螺钉夹紧在刷杆上，刷杆装在刷杆座上。刷杆与刷杆座彼此绝缘。刷杆座装在机座上，移动刷杆座可以调整电刷的位置。

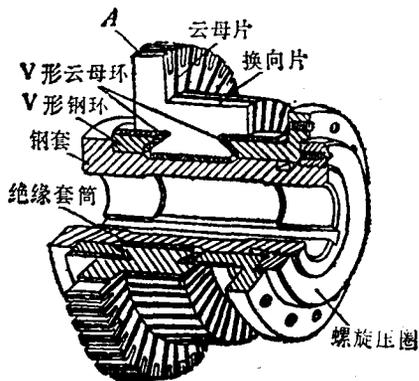


图18-7 换向器结构图

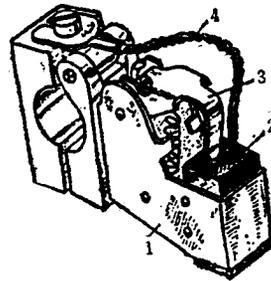


图18-8 电刷与刷握

1—刷握；2—电刷；3—压紧弹簧；4—软导线

第三节 铭 牌

直流电机铭牌上一般有以下几项内容：

1. 型号

如 Z_2-42 。 Z 表示直流电机， Z 的下角 2 是设计序号； 4 是机座号； 2 是铁芯长度号。

2. 额定值

直流电机的额定值包括额定功率、额定电压、额定电流及额定转速等。

对发电机来说，额定功率等于额定电压与额定电流的乘积，即 $P_N = U_N I_N$ 。是发电机出线端的输出功率。

对电动机来说，是指轴端输出的机械功率，它等于额定电压与额定电流和额定效率的乘积，即 $P_N = U_N I_N \eta_N$ 。

3. 励磁方式

表示主磁极绕组供电的方式和它与电枢绕组连接关系。关于励磁方式将在下一节讨论。

第四节 励 磁 方 式

直流电机主极磁场是由主极励磁绕组中励磁磁势建立的。根据励磁绕组获得励磁电流的方式不同，直流电机可以分为自励和他励两类。自励又包括并励、串励和复励。下面分别介绍这些励磁方式。图 18-9 是以直流发电机为例的励磁方式。

1. 他励电机

他励电机主极励磁线圈和电枢回路是各自分开的。励磁线圈由独立的直流电源供电，如图 18-9 (a) 所示。励磁功率大约为直流电机额定功率的 1%~3%。

2. 并励电机

并励电机主极励磁线圈回路与电枢回路并联，如图 18-9 (b) 所示。励磁线圈回路中的电流与电枢两端的电压有关。励磁功率为电机额定功率的 2%~10%。

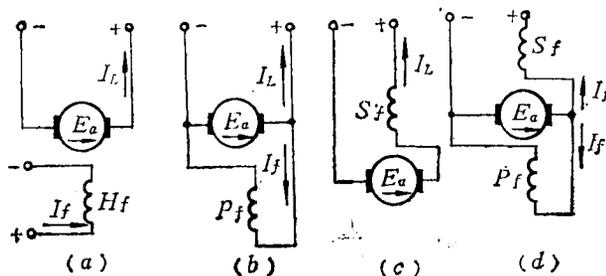


图 18-9 直流发电机励磁方式

(a) 它励；(b) 并励；(c) 串励；(d) 复励

H_f —它励励磁绕组； P_f —并励励磁绕组； S_f —串励励磁绕组

3. 串励电机

串励电机主极励磁线圈与电枢回路串联，如图 18-9 (c) 所示。励磁线圈回路中的电流与电枢回路的电流相等。

4. 复励电机

复励电机的主极上既有并励线圈又有串励线圈，如图 18-9 (d) 所示。两套线圈磁势方向一致者称为积复励电机；磁势方向相反时称为差复励电机。

一般直流发电机的主要励磁方式为他励、并励和复励。直流电动机的励磁电流都是由外电源供给，无所谓他励和自励之分。

第五节 小结

直流电机既可作发电机又可作电动机。它们在结构上无原则性的区别。

直流电机的换向器是区别交流旋转电机的一个特殊部件，也是直流电机结构中的重要部件。是它把直流发电机电枢线圈中的交变电势变为电刷间的直流电势；也是它把电刷引进的直流电流变为电枢线圈的交流电流，使电枢线圈受到方向不变的电磁转矩，从而成为电动机运行。

思考题与习题

18-1 判断下列情况下，电刷两端电势是交流的还是直流的：

- (1) 磁极固定，电刷与电枢同步旋转；
- (2) 电枢固定，电刷与磁极同步旋转；
- (3) 电刷固定，磁极和电枢以不同速度同时旋转。

18-2 为什么直流电机的电枢铁芯要由硅钢片迭成而定子磁轭可用整块钢板卷成？

18-3 一台直流发电机额定功率为 3.2kW ，额定电压为 230V ，试求额定电流。另有一台直流电动机，额定电压为 220V ，额定电流为 22.3A ，额定效率为 80% ，试求这台直流电动机的额定功率。

18-4 直流电机有哪些主要部件，各部件有什么作用，一般用什么材料制成？

第十九章 电枢绕组和电枢电势

在实际电机中，电枢线圈数和换向片数都很多，这是为了提高电枢电势的数值和减小它的脉动。电枢绕组是电枢上很多线圈连接起来的总称。它的作用是：当它在磁场中旋转时感应电势；当它有电流流通时，电流和磁场作用产生转矩。这两个作用不论在发电机运行时还是电动机运行时都存在，以完成机电能量的转换。所以电枢绕组是电机的主要部件。

在直流电机中，电枢绕组是按一定规律连接起来的闭合回路。按照电枢线圈连接规律不同，可将电枢绕组分为单迭绕组，单波绕组，复迭绕组、复波绕组和蛙绕组等五种类型。本章只介绍其中最基本的单迭绕组和单波绕组并分析电枢电势的计算方法。

第一节 直流电枢绕组的一般知识

直流电枢绕组是由结构形状相同的绕组元件构成。图9-1表绕组元示迭件和波绕组元件结构。其中元件的前端接头与换向片升高部分相焊接。由于每个换向片接有两个属于不同绕组元件的前端接头。所以换向片数 K 和绕组元件数 S 是相等的，即

$$K = S \quad (19-1)$$

为了便于嵌线，元件的两个边，一个边放在某一槽的上层，另一个边放在另一槽的下层。所以直流电机电枢绕组都是双层绕组。

在一些电机中，元件数等于槽数。这时，每槽上下层各放一个元件边。但不少电机常在一个槽内每层放二个、三个或 u 个元件边。我们称此种情形为一个实际槽内有两个、三个或 u 个虚槽，如图 19-2 所示。在计算和作图时是以虚槽来编写的。设 Z 为槽数， $Z_{\text{虚}}$ 为虚槽数，则有

$$Z_{\text{虚}} = uZ \quad (19-2)$$

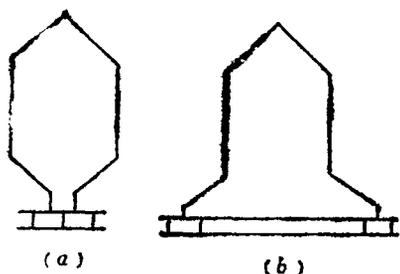


图 19-1 电枢元件

(a) 迭绕组元件；(b) 波绕组元件

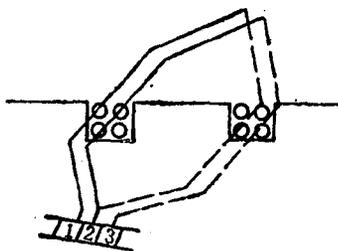


图 19-2 $u=2$ 的电枢绕组

显然

$$Z_{au} = S = K \quad (19-3)$$

要了解绕组连接规律，还须了解下面术语的含义。

一、第一节距 y_1

第一节距表示同一元件的两个有效边所跨的虚槽数。为使元件能获得最大的感应电势，第一节距等于或近似的等于一个极距。因此第一节距由下式确定

$$y_1 = \frac{Z_{au}}{2p} \mp \varepsilon = \text{整数} \quad (19-4)$$

式中 ε 用来凑成 y_1 与 $Z_{au}/2p$ 相接近的整数。取“—”号为短距，取“+”号为长距。长距绕组浪费端接部分的铜线，一般不用长距，如图19-3。 ε 为零时 y_1 即是整距。

二、第二节距 y_2

第二节距 y_2 表示第一元件的下层边到与它相串连的第二元件的上层元件边所跨的虚槽数，如图19-3。这里规定右行为负，左行为正。

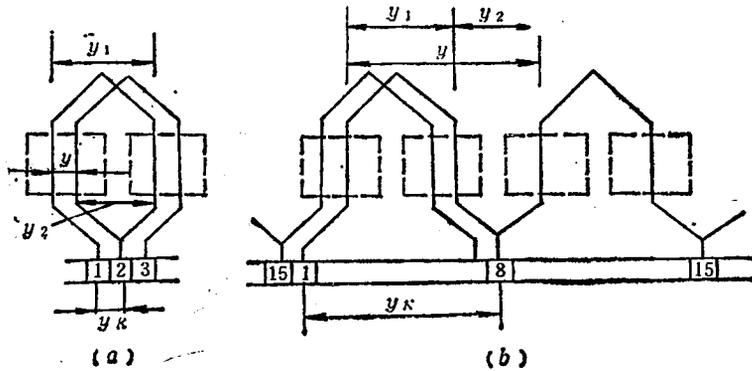


图 19-3 绕组节距
(a) 迭绕组 ; (b) 波绕组

三、合成节距 y

合成节距 y 是相串连的两元件的对应边所跨的虚槽数，如图19-3。合成节距为 y_1 和 y_2 的代数和，即

$$y = y_1 + y_2 \quad (19-5)$$

四、换向器节距 y_k

换向器节距是每一元件首尾端所连的两换向片之间的跨距，用换向片数来表示节距大小。从图19-3不难看出

$$y_k = y \quad (19-6)$$

第二节 单迭绕组

单迭绕组的主要特征是： $y_k = y = 1$ 。在绕制时，每绕一个元件，便在电枢表面向右移过一个虚槽（右行），如图19-3(a)所示。下面举例说明单迭绕组的连接方法，电刷放置法和并联支路数，从而说明其特点。

已知直流电机极数 $2p = 4$ ， $Z = 16$ ， $u = 1$ ，要求绕制单迭绕组。

一、确定节距

单迭绕组特征： $y_K = y = 1$

由计算可得： $y_1 = \frac{Zau}{2p} - \epsilon = \frac{16}{4} - 0 = 4$ （整矩）

$y_2 = y - y_1 = 1 - 4 = -3$ （右行）

二、画绕组展开图

展开图 19-4 是依照下面步骤完成的：

(1) 把电枢从某一齿中间沿轴向切开展开成平面。均匀地画出代表虚槽的 16 对双竖线，实线代表上层边，虚线代表下层边。给虚槽编号。

(2) 根据 $y = 4$ 画第一个元件，它的上层边应在 1 号槽中，下层边应在 5 号槽中。元件应对称，鼻部应在元件的中心线上，端接的换向片也应与元件中心线对称。与上层边相

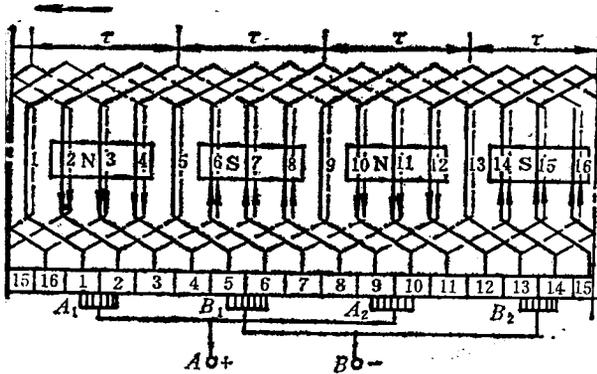


图 19-4 单迭绕组展开图

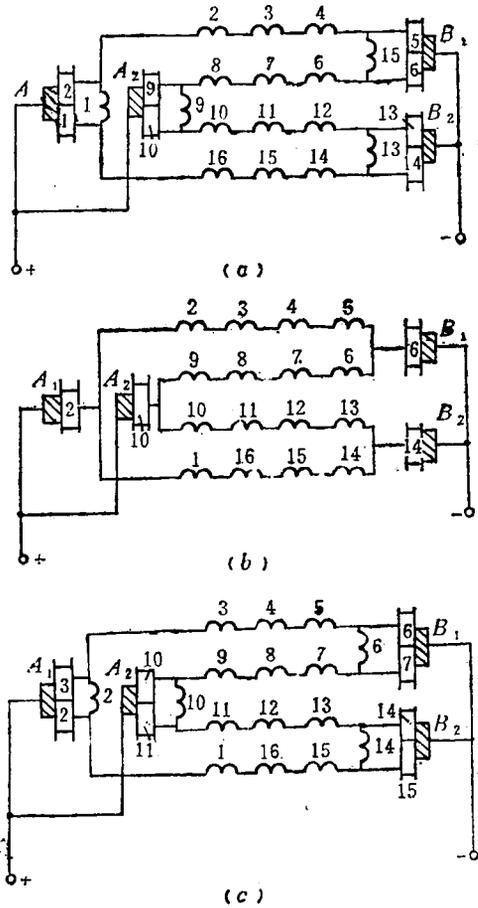


图 19-5 单迭绕组支路图组

连接的换向片记为 1 号，与下层边相接的换向片记为 2 号，向右的换向片应依次编为 3、4……16 号。这样做的目的是使槽号、元件号、换向片号一致。

(3) 第二个元件的上层边应在 2 号槽中，下层边应在 6 号槽中，其上层边端接应与 2 号换向片相连，下层边端接则与 3 号换向片相连。如此依次连接，各元件通过换向片将串联成一封闭绕组。

(4) 均匀置放磁极，按 N 、 S 、 N 、 S 标出磁极极性。代表磁极的矩形宽为 0.7τ (τ

是极距)。设想磁极在绕组之上,则 N 极磁力线进入纸面, S 极磁力线由纸面穿出。

(5) 电枢旋转方向标在展开图上方。注出槽中导体感应电势方向。磁极之间的分界线称为几何中性线。显然处于几何中性线的导体感应电势为零。

(6) 电刷的数目与主磁极极数相等,放在主磁极中心线所对应的换向片上。这样做的目的是:使电刷间获得最大的感应电势;使被电刷所短路的元件正好处于几何中性线上,避免换向时产生火花。电刷放置好后,自成闭路的电枢绕组组成了 4 条并联支路。根据支路中感应电势的方向,可以确定电刷极性。

三、单迭绕组支路图

图 19-5 为单迭绕组的支路图。分图 (a)、(b)、(c) 为电枢旋转时支路图的三个不同时刻。图组表明,尽管电枢在旋转,但总是一个磁极下的所有元件组成一个支路,所以支路对数应等于极对数。设电机的支路对数为 a , 磁极对数为 p , 则

$$2a = 2p$$

图组还表明了元件从一条支路经过电刷短路后进入另一条支路的过程,这个过程称为换向。换向时我们希望元件的上下层边正处于几何中性线上,如图 19-5 (b) 所示。这样被电刷所短路的元件感应电势为零,电刷下不会产生火花,支路电势又有最大值。这说明保证电刷的正确位置是十分必要的。

图组也表明,支路中元件在电机运转中不断更换,但各支路占有固定的磁场位置。从支路图还可看出,支路电势就是电枢电势,而电枢电流是各支路电流的总和。

第三节 单波绕组

为了获得最大的支路电势,单波绕组紧相串连的两个元件须处于相同极性磁极的相似位置,即要求其第一节距接近于极距,而合成节距约为二倍极距。其次,当顺着串连元件绕电枢一周后,能回到起始元件相邻的元件上(左行),便于第二周继续连接下去。因此,单波绕组的特点是

$$y_K = y = \frac{K-1}{p} = \text{整数} \quad (19-7)$$

下面举例说明单波绕组的连接方法,电刷放置及并联支路数,从而说明其特点。

已知直流电机极数 $2p = 4$, $Z = 15$, $u = 1$, 要求绕制单波绕组。

一、确定节距

$$y_K = y = \frac{K-1}{p} = \frac{15-1}{2} = 7$$

$$y_1 = \frac{Z \cdot u}{2p} - \varepsilon = \frac{15}{4} - \frac{3}{4} = 3 \quad (\text{短矩})$$

$$y_2 = y - y_1 = 7 - 3 = 4 \quad (\text{左行})$$

二、画绕组展开图

(1) 把电机展开为平面,画出虚槽并编号。

(2) 根据 $y_1 = 3$ 画第一个元件，它的上层边在一号槽中，下层边在 4 号槽中。鼻部在元件中心线上，端接的换向片距中心线 $1/2 y_K$ 与上层边相接的换向片记为 1 号，由此向右的换向片依次记为 2, 3……15 号。显然 1 号元件的下层边的端头应与 8 号换向片相接，如图 19-6 所示。

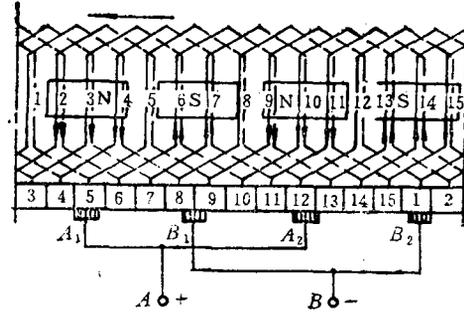


图 19-6 单波绕组展开图

(3) 第二个元件及以后的元件按图 19-7 依次串连。



图 19-7 单波绕组元件连接顺序

(4) 均匀置放磁极，注出极性。

(5) 注出电枢旋转方向及导体感应电势方向。

(6) 电刷数等于主磁极数，置于主磁极中心线所对应的换向片上。电刷位置放好后，自成闭路的电枢绕组组成 2 条并联支路。根据支路中感应电势方向，可确定电刷的极性。

三、单波绕组支路图

图 19-8 为单波绕组支路图，它只有两条支路，与极对数无关。即

$$2a = 2$$

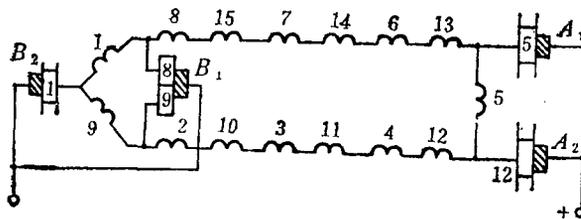


图 19-8 单波绕组支路图

两条支路各由同性磁极下的所有元件串联而成。被电刷所短路的元件也处于几何中性线附近。

单波绕组并联支路数少。在相同元件数的情况下，单波绕组比单迭绕组有较高的感应电势和较小的电枢电流。

第四节 电枢电势的计算公式

直流电机气隙下的磁通密度分布如图19-9所示。磁通密度在每处的数值不完全相同，导

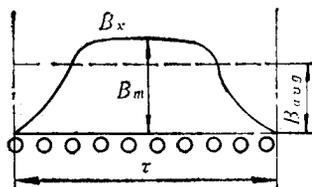


图 19-9 气隙中主磁场磁通密度分布

体切割磁通在每处感应的电势也不尽相等。这样给计算带来了不便。但是，我们所要求的电枢电势实际上是支路电势，不是每根导体的电势。由于一个极距范围内的导体电势是串联相加的，若能求得每根导体的平均电势，则不难求出电枢电势。我们通过下面的简化，可以得到电枢电势的计算公式。

把磁通密度分布曲线 B_x 化为底边为 τ 高为 B_{av_s} 的矩形，并使它们面积相等。这样 B_{av_s} 为平均磁通密度。于是导体的平均电势为

$$e_{av_s} = B_{av_s} LV \quad (19-8)$$

设电枢总导体数为 N ，支路数为 $2a$ ，则支路导体数为 $N/2a$ ，支路电势为

$$E_a = e_{av_s} \frac{N}{2a} = B_{av_s} LV \frac{N}{2a} \quad (19-9)$$

式中 L ——导体有效长度，m；

V ——导体对磁场的相对速度，m/s。

设电枢转速为 n (r/min)，电枢直径为 D (m)，则导体运动速度可由下式求得

$$V = \frac{\pi D n}{60} = \frac{2 p \tau n}{60} = 2 \tau \frac{p n}{60} \quad (19-10)$$

式中 $2p$ ——电机磁极个数；

τ ——极距。

又因 $B_{av_s} L \tau = \Phi$ ，为每极磁通量，单位为 Wb，则电枢绕组的支路电势为

$$E_a = B_{av_s} L \cdot 2 \tau \frac{p n}{60} \times \frac{N}{2a} = \frac{N p}{60 a} n \Phi = C_e n \Phi \quad (19-12)$$

式中 $C_e = \frac{p N}{60 a}$ ——直流电机的电势常数；

n ——电枢转速，r/min；

Φ ——主极每极磁通，Wb；

E_a ——支路电势（电枢绕组电势），V。

由式(19-12)可见，电势的大小与每极磁通量的大小及转速有关。这里指的每极磁通量是指总磁通量的大小，它与磁通分布情况无关。如果电刷不放在与几何中性线区域的元件相联的地方，电势就有部分相抵消。

第五节 小结

直流机电枢绕组最基本的形式为单迭绕组和单波绕组。单迭绕组的特点是： $y_K = 1$ ， $2a = 2p$ ，一个极下的所有元件串联为一个支路。单波绕组的特点是： $y_K = (K-1)/p$ ， $2a = 2$ ，同性磁极下的所有元件串联为一个支路。

直流电机绕组是一个闭式绕组。电刷放置后即组成若干并联支路，并可从正、负电刷间获得电枢电势。为了使电刷间电势最大，为了良好地换向，电刷应放在主磁极中心线所对应的换向片上。

直流机电枢电势的大小由下式确定：

$$E_a = C_a n \Phi$$

思考题与习题

19-1 给出一台直流电机转子，如何判断电枢绕组是迭绕组还是波绕组？又如何知道其极数？

19-2 根据图19-8所示的单波绕组支路图分析能否取去一组电刷，如取去 A_1 和 B_1 。这样做对电机有无影响？

19-3 电刷的位置应如何放置？如果放置有偏差将产生什么后果？

第二十章 电 枢 反 应

直流电机空载时，其气隙磁场仅由主磁极上的励磁磁势所建立。当电机带上负载后，电枢绕组内流过电流，在电机磁路中，又出现一个磁势，这个磁势称为电枢磁势。由于电枢磁势的出现，气隙中原有的磁场将发生变化。我们把电枢磁场对主磁场的影响称为电枢反应。

电枢反应与直流电机运行特性关系很大，对电动机来说它影响转矩及转速；对发电机来说它影响电枢电势。本章先讨论主磁场和电枢磁场，再讨论电枢磁场如何影响电机中的气隙磁场。

第一节 主磁场与电枢磁场

这里以二极直流发电机为讨论对象。为简明起见，画图时省去换向器而把电刷放在几何中性线上，直接与被短路的元件相接触，并把这种情形称为“电刷放在几何中性线上”。

一、主磁场

主磁场的分布如图 20-1 所示。从图可见，气隙中的主磁场磁通密度分布曲线为一平顶波，几何中性线处磁密度为零。曲线对称于主磁极中心线。

二、电枢磁势及电枢磁场

电机带上负载后，电枢绕组内将有电流。不论是迭绕组还是波绕组，电刷两边电流的分布一定是方向相反而且是对称的。也就是说，电刷位置一经确定，电刷轴线便是电枢表面电流分布的分界线，如图 20-2 所示。尽管电枢转动使各支路的元件不断轮换，但因换向作用，每一磁极下元件边中的电流方向不变，因而电枢磁势和磁场在空间是固定的。

由图 20-2 (a) 所知，磁力线所包围的全电流以几何中性线处为最多，磁极中心线处为最少。所以在图 20-2 (b) 中所示的磁势分布波形为对称于电刷轴线的三角波形，刷间中线处的磁势为零。由于此时电枢磁势轴线与主磁场轴线正交，如图 20-2 (a)，因此还把这种电枢磁势称为交轴电枢磁势。

由图 20-2 (a) 还可看出，各磁力线两次穿过气隙而闭合，极弧下气隙相等，磁阻在极弧区段处处相等，因此极弧下气隙各处的电枢磁场与其磁势成正比。唯几何中性线附近的磁力线所穿越的气隙最长，作用在该区段的电枢磁势虽然最大，但因该区段的磁阻很大，电枢磁场反而较小。使电枢磁场分布波形在极间处下陷并呈马鞍形。

图 20-3 为电刷顺电枢旋转方向偏离几何中性线 β 角的情形。请注意，电刷轴线为电枢表面电流的分界线，极间区段电枢磁场波形下陷，电枢磁势三角波顶点与电刷轴线重合，零点在两刷间的中线上。

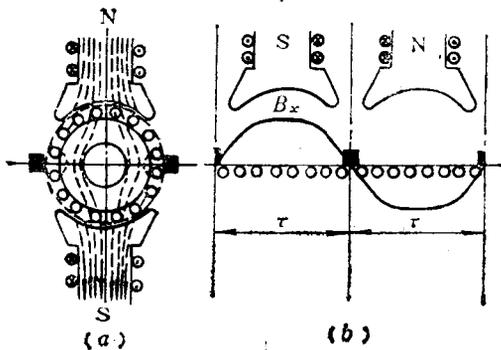


图 20-1 主磁场
(a) 剖面示意图; (b) 展开图

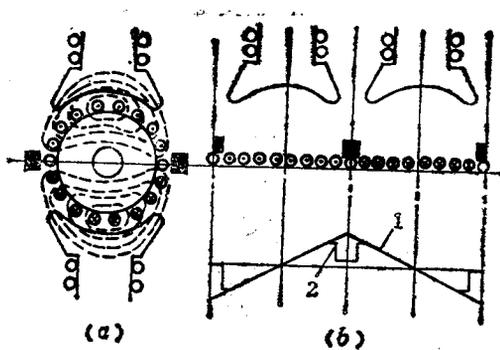


图 20-2 电枢磁势及其磁场
(a) 剖面示意图, (b) 展开图
1—电枢磁势分布曲线; 2—电枢磁场分布曲线

为了帮助我们理解电刷不在几何中性线时的电枢磁势, 在图 20-3 (a) 中, 可逆着电枢旋转方向再作一条偏离几何中性线 β 角的辅助线, 这样电枢表面的电流就被分成四部分了。电枢磁势可以看成是两部分磁势的合成, 即由电枢 $\pm\beta$ 角部分的电流形成的与主磁极中心线重合的直轴电枢反应磁势 F_{ad} 和电枢上下部分电流形成的与主极中心线垂直的交轴电枢磁势 F_{aq} 。

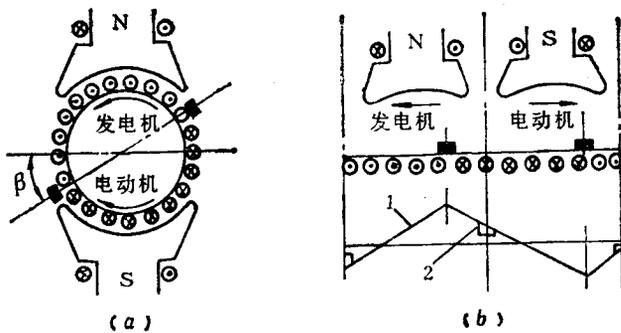


图 20-3 电刷偏离几何中性线的电枢磁势与磁场
(a) 剖面示意图; (b) 展开图
1—电枢磁势波; 2—电枢磁场波

第二节 电 枢 反 应

主磁极的励磁磁势和电枢磁势分别单独作用于磁路所建立的气隙磁场的分布情形上节已经讨论过了。现在让电机带负载后, 我们对上面两种磁场同时作用于气隙的情形加以分析, 以了解电枢磁势对气隙主磁场的影响。

图 20-4 为交轴电枢反应分析图。曲线 3 是电刷在几何中性线上，不考虑磁路饱和，而把主磁场磁通密度曲线 1 与电枢磁场磁通密度曲线 2 迭加起来所得的结果。比较曲线 3 与

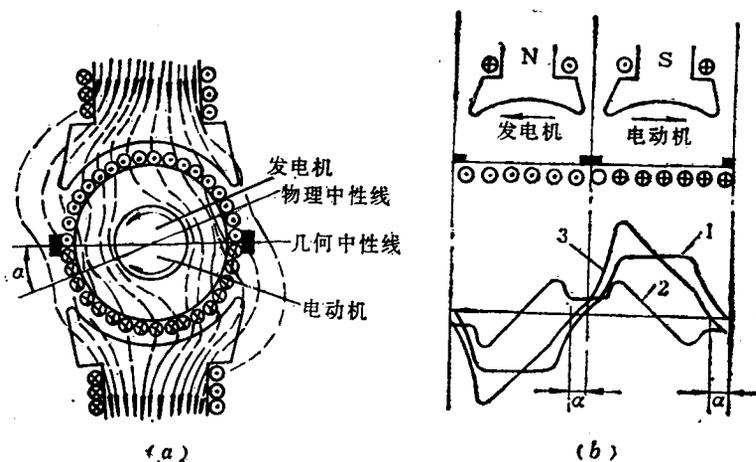


图 20-4 交轴电枢反应

(a) 剖面图；(b) 气隙磁场分布图

1—主磁场磁通密度曲线，2—电枢磁场磁通密度曲线；

3—气隙合成磁通密度曲线

曲线 1，可以明确了解到负载时直流电机交轴电枢反应的性质如下：

一、使气隙磁场发生畸变

电枢磁场使主磁场在一半主极范围内削弱，另一半加强。如果把通过磁通密度为零的垂直电枢表面的直线称为物理中性线。载负时物理中性线与几何中性线不再重合。在电动机中，物理中性线逆电机旋转方向移过一个 α 角。在发电机中则相反。

负载时，气隙磁场的畸变是机电能量转换的必然现象。此时，转子受到电磁转矩的作用。对电动机来说，这个电磁转矩是驱动转矩，实现将电能转换为机械能的交换。对发电机来说，这个电磁力矩为制动转矩，它要求原动机不断地输入机械能，平衡这一制动力矩，保证发电机输出电能。

二、呈去磁作用

在磁路不饱和情况下，主极磁场被削弱的数量和被加强的数量恰好相等，气隙中磁通量不变。但实际电机中，磁路总是饱和的，此时实际气隙磁场分布如图 20-4(b) 中虚线所示。因为在主磁极两半部分磁场的变化不一样，加磁的一半会使磁路更加饱和，铁心磁阻增大，使实际气隙磁场比不计饱和时略低；而去磁的一半实际气隙磁场与不计饱和时基本一致。所以，负载时，若计及饱和，则每极下的磁通量将比空载时略有减少。这种作用称为交轴磁势由于磁路饱和所引起的去磁作用。

若电刷不在几何中性线上，电枢磁势中除交轴电枢磁势产生交轴电枢反应外，直轴磁势还要产生直轴电枢反应。它可能是去磁的，也可能是加磁的，这取决于电刷的位置和电机的运行方式。

从图 20-5 不难看出，若为电动机运行，电刷逆着旋转方向移动 β 角，直轴电枢反应将呈去磁作用；电刷若顺着旋转方向移动 β 角，则直轴电枢反应将呈加磁作用。若为发电机运行，直轴电枢反应情形与电动机的情况恰好相反。

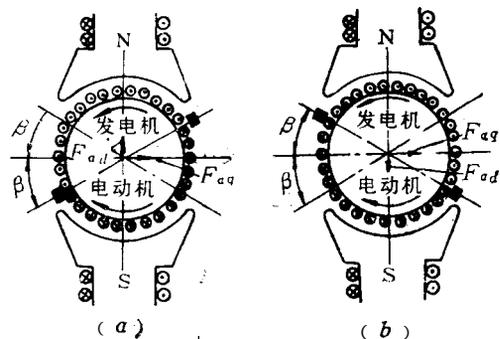


图 20-5 电刷偏离几何中性线时的电枢反应
 (a) 电刷逆着电枢旋转方向移 β 角；(b) 电刷顺着电枢旋转方向移 β 角

第三节 小 结

电枢磁势对主磁场的影响称为电枢反应。电枢反应的性质与电刷的位置和电机运行方式有关。其中交轴电枢反应必不可少，它保证了电机能量的转换。

思考题与习题

- 20-1 直流发电机负载时电枢电势与空载时是否相同？为什么？
- 20-2 绘出直流电动机电刷逆着旋转方向移动 β 角时的电动机负载时的电枢反应波形图。

第二十一章 换 向

第十九章讨论迭绕组支路图时已经提到换向。换向问题是直流电机的一个专门问题。换向不良将在电刷下发生有害火花。当火花超过一定程度，就有烧坏电刷和换向器的危险，使电机不能正常运行。换向过程是十分复杂的，它涉及到电磁、机械及电化学等方面的因素。本章仅就换向的电磁现象及改善换向的方法作简单介绍。

第一节 换向的基本概念

在电枢绕组中任取一个元件 K ，它的有效边分别为 ab 和 cd 。现在分析元件 K 经过电刷时的电磁现象。

(1) 换向开始 如图 21-1(a) 所示。元件 K 属右边支路，电流由 $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ 反时针方向经换向片 1 由电刷导出。

(2) 正在换向 如图 21-1(b) 所示。元件 K 的上下层有效边 ab 及 cd 处在几何中性线上，元件 K 中的电流为零。

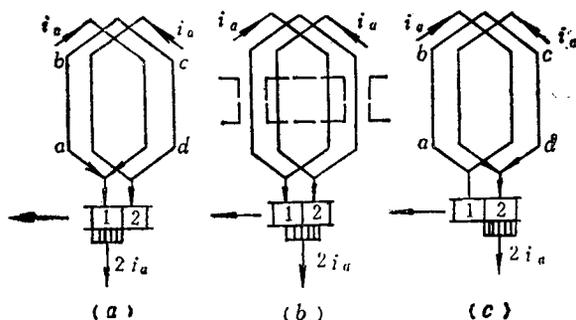


图 21-1 换向过程示意图

(a) 换向开始；(b) 正在换向；(c) 换向完毕

(3) 换向完毕 如图 21-1(c) 所示。元件 K 属左边支路，电流由 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ 顺时针方向经换向片 2 由电刷导出。

图 21-1 表明，元件 K 在电刷表面滑过时，电流由 $+i_a$ 变为零，再由零变为 $-i_a$ 。元件从一个支路进入另一个支路。我们称这个过程为换向过程。换向过程是一个历时很短暂的过程，所需时间 T_K 大约为 $0.5\% \sim 2\% s$ 。

理想情况下，换向元件经过几何中性线，不切割任何磁场。在元件被电刷所短路的过程中，电刷上的电流密度保持不变。换向元件中的电流 i_K 随换向片与电刷的接触面积和位置的变化平稳地减小且在 $T_K/2$ 时为零并开始平稳地反向增长，如图 21-2 所示。这种换向状态称为良好换向或直线换向。直线换向时，换向元件电流的变化规律保证了流经电刷

的电流密度不变，因此电刷下不产生火花。

实际上，由于漏磁场、电枢反应磁场及换向极磁场等的存在，会在换向元件中产生附加电势并形成附加电流，使换向变得不利。下面分析换向过程中，换向元件中可能出现哪

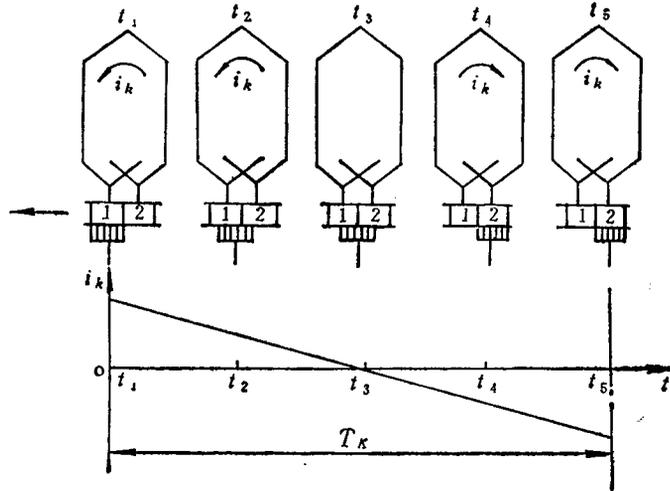


图 21-2 直线换向

几种电势。

一、漏磁场和电抗电势 e_r

换向元件中电流的变化，必然引起环链换向元件的漏磁通的变化并产生一个阻碍磁通变化的电抗电势 e_r 。按焦耳楞次定律，电抗电势与换向前电流方向一致，它趋向于保持换向元件中原电流不变。因此电抗电势起阻碍换向的作用。

二、交轴电枢磁场和交轴电枢电势 e_a

交轴电枢磁场在空间静止不动，其幅值的位置与电刷轴线重合。换向元件虽不切割主磁场，但要切割电枢反应磁场并产生电枢反应电势 e_a 。根据右手定则， e_a 的方向与换向前元件中电流方向一致，也是阻碍换向的。

可见在换向过程中，虽然元件的有效边位于几何中性线处。但元件中仍存在上面所说的两种电势 e_r 及 e_a 。它们在元件中产生附加电流 $i_{a,r}$ ，并通过电刷形成回路。如图 21-3 所示。当换向片 1 离开电刷的瞬间，将强迫附加电流断开。这实际上是换向元件和电刷所构成的电感性回路突然断开，磁场能量 $(\frac{1}{2} L i_{a,r}^2)$ 将以火花形式释放出来。故电抗电势和交轴电枢电势的存在使电刷的后刷边（换向片离开电刷的那一边）出现火花。这种换向称为延迟换向。

三、换向极磁场与切割电势 e_{α}

为改善换向而设置的换向极被置于几何中性线上，且使换向极绕组与电枢绕组串联。换向元件切割换向极磁场将产生切割电势 e_{α} 。

若换向极磁场产生的切割电势 e_{α} 的方向与 $(e_r + e_a)$ 的方向相反并恰好抵销，将使

换向改善或达到直线换向。但当 e_{ca} 过份地大，致使换向一开始，由 e_{ca} 产生的附加电流大量地拥向前刷边（换向片进入电刷的那一边）造成前刷边电流密度过大，使前刷边发生火花。这种现象称为加速换向，如图 21-4 所示。

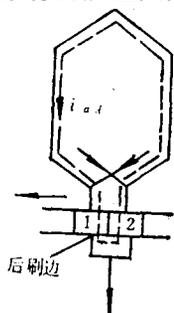


图 21-3 延迟换向后刷边出现火花

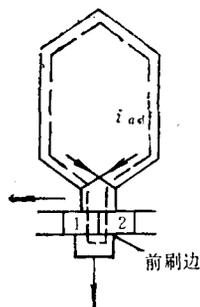


图 21-4 加速换向时前刷边出现火花

第二节 改善换向的方法

换向不良，会在电刷下出现火花。如果火花范围较大且火花程度剧烈，将会灼伤换向器和电刷，甚至会使直流电机无法正常运行。下面介绍改善换向以消除换向火花的方法。

一、装设换向磁极

这里重申，换向磁极装在电机几何中性线上，极身上的励磁线圈与电枢绕组串联。我们的目的是设计合理的换向极线圈的匝数，通过调节换向磁极的第二气隙（换向磁极极身与机座间的间隙称为第二气隙），使换向元件在切割换向极磁场时获得的电势 e_{ca} 能抵消 e_r 及 e_a 。这就要求换向磁极有正确的极性和恰当的磁势。在电动机中，换向极的极性与换向元件即将进入的主磁极极性相反；在发电机中，换向极极性应与换向元件即将进入的主磁极极性相同，如图 21-5 所示。

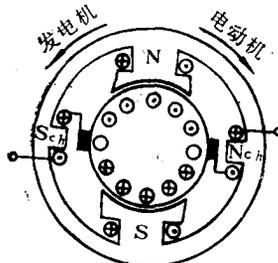


图 21-5 换向磁极极性的确定

换向极线圈串联在电枢回路中，是为了使换向磁极磁势正比于电枢电流。因为当负载发生变化时，电抗电势和电枢反应电势都正比于电枢电流，这样就能在不同负载下都满足换向元件中电势之和 ($e_r + e_a + e_{ca}$) 接近于零，达到不同负载下都能获得满意的换向。

近代直流电机广泛采用装置换向磁极的方法来改善换向。换向磁极的极数一般与主磁极数相等。只在容量比较小的两极电机中，换向磁极只有一个，装在机座的其中一条几何中性线上。

二、合理选择电刷牌号

电刷与换向片间的接触电阻，是换向回路的主要电阻。不同牌号的电刷具有不同的接触电阻。从改善换向的角度出发，希望电刷的接触电阻大一些，以限制换向元件中被电刷所短路的附加电流。但是，提高接触电阻又会使电刷的接触电压降增大，从而使接触处的

损耗加大，使发热加剧。因此在选用电刷时，应根据具体的电机出发来考虑采用哪一种牌号的电刷比较合适。

一般中小型电机，大多采用接触电阻值中等的石墨电刷；对于换向问题突出的牵引电机、电车电机等，必须采用接触电阻大的硬质电化石墨电刷；对于低电压大电流的电机，则须采用接触电阻较小的含铜石墨电刷。

此外，定期检查换向器椭圆度、片间云母下刻深度、电刷弹簧压力、换向器表面氧化亚铜薄膜状态，并及时地就以上机械原因和化学原因造成的不良状态给予处理，这对改善换向条件及消除刷下火花有积极作用。

第三节 环火及补偿绕组

电机在负载运行时，由于电枢反应的影响，气隙磁通密度分布曲线发生畸变，如图 21-6 所示。负载越大，磁通密度曲线畸变得越厉害。处于最大磁通密度处的元件的换向片间电压 Δu_k 将达到很高的数值。过高的片间电压会使片间的空气击穿而产生不利于换向的另一种火花——电位差火花。

当电机受到冲击负载时，电枢电流急剧上升。由于换向极铁心的涡流作用，使换向极磁场不能马上增大。因此 e_{c_h} 不能及时补偿 e_a 而造成延迟换向，后刷边产生强烈火花。由于换向器的转动和电弧的电动力作用，电弧将沿换向器旋转方向前移，如图 21-7 所示。当电弧延伸到片间电压较大的地方时，换向火花和电位差火花汇合在一起，以换向器表面残积的炭粉为桥梁，变为跨越正、负电刷间的电弧，出现环火。电机产生环火后，电枢绕组被电弧短路，将产生强大的电流，使电机在短时被烧坏。

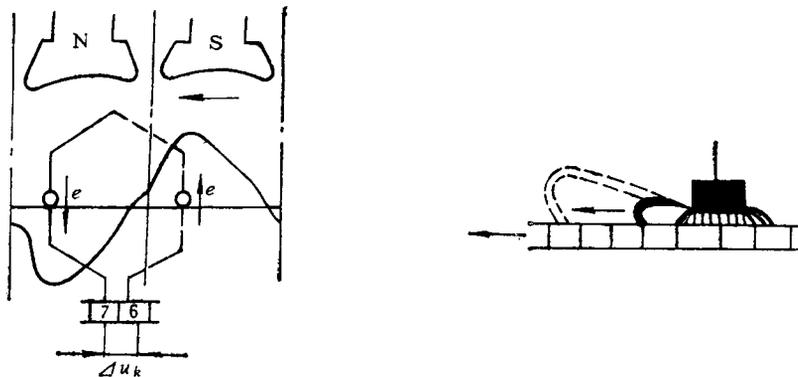


图 21-6 相邻换向片间的电压 图 21-7 换向器上的电弧

防止因电枢反应造成的电位差火花及环火的有效方法是装设补偿绕组。补偿绕组用扁铜条焊连而成，嵌放在主磁极极靴的槽中。补偿绕组与电枢绕组串联，其磁势作用在两主极之间。为了补偿电枢磁势，补偿绕组磁势应与电枢磁势大小相等，方向相反，如图 21-8 所示。

由图可见，补偿绕组磁势呈平顶形。电枢磁势被补偿绕组磁势抵消后剩余的三角形磁势（图中阴影部份）已属几何中性线区域，此处磁阻很大，气隙内磁通密度很小，不会产

生很大的片间电压，不会产生环火。

装设补偿绕组将增加用铜量，且使电机结构复杂化。故只在负载经常变化的大、中型直流电机中才采用。显而易见，由于装设了补偿绕组，换向磁极所需磁势可大大减小。

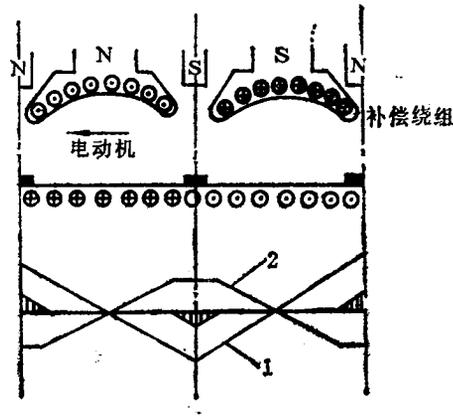


图 21-8 电动机补偿绕组作用原理
曲线1—电枢磁势；曲线2—补偿绕组磁势

第四节 小结

直流电机的电枢元件经过电刷从一个支路进入另一个支路、元件中或电流从一个方向变换为相反方向的过程称为换向。

处于几何中性线上的换向元件，由于元件的漏磁场和电枢电流产生的电枢磁场的影响使换向变得不利。改善换向的主要方法是装设换向磁极，使 $(e_r + e_a + e_{e_h})$ 之和趋向于零。换向磁极的极性可以用以下简单方法确定：即使换向极磁势的方向与横轴电枢反应磁势方向相反。

为防止环火，可装设补偿绕组。

思考题与习题

21-1 换向元件中有哪些电势，它们是怎样产生的，对换向起什么作用？

21-2 换向磁极极性如何确定，极性反了会产生什么影响？

21-3 某台直流电机，运行时后刷端发生火花，如在换向极根部（第二气隙）加装钢垫片，运行便无火花？为什么

第二十二章 直流发电机

前几章讨论了直流发电机和直流电动机的共同问题。本章主要讨论直流发电机的电磁关系和运行特性。

第一节 并励发电机的自励建压过程

并励发电机是一种自励发电机，由于它不需要外电源供给励磁，所以应用较广。并励发电机自励的可能性，有赖于磁化曲线的下列特性：即剩磁的存在和饱和现象。下面分析并励发电机自励建压的过程。

当电枢由原动机拖动旋转时，励磁线圈中的电流是靠电枢绕组切割主磁极剩磁产生的剩磁电势 E_{r0} （它约为额定电压的 2%~5%）加于励磁回路而产生的。因此剩磁是自励建压的先决条件。

由剩磁电势在励磁绕组中产生的励磁磁势的方向如果与磁极的剩磁方向一致，气隙磁通可望增强，电枢电势和励磁电流都将增长，发电机端电压将增长、建立。反之，如果励磁绕组与电枢绕组的连接不当，发生励磁磁势与剩磁方向相反，剩磁被抵消，发电机电压将不能建立。可见，使励磁磁势方向与剩磁方向一致是自励建压的第二个必备条件。这就要求励磁绕组、电枢绕组的端头极性和电枢旋转方向正确配合。

当励磁磁势与剩磁方向一致时，励磁电流的增长促进发电机端电压升高，而电压的升高又促进励磁电流增长。这个相互促进的过程是否会使发电机端电压无限升高呢？下面就这个问题进行分析。

图22-1 绘出了发电机空载特性 $U_0 = f(I_f)$ 及励磁回路的伏安特性 $U_0 = I_f R_f$ 。励磁回路的伏安特性是一条通过原点的直线，其斜率由电阻的大小决定，即

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{I_f R_f}{I_f} = R_f \quad (22-1)$$

常称这条伏安特性曲线为场阻线。

自励电压最后稳定的数值决定于空载特性和励磁回路的场阻线的交点，如图 22-1 中所示的 P 点。 P 点的纵坐标值是稳定的空载电压值， P 点的横坐标值是稳定的励磁电流值。稳定运行点 P 实现了空载电势与励磁回路电压降之间的平衡。在 P 点之前这一平衡是不可能实现的，即任何时候都有 $E_{r0} > I_f R_f$ 。

如图 22-2 所示，改变励磁回路总电阻值 R_f （它等于励磁绕组电阻与磁场变阻器电阻的和），将改变 P 点的位置。因而可以调节空载电压数值。当 R_f 不断变大，场阻线的 α 值不断加大。如果场阻线（曲线 3）与空载特性不饱和区段相切时，不可能建立稳定的空载电压。我们把这时的场阻线称为临界场阻线，对应的励磁回路的电阻值称为临界电阻值。当励磁回路电阻值大于临界电阻，场阻线与空载特性交点很低，如图 22-2 曲线 4 所示，空

载电压等于剩磁电压，发电机不能自励。

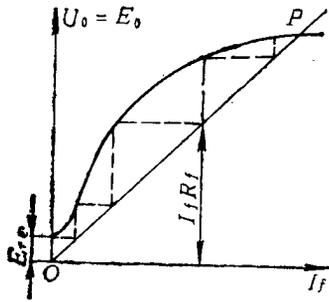


图 22-1 并励发电机自励建压过程

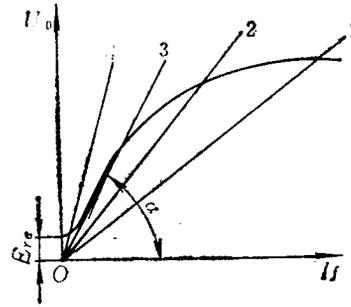


图 22-2 空载电压与场阻线的关系

综上述，并励发电机自励建压的条件有三条：

- (1) 电机磁路要有剩磁且具有饱和特性；
- (2) 励磁磁势与剩磁方向一致；
- (3) 励磁回路的电阻值小于临界电阻值。

发电机如果不能自励并建立稳定电压。首先应考虑是否是磁场变阻器阻值太大，应相应调小。其次在考虑对调励磁绕组接线端头时，不妨先检查一下是否有剩磁。如果没有剩磁应利用直流电源对励磁绕组充磁一次。

从上面分析还可以看出，在一般情况下，并励发电机要得到较低的稳定电压是困难的。在这一点上并励发电机不如他励发电机。

第二节 直流电机的基本方程

直流电机的基本方程式主要是指直流电机的电势方程式、机械系统中的转矩方程式。两组方程式综合地反应了电机内部电磁过程，还表达了电机外部的运行特性。下面以并励发电机为例讨论基本方程式。

一、电势方程式

图22-3为并励直流发电机原理图。按图所给定的各量实际方向，忽略电刷接触压降，可列出电枢回路的电势方程式为

$$E_a = U + I_a R_a \quad (22-2)$$

$$I_a = I_f + I_x \quad (22-3)$$

二、转矩方程式

由图22-3(a)可知，作为发电机，当电流流过电枢绕组时，便产生电磁转矩 M_M ，方向由左手定则确定。这时发电机的电磁转矩是制动性质的，它与空载转矩 M_0 之和与原动机驱动转矩 M_1 平衡。因此发电机的转矩平衡方程式为

$$M_1 = M_0 + M_M \quad (22-4)$$

三、功率方程式

功率方程式是根据电势平衡方程式与转矩平衡方程式导出的。把转矩方程式 (22-4)

乘以电枢的机械角速度 Ω ，可得

$$M_1\Omega = M_0\Omega + M_M\Omega \quad (22-5)$$

式中， $M_1\Omega = P_1$ 为原动机输入功率； $M_0\Omega = P_0$ 为克服空载转矩所需要的空载功率，它等于铁耗 p_{Fe} ，机械损耗 p_o 及附加损耗 p_{ad} 之和，即 $P_0 = p_o + p_{Fe} + p_{ad}$ ； $M_M\Omega = P_M$ 为原动机克服制动电磁转矩所需输入的机械功率，这个功率在数值上就等于电磁功率 P_M 。于是(22-5)可改写为

$$P_M = P_1 - (p_{Fe} + p_o + p_{ad}) \quad (22-6)$$

图22-4是并励发电功率分配图。在电磁功率中，减去电枢回路的铜损耗 p_{Cu_a} 和励磁回路的铜损耗 p_{Cu_f} ，才是并励发电机输出的功率 P_2 。

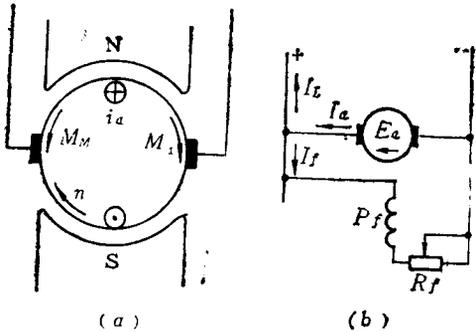


图 22-3 并励发电机原理图

(a) 力矩示意图；(b) 接线原理图

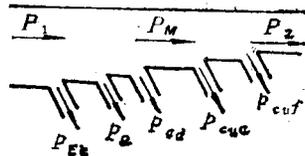


图 22-4 并励发电机功率分配图

考虑到 $P_M = E_a I_a$ ， $E_a = (Np/60a) n\Phi$ ， $\Omega = (n/60) 2\pi$ ，可导出电磁转矩的公式如下

$$M_M = \frac{P_M}{\Omega} = \frac{\frac{Np}{60a} n\Phi I_a}{2\pi \frac{n}{60}} = \frac{pN}{2\pi a} I_a \Phi = C_M I_a \Phi \quad (22-7)$$

式中， C_M 为力矩常数， $C_M = \frac{pN}{2\pi a}$ ， I_a 的单位用A； Φ 的单位用Wb；则 M_M 的单位为 $N \cdot m$ 。

从式(22-7)可看出，电磁转矩与每极磁通和电枢电流的乘积成正比。

第三节 直流发电机的运行特性

发电机运行时涉及的主要物理量有：端电压 U ，励磁电流 I_f ，负载电流 I ，转速 n 。在运行中，发电机的转速 n 常保持不变，我们把端电压、励磁电流、负载电流互相影响的变化关系称为发电机的运行特性。发电机的运行特性主要有三种，即空载特性、外特性、调整特性。这些特性又因发电机的励磁方式不同而各有差异。下面分别叙述之。

一、它励发电机

1. 空载特性

空载特性是在 $n = n_N = \text{常数}$ ， $I = 0$ 时端电压 U 随励磁电流 I_f 变化的关系曲线，即

$U_0 = f(I_f)$ 。按图 22-5 所示的接线作空载试验时, 应将刀闸 K 打开, 保持电机转速为额

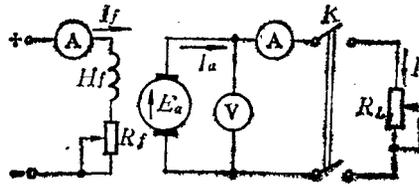


图 22-5 它励发电机试验线路图

定值不变, 调节 R_f , 使 I_f 从零逐渐增大, 直到与之相应增长的 U_0 (即空载电势 E_0) 约为 $1.3U_N$ 为止。记下相应的 I_f 和 U_0 值, 即可得到空载特性的上升分支。然后将 I_f 逐渐减小至零, 记下相应的 I_f 和 U_0 值, 又可得到一条下降分支的曲线, 如图 22-6 所示。一般取两分支的平均值作为空载特性曲线, 如图 22-6 中虚线所示。由于电机有剩磁, 当 I_f 已回到零值时, 发电机还有剩磁电压, 其值约为额定值的 $2\% \sim 5\%$ 。

空载特性曲线是电机基本特性曲线。这条曲线还反映了电机磁路的饱和程度。

2. 外特性

他励发电机的外特性是指发电机接上负载后, 在保证励磁电流不变 (通常等于额定励磁电流) 的情况下, 负载电流变化时, 端电压 U 变化的规律, 即 $n = n_N = \text{常数}$, $I_f = I_{fN} = \text{常数}$ 时, $U = f(I)$ 。

按图 22-5 所示的接线图作外特性时, 应将负载开关 K 合上。调节发电机负载电流和励磁电流, 使发电机达到额定运行状态。所谓额定运行状态是指发电机端电压为额定电压, 发电机负载电流为额定电流, 此时发电机的励磁电流称为额定励磁电流, 用 I_{fN} 表示。在求取外特性时, 保持 I_{fN} 不变, 逐渐增大负载电阻, 使负载电流减小, 直到负载断开, $I = 0$ 。在每一负载下, 同时测取端电压 U 和负载电流 I , 即可得到发电机的外特性, 如图 22-7 所示。从特性曲线可知, 发电机端电压随负载的增大稍有下降。从电势平衡方程 $U = E_0 - I_a R_a$ 和电势公式 $E_0 = C_e n \phi$ 可知, 引起端电压下降的因素主要有两点: 电枢电阻压降及电枢反应的去磁作用。这两个因素, 大体随负载的增大而增大。

发电机端电压随负载变化的程度可由电压变化率来衡量。发电机电压变化率由下式定

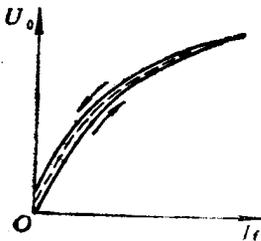


图 22-6 他励发电机空载特性

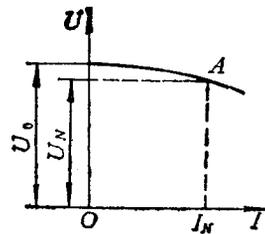


图 22-7 他励发电机外特性

义：

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_N}{U_N} \times 100\% \quad (22-8)$$

一般他励发电机的电压变化率 ΔU 约为 $5\% \sim 10\%$ 。

3. 调整特性

调整特性是指保持发电机端电压为额定值，当负载变化时，励磁电流的调节规律。即 $n = n_N = \text{常数}$ ， $U = U_N$ ， $I_f = f(I)$ 。

它励发电机调整特性如图 22-8 所示，是一条上翘的曲线。上翘的原因是由于负载电流增大使电枢电阻压降增大，电枢反应的去磁作用增强，为保持端电压不下降并始终保持额定值，在负载电流增加的同时应相应地增加励磁电流以补偿使端电压下降的因素。

二、并励发电机

空载时，并励发电机的电枢电流 I_a 等于励磁电流 I_f 。由于励磁电流很小，励磁电流所引起的电枢电阻压降可以忽略不计，即认为 $E_a = U_0$ 。所以并励发电机空载特性与用它励方法求得的空载特性曲线并无多大区别。

并励发电机外特性下降幅度比它励发电机大，如图 22-9 所示。这是因为它励发电机中 $I_{f,N}$ 是不变的，而并励发电机虽然励磁回路中的 R_f 值不变，却不能保证 $I_{f,N}$ 不变。并励发电机端电压加在励磁回路，当其端电压随负载增大而下降时，励磁电流将相应减小，从而使发电机端电压下降的因素中多了一个。

并励发电机电压变化率 ΔU 为 20% 左右。

图 22-10 为并励发电机的调整特性。为了补偿使并励发电机端电压下降的三个因素，即电枢电阻压降、电枢反应的去磁作用及因端电压下降造成励磁电流减小，当负载电流增加时，为保持端电压为额定值，励磁电流的增加值比他励时大。所以并励发电机调整特性曲线向上弯曲较高。

并励发电机不需外电源给以励磁，运行特性较好，所以获得广泛应用。不过由于并励发电机电压变化率较大，如果负载变化较大，就不能作恒压电源使用。

三、复励发电机的特性

复励发电机由于在并励的基础上加了串励绕组磁势，因而可以较容易地得到我们所要求的特性。复励发电机外特性如图 22-11 所示。

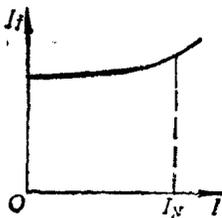


图 22-8 它励发电机调整特性

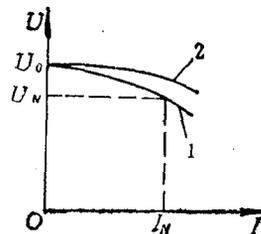


图 22-9 并励发电机外特性

1—并励发电机外特性，2—它励发电机外特性

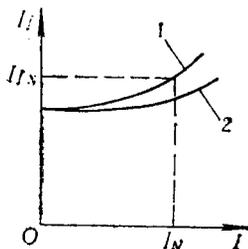


图 22-10 并励发电机调整特性

1—并励发电机调整特性； 2—它励发电机调整特性

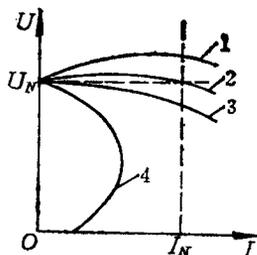


图 22-11 复励发电机外特性

1—过复励； 2—平复励； 3—欠复励； 4—差复励

积复励发电机并励绕组的磁势保证在空载时发电机端电压有额定值。串励绕组的磁势则用于补偿电枢电阻压降及电枢反应的去磁作用对端电压的影响。在积复励发电机中，按照额定负载的端电压等于、大于或小于空载电压而分为：平复励、过复励和欠复励三种。它们是利用合理设计串励绕组匝数以得到适当的磁场强度来实现的。

在差复励发电机中，串励绕组的磁势和并励绕组磁势方向相反，故负载增加时串励绕组的磁势使电机的气隙磁场削弱，外特性下降很快。差复励发电机常作为直流电焊发电机。

第四节 小结

并励发电机自励建立端电压必须满足三个条件：1) 有剩磁；2) 励磁绕组与电枢绕组并联时极性必须正确；3) 励磁回路电阻小于临界电阻值。

直流电机的电磁转矩公式为 $M_M = C_M I_a \phi$

直流发电机的运行特性主要有：空载特性、外特性、调整特性。对运行最重要的是外特性。复励发电机能提供较理想的外特性。

思考题与习题

22-1 如果并励发电机不能自励建立端电压，可能有哪些原因？

22-2 并励发电机正转能自励，反转能否自励，为什么？

22-3 一台并励发电机，励磁回路电阻 $R_f = 44\Omega$ ，负载电阻 $R_L = 4\Omega$ ，电枢回路总电阻 $R_a = 0.25\Omega$ ，端电压 $U = 220V$ ，试求：

- (1) 励磁电流 I_f 和负载电流 I ；
- (2) 电枢电流 I_a 和电枢电势 E_a ；
- (3) 输出功率 P_2 和电磁功率 P_M 。

22-4 一台单迭绕组的直流发电机， $2p = 4$ ， $N = 420$ 根， $R_a = 0.8\Omega$ ， $I_a = 30A$ ， $U_N = 220V$ ， $\Phi = 0.028Wb$ 。试求：

- (1) 电势 E_a 和转速 n ；

(2) 电磁转矩 M_M 和电磁功率 P_M 。

22-5 一台复励发电机，额定功率 $P_N=6\text{kW}$ ， $U_N=230\text{V}$ ， $n_N=1450\text{r/min}$ ， $p=2$ ， $a=1$ ， $R_a=0.59\Omega$ ，换向极绕组电阻 $R_{c,h}=0.255\Omega$ 串励绕组电阻 $R_{s,r}=0.076\Omega$ ，并励绕组电阻 $R_{p,r}=177\Omega$ ，正负极电刷处电压降 $\Delta U=2\text{V}$ ，额定负载时电枢铜耗 $p_{Cu,a}=443\text{W}$ ，铁耗 $p_{Fe}=234\text{W}$ ，机械损耗 $p_{\Omega}=61\text{W}$ ，略去其它损耗。试求：

- (1) 电磁功率 P_M ；
- (2) 电磁转矩 M_M ；
- (3) 效率 η ；
- (4) 绘出这台复励发电机接线原理图。

第二十三章 直流电动机及电力拖动

直流电动机将电能转换为机械能，是发电机的一种逆运行状态。直流电动机作为拖动生产机械的原动机，要求有很好的转矩—转速特性，即机械特性。这一特性因励磁方式不同而差异很大。和直流发电机一样，直流电动机的励磁方式也可分为它励、并励、串励和复励。本章主要介绍并励直流电动机的基本特性、稳定运行条件及拖动中的各种运转状态。

第一节 直流电机的可逆原理

一台直流电机既具有作发电机运行的可能性，同时又具有作电动机运行的可能性。下面讨论直流电机的这种可逆原理。

设一台并励直流电机接在直流电网上作发电机运行，如图23-1(a)所示。用原动机拖动使电枢逆时针方向旋转，此时如电枢电势 $E_a > U_N$ 。则电枢电流 $I_a = (E_a - U_N) / R_a$ 为正值， E_a 与 I_a 同方向。乘积 $E_a I_a$ 为正值，它表示电枢绕组中获得了向外电路输出的电磁功率。与此同时，在电枢电流 I_a 和主磁场的作用下所产生的电磁转矩方向与电枢旋转方向相反，起制动作用。因此原动机的拖动转矩 M_1 必须克服电磁转矩 M_M 和空载转矩 M_0 才能维持稳定运转。这就是发电机将机械能变为电能的物理现象。

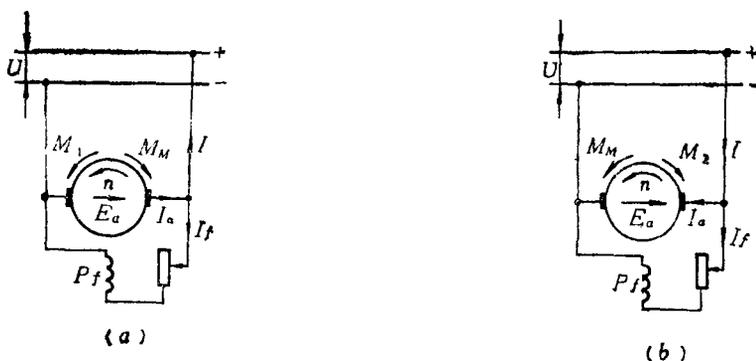


图 23-1 直流电机可逆原理

(a) 发电机运行；(b) 电动机运行

降低原动机转速，即减小机械能的输入。发电机电枢电势 E_a 将降低，当 E_a 降到 $E_a = U_N$ 时，发电机处于空载状态， $I_a = 0$ ， $M_M = 0$ 。机械能的输入继续减小，原动机转速因此继续下降，则 $E_a < U_N$ ， $I_a = (E_a - U_N) / R_a$ 将为负值， I_a 变为与 E_a 相反的方向，如图23-1(b)所示。这时直流电机吸收电网的电磁功率， $E_a I_a$ 变为负值。电磁转矩 M_M 也改变了方向，成为与旋转方向相同的驱动转矩。显而易见，此时直流电机已不再是发电机了，由于外部条件的改变，直流电机已为电动机运行状态了。它吸收电网电磁功率，将电能变换

为机械能。

以上分析可知，同一台直流电机，在一定的外部条件下可作为发电机运行，这时 $E_a > U_N$ ；在另一条件下又可以作为电动机运行，这时 $E_a < U_N$ 。这就是直流电机运行的可逆性。

必须指出，在实际运用中，根据生产需要和经济要求，相同功率的直流发电机和直流电动机在结构上和有关的额定值的要求上是有区别的。最好按铭牌要求使用。

第二节 直流电动机的基本方程式

和直流发电机一样，直流电动机也有电势、功率、转矩三个基本方程式。现以并励直流电动机为例简述如下。

如图 23-1(b) 中所示的箭头为各量的正方向，可列出并励直流电动机的电势平衡方程式为

$$U = E_a + I_a R_a \quad (23-1)$$

根据图 23-2 所示的并励电动机功率分配图可列出其功率平衡方程式为

$$P_1 = P_2 + \Sigma p \quad (23-2)$$

$$\Sigma p = p_{Cu} + p_{Cu_a} + p_{\Omega} + p_{Fe} + p_{ad} \quad (23-3)$$

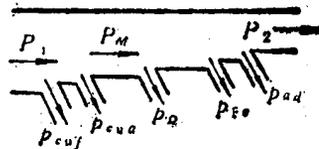


图 23-2 并励电动机功率分配图

分配图和功率平衡方程式表明电网输入的功率 P_1 除去电机励磁回路铜损耗 p_{Cu_f} ，电枢回路总损耗 p_{Cu_a} ，便得到转换为机械功率的电磁功率 P_M 。再从电磁功率中减去机械损耗 p_{Ω} 、铁耗 p_{Fe} 、附加损耗 p_{ad} 后便得到轴输出功率 P_2 。

在电动机中，电磁转矩 M_M 为驱动转矩，而机械负载转矩 M_L 和空载转矩 M_0 是制动转矩。电动机稳定转速下的转矩平衡方程式为

$$M_M = M_L + M_0 = M_{s.ta} \quad (23-4)$$

稳定运行时的负载转矩和空载转矩的和又称静态转矩 $M_{s.ta}$ ，它与电磁转矩 M_M 平衡。如果电动机转速不是恒定的，根据力学原理可知，电磁转矩与静态转矩将失去平衡，其差值为动态力矩 $M_{m.o}$ ，这时转矩平衡方程应改写为

$$M_M = M_{s.ta} \pm M_{m.o} \quad (23-5)$$

动态力矩 $M_{m.o}$ 是由电机转动部分的转动惯量产生的，其值为

$$M_{m.o} = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (23-6)$$

式中 J ——电机及拖动的机械负载的转动惯量之和。

第三节 直流电动机的机械特性

由于直流电动机是输出机械功率的原动机，因此必须讨论它的转速与转矩。现在让我

们来分析当电源电压、励磁电流为常数和给定电枢回路电阻的条件下，电磁转矩 M_M 和转速 n 间的变化关系 即 $n=f(M_M)$ 。这个关系也称电动机的机械特性。

从并励直流电动机转矩公式、电势公式及电势平衡方程

$$M_M = C_M \Phi I_a$$

$$E_a = C_e \Phi n$$

$$U = E_a + I_a R_a$$

不难导出并励直流电动机机械特性方程式

$$n = \frac{E_a}{C_e \Phi} = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_M \Phi^2} M_M = n'_0 + \alpha M_M \quad (23-7)$$

式中 $n'_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$ 又叫理想空载转速；而 $\alpha = \frac{R_a}{C_e C_M \Phi^2}$ 。

当 U 、 R_a 、 Φ 为常数时 机械特性可画出一条向下倾斜的直线 如图 23-3 所示。由特性曲线可见，转速 n 随电磁转矩 M_M 的增大而降低。这说明电动机加上负载后，转速会有一些降落。需要指出，电枢反应不大时，可忽略它对机械特性的影响。但当电枢电流较大时，电枢反应的去磁作用将使转速回升，使机械特性呈上翘现象，如图 23-3 虚线所示。

图 23-3 所示的机械特性是电机的固有机机械特性，它远远不能适应生产机械的需要。事实上人为地改变电枢回路中串入的电阻和调节励磁电流以减弱磁场时，均可改变电机的机械特性，这时得到的特性称为人工机械特性。

图 23-4 所示为并励直流电动机固有机机械特性及电枢回路中串接电阻后的人工机械特性。

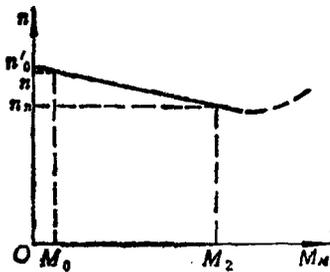


图 23-3 并励直流电动机机械特性

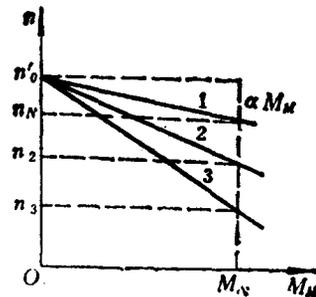


图 23-4 并励直流电动机人工机械特性

1—固有机机械特性，电枢回路电阻为 R_a ；

2—人工机械特性，电枢回路电阻为 $R_1 > R_a$ ；

3—人工机械特性，电枢回路电阻为 $R_2 > R_1$ 。

图 23-5 所示为并励直流电动机固有机机械特性及削弱磁场后的人工机械特性。

倘若电动机为他励直流电动机，还可通过降低电源电压的方法来获得所需的人工机械特性，如图 23-6 所示。由于理想空载转速 n'_0 随电源电压而降低，所以人工机械特性是一些斜率不变的平行线。

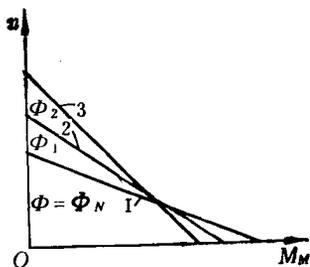


图 23-5 削弱磁场时的机械特性

- 1—固有机械特性，主极磁场 $\Phi = \Phi_N$;
- 2—人工机械特性，主极磁场 $\Phi_2 < \Phi_1$;
- 3—人工机械特性，主极磁场 $\Phi_3 < \Phi_2$;

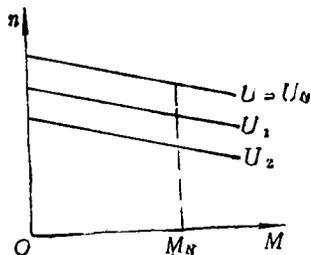


图 23-6 它励直流电动机端电压不同时的机械特性

- 1—固有机械特性，端电压 $U = U_N$;
- 2—人工机械特性，端电压 $U_1 < U$;
- 3—人工机械特性，端电压 $U_2 < U_1$;

第四节 电力拖动机组稳定运行的条件

生产机械和拖动生产机械的电机构成电力拖动机组。机组的稳定性决定于电动机和负载的机械特性。

根据统计，大多数生产机械的负载转矩特性可以归纳为三种类型：

(1) 恒转矩负载特性。如起重机、卷扬机、电梯等，如图 23-7 曲线 1 所示。

(2) 抛物线型负载特性。负载转矩基本上与转速的平方成正比。如通风机、水泵、油泵等，如图 23-7 曲线 2 所示。

(3) 恒功率负载特性。一些机床如车床属于这种负载，负载转矩与转速基本上成反比，如图 23-7 曲线 3 所示。

至此，我们已先后分析了电动机机械特性和生产机械负载转矩特性。下面讨论电动机与机械负载组成电力拖动系统后的稳定运行的条件。

图 23-8 为直流电动机带上恒力矩负载时的情形。图 (a) 表示额定负载时，图 (b) 表示负载过大并有较强的电枢反应。这两图中，A 和 B 点为拖动机组的运行点。

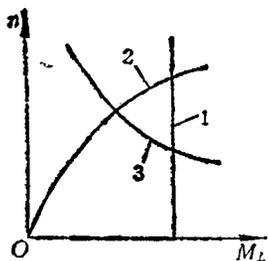


图 23-7 机械负载转矩特性

- 1—恒转矩特性；
- 2—抛物线特性；
- 3—恒功率特性

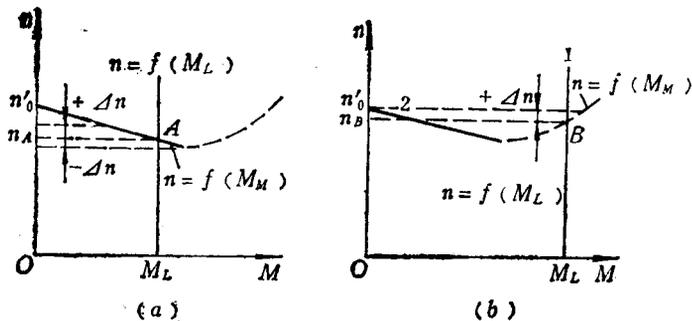


图 23-8 电力拖动系统稳定运行的条件

- (a) 稳定；
- (b) 不稳定

(a)图表明, 由于偶然原因, 例如电网电压波动, 电动机端电压瞬时升高, 将引起机组转速增加到 $n_A + \Delta n$ 。当波动消失后, 电动机端电压恢复正常, 机组转速由于惯性来不及变化。这时, 由于电动机电磁转矩 M_M 小于负载转矩 M_L , 机组转速将减速并回到 A 点稳定运行。同理, 当瞬时波动引起机组转速下降到 $n_A - \Delta n$ 时, 波动消失后, 机组会因 $M_M > M_L$ 而加速并回到 A 点稳定运行。

(b)图表明, 由于负载过大, 电枢反应去磁作用过强, 使电动机机械特性尾部呈上翘状态。如果因为电网电压波动, 引起机组转速升高为 $n_B + \Delta n$, 那么波动消失后, 由于电动机此时的电磁转矩 M_M 大于负载转矩 M_L , 机组转速将继续升高, 最后可能引起飞速。若电网电压波动, 引起机组转速下降, 不管波动消失与否, 机组均会减速、停机。

由上面分析可见, 电动机的机械特性 $n=f(M_M)$ 与负载的特性曲线 $n=f(M_L)$ 在交点处的配合应满足下列要求才能实现稳定运行。即在交点对应的转速之上保证有 $M_M < M_L$; 在交点对应的转速之下保证有 $M_M > M_L$ 。换句话说, 只要电动机的机械特性是下降的, 整个拖动机组就能稳定运行。因此, 为扩大电动机的使用范围, 电动机应设计成具有下降的机械特性。复励电动机中的串励绕组就具有这种作用。

第五节 并励直流电动机的起动

直流电动机接上电源, 转速由零升高到正常的工作转速, 这一过程称为起动过程。直流电动机起动电流可由其电势方程 $U = E_a + I_a R_a$ 导出。刚起动时转速 $n = 0$, $E_a = 0$ 。因此起动电流由下式确定

$$I_{st} = I_a = \frac{U}{R_a} \quad (23-8)$$

如果电动机在额定电压下直接起动, 由于电枢回路电阻值很小, 起动电流 (即电枢电流) 会突然增到额定电流的十多倍。这会起电动机换向情况恶化, 电刷下产生有害火花; 与电流成正比的电磁转矩将使拖动机组的转速升至损害传动机构的数值。为此起动时应设法限制电枢电流。一般直流电动机起动电流不得超过额定值的 $1.5 \sim 2$ 倍。

直流电动机起动方法有三种: 1) 直接起动; 2) 电枢回路串变阻器起动; 3) 降低电枢回路端电压起动。现以并励直流电动机为例, 分别说明如下:

一、直接起动

在额定电压下直接起动电动机的优点是不需要什么起动设备, 操作方便。由于起动电流很大, 这种方法只限于微型电机使用。

二、电枢回路内串变阻器起动

电动机起动时, 将起动电阻 R_{st} 串入电枢回路以限制起动电流, 如图 23-9 所示。当转速上升后将起动电阻逐段切除。采用变阻器起动时, 起动电流为

$$I_{st} = \frac{U}{R_a + R_{st}} \quad (23-9)$$

只要 R_{st} 数值选择适当, 就能将起动电流限制在允许范围之内。

下面研究起动的物理过程。图 23-10 用不同起动电阻值起动时的机械特性。当电动机

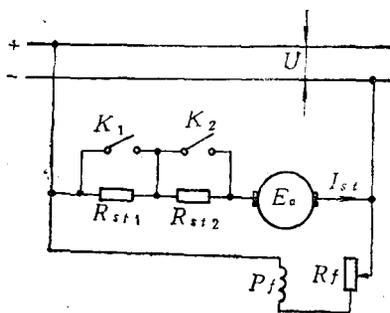


图 23-9 并励直流电动机起动原理图

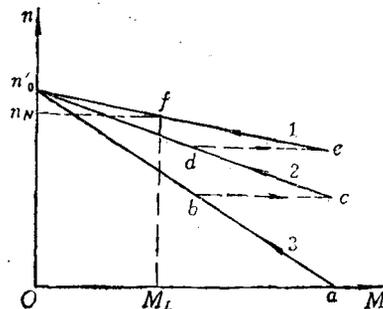


图 23-10 并励电动机起动过程

1—固有机械特性；2—串入 R_{st1} 后的人工机械特性，

3—串入 R_{st1} 、 R_{st2} 的人工机械特性

接上电源起动时，起动电阻 R_{st1} 、 R_{st2} 均串入电枢回路。这时 $n=0$ ，起动转矩 $M_{st} = \alpha a$ 。起动电流由

$$I_{st} = \frac{U}{R_{st1} + R_{st2} + R_a} \quad (23-10)$$

确定。由于 $M_{st} > M_L$ 电机沿曲线 3 很快上升。升速的同时，反电势 E_a 加大， I_a 逐渐减少，起动力矩逐渐降低，转速上升的速率逐渐减慢。为了加速起动，有必要提高起动力矩，为此切除 R_{st1} ，切除瞬间转速因电枢惯性来不及变化，运行点由 b 变到曲线 2 的 c 点。起动转矩与额定转矩差直再次加大，电枢沿曲线 2 加速。当加速到 d 点，再切除 R_{st2} ，电动机由运行点 d 变到曲线 1 的 e 点。转矩再次增大，电机沿固有机械特性曲线加速到 f 点，并在此点稳定运行，起动过程完毕。

必须指出，为使起动过程中有足够大的起动转矩，起动时励磁回路中的附加电阻应全部短接，使励磁磁势有最大值。此外，起动电阻往往是按短时工作方式选择的，不能长期将其接在电枢回路中，以免烧坏。

三、降低电阻回路端电压起动

单纯降低电枢回路端电压以限制起动电流的起动方法要求将电机改为它励，配备两套直流电源设备。一套电源设备用来改变电枢回路的端电压，另一套作为电机它励电源。这种方法的优点是电动机起动电流小，起动时能量损耗也小。配备两套电源设备费用虽较大，但能兼作电机调速、反转之用。

第六节 并励直流电动机的调速

直流电动机具有优良的调速性能，能在宽广的范围内平滑而经济地调节转速。这对于提高生产率，保证产品质量是非常必要的，所以直流电动机获得广泛的应用。

我们知道，当电动机电枢回路中串接调速电阻 R_{ad} 时，机械特性方程可表示为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a + R_{ad}}{C_e C_M \Phi^2} M_M \quad (23-11)$$

从上式可知，直流电动机的转速可采用下面的方法来进行调节：电枢回路串接调节电阻；改变主磁通及改变电枢端电压等。下面分别叙述之。

一、改变串接在电枢回路中的电阻 R_{ad} 调速

图23-11为并励电动机电枢回路中串接电阻的调速原理图。设调速前后负载不变。调速前开关 K 闭合，系统稳定运行在 A 点，此时电机的转速为 n_A 。当开关 K 断开时，电枢回路中接入调节电阻 R_{ad} 。转速 n 及电枢电势 E_a 一开始不能突变，电枢电流及电磁转矩因 R_{ad} 的加入而变小，运行点在相同转速下由 A 点过渡到 B 点。由于电磁转矩低于负载转矩，系统减速，电枢电势随转速下降而减小，电枢电流及电磁转矩不断回升。当电磁转矩 M_M 增至与负载转矩 M_L 达到平衡时，电机即在 C 点稳定运行，转速由 n_A 调至 n_C 。

电枢回路串电阻的调速方法的调速范围不大。调速为有级调速故调速的平滑性不高。这种调速方法虽然简单，但不经济。

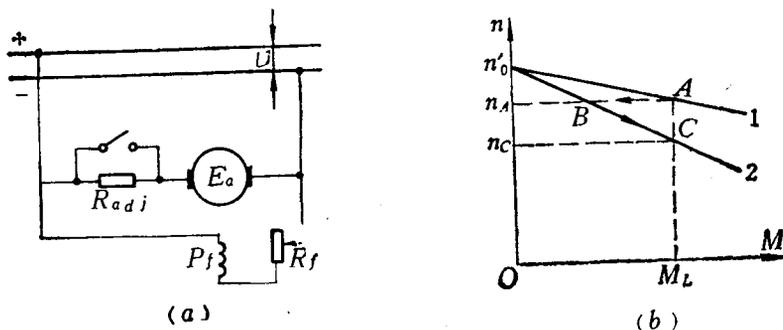


图 23-11 并励直流电动机电枢回路串电阻调速原理

(a) 接线原理图；(b) 机械特性曲线

1—固有特性，2—人工特性

二、弱磁调速

当电源电压为常数，增大励磁回路的电阻 R_f ，使励磁电流减小，主磁通 Φ 减小，电动机转速将上升。现分析削弱磁场的调速过程。

削弱磁通前，电动机主磁通为 Φ_1 ，转速为 n_1 ，转矩为 M_M ，相应的电枢电流为 I_{a1} ，这时运行点是如图 23-12 所示固有机械特性曲线 1 上的 A 点。

当开关 K 断开，励磁回路中接入 R_f ，励磁电流及主磁通减小。由于惯性，电机转速来不及变化，电动机反电势 E_a 随主磁通的减小而减小，电枢电流升至 I_{a2} 。一般情况下 I_{a2} 增加的相对数量比主磁通下降的相对数值大，电动机转矩增大且 $M_M > M_L$ ，如图 23-12 中曲线 3，机组加速。在加速过程中反电势逐渐回升，电枢电流及电磁转矩逐渐下降，直到 $M_M = M_L$ 为止，机组转矩达到平衡，转速上升到 n_2 。运行点转移到人工机械特性曲线 2 的 B 点稳定运行。

由于调速前后负载转矩不变，磁场从 Φ_1 削弱到 Φ_2 ，电流由 I_{a1} 增大到 I_{a2} ，此时

$$\frac{I_{a2}}{I_{a1}} = \frac{\Phi_1}{\Phi_2} \quad (23-12)$$

忽略电枢回路的电阻压降，则调速前后的稳定转速为

$$n_2 \approx \frac{\Phi_1}{\Phi_2} n_1 \quad (23-13)$$

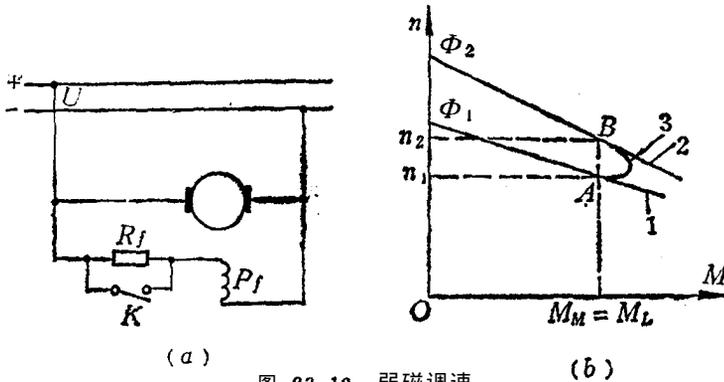


图 23-12 弱磁调速
(a) 原理图; (b) 机械特性

1—固有机特性; 2—人工机械特性; 3—动态机械特性

弱磁调速的优点是：控制方便，能耗小，调速平滑。缺点是调速范围不大，调速下限受励磁回路固有电阻及磁路饱和的限制；上限受机械强度和换向的限制。

三、改变电枢回路端电压调速

改变电枢回路端电压调速必须有专门的电源设备。这时并励电动机励磁方式改为他励。目前用得最多的可调直流电源是可控硅整流装置 SCR，如图 23-13 所示。容量较大的直流电动机一般用专门的发电机供电，这种系统称为发电机——电动机系统，如图 23-14 所示。图中交流电动机 ACM 作为直流发电机 DCG 的原动机，利用可控硅装置调节发电机 DCG 的励磁电流来达到调节发电机端电压的目的，从而实现改变直流电动机电枢回路的端电压以实现调速的目的。

从机械特性方程可知，调节电压 U 调速时，理想空载转速 n_0 将随 U 的变化而变化。因而固有斜率保持不变，如图 23-15 所示。

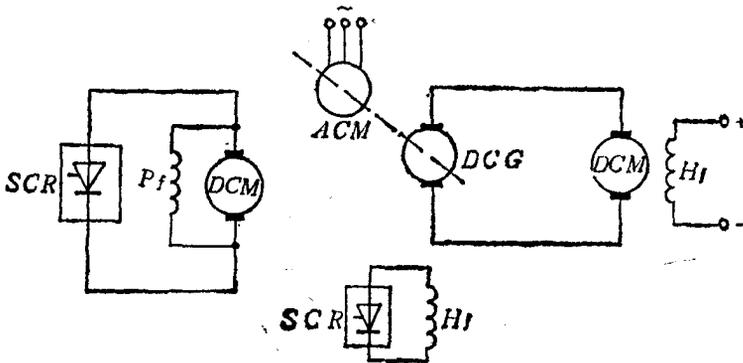


图 23-13 可控硅供电的直流调速系统

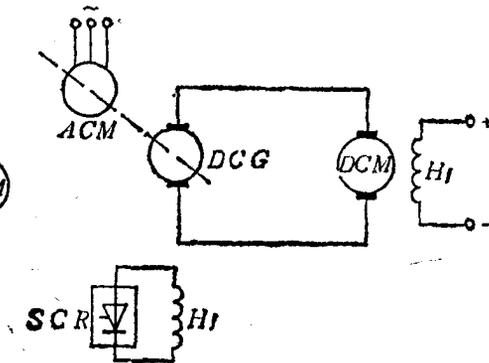


图 23-14 发电机—电动机组调速系统

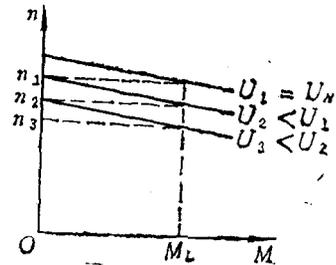


图 23-15 调电源电压调速

当负载转矩不变时，电源电压由 U_1 降到 U_2 ，再由 U_2 降到 U_3 ，电机转速则由 n_1 降到 n_2 再下降到 n_3 。调速过程中，由于励磁电流和负载均保持不变，电枢电流 I_a 和电枢电阻压降 $I_a R_a$ 不变。于是调压前后的转速将与反电势成正比变化即

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{E_{a1}}{E_{a2}} = \frac{U_1 - I_a R_a}{U_2 - I_a R_a} \quad (23-14)$$

从发展看来，可控硅直流电动机调速系统由于具有体积小，效率高等优点，大有取代发电机—电动机调速系统的趋势。

顺便指出，在改变电源电压调速的同时，采用弱磁调速，可使调速范围达到 1:18~1:24。

第七节 直流电动机的制动

使直流电动机迅速停转或使之减速的运动状态称为直流电动机的制动。这个制动状态的特点是在机轴上施加一个与旋转方向相反的转矩。制动方法可以用机械制动法，如使用抱闸。也可用电磁制动法。电磁制动比机械制动方便、经济。下面介绍直流电动机三种电磁制动方法。

一、能耗制动

能耗制动时，电动机为他励方式，仅将电枢从电源断开并接到一个适当的制动电阻 R 上，如图 23-16 所示。此时电机靠惯性获得动能呈发电机运行状态，将电能消耗于电阻上，使电动机动能很快消失，较快停机。机轴上获得的制动转矩，是发电机的电磁转矩。

二、反接制动

图 23-17 为反接制动线路图，为了使工作机械迅速停车（或反向转动），可把电枢回路两端断开经电阻 R 反接到电源上。此时电枢电流反向，电磁转矩反向成为制动转矩。反接制动时，电枢电势与电源电压同向，利用 R 限制电枢电流。如若制动目的是使拖动机组迅速停机，应在转速接近于零时切断电源，否则电机将反转。

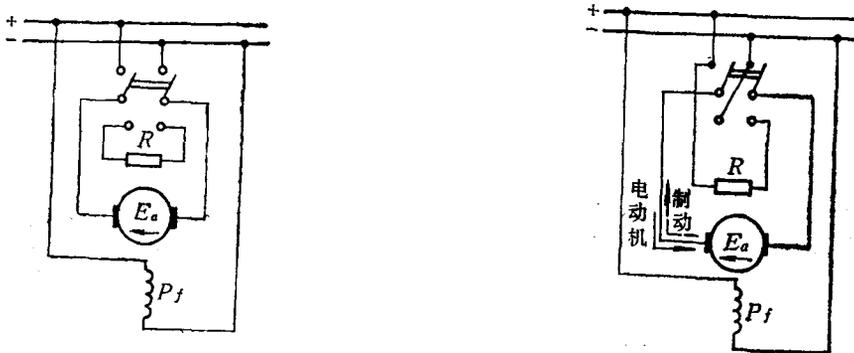


图 23-16 并励电动机能耗制动图 23-17 反接制动线路图

三、反馈制动

反馈制动又称再生制动。现以电力传动机车下坡为例说明再生制动。当电力机车下坡

时，其位能驱使电机升速，当转速 n 超过空载转速 n_0 时，电枢电势 E_a 大于电源电压 U ，电枢电流 I_a 反向，电磁转矩反向起制动作用，限制转速继续上升。此时电机变为发电机运行状态，将机车上坡时所获得的位能变换为电能回输给电网。

四、电动机反转

在电力拖动装置工作过程中，常要求电动机既能正转还能反转。使电动机改变旋转方向，可通过改变电磁转矩的方向来实现。改变电动机电磁转矩方向的方法有两种：即改变电枢电流方向或改变励磁电流方向。

在实际运用中，常采用改变电枢电流方向的方法改变转向。这是由于励磁回路电感大，切换励磁电流方向时，易感应较高电势，对励磁绕组绝缘不利，所以一般不采用改变励磁电流方向来改变电机转向。

第八节 串励直流电动机

图23-18为串励电动机的电路图，其励磁绕组与电枢绕组串联，电枢电流 I_a 产生主极磁通 Φ 。下面叙述磁路不饱和时串励电动机的机械特性。由于 $\Phi \propto I_a$ ，则 $M_M \propto I_a^2$ 或 $I_a \propto \sqrt{M_M}$ 。根据电势方程式 $E_a = U - I_a R_a$ ，电动机转速可由下式确定

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{I_a R_a}{C_e \Phi} \quad (23-15)$$

将磁通与电枢电流的正比关系改写为 $\Phi = k_1 I_a$ ，电流与转矩的关系改写为 $I_a = k_2 \sqrt{M_M}$ 并代入(23-15)式中，则

$$\begin{aligned} n &= \frac{U}{C_e k_1 I_a} - \frac{I_a R_a}{C_e k_1 I_a} = \frac{U}{C_e k_1 k_2 \sqrt{M_M}} - \frac{1}{C_2} R_a \\ &= \frac{U}{C_1 \sqrt{M_M}} - \frac{1}{C_2} R_a \end{aligned} \quad (23-16)$$

式中 C_1 、 C_2 为常数。串励电动机的机械特性如图23-19所示。当负载增加时，电枢电流增加，使电枢回路中的电阻压降 $I_a R_a$ 增大，同时也使主磁通增大，这两个因素都促使转速下降，因此串励电动机转速 n 随负载增加而迅速降低。

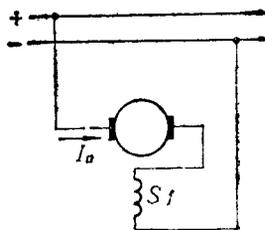


图 23-18 串励直流电动机电路图

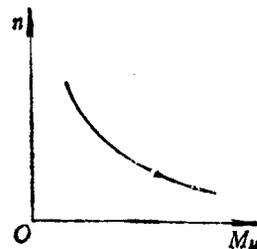


图 23-19 串励电动机的机械特性

串励电动机不允许空载运行，空载时 I_a 很小，磁通 Φ 也很小，为产生一定的反电势 $E_a = C_e n \Phi$ 以与电源电压 U 相平衡，电动机转速将很高。一般会达到 $5 \sim 6 n_n$ ，这会造成电机的损坏。

图23-20为复励电动机的原理图。复励电动机的机械特性介于并励电动机和串励电动机之间，如图23-21所示。

由图23-21可以看出，并励电动机机械特性很硬，适合用来拖动转速变化较小的负载，如金属切削机床、球磨机等。串励电动机机械特性很软，起动力矩大，过载能力大，适用于冲床、刨床、牵引机车等。以串励为主的复励电动机具有串励电动机的优点，由于有较小并励磁势的存在，使复励电动机可以在轻载或空载运行，所以它克服了串励电动机的缺点，更适用于吊车和电梯等场合使用。

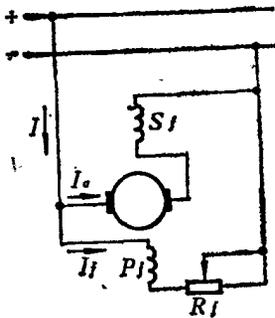


图 23-20 复励电动机原理图

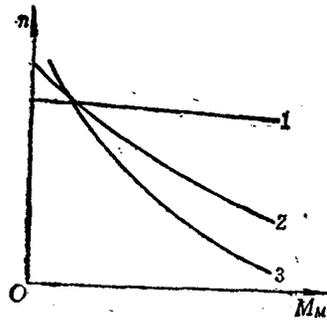


图 23-21 复励电动机机械特性
1—并励电动机的机械特性；2—复励电动机的机械特性；3—串励电动机的机械特性

第九节 小结

直流电动机是直流发电机的一种逆运行状态。此时 $E_a < U$ 为反电势， M_M 为驱动转矩。机械特性是直流电动机的主要特性，它因励磁方式的不同有较大的差异。并励直流电动机有硬的机械特性，串励电动机有软的机械特性。在电力拖动系统中，电动机具有下降的机械特性是拖动系统稳定运行的重要条件。

起动、调速、制动、反转和稳态运行一样均属电动机常见的运转状态。并励直流电动机起动时，因电枢电势为零，电枢电流很大，为限制起动电流常采用在电枢回路中串电阻的起动方法。运用机械特性，可以讨论直流电动机的各种调速过程。直流电动机能在宽广的范围内平滑经济地调速是其可贵的优点。直流电动机调速方法有：电枢回路串电阻、削弱磁场及改变电枢端电压等。制动的目的是使拖动系统迅速减速或停机。直流电动机电磁制动方法有：能耗制动、反接制动和回馈制动。

思考题与习题

23-1 并励电动机在运行时励磁绕组突然断线对运行有何影响？

23-2 串励电动机为什么不能空载运行？和并励电动机的机械特性比较，串励电动机有何特点？

23-3 直流电动机拖动同步发电机与电力系统并列运行，能否出现电机的逆运行现象？试分析之。

23-4 一台直流电动机, $U_N=110\text{V}$, $I_N=26.6\text{A}$ 。直接启动时 启动电流 $I_{st}=390\text{A}$ 。欲使启动电流 $I_{st}=2I_N$, 问电枢回路内应串入多大的电阻?

23-5 一台并励电动机在 $U_N=220\text{V}$, $I_a=54.8\text{A}$, $n_N=1000\text{r/min}$, $R_a=0.393\Omega$, 电机在 $M_2+M_0=$ 常数的额定情况下运行。如果调节磁场变阻器电阻, 使磁通减少 15%。试求:

- (1) 在磁通减少瞬间, 电枢电流的最大值;
- (2) 在进入新的稳态运行后, 电枢电流 I_a 和转速 n 。

第六篇 电力拖动系统中 电动机的选择

电力拖动系统中，电动机的选择内容包括电机种类、结构型式、电动机额定容量、额定电压和额定转速的选择，但首先是电动机容量的选择。

电动机的容量，取决于电动机的发热和冷却情况、绕组绝缘材料的等级和负载的运行情况。因此，在讨论电动机选择之前，首先要研究电动机的发热和冷却，绝缘材料等级和允许温升限度，然后根据负载情况，正确选择电动机容量。

第二十四章 电动机的发热和冷却

本章主要讨论电机发热的原因，电机发热及冷却的一般规律，绕组绝缘材料等级及允许温升限度。

第一节 电机的发热及冷却规律

一、电机发热的原因

各种电机在运行的过程中，随着能量的转换，都会产生各种损耗，如铜损、铁损及机械损耗等。这些损耗一方面使电机的效率降低；另一方面这些损耗又转变成热能，使电机发热，温度升高。由于电机内部不断产生热量，电机温度上升得比周围环境温度还要高。电机温度与环境温度之差，称为温升。使用不同绝缘材料的电机，其最高允许温升是不相同的。我国规定的标准环境温度为 40°C 。电机绝缘材料的最高允许温度与 40°C 之差，称为额定温升。电机铭牌上所标的温升就是额定温升。

各种绝缘材料的使用寿命，同它的工作温度有关。在运行过程中，电机的最高温度不能超过绕组绝缘材料的最高允许温度。如果超过这一限度时，绝缘材料会因迅速老化而降低绝缘性能，甚至烧坏绝缘。因此，发热问题直接影响到电机的寿命和运行的可靠性。为了限制发热对电机的影响，保证电机的使用年限和安全运行，一方面要控制电机各部分损耗，减少发热量；另一方面要改善电机的冷却系统，提高电机的传热和散热能力，从而把电机内部热量很快地传导和散发出去。

二、电机的发热过程

电机在实现能量转换的过程中，产生的各种损耗，最后都转变成热量，使电机的

温度升高。电机温度升高以后，通过辐射和对流作用向周围空气散发热量。当电机产生的热量与散发的热量相等时，电机的温度不再上升而达到某一稳定值。

电机的发热过程比较复杂，因为它不是一个均匀体，各部分热量不一样。在电机中有绕组、铁芯、轴承等几个不同的发热源，但各部分产生的热量不相等，散热条件也不相同，因此，各部分温度不相等。为了使问题简化，特作如下假设：

- (1) 电机为一均匀体，且各点温度相等；
- (2) 电机各处散热系数相同；
- (3) 电机长期运行，负载不变，总损耗不变；
- (4) 周围环境温度不变。

下面研究电机温升随时间的变化曲线，即发热曲线，用 $\tau=f(t)$ 表示。

设电机的总损耗为 Σp ，则电机每秒产生的热量

$$Q=0.24\Sigma p \quad (\text{J})$$

电机在 dt 时间内产生的热量

$$dQ=Qdt \quad (\text{J})$$

根据能量守恒的关系，电机在发热过程中所产生的热量分成两部分：一部分热量 $Cd\tau$ 为电机本身所吸收，使电机温度升高；另一部分热量 $A\tau dt$ 则散发到周围空气中去。因此，电机的热平衡方程式为

$$Qdt=Cd\tau+A\tau dt \quad (24-1)$$

式中 C ——电机的热容量，即电机温度升高一度时所需的热量， $\text{J}/^\circ\text{C}$ ；

τ ——电机的温升， $^\circ\text{C}$ ；

$d\tau$ —— dt 时间内的温升， $^\circ\text{C}$ ；

A ——电机的散热系数，即电机与周围介质温度相差 1°C 时，电机每秒钟向周围介质散发的热量， $\text{J}/^\circ\text{C}$ 。

以 $A dt$ 除式 (24-1) 并整理后得

$$\tau + \frac{C}{A} \times \frac{d\tau}{dt} = \frac{Q}{A}$$

令

$$\theta = \frac{C}{A}, \quad \tau_w = \frac{Q}{A}, \quad \text{则}$$

$$\tau + \theta \frac{d\tau}{dt} = \tau_w \quad (24-2)$$

这是一个非奇次常系数一阶微分方程。该方程的解为

$$\tau = \tau_w \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta}} \right) + \tau_q e^{-\frac{t}{\theta}} \quad (24-3)$$

式中 τ_w ——电机的稳定温升， $^\circ\text{C}$ ；

τ_q ——电机的起始温升， $^\circ\text{C}$ ；

θ ——温度升高的时间常数，它反映了电机温升变化快慢的程度， s 。

如果电机从冷却状态开始发热，即 $t=0$ 时， $\tau_q=0$ ，则式 (24-3) 变为

$$\tau = \tau_w \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta}} \right) \quad (24-4)$$

图24-1绘出了两条对应于式(24-3)和式(24-4)的温升曲线1和2,它们均按指数规律变化。

发热过程开始时,电机产生的热量几乎全部被电机本身所吸收,用来升高电机的温度,因此,温度上升得很快。随着电机温升的升高,电机与周围空气之间的温差逐渐加大,电机向外散发的热量不断增多,而电机发出的热量因负载不变而维持恒定。因此,用来升高电机本身温度的热量逐渐减小,温升增加缓慢。当发热量与散热量相等时,电机的温升不再升高而达到稳定温升值 τ_w 。

三、电机的冷却过程

电动机的冷却过程有两种情况:一种是电动机负载减小,则电动机的损耗 Σp 和发热量 Q 随之减小,于是发热量小于散热量,原来的热平衡状态被破坏了,电机的温升由起始值 τ_q (原来的稳定温升 τ_w)开始下降。当散热量下降到与发热量相等时,重新达到新的热平衡,温升不再继续下降而达到新的稳定温升 τ'_w ,如图24-2曲线1所示。另一种是电机温升达到稳定值后,电动机自电源断开,停止运行,电动机的损耗变为零,电机内部不再产生热量。电机内部原有的热量逐渐散发到周围空气中,电机温升从起始值 τ_q 逐渐下降至零,即 $\tau_w = 0$,式(24-3)变为

$$\tau = \tau_q e^{-\frac{t}{\theta}} \quad (24-5)$$

式(24-5)如图24-2曲线2所示,它表明电机冷却过程的温升按指数规律衰减。

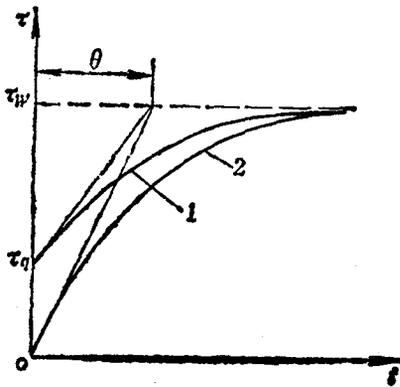


图 24-1 电动机发热过程的温升曲线
1— $\tau_q \neq 0$; 2— $\tau_q = 0$

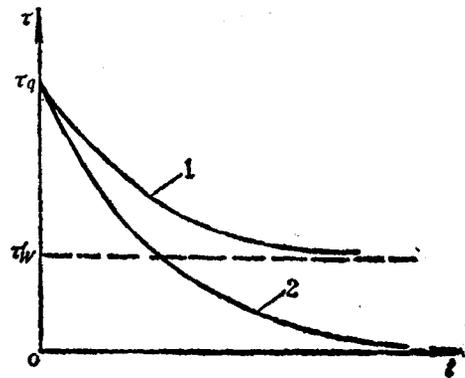


图 24-2 电动机冷却过程的温升曲线
1—负载减小; 2—电动机脱离电网

第二节 电机的绝缘材料等级和允许温升

一、温升及最高允许温升

电机温度与周围环境温度(周围介质)之差称为温升,即

$$\tau = t_1 - t_0 \quad (24-6)$$

式中 τ ——电机的温升, $^{\circ}\text{C}$;

t_1 ——电机的温度, $^{\circ}\text{C}$;

t_0 ——电机周围的环境温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

为了保证电机的使用年限和安全运行,对电机各部分最热点规定了一个极限值,这个极限温度,称为最高允许温度。

一般电动机的冷却介质是空气,它的温度随地区和季节而不同。从冬季到夏季,从我国的北方到南方,周围环境温度变化很大。为了制造出能在全各地且全年都能适用的电机,我国国家标准规定:冷却介质的温度为 40°C 。

电机的最高允许温度与标准冷却介质温度 40°C 之差,称为最高允许温升。

二、绝缘材料等级

从发热方面来看,限制电机容量的主要因素是绕组绝缘材料的耐热能力,也就是取决于绕组绝缘材料的最高允许温度。在最高允许温度之内,绝缘材料的物理、化学、机械、电气等方面的性能比较稳定,其工作寿命一般为20年。超过了这个限度,电机的使用寿命迅速下降。据统计, A级绝缘材料的工作温度每上升 5°C ,绝缘材料寿命将缩短一半。根据国际电工委员会规定,按照最高允许温度的不同,电工绝缘材料可分为七个等级。电机所用绝缘材料主要有 A、E、B、F、H五个等级如表 24-1所示。现代电机中应用最多的是 E 级和 B级绝缘材料。在比较重要的场合,电机采用 F级或 H级绝缘材料。

表 24-1 绝缘材料等级

等级	绝缘材料	允许温度($^{\circ}\text{C}$)	允许温升($^{\circ}\text{C}$)
A	经过浸渍处理的棉、丝、纸板、木材和普通绝缘漆	105	65
E	环氧树脂、聚脂薄膜、青壳纸、三酯酸纤维薄膜、高强度绝缘漆	120	80
B	云母带、云母纸、石棉、用绝缘漆处理过的玻璃纤维	130	90
F	用耐热优良的环氧树脂粘合或浸渍的云母、石棉和玻璃纤维	155	115
H	用硅有机树脂粘合或浸渍的云母、石棉和玻璃纤维组合物	180	140

三、电机额定功率与允许温升的关系

设 τ_y 为电动机的允许温升,则带额定负载时的稳定温升 τ_w 等于 τ_y 。

$$\tau_w = \frac{Q_N}{A} = \frac{0.24 \Delta p_N}{A} \quad (24-7)$$

$$\text{又} \quad \Delta p_N = P_{1N} - P_{2N} = \frac{P_{2N}}{\eta_N} - P_{2N} = P_{2N} \left(\frac{1 - \eta_N}{\eta_N} \right) \quad (24-8)$$

将式(24-8)代入式(24-7)得

$$\tau_w = 0.24 P_{1N} \left(\frac{1 - \eta_N}{\eta_N} \right) / A \quad (24-9)$$

式中 η_N ——电动机的额定效率；

P_{1N} ——电动机输入的额定功率；

P_{2N} ——电动机输出的额定功率。

式(24-9)表明，当散热系数 A 与电动机效率 η_N 不变时，电动机的额定功率与允许温升成正比。也就是说，电机尺寸不变，只要提高绝缘材料等级，就可以提高电机的容量。增大散热系数 A 也可以按比例地提高电机容量。因此，采取外壳带散热筋，加强通风等办法可提高电动机的容量。

第二十五章 电动机的选择

第一节 选择电动机容量的基本原则 及电动机的工作方式

一、电动机的选择原则

(1) 所选电动机能完全满足生产机械对电动机提出的功率、转速、转矩以及起动、调速和过载能力等方面的要求；

(2) 电动机容量能被充分利用，且不超过最高允许温升；

(3) 电动机的结构型式应适合周围环境条件，如开启式电动机，只能在清洁、干燥的环境中使用，而易爆的矿井必须选择防爆电动机。

二、选择电动机容量的基本原则

电动机容量的选择应正好适合生产机械的需要，既充分利用电动机容量又不超过最高允许温升，以保证电力系统安全而经济地运行。如果电动机容量选择得过大，不仅电机容量得不到充分利用，造成设备浪费，而且由于电动机长期轻载运行，使电机效率和交流电动机的功率因数降低，极不经济；反之，如果电动机容量选小了，电动机因超载运行而过热，如长期过载运行，将会烧坏电动机。可见，如果电动机容量选择得不恰当，将会对生产和经济造成严重损失。然而正确地选择电动机容量并不是一件很容易的事。必须对负载的性质、所需转矩和功率的大小、电机运行方式（运行时间的长短）、绝缘材料等级作全面的了解，然后按一定步骤选择电动机的容量。

三、电动机的工作方式分类

电机的温升是由它的发热和冷却情况决定的。而电机的发热和冷却不仅与负载的大小有关，而且与电动机持续运转的时间有关。为了充分利用电动机的容量，把电动机分成三种工作方式，又称为三种工作制，即连续（长期）工作方式、短时工作方式和周期性断续工作方式（或重复短时工作方式），以供不同负载使用。

1. 连续工作方式

电动机在恒定负载下，连续工作的时间很长，温升可以达到稳定值（额定温升） τ_N 的运行方式，称为连续工作方式。其简化负载图 $P=f(t)$ 及温升曲线 $\tau=f(t)$ 如图 25-1 所示。属于这类生产机械有水泵，鼓风机、造纸机、机床主轴等。

2. 短时工作制

在额定负载下，电机工作的时间 t_s 很短，温升 τ 达不到稳定值，而停车时间 t_0 又很长，电机的温升可降到零。这种运行方式的电动机称为短时工作制电动机。吊车、水闸门的启闭机属于这类机械负载。其简化负载图 $P=f(t)$ 及温升曲线 $\tau=f(t)$ 如图 25-2 所示。

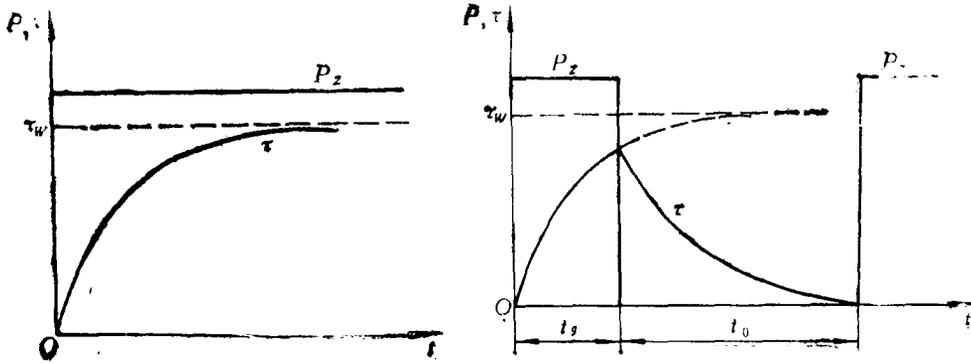


图 25-1 连续工作制的负载图与温升曲线图 25-2 短时工作制的负载图及温升曲线

3 断续周期工作制

电机工作与停车的时间周期性地交替进行，而且工作时间 t_s 和停车时间 t_0 都较短。在任何一个周期的工作时间内，温升来不及升到稳定值；而在停车时间内，电动机的温升也来不及降到零，这种运行方式的电动机称为断续周期工作制电动机。属于这类工作制的生产机械有起重机、电梯、轧钢辅助机械（如辊道、压下装置等）。

断续周期工作制电动机起动后，温升 τ 按指数曲线上上升，但尚未达到稳定温升电动机已停止运转，温升 τ 又按指数曲线下下降，到停歇时间 t_0 结束时，温升尚未降到零。因此，第二个周期由于起始温升比第一个周期时提高了，因此，工作时温升增长较慢，而停歇时间温升降落较多，如图25-3所示。

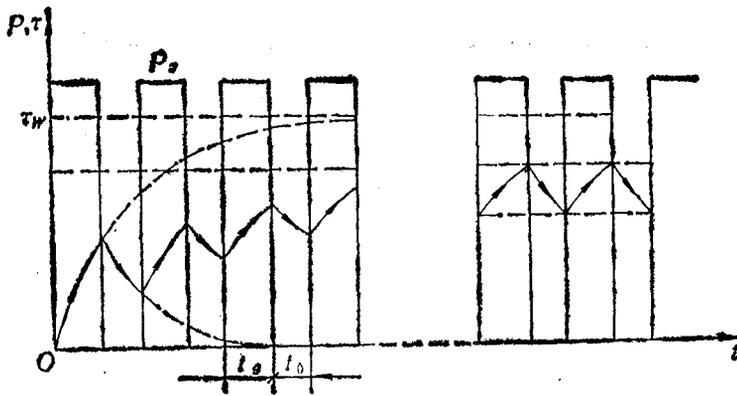


图 25-3 断续周期工作制负载图与温升曲线

四、电动机容量选择的一般步骤

- (1) 计算负载功率 P_v ;
- (2) 根据负载功率 P_v 在产品目录上预选一台容量相当的电动机;
- (3) 进行发热、过载能力及起动能力的校验。如果校验通过，并且功率适当，电动机功率即可决定下来。否则需要重新选择电动机的容量，再进行发热、过载能力及起动能力校验。如此反复进行，直到所选功率合适为止。校核起动能力主要是指鼠笼式异步电动机是否能可靠起动。

第二节 连续工作制电动机容量的选择

连续工作制电动机的负载可分为两类，即恒定负载与变化负载。下面分别进行讨论：

一、恒定负载下电动机功率的选择

在工农业生产中，有相当多的生产机械在长期不变的负载下运转。恒定负载下电动机功率的选择很简单，在计算出负载功率 P_L 后，选择额定功率 P_N 等于或略大于 P_L 的电动机即可，用下式表达

$$P_N \geq P_L \quad (25-1)$$

由于一般电动机是按恒定负载下连续工作设计的，电机在额定功率下工作时，温升不会超过允许值。而电动机功率 $P_N \geq P_L$ ，因此，电动机不会过热，无需进行发热校验。

当不知生产机械所需的功率时，可用理论方法进行计算。现以水泵和通风机为例：

泵用电机的负载功率按下式计算

$$P_L = \frac{q\gamma h}{\eta_b \eta} \quad (W) \quad (25-2)$$

式中 q ——泵单位时间排送的液体量， m^3/s ；

γ ——液体的比重， N/m^3 ；

h ——排送高度， m ；

η_b ——泵的效率，活塞式泵为 $0.8 \sim 0.9$ ，高压离心泵为 $0.5 \sim 0.8$ ，低压离心泵为 $0.3 \sim 0.6$ ；

η ——电动机与泵之间传动机构的效率，直连接为 $0.95 \sim 1$ ，皮带传动为 0.9 。

通风机所用电动机的功率按下式计算

$$P_L = \frac{qh}{\eta_f \eta} \quad (W) \quad (25-3)$$

式中 q ——每秒吸入或压出的气体量， m^3/s ；

h ——通风机的风压， N/m^2 ；

η_f ——通风机的效率，大型通风机效率为 $0.5 \sim 0.8$ ，中型为 $0.3 \sim 0.5$ ，小型为 $0.2 \sim 0.35$ 。

【例 25-1】一台离心式水泵，流量为 $720m^3/h$ ，排水高度 $h=21m$ ，转速 $n=1000r/min$ ，水泵效率 $\eta_b=0.78$ ，水的密度 $\rho=1000kg/m^3$ ，传动机构效率 $\eta=0.98$ ，电动机与水泵同轴连接。今有一电动机其功率 $P_N=55kW$ ，定子电压 $U_N=380V$ ，额定转速 $n_N=980r/min$ ，试确定是否可以使用？

解 负载功率

$$\begin{aligned} P_L &= \frac{q\gamma h}{\eta_b \eta} \times 10^{-3} \\ &= \frac{\frac{720}{3600} \times 1000 \times 21}{0.78 \times 0.98} \times 10^{-3} \times 9.81 \end{aligned}$$

$$= 53.9 \text{ (kW)}$$

因 $P_N > P_L$ ，电动机额定转速 $n_N = 980 \text{ r/min}$ ，与水泵转速 $n_N = 1000 \text{ r/min}$ 相近，故该电动机可用。

【例 25-2】一台直接与电动机连接的离心式水泵，排水量为 $50 \text{ m}^3/\text{h}$ ，扬程为 10 m ，吸程为 5 m ，转速为 1440 r/min ，泵的效率 $\eta_b = 0.4$ ，试选择电动机容量。

解 水泵在电动机轴上的负载功率

$$\begin{aligned} P_L &= \frac{q\gamma h}{\eta_b \eta} \times 10^{-3} \times 9.81 \\ &= \frac{9810 \times \frac{50}{3600} \times 15}{0.4 \times 1 \times 1000} = 5.1 \text{ (kW)} \end{aligned}$$

可选用额定转速为 1440 r/min ，额定功率为 5.5 kW 的鼠笼式异步电动机。

二、变化负载下电动机容量的选择

图 25-4 为连续变化负载的生产机械负载记录图，图中只表示生产过程的一个周期。当

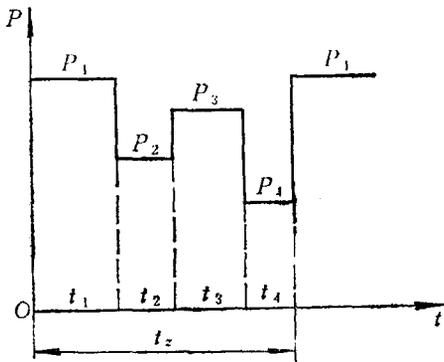


图 25-4 变动的负载记录图

电动机拖动这一机械工作时，因为输出功率周期性地变化，其温升也随之作周期性的波动。波动的最大值将低于相应最大负载下的稳定温升，而高于相应于最小负载的稳定温升。这时，如果按最大负载选择电动机容量，电动机将得不到充分利用；而按最小负载选择电动机容量，电动机温升又将超过允许温升而发热。因此，电动机容量应在最大负载与最小负载之间合理选择，可使电动机容量得到充分利用而又不致过载。其具体步骤是：

- (1) 计算并绘制生产机械负载记录图 $P_L = f(t)$ ；
- (2) 求负载的平均功率 P_{pj} 或平均转矩 M_{pj} ，计算公式分别为

$$\begin{aligned} P_{pj} &= \frac{P_1 t_1 + P_2 t_2 + \dots}{t_1 + t_2 + \dots} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n P_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \end{aligned} \quad (25-4)$$

$$\begin{aligned} M_{pj} &= \frac{M_1 t_1 + M_2 t_2 + \dots}{t_1 + t_2 + \dots} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n M_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \end{aligned} \quad (25-5)$$

式中 P_1, P_2, \dots, P_n —— 各阶段负载功率；

$t_i = t_1 + t_2 + \dots + t_n$ —— 每一周期的时间。

(3) 根据平均功率预选电动机容量。

$$P_N \geq (1.1 \sim 1.6) P_{pj} \quad (25-6)$$

电动机预选后，按下式可计算出电动机在额定功率下的损耗 ΔP_N

$$\Delta P_N = \frac{P_N}{\eta_N} - P_N \quad (25-7)$$

(4) 进行发热校验。如果校验合格，并且功率适当，则电动机功率即可确定下来。如果校验通不过或功率预选过大，需要重新选择电动机，再作电动机负载图进行发热校验。

(5) 电动机过载能力校验。

热校验合格后，再进行过载能力校验。要求负载图中的最大转矩 M_{Lmax} 小于电动机产生的最大电磁转矩 M_{max} ，即

$$M_{Lmax} \leq M_{max}$$

式中 M_{Lmax} —— 最大负载转矩；

M_{max} —— 电动机的最大电磁转矩。

电动机的最大电磁转矩 M_{max} 与电动机的额定转矩 M_N 之比，称为过载能力，即

$$\lambda_M = \frac{M_{max}}{M_N}$$

或

$$M_{max} = \lambda_M M_N$$

所以

$$M_{Lmax} = \lambda_M M_N \quad (25-8)$$

对于交流电动机，考虑电网电压可能发生波动，要求

$$M_{Lmax} \leq (0.8 \sim 0.85) \lambda_M M_N$$

对于交流异步电动机，必要时，还要校核起动能力。

三、热校验方法

热校验方法分类如下：

$$\text{热校验方法} \left\{ \begin{array}{l} \text{平均损耗法} \\ \text{等效法} \left\{ \begin{array}{l} \text{等效电流法} \\ \text{等效转矩法} \\ \text{等效功率法} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

1. 平均损耗法

(1) 利用电动机的效率曲线，求每一段负载的功率损耗

$$\Sigma p_N = P_1 - P_2 = \frac{P_2}{\eta} - P_2$$

式中的 P_1 和 P_2 分别为电动机每一段时间内的输入功率和输出功率。

(2) 求电动机变动负载时的平均损耗 Σp_{pj}

$$\Sigma p_{pj} = \frac{1}{t_g} (\Sigma p_1 t_1 + \Sigma p_2 t_2 + \dots + \Sigma p_n t_n) \quad (25-9)$$

式中 $t_g = t_1 + t_2 + \dots + t_n$ —— 每一周期的时间。

(3) 用平均损耗法进行发热校验

若 $\sum p_{pj} \leq \sum p_N$, 则发热通过 ;

若 $\sum p_{pj} \geq \sum p_N$, 则发热未通过。

发热未通过 , 说明选择的电动机功率太小 , 应重新选较大功率的电动机 , 再进行发热校验。

平均损耗法所得结果准确 , 且适合任何一种电动机的发热校验 , 但这种方法计算复杂 , 且必须知道电动机的效率曲线。因此 , 除在一些重要场合应用外 , 一般用简单的准确性稍差的等效法。

2. 等效法

等效法包括等效电流法、等效转矩法和等效功率法三种。三种等效法都是从平均损耗法导出来的。用等效法进行发热校验 , 其依据都是平均温升 τ_{pj} 小于额定温升 τ_{wN} 。

(1) 等效电流法。

等效电流法就是用一个不变的等效电流 I_{eq} 来代替实际变化的负载电流。等效代替的条件是 : 在同一周期内二者产生的热量 (损耗) 相等 , 即

$$Q_{\text{eq}} t_e = \sum_1^n Q_{\text{e}} t_{\text{e}} \quad (25-10)$$

或
$$\sum p_{\text{eq}} t_e = \sum_1^n \sum p_{\text{e}} t_{\text{e}} \quad (25-11)$$

电动机的损耗分为空载损耗 p_0 (包括铁损耗和机械损耗) 负载损耗 p_{Cu} (铜损 $p_{\text{Cu}} = I^2 R$)。空载损耗基本不变 , 称为不变损耗。于是式 (25-11) 可写成

$$(p_0 + I_{\text{eq}}^2 R) t_e = (p_0 + I_1^2 R) t_1 + (p_0 + I_2^2 R) t_2 + \dots + (p_0 + I_n^2 R) t_n \\ = p_0 t_e + (I_1^2 R t_1 + I_2^2 R t_2 + \dots + I_n^2 R t_n)$$

或
$$I_{\text{eq}}^2 R t_e = I_1^2 R t_1 + I_2^2 R t_2 + \dots + I_n^2 R t_n$$

等效电流为

$$I_{\text{eq}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_e}} \quad (25-12)$$

如果预选电动机的额定电流 I_N 满足条件

$$I_N \geq I_{\text{eq}}$$

则发热校验通过。

等效电流法的计算公式 , 在推导的过程中 , 假设空载损耗 p_0 和电机回路电阻 R 不变。但深槽式和双鼠笼异步电动机 , 在起动和反转时 , 其电阻和铁损均在变化 , 所以这两种电机不能用等效电流法进行发热校验。

(2) 等效转矩法。

当直流电动机磁通不变 , 异步电动机磁通和功率因数不变时 , 电磁转矩 M 与电流 I 成正比 , 于是可用等效转矩 M_{eq} 来代替等效电流 I_{eq} , 于是式 (25-12) 可写成

$$M_{\text{eq}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_e}} \quad (25-13)$$

如果预选电动机的额定转矩 M_N 满足条件

$$M_N \geq M_{\text{eq}}$$

则发热校验通过。

M_N 可由预选电动机的额定功率 P_N 和额定转速 n_N 进行计算,即

$$M_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

式中 P_N —电动机额定功率, kW。

应用等效转矩法,同样要校验电动机的过载能力。

等效转矩法应用范围较窄,除要求空载损耗 p_0 和电机主回路电阻不变外,还要求转矩与电流成正比,因此,只适用于磁通不变的它励直流电动机和负载接近额定值且 $\cos\varphi$ 变化不大的异步电动机。

(3) 等效功率法

等效功率法是当转速 n 基本不变时由等效转矩法引出来的。因为 $P = \frac{1}{9550} Mn$,当 n 不变时,功率与转矩成正比,即 $P \propto M$,则式(25-13)可写成功率形式,即

$$P_{da} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_s}} \quad (25-14)$$

如果预选电动机额定功率满足条件

$$P_N \geq P_{da}$$

则电动机热校验通过。同样,也必须进行过载能力的校验。

等效功率法要求功率与电磁转矩成正比,因此,适用范围更小。只有恒电压、恒磁通的直流电动机和接近额定转速的异步电动机才能应用。

第三节 短时工作制电动机容量的选择

对于短时工作制的机械负载,既可以选用为连续工作制而设计的电动机,也可以选用专为短时工作制而设计的电动机。下面对这两种情况分别进行讨论。

一、直接选用短时工作制的电动机

我国专为短时工作制设计的电动机,其工作时间规格为15、30、60、90min四种。对于某一电机,对应不同的工作时间,其功率是不相同的,其关系是 $P_{15} > P_{30} > P_{60} > P_{90}$,即工作时间短的功率大,否则反之。而其过载能力为 $\lambda_{15} < \lambda_{30} < \lambda_{60} < \lambda_{90}$,即工作时间越长,过载能力越强。选择这种电动机很方便,可以根据负载的功率、工作时间和转速要求,由产品目录上直接选取。如果是变化负载,可按算出的等效功率来进行选择,同时还要进行过载能力及起动能力的校验。专为短时工作制设计的电动机,一般都有较大的过载能力和起动转矩。

二、选用连续工作制电动机

把连续工作制电动机用于短时工作制,如果按生产机械短时工作所需要的功率来选择电动机容量,是不经济的。因为这种电动机工作时间短,达不到额定温升,电动机的容量未被充分利用。因此选择连续工作制电动机短时运行,电动机容量应小于负载所需功率,让它在温升不超过允许值的条件下,在短时间内过载运行。下面讨论这种电动机容量的选

择方法。

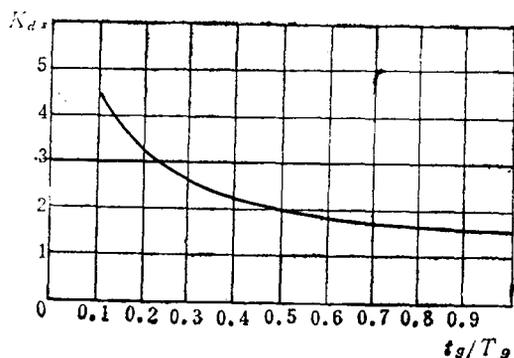


图 25-5 过载倍数与工作时间的关系

电动机在短时工作时容许输出的功率 P_{ds} 与它在连续工作时容许输出的功率 P_N 之比，称为功率的过载倍数 K_{ds} 。不同工作时间 t_g 与过载倍数 K_{ds} 的关系如图 25-5 中的曲线所示。 T_g 为电机的发热时间常数。

短时工作的生产机械选用连续工作制电机时，它的额定容量为

$$P_N = \frac{P_{ds}}{K_{ds}} \quad (25-15)$$

电动机容量按上式选择后，还应通过对过载能力及起动转矩进行校验，但不需进行热校验，因电动机容量是按发热通过进行选择的。

第四节 断续周期工作制电动机容量的选择

断续周期工作制电动机的工作时间 t_g 和停止断电时间 t_0 相互交替，二者都很短，按标准规定，每个周期的时间 $t_g + t_0 < 10\text{min}$ 。显然，这种电动机起动和制动很频繁，普通鼠笼式异步电动机难以胜任这样频繁的起动和制动工作。因此，电机厂专为这类机械负载设计、生产了断续工作制电动机，其特点是：

- (1) 机械强度大；
- (2) 惯性小，为此电机直径偏小，长度偏大，飞轮转矩小；
- (3) 起动和过载能力强；
- (4) 绝缘材料等级高；
- (5) 机械特性偏软，效率略低。

断续周期工作制电动机的负载图与温升曲线如图 25-3 所示。负载工作的时间与整个周期之比称为负载持续率 $FC\%$ ，即

$$FC\% = \frac{t_g}{t_g + t_0} \times 100\% \quad (25-16)$$

我国规定的标准负载持续率有 15%、25%、40%、60% 四种。

与短时工作制电机相似，同一台电动机，在不同持续率 $FC\%$ 下工作，额定功率不一样， $FC\%$ 越小，额定功率越大。表 25-1 列出了断续工作制电机的一些数据，可资比较。

电机最大电磁转矩 M_{max} 与额定转矩 M_N 之比称为过载能力。表中“过载能力”一项，仅给出 $FC\% = 25\%$ 的数据。对一台电动机，最大电磁转矩 M_{max} 是一定的，而额定转矩 M_N 则因 $FC\%$ 而异， $FC\%$ 越小， P_N 和 M_N 越大，过载能力越低。其它负载持续率 $FC\%$ 的过载能力均可由给出的数据计算出来，一般产品目录中都不列了。

断续周期性工作制电动机功率选择的步骤与连续工作制变化负载下的功率选择是相似

表 25-1

断续工作制电动机的型号与额定数据

电动机种类	型 号	负载持续率 $FC\%$	额定功率 (kW)	额定电流 (A)	额定转速 (r/min)	过载能力
起重冶金用的它励直 流电动机	ZZ-12 (220V)	15%	3	17.5	1280	—
		25%	2.5	14.2	1300	2.5
		40%	1.8	10.5	1330	—
		60%	1.3	7.6	1370	—
起重冶金用绕线式 异步电动机	JZR-11-6 (380V)	15%	2.7	8.3	855	—
		25%	2.2	7.2	885	2.5
		40%	1.8	6.6	910	—
		60%	1.5	6.2	925	—
		100%	1.1	5.8	945	—

的，一般都要经过预选与校验等步骤。具体方法如下：

(1) 计算负载功率并作出生产机械的负载图，初步确定负载持续率 $FC\%$ ；

(2) 根据负载功率的平均值 P_{σ} (计算时不应包括 t_0 ，因为它已在负载持续率中考虑了)、负载持续率 $FC\%$ 和转速要求，预选电动机；

(3) 对预选电动机进行发热、过载能力及必要的起动能力校验。

如果在工作时间内负载是变化的，可应用等效法来校验，但公式中不应计入 t_0 ，因已在负载持续率中考虑了。

如果实际的负载持续率恰好是标准的，即可按照产品目录选择合适的电动机。如果电动机实际工作的持续率 $FC_{\sigma}\%$ 与标准值 $FC\%$ 不相同，应把 $FC_{\sigma}\%$ 下的功率 P_{σ} 换算成邻近的 $FC\%$ 下的功率 P ，再根据 P 选择电动机容量和发热校验。换算的原则是：在同一工作周期内，实际工作的 $FC_{\sigma}\%$ 与标准的 $FC\%$ 下的功率损耗相等，发热相同，即

$$\sum P_{\sigma} FC_{\sigma}\% = \sum P FC\%$$

或
$$\left[p_0 + p_{0\sigma} \left(\frac{P_{\sigma}}{P} \right)^2 \right] FC_{\sigma}\% = [p_0 + p_{0u}] FC\%$$

将上式两边除以 p_{0u} 可得

$$\left[k + \left(\frac{P_{\sigma}}{P} \right)^2 \right] \cdot FC_{\sigma}\% = [k+1] \cdot FC\%$$

式中

$$k = \frac{p_0}{p_{0u}}$$

由上式可解出 P 与 P_{σ} 的关系为

$$P = \frac{P_{\sigma}}{\sqrt{\frac{FC\%}{FC_{\sigma}\%} + k \left(\frac{FC\%}{FC_{\sigma}\%} - 1 \right)}}$$

当 $FC_{\sigma}\%$ 与 $FC\%$ 相差不大时，可将上式中的 $k \left(\frac{FC\%}{FC_{\sigma}\%} - 1 \right)$ 项忽略，则简便的换算公式为

$$P \approx P_{\sigma} \sqrt{\frac{FC_{\sigma}\%}{FC\%}}$$

注意：用上式时，应将 $FC_a\%$ 向自己邻近的 $FC\%$ 值进行换算。

如果负载持续率 $FC_a\% < 10\%$ 时，可按短时工作制选择电动机；如果 $FC_a\% > 70\%$ 时，可按连续工作制（即 $FC_a\% = 100\%$ ）选择电动机。

【例 25-3】 一台他励直流电动机 $P_N = 16\text{kW}$ ， $FC\% = 40\%$ ，其中 $P = f(t)$ 及 $n = f(t)$ 如图 25-6 所示。电动机用作机械制动，如果 $k = \frac{P_0}{P_{0u}} = 1$ ($FC\% = 40\%$)，试校验电动机的发热。

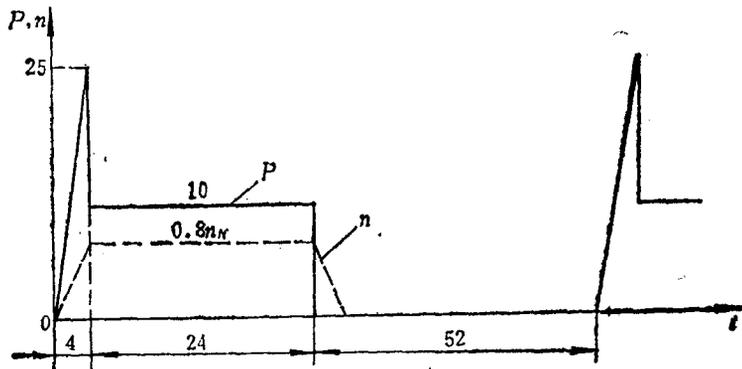


图 25-6 断续周期工作制电动机负载图

解 根据负载图求等效功率 P_e

$$P_e = \sqrt{\frac{\left(\frac{P_1}{0.8}\right)^2 t_1 + \left(\frac{P_2}{0.8}\right)^2 t_2}{t_1 + t_2}}$$

$$= \sqrt{\frac{\left(\frac{25}{0.8}\right)^2 \times 4 + \left(\frac{10}{0.8}\right)^2 \times 24}{4 + 24}} = 16.54\text{kW}$$

考虑电网电压波动对电动机输出功率的影响，上式引入了 0.8 这个系数。负载持续率为

$$FC_a\% = \frac{t_1 + t_2}{t_1 + t_2 + t_0} \times 100\%$$

$$= \frac{4 + 24}{4 + 24 + 52} \times 100\% = 35\%$$

换算为 $FC\% = 40\%$ 时的功率为

$$P = P_e \sqrt{\frac{FC_a\%}{FC\%}} = 16.54 \sqrt{\frac{35}{40}} = 15.5\text{kW}$$

由于 $P_N = 16 > P = 15.5$ ，因此发热校验合格。

第五节 选择电动机功率的统计法

用前面介绍的方法选择电动机容量时，负载记录图的绘制比较麻烦，计算工作量也较

大。经过人们不断总结经验，目前已得出一些生产机械选用电动机功率的实用方法。这些方法比较简单，但有一定的局限性。

目前我国对拖动机床选用的电动机的功率，就是采用统计分析法估算。这种方法就是将各国同类型先进机床所选用的电动机功率，进行统计分析，从中找出电动机功率与机床主要参数之间的关系，再根据我国实际情况，得出相应的计算公式。

1. 车床

$$P=36.5D^{1.54} \quad (\text{kW})$$

式中 D ——工件的最大直径，m。

2. 立式车床

$$P=20D^{0.88} \quad (\text{kW})$$

式中 D ——工件的最大直径，m。

3. 摇臂钻床

$$P=0.0646D^{1.19} \quad (\text{kW})$$

式中 D ——最大的钻孔直径，mm。

4. 外圆磨床

$$P=0.1KB \quad (\text{kW})$$

式中 B ——砂轮宽度，mm；

K ——考虑砂轮主轴采用不同轴承时的系数。

当采用滚动轴承时， $K=0.8\sim 1.1$ ，而采用滑动轴承时， $K=1.0\sim 1.3$ 。

5. 卧式镗床

$$P=0.004D^{1.7} \quad (\text{kW})$$

式中 D ——镗杆直径，mm。

6. 龙门铣床

$$P=\frac{B^{1.15}}{166} \quad (\text{kW})$$

式中 B ——工件台宽度，mm。

例如，C660 车床的工件最大直径为 1250mm，按上列统计分析公式计算，电动机功率为

$$P=36.5D^{1.54}=36.5\times\left(\frac{1250}{1000}\right)^{1.54}=52 \quad (\text{kW})$$

而实际选用电动机的额定功率 $P_N=60\text{kW}$ ，与计算结果相近，由此可知，用统计分析法估算电动机容量简单，但准确性稍差。

第六节 电动机种类、电压、转速和结构型式的选择

选择电动机时，最重要的是电动机容量的选择。但同时，还必须根据生产机械的要求、技术经济指标以及工作环境等进行电动机种类、电压、转速和结构型式的选择。

一、电动机种类的选择

选择电动机种类时，首先考虑的是电动机的性能（如起动转矩、调速性能、过载能力）应满足生产机械的要求。在这个前提下，优先选用结构简单、价格便宜、维护方便、

运行可靠的鼠笼式异步电动机。水泵、通风机、空气压缩机、传送带、机床的辅助运动机构和一些小型机床的主拖动等机械负载常选用鼠笼式异步电动机。

对起动、制动比较频繁、起动力矩要求比较大，并有一定调速范围的生产机械，如起重機、卷扬机、压缩机、不可逆轧钢机、电梯、锻压机等，广泛选用绕线式异步电动机。

具有高起动转矩的鼠笼式异步电动机用于起动力矩要求较大的生产机械，如空气压缩机、皮带运输机和纺织机械等。

同步电动机的特点是转速恒定不变，功率因数是可调的，过励运行时能改善系统的功率因数，但结构复杂，造价高，并要求直流励磁，因此对功率较大又不要求调速的生产机械常用同步电动机来拖动，如不要求调速的连续式轧钢机、大功率水泵、鼓风机、球磨机等。

直流电动机的优点是起动力矩大，有良好的调速性能，其缺点是结构复杂，造价高，维护和管理都不方便。因此，凡是用交流电动机能满足生产机械要求的场合，绝不用直流电动机。但对调速性能要求高（在很宽的范围内平滑、稳定地调速）的生产机械，如高精度数控机床、龙门刨床、可逆轧钢机、造纸机、矿井卷扬机等，常选用它励直流电动机。

对要求起动转矩大，机械特性软的生产机械，如电车、电气机车、重型起重机等，使用串激或复激直流电动机。

直流电动机由于存在着换向问题，限制了它向高转速，大容量方向发展。而异步电动机在转速高、电压高、容量大等方面远远超过了直流电动机。近年来，随着异步电动机串级调速、变频调速的发展，异步电动机将会在电力拖动系统中应用得更加广泛。

根据电动机安装位置和机械传动的要求，可选用卧式或立式。卧式电动机的转轴是水平放置的，立式电动机的转轴与地面垂直。在一般情况下应选用卧式。

二、电动机额定电压的选择

电动机额定电压应与供电电网的电压一致。一般工厂的车间线电压为380V，因此中、小型交流电动机额定电压为380V。这种电动机额定电压又分为220/380V Δ /Y接法和380V Δ 接法。如需Y/ Δ 降压起动，就选380V Δ 接法的电动机。对大容量的交流电动机，供电电压为6000V及10000V时，可选用6000V和10000V的高压电动机。

直流电动机的额定电压也应与供电电压一致。当直流电动机由单独的直流发电机供电时，其额定电压常用220V或110V，大功率直流电动机可提高到600~800V，甚至1000V。新改进的Z₃型电动机除原来的电压等级外，还增设了160V（配合单相整流）和440V（配合三相桥式整流）两种电压等级。Z₂型电动机也增设了180、340、440V几种电压等级。

三、电动机额定转速的选择

额定功率相同的电动机，转速越高，体积越小，造价越低，在一般情况下电动机的飞轮惯量 GD^2 也越小。因此，选用高速电动机较为经济。但电动机是用来拖动生产机械的，而生产机械的转速是由生产过程的要求所决定的。电动机转速越高，减速机构的传动比就越大，因此，使机械传动部分的结构复杂，增加造价和传动损耗。因此，必须综合考虑电动机与传动机构两个方面的因素，才能确定合适的转速。

由电力拖动过渡过程的计算可知，决定电动机起动、制动过渡过程持续时间的主要因素是电动机的飞轮惯量 GD^2 和额定转速 n_N ，即 $GD^2 n_N$ 。电动机的 $GD^2 n_N$ 越小，过渡过程越

短，能量损失也越小。因此，为了得到最高的生产效率，应根据最小的 $GD^2 n_N$ 来选择电动机的额定转速。为此，工厂专门设计转子较长而直径较小的电动机，使 GD^2 小。如冶金起动用的JZ、JZR异步电动机和ZZ型直流电动机。

四、电动机型式的选择

按结构型式和安装方式的不同，电动机分为卧式和立式两种。卧式的轴承是水平放置的，而立式的轴承是与地面垂直的，两者的轴承不同，因此，不能随便混用。由于立式电动机价格较贵，所以一般选用卧式。仅在特殊情况下采用立式，如深井水泵及钻床等，为简化传动装置，才采用立式。

为了防止周围介质对电动机的损坏或因电动机本身故障而引起灾害，电动机必须根据不同的工作环境，选择适当的防护型式。为了适应不同的工作环境，电动机主要有以下四种防护型式：

(1) 开启式。这种电动机的两侧和端盖上都有很大的通风口，具有良好的散热条件，且价格低。但容易使灰尘、水滴或铁屑等侵入电机内部，影响电机的寿命及正常运行。因此，开启式电动机只能用于干燥及清洁的环境中。

(2) 防护式。这种电动机的机座下面有通风口，散热好，能防止水滴、铁屑等从上方落入电机，但潮气及灰尘仍可进入。因此，这种电机适用于比较干燥、灰尘不多、没有腐蚀性和爆炸性的地方

(3) 封闭式。这种电机的机座和端盖上均无通风孔，电动机散热不好。封闭式电动机又分为自冷封闭式、强迫通风和密闭式三种。前两种封闭式电动机，潮气和尘土等不易进入电机内部，能防止从任何方向飞溅来的水滴或其它物体侵入。因此，这两种电动机适用于尘土多、水土飞溅、特别潮湿、易于引起火灾和有腐蚀性气体的地方，如纺织厂、碾米厂和水泥厂等。密封式电动机适用于浸在液体中工作的机械，如电动潜水泵等。

(4) 防爆式。这种电机是在封闭式结构的基础上，制成隔爆型。适用于有易燃、易爆气体的场所，如矿井、油库、煤气站等。

第七节 小结

(1) 本章主要讨论电力拖动系统中电动机的选择。电动机的选择包含电动机种类、型式、额定电压、额定功率、额定转速等。本章以电动机功率的选择为主要讨论内容。

(2) 限制电动机容量的主要因素是绝缘材料的耐热性能，即绕组绝缘材料的最高允许温度。因此，当周围环境温度变化时，电动机允许输出功率也不同。周围环境温度高于 40°C 时，电动机允许输出功率减小；周围环境温度低于 40°C 时，电动机允许输出功率可以增加。

(3) 选择电动机容量的原则是：在满足机械负载要求的条件下，尽量选容量较小的电动机，既充分利用电动机容量，又不超过最高允许温升。

(4) 电动机容量选择的一般方法如下：

1) 计算负载功率 P_L ； 2) 根据负载功率 P_L ，在产品目录上预选一台电动机； 3) 进

行发热、过载能力及起动能力的校验。

(5) 电动机按工作方式不同可分为连续工作制、短时工作制与断续周期工作制三类。我国对于上述三类不同工作制电动机都有产品。原则上,不同工作方式的生产机械,应选用对应的工作制电动机。

(6) 连续工作制电动机容量的选择:

1) 恒定负载时,电动机额定功率等于或略大于负载功率,即

$$P_N \geq P_L$$

2) 变动负载时,按下式预选一台电动机

$$P_N \geq (1.1 \sim 1.6) P_{pj}$$

式中 P_{pj} ——负载平均功率。

然后进行发热校验和过载能力校验。

(7) 短时工作制电动机容量的选择:

1) 选用短时工作制电动机时

$$P_N \geq P_L$$

2) 选用连续工作制电动机时

$$P_N = \frac{P_{\Delta s}}{K_{\Delta s}}$$

式中 P_N ——电动机连续工作时输出的额定功率;

$P_{\Delta s}$ ——电动机短时工作时允许输出的功率。

(8) 断续周期工作制电动机容量的选择:

根据负载平均功率 P_{pj} 、负载持续率 $FC\%$ 和转速要求,预选电动机容量为

$$P_N \geq (1.1 \sim 1.6) P_{pj}$$

当负载实际持续率 $FC_s\%$ 与标准持续率 $FC\%$ 不相等时,应按下式进行功率折算,即

$$P = P_s \sqrt{\frac{FC_s\%}{FC\%}}$$

如果 $FC_s\% < 10\%$ 时,可按短时工作制选择电动机;如果 $FC_s\% > 70\%$ 时,可按连续工作制选择电动机。

(9) 选择电动机的原则和步骤:

1) 根据生产机械的性能(起动、调速、过载能力等)要求,选择电动机的种类和转速; 2) 根据电源的情况,选择电动机额定电压; 3) 根据生产机械需要的功率和工作方式,确定电动机的额定功率; 4) 根据电动机的工作环境,选择电动机的结构和防护型式。

思考题及习题

25-1 电力拖动系统中电动机的选择主要包括哪些内容?

25-2 限制电动机容量的主要因素是什么?简述选择电动机容量的一般步骤。

25-3 两台同样的电动机,在下列条件下拖动负载运行时,它们的起始温升、稳定温升是否相同?

(1) 相同的负载, 但一台环境温度为 25°C , 另一台环境温度为 45°C ;

(2) 相同的负载, 相同的环境, 一台原来没有运行, 一台是运行刚停下后又起动作运行;

(3) 同一个环境中, 一台半载, 另一台满载;

(4) 同一房间内, 一台自然冷却, 一台用冷风吹, 都是满载运行。

25-4 恒定负载下, 连续运行的电动机的容量如何选择?

25-5 变动负载下, 连续运行的电动机的容量如何选择?

25-6 短时运转电动机的容量如何选择?

25-7 断续周期运转电动机的容量如何选择?

25-8 将一台连续工作的电动机用于短时工作的机械负载时, 其输出功率可以加大, 其过载能力增大还是减小?

25-9 有一台离心式水泵, 流量 $q=720\text{m}^3/\text{h}$ 排水高度 $h=21\text{m}$ 转速为 $1000\text{r}/\text{min}$, 水泵效率 $\eta_b=0.78$, 水的比重 $\gamma=1000\text{kg}/\text{m}^3$, 传动机构效率 $\eta=0.98$, 电动机与水泵同轴联结。今有一台电动机 $P_N=55\text{kW}$ 定子电压 380V , 额定转速 $N_N=980\text{r}/\text{min}$, 是否能选用?

25-10 试比较 $FS\% = 15\%$, $P_N=30\text{kW}$ 的电动机与 $FS\% = 40\%$, $P_N=20\text{kW}$ 的电动机, 哪一台实际容量大?

25-11 有一台电动机用来拖动一短时工作制负载, 负载功率 $P_s=18\text{kW}$, 现有下列两台电动机可供选用:

第一台 $P_N=10\text{kW}$, $n_N=1460\text{r}/\text{min}$, 过载能力 $\lambda=2.5$, 起动转矩倍数 $k_{st} = M_{st}/M_N = 2$.

第二台 $P_N=14\text{kW}$, $n_N=1460\text{r}/\text{min}$, $\lambda=2.8$, 起动转矩倍数 $K_{st} = 2$.

试校验过载能力及起动能力, 以决定哪一台电动机适用。校验时需考虑到电网电压可能降低 10% 。

25-12 有一台负载持续率 $FC\% = 25\%$ 的异步电动机 $P_N=51\text{kW}$, $n_N=692\text{r}/\text{min}$, $U_N=380\text{V}$, $I_N=52.6\text{A}$, $M_{mx}=3.1M_N$, $M_{st}=2.8M_N$ 。如果这台电动机 $FC\% = 15\%$ 、 50% 的条件下, 它的输出功率和过载能力如何变化?