

# 绪 论

## 第一节 电器的定义与分类

发电机产生电流，把机械能转换成电能，电动机接收电能，把电能转换成机械能或其他形式的能量。然而，从电能的产生、输送到应用，并不是一个简单的过程。例如发电机的端电压随负载而变化，必须有稳定电压的设备，才能符合用户的要求。又如高压输电系统中出现短路时，数以万安计的电流可以将电气设备烧坏，所以必须有自动切断故障的自动装置。电动机在起动时会产生较大的起动电流，影响电力系统的稳定，也要设法弥补这一缺点。在电力拖动与自动控制系统中，需要电动机有很好的调速性能，对起动、制动、反向和调速等能简便而迅速地控制，并且要求对生产过程能进行检测和自动控制。总之，从发电机到负载之间还必须有许多其他电气设备的配合，才能顺利实现电能的生产和应用。而凡是对电能的产生、输送和应用起控制、保护、检测、变换与切换及调节作用的电气器具，统称为电器。

由于电器所起的作用不同，应用的条件不同，因此它的外形、尺寸、重量均不一致。以重量来说，一些按钮开关只有几十克重，而高压断路器可达  $10^4\text{kg}$  以上。就外形尺寸来说，一些继电器小巧玲珑，可置于掌上，而某些断路器则高达十余米。从结构来说，简单的如刀开关等不过几个零件，复杂的如断路器其零件数以千计。

除电机与变压器外，电器是电气化和自动化的基本工具。电器元件与电器成套装置是发电厂、电力网、工矿企业、农林牧副渔业和交通运输业以及国防军事等方面的重要技术装备。电器在电力输配电系统、电力传动和自动控制设备中起着重要作用。据估计每新增  $10^4\text{kW}$  的发电容量，就需要大小高压电器 500~600 台以上，各种低压电器元件 6 万件左右。在大型现代化成套设备中，例如一套 1700mm 的连轧机，就装有低压电器元件上千个品种，上万个元件。

电器有各种分类方法。

### （一）按照电器的用途分

1. 电力系统用电器 如高压断路器、高压熔断器、电抗器、避雷器、低压断路器、低压熔断器等。除电抗器和避雷器外，对这类电器的主要技术要求是通断能力强、限流效应好、电动稳定性和热稳定性高，操作过电压低和保护性能完善等。

2. 电力拖动自动控制系统用电器 如接触器、起动器、控制器、控制继电器等。对这类电器的主要技术要求是有一定通断能力、操作频率高、电气和机械寿命长等。

3. 自动化通信用弱电电器 如微型继电器、舌簧管、磁性或晶体管逻辑元件等。对这类电器的主要技术要求是动作时间快、灵敏度高、抗干扰能力强、特性误差小、寿命长和工作可靠等。

### （二）按电压高低、结构和工艺特点分

1. 高压电器 额定电压 3kV 及以上的电器，如高压断路器、隔离开关、负荷开关、接地短路器、高压熔断器、电压互感器、电流互感器、避雷器、电抗器等。其电压有 3、6、

10、15、20、35、63、110、154、220、330、500kV 及以上等级。

2. 低压电器 额定电压交流 1200V、直流 1500V 及以下的电器，称为低压电器。如低压断路器、刀开关、转换开关、接触器、起动器、控制器、继电器、低压熔断器、电阻器、变阻器、主令电器等。其电压等级一般为交流 1140V、660V、380V、220V 及 36V 等。直流 1500V、1000V、800V、440V、220V、110V、48V 及 36V 等。

3. 自动电磁元件 阀用电磁铁、电磁离合器、磁放大器、磁性逻辑元件、微型继电器、传感器和自动电压调节器等。

4. 成套电器和自动化成套装置 高压开关柜、低压开关柜、电力用自动化继电保护屏、可编程序控制器、半导体逻辑控制装置、无触点自动化成套装置等。

### （三）按电器的使用场合及工作条件分

1. 一般民用电器 适用于大部分工业企业环境，无特殊要求。

2. 特殊工业企业用电器 适用于矿山、冶金、化工等特殊环境，例如矿用防爆电器和化工用电器等。

3. 农用电器 适合于农村环境而专门生产的电器。

4. 热带用电器和高原用电器 适合于热带、亚热带地区以及高原山区而派生的电器。

5. 牵引、船舶、航空等电器 如船用电器，电气铁道用的牵引电器、航空电器以及汽车、拖拉机用电器等。

### （四）根据电器执行功能分

1. 有触点电器 电器通断电路的执行功能由触头来实现的电器。

2. 无触点电器 电器通断的执行功能不是由触头来实现，而是根据开关元件输出信号的高低电平来实现，如饱和电抗器、晶闸管接触器及晶闸管起动器等。其特点为无弧通断电路、动作时间快、电寿命及机械寿命长、无噪声等。

无触点电器目前还不能完全切断电流，不如有触头电器那样对电源起隔离作用。对此，须引入转换深度的概念。所谓转换深度就是断开（或截止）时执行电路的电阻值与接通（或导通）时执行电路的电阻值之比，可用  $h$  表示。对有触点电器  $h$  约为  $10^{10} \sim 10^{14}$ ，而无触点电器  $h$  约为  $10^4 \sim 10^7$ 。

3. 混合式电器 无触点与有触点互相结合相辅相成的电器新品种，它有着广阔的发展前途，如低压断路器采用半导体脱扣器，高压断路器应用微型计算机控制的智能断路器等。

有触点电器主要问题是通断过程的电弧和磨损、电气和机械寿命短；而无触点电器的主要问题是压降大和发热温升高。如果通断过程由晶闸管无弧转换来完成而断开状态由触头来实现，则可以取长补短，提高电器性能。

## 第二节 电器在电力系统及电力拖动装置中的地位和作用

由发电厂、电力网及电能用户组成的系统称为电力系统。电力网是输送、交换和分配电能用的，它由变电所和各种不同电压等级的电力线路所组成。变电所是变换电压和交换电能的场所，由电力变压器和配电装置所组成。

电力系统的中心环节是发电厂。我国发电厂主要有火力发电厂和水力发电厂两类。火力

发电厂是利用过热蒸气推动汽轮机旋转以带动发电机发电。水力发电是利用水的冲击力推动水轮机旋转，由水轮机带动发电机发电。根据利用能源的不同，尚有其他类型的发电厂，如核电厂，地热发电厂、潮汐发电厂，以及风力发电、沼气发电、太阳能发电等。

发电厂与用户之间有一定距离，通常采用架空输电线或电缆将电能从发电厂送到用户。要将电能送到远处，必须升高电压后再输出，因为当输送功率一定时，电压增高，电流可减小，则电线的线径可以选择小些，以节省大量有色金属，同时线路的有功损耗及电压损耗也降低了。例如，一台汽轮发电机，额定电压为 10.5kV，或水轮发电机，额定电压 13.8kV，若需送电到 100km 以外，应将电压升高到 110kV。若要送电到 200~300km 处，需将电压升为 220kV。粗略估计，35kV 能送电至 40~50km，10kV 能送电至 15~20km，380V 仅能送电 1.5km 左右。

发电厂生产的电能，经过变压器升高电压以后，经输电线送达变电所，在变电所一般要将 110kV 以上的电压由降压变压器降压，变为 35kV，35kV 及以下的线路均属于配电线路。由 35kV 送电到用户之前，需再次降压为 10kV 然后以 10kV 配电线路供电到各用户。各用户采用配电变压器将电压降为 380/220V 以后供电到各车间及住宅区（一般动力线路采用 380V 照明线路采用 220V）。

电力系统的接线图按其电力系统的功用可分两种，一种表示电力输送及分配的电路，称为一次接线或主接线图，凡与其直接相连的电气设备，称为一次设备或一次元件。另一种是表示控制、指示、监视、测量和保护一次设备运行的接线图，称为二次接线图或控制线路，凡与其直接相连的电气设备，称为二次设备或二次元件。

下面举例介绍两种类型的接线图，可以看出电器在线路中的地位和作用。

图 0-1 介绍车间用高压配电所的主接线图。这是一种最常见的高压侧无母线的主接线图。由 6~10kV 架空进线，经高压隔离开关 QS 和高压断路器 QF 送到电力变压器 TM，变压器将 6~10kV 高压降为 400/230V 低压后，进入低压配电室，经低压总开关（此处采用低压断路器）将电能送达低压母线。再经过低压刀开关 S 和低压熔断器 FU 由低压配电线送到用电设备。

高压断路器可以接通或切断负荷电流，

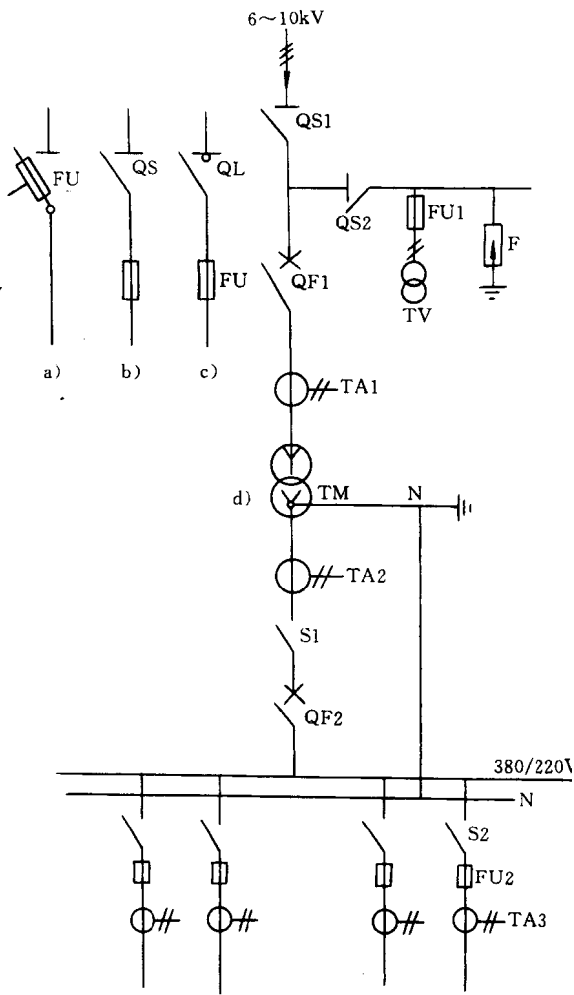


图 0-1 高压配电所主接线图

- a) 采用跌落式熔断器 b) 采用隔离开关—熔断器
- c) 采用负荷开关—熔断器 d) 采用隔离开关—断路器
- FU—熔断器 S—刀开关 F—避雷器 QF—断路器
- QS—高压隔离开关 QL—负荷开关 TA—电流互感器 TV—电压互感器 TM—电力变压器

并且在电路发生过载或短路时，可以自动跳闸切断电路，起过载及短路保护的作用。断路器是高压电器中最重要的一类电器。

隔离开关是电力系统中应用最多的一种高压开关设备，由于它没有灭弧装置，只能用它隔离电源，建立必要的绝缘间隙，以便检修后面的电气设备。但不能用它接通或切断负荷电流。

当检修线路时，应先断开高压断路器，然后才允许将隔离开关打开。当检修完毕要恢复通电时，应先合上隔离开关，然后将断路器合闸。总之，隔离开关与断路器配合使用时，应有机械的或电气的连锁，以保证上述操作顺序的正确性。

高、低压侧均装有电流互感器 TA，高压侧还装有电压互感器 TV，用它们可以将测量仪表、继电器和自动调整装置接入线路，以达到测量安全，使仪表、继电器便于工作的目的。例如，电流互感器的二次线圈（额定电流 5A）与电压互感器的二次线圈（额定电压 100V）分别接到电度表的电流线圈和电压线圈，以便计量电损耗。电流互感器二次线圈还接通电流表，以便测量各相电流，并供电给电流继电器以实现过电流保护。电压互感器的二次线圈接到电压表以便测量电压，并供电给绝缘监察用的仪表。

为了防止雷电波沿架空线侵入变电所，保护电力系统和电气设备的绝缘，使其不受过电压的损害，在进线处安装避雷器 F。

当变压器 (320kV·A 以下) 装在户外或杆上时，高压侧采用跌落式熔断器，如图 0-1a 所示。跌落式熔断器不能带负荷操作，仅可以通断一定容量的变压器空载电流。当发生短路故障时，熔管中熔体熔断，熔管的一端绕轴下坠，电弧被气吹熄灭。可起短路保护作用。

若变压器装在户内，变压器容量在 320kV·A 以下，高压侧也可采用隔离开关串联熔断器方案，如图 0-1b 所示。隔离开关不能带负荷操作。

当变压器容量在 500~1000kV·A 范围内，或者变压器需经常通断时，高压侧可采用负荷开关串联熔断器方案，如图 0-1c 所示。在 c 方案中，负荷开关不能切断短路电流，仅可切换负荷电流，熔断器作短路保护，现行环网柜多采用此方案。

当变压器容量在 1000kV·A 及以上范围，多采用隔离开关串联断路器方案，如图 0-1d 所示。由于高压断路器具有过载及短路保护的性

能，并可以实现自动重合闸，使恢复供电时间大为缩短。

图 0-2 为三相笼型异步电动机直接起动控制线路。由三相交流电源经刀开关 S、熔断器 FU、接触器 KM 的常开触头、热继电器 FR 的热元件接到异步电动机 M 定子绕组的电路，称为主电路。

由按钮开关 SB1（动断按钮）SB2（动合按钮）、接触器线圈 KM 和其动合辅助触头 KM、热继电器的动断触头 FR 组成的电路、称为控制电路。

起动时，首先合上低压三相刀开关 S，

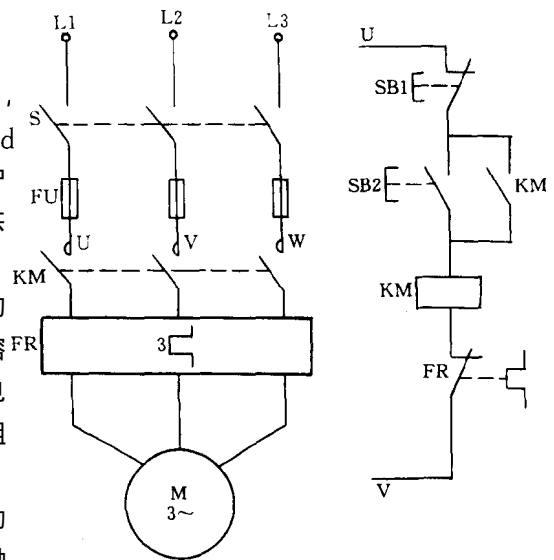


图 0-2 三相笼型异步电动机的控制线路图  
KM—接触器 FR—热继电器 SB—按钮 S—刀开关 FU—熔断器 M—电动机

引入电源。按下起动按钮 SB2，交流接触器 KM 的电磁线圈接通电源，三对主触头闭合，电动机 M 起动运转。与此同时，并联在按钮 SB2 的两端的辅助触点 KM 也闭合，这样当手松开而按钮 SB2 自动复位后，接触器 KM 的线圈也不会断电，所以称此动合辅助触点为“自锁（自保）”触点。此种线路具有自锁功能，同时具有失压保护和过载保护的功能。

失压保护：电动机运行时，遇到电源临时停电，在恢复供电时，如果未加防范措施而让电动机自行起动，很容易造成设备或人身事故。采用自锁控制线路，由于自锁触点和主触点在停电时一起断开，控制电路和主电路都不会自行通电。所以在恢复供电后，如果不按下起动按钮 SB2 电动机就不会自行起动。

过载保护：电动机在运行过程中，如果由于过载、操作频繁、断相运行等原因都会使电动机电流超过额定值，将引起电动机过热。串接在主电路中的热继电器 FR 的热元件因受热而弯曲，产生推力，使串联在控制回路中的 FR 的动断触点断开，切断控制回路，KM 线圈断电，主触点断开，电动机 M 停转。

热继电器的热元件有热惯性，即使通过它的电流超过额定值的好几倍，也不会瞬时动作。因此，它仅能作为过载保护用，对于电动机的短路保护，还要靠熔断器 FU 完成。

要电动机停止运转，按下停止按钮 SB1，控制线路断电，接触器 KM 的电磁线圈失电，接触器的衔铁打开，主触点即断开，电动机停止运行。

以上简单介绍了高、低压电器在电力线路中的地位和作用，可以对电器功能及其与电力系统的联系有初步概念。

随着改革开放进一步深化，国民经济上新台阶。农业机械化及工业自动化程度将不断提高，电器的使用范围日益扩大，对品种、产量及质量的要求日益提高，电器制造业已成为国民经济建设中重要的一环。

### 第三节 蓬勃发展中的我国电器工业

我国古代劳动人民在科学技术上有不少发明创造，在电磁学及自动学方面，亦有悠久的发展历史。远在公元前 300 年，已经利用天然磁石作为指南针。公元 1500 年左右，就能利用继电器性质的触发元件制成自动爆炸的地雷。

解放以前，我国电机与电器工业十分薄弱。1949 年以前所造电机容量不超过 20kW，变压器容量未超过 2000kV·A，更没有独立的电器工业。仅在电机厂中仿制一些小型低压电器，如刀开关及熔断器等，以及 6.6kV 以下，断流容量 100MV·A 左右的户内式高压断路器。用它们不能配全起码的发电厂与变电所或普通机床与卷扬机等所需的电器设备。

1949 年以来，我国电机与电器工业迅速发展。1975 年刘家峡黄河水电站建立，厂区内有我国自制的 300MW 双水内冷发电机组。1986 年葛洲坝电厂安装了我国制造三相 360MV·A、500kV 自耦有载调压联络变压器和 300MV·A、500kV 三相双绕组升压变压器。高压电器制造业已具有自行开发、设计制造、成批生产和成套供应 500kV 及以下各种电压等级系列化产品的能力。低压电器方面，1957 年已完成最常用的 100 多个系列 200 多种产品，基本上满足了当时发电厂、变电所、冶金工业、机器制造业及交通运输等方面的需要。至 1985 年，全国生产的低压电器共有 13 大类、359 个系列、1242 个品种，其中达到国际 70~80 年代水平的品种约占 17%。

我国经济建设在发展，电网容量在增大（到本世纪末，装机容量将达 31 万 MW，年发电量将达 12000 亿 kW·h 以上），电力传动技术在革新，对电器提出越来越高的要求。例如，对低压配电电器要发展大容量开关和限流式电器及选择性断路器，完善保护特性，提高分断能力。对低压控制电器，要继续提高使用寿命和操作频率，缩小产品体积和减轻重量。在继续发展有触点电器的同时，发展无触点电器，及采用两者组合的混合控制系统。对于高压电器，要求发展大容量、快速动作、断口电压高的新系列产品，努力发展组合电器及成套配电装置。SF<sub>6</sub> 电器已成为高压或超高压领域的发展方向；在中压领域中，10kV 与 35kV 的配电用断路器也由原来单一的品种——少油断路器，迅速向真空断路器及 SF<sub>6</sub> 断路器及其开关柜方向发展，为配电设备无油化创造条件。

## 第四节 本课程的任务

电器学课程的主要任务是使学生了解电器的理论基础，初步掌握常用电器的结构、工作原理、性能和使用方法。具体任务如下：

1. 掌握电器基础理论知识——包括电动力、发热、电弧、电接触、电磁铁的理论基础及基本计算方法。
2. 通过对低压电器典型产品的结构和性能的分析，及选用方法的介绍，掌握各类电器的用途、结构和性能特点，达到“举一反三”的效果。
3. 对常用高压电器作一般性介绍。
4. 通过实验课程，使学生具有测试常用电器技术参数及对电器进行操作的初步能力。

# 第一篇 电器原理

## 第一章 电器的电力

### 第一节 概述

电力网发生短路时，其短路电流远大于额定电流，电器会承受由短路电流所产生的巨大电力，所以电器必须具有足够的机械强度，以免遭受电力的破坏。

电器在电力作用下，其有关部分能够不损坏或不永久变形的性能，称为电动稳定性，它通常以动稳定电流表示。所谓动稳定电流，又称峰值耐受电流，是指在规定的使用性能条件下，开关电器或其他电器在闭合位置上所能承受的电流峰值。

电力是指载流导体在磁场中所受的力。实验证明，凡位于磁场中的载流导体，必定受到力的作用。若磁场是均匀的，电流与磁感应强度  $B$  的正方向之间的夹角为  $\beta$ ，如图 1-1 所示，电流为  $I$ ，导体长度为  $l$ ，则导体受到的电力（单位为 N）为

$$F = BIl \sin \beta \quad (1-1)$$

式中  $I$ ——流过导体的电流（A）；

$B$ ——磁感应强度（T）；

$l$ ——导体的长度（m）。

若  $\beta = 90^\circ$ ，即导体与  $B$  垂直，则所受电力为

$$F = BI \quad (1-2)$$

电力的方向可以用安培左手定则确定，即将左手平伸，让拇指与其余四指垂直，手心迎着磁感应强度  $B$ ，若电流与直伸的四指同方向，则电力方向与大拇指所指方向相同。

关于电力现象，现举例如下：

例 1，两平行载流导体或两个共轴线平行放置的线圈，若它们的电流方向相同，导线间或线圈间产生吸力，若电流方向相反，则导线间或线圈间产生互相排斥之力。

如图 1-2a 中，两平行导体 A 与 B 平放在纸面上，流过的电流分别为  $I_1$  与  $I_2$ ，导体 A 流过电流时，在其周围产生磁场，其磁感应强度  $B$  的方向可用右手螺旋定则确定。对直导线，用右手伸直的大拇指顺着直导线中电流方向，则弯曲的四指就表示磁力线的方向。即电流  $I_1$  产生的磁场呈同心圆形状，电流  $I_1$  在导体 B 处产生的磁感应强度  $B_1$  的方向垂直于导体 B，磁力线进入纸面，用“ $\times$ ”表示。依左手定则可判断 B 导体所受电力  $F_2$  方向如图所示。同理，电流  $I_2$  在导体 A 处产生磁感应强度  $B_2$ ，其方向垂直于 A 导体，磁力线从纸面出来。用“ $\cdot$ ”表示，由左手定则可判断电力  $F_1$  的方向如图所示。

我们也可以用法拉第对磁场中电磁力的假设来解释。法拉第认为磁场是物质的，磁力线

是具有弹性的实体线，它具有纵向的张力以尽量拉紧，缩短其长度。并且具有沿其侧面法线方向上的侧压力，这个力趋向于把磁通管扩大而变宽。

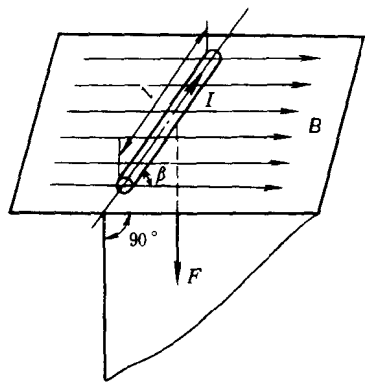


图 1-1 磁场对载流导体的作用

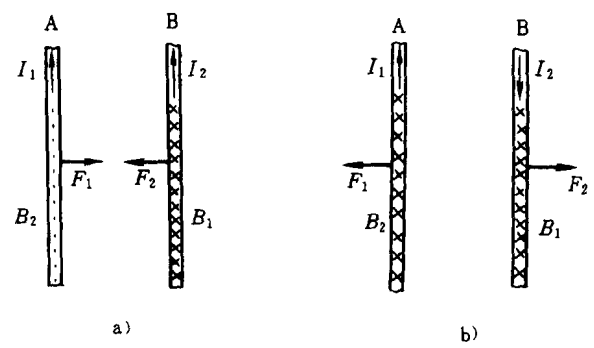


图 1-2 载流导体间电动力的方向

当两平行导体的电流方向相同时，两个导体被包围在公共的磁力线中，这些线所固有的纵向拉力形成了两导体间彼此互相吸引之力。当两导体的电流方向不同时，在导体之间的空间里磁力线的密度大于其外部，这些磁力线的侧压力在磁力线密度高的地方比较大，因此合成力将使带有不同电流方向的导体间产生互相排斥之力。

两个同轴线且平行放置的线圈如图 1-3 所示，图 1-3a 中两线圈通过的电流方向相同，根据法拉第的假设，两线圈间产生吸引力。图 1-3b 中所示电流异向，两线圈间产生互相排斥之力。也可以用磁极极性相同则互相排斥的观点来解释排斥力。

例 2，环形线圈或 U 形回路，通电流时受向外扩张之力。

如图 1-4a，环形线圈中电流方向如箭头所示，根据右手螺旋定则，环形线圈内磁力线是垂直地进入纸面的，用“×”表示。由于圈内磁力线具有横向侧压力。因而线圈受有沿径向向外扩张之力。

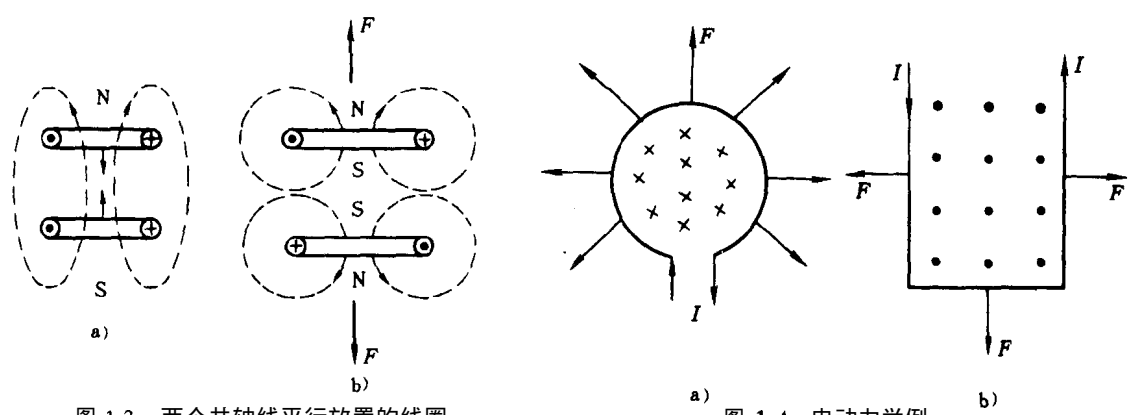


图 1-3 两个共轴线平行放置的线圈  
a) 电流同向 b) 电流异向

图 1-4 电动力举例  
a) 环形回路 b) U 形回路

同理，根据图 1-4b 电流方向，磁力线垂直地从纸面出来，可用“·”表示。磁力线在 U 形回路内密度较大，其横向侧压力使 U 形回路承受向外扩张之力。图中 F 表示力，力的方向如箭头所示。

电动力对电器有一定危害性，当短路电流超过 10kA 时，电动力就很可观。例如在巨大短路电流作用下，母线所承受的电动力可达几百或几千牛顿，若设计不合理，往往会使母线变形或它与绝缘支座的接头松脱，如图 1-5 所示。

图 1-6 表示隔离开关的导电回路呈 U 形布置，当短路电流通过时，所产生的电动力倾向于使刀开关打开，产生误动作。由于隔离开关无灭弧装置，当产生电弧后往往烧坏触头，甚至影响电力系统的安全运行。通常利用机械方法或“磁锁”防止隔离开关误动作。

图 1-7 表示收缩电动力。因流经动、静触头间接触点的电流线先收缩后又散开，散开后上、下触头间有些电流线几乎是互相平行的，因而使动、静触头产生互相排斥之力，称为收缩电动力。收缩电动力较大时触头会分开，其间产生电弧，使触头烧损或熔焊。为了减小这种损坏，可以合理设计触头结构及触头弹簧压力。

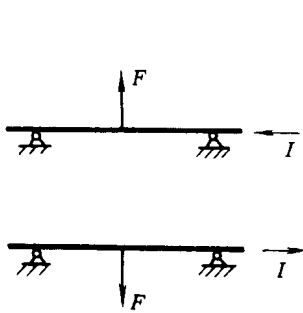


图 1-5 母线间电动力

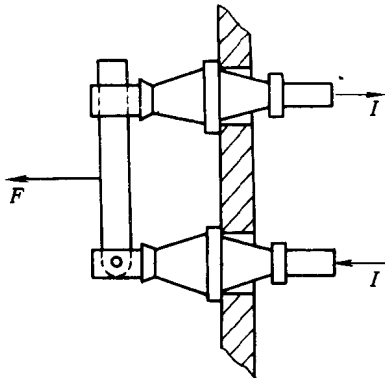


图 1-6 隔离开关产生误动作

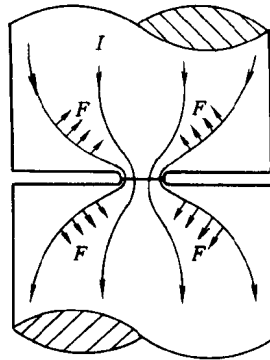


图 1-7 触头的电流线收缩所引起的电动力

事物是一分为二的，在某些场合，也可以创造条件，利用电动力产生良好的效果。

#### 一、利用电动力作用，增强电器触头间的接触压力

如图 1-8 所示，将静触头分成两平行导电片，当流过电流时所产生的电动力  $F_c$  将动、静触头夹紧，促使接触良好。虽然触头间收缩电动力  $F_0$  有使动、静触头分离的倾向，由于正常工作时  $F_0$  小于  $F_c$ ，影响不大。

#### 二、磁吹灭弧

如图 1-9 所示，当电流流经动、静触头及串联的磁吹线圈时，由于磁性夹板 5 中磁场方向与触头间电弧的轴线垂直，根据左手定则，电弧受电动力向上运动，并转移到引弧角 3 上燃烧，最后被拉长而熄灭。

显然，当电流方向改变时，由于磁场方向也跟着改变，所以电弧还是受向上的电动力。

其他方面，利用电动力的例子甚多，例如  $\text{SF}_6$  磁旋弧式断路器就是利用电弧电流产生磁场，驱动电弧作旋转运动，进行冷却灭弧。在电器产品结构中还会遇到各种运用电动力的实例。

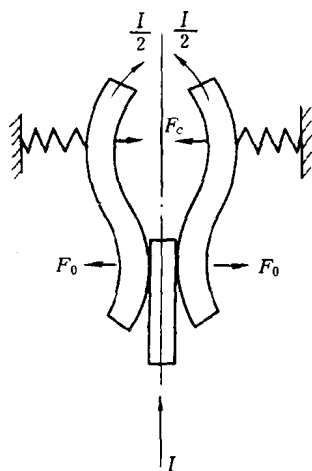


图 1-8 利用电磁补偿增强接触压力

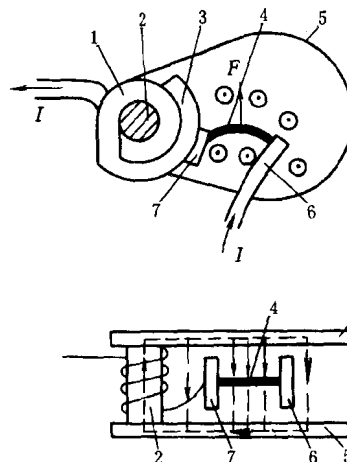


图 1-9 磁吹灭弧工作原理

1—磁吹线圈 2—铁心 3—引弧角 4—电弧 5—磁性夹板  
6—动触头 7—静触头

## 第二节 计算电动力的两种基本方法

计算电动力有两种基本方法，即能量平衡法与比奥—沙瓦定律法。用能量平衡法计算时必须先知道不同回路的自感、互感等，有一定局限性。用比奥—沙瓦定律法，可求得不同形状的载流导体在不同的相互位置上所承受的电动力。

### 一、用能量平衡法计算电动力

能量平衡法计算电动力的原理是，任一回路内电动力  $F$  所作的功等于该回路中所贮存磁能的变化，即

$$dW = Fdx$$

式中  $dW$ ——系统磁能的变化量；

$dx$ ——导体受电动力作用在  $x$  方向产生的单元位移。

由此得出，作用在回路中导体上的电动力  $F$  为

$$F = \frac{dW}{dx} \quad (\text{N}) \quad (1-3)$$

若单回路中电流为  $I$ ，回路电感为  $L$ ，则贮存于磁场中的能量  $W$  为

$$W = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1-4)$$

式中  $L$ ——自感(H)；

$I$ ——电流(A)。

两个相邻的载流导体回路中，贮存于磁场中的总能量为

$$W = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + M I_1 I_2 \quad (1-5)$$

式中  $L_1$ 、 $L_2$ ——回路 1 与 2 的自感(H)；

$M$ ——两回路间的互感(H)；

$I_1$ 、 $I_2$ ——回路 1 和 2 中的电流(A)。

当载流导体回路的自感和互感为已知时，利用式 (1-3) 计算电力就比较方便，即

$$\left. \begin{aligned} F &= \frac{dW}{dx} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{dx} \quad (\text{N}) \\ F &= \frac{dW}{dx} = \frac{1}{2} I_1^2 \frac{dL_1}{dx} + \frac{1}{2} I_2^2 \frac{dL_2}{dx} + I_1 I_2 \frac{dM}{dx} (\text{N}) \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

式 (1-6) 中载流导体中电流不随  $dx$  而变化。

设长度为  $l$  的两平行圆导线构成一回路，两导线轴线间距离为  $s$ ，导线的半径为  $R$ ，且  $s \gg R$ ， $l \gg s$ 。回路自感为

$$L = l \left( 4 \ln \frac{s}{R} + 1 \right) \times 10^{-7} (\text{H})$$

则导线间电力为

$$F = \frac{dW}{dx} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{ds} = 2 I^2 \frac{l}{s} \times 10^{-7} (\text{N}) \quad (1-7)$$

关于电力  $F$  的方向，可依“电流同向相吸，异向相斥”的准则判断。即两导体的电流方向相同时，导体间产生互相吸引之力。电流方向不同时，产生斥力。

## 二、用比奥—沙瓦定律计算电力

设有载流长导线置于真空中，电流  $I$  方向如图 1-10 所示。在导线上取长度单元  $dl$ ，取单元电流  $I dl$ ，根据比奥—沙瓦的实验，得知元线段  $dl$  内的电流在  $P$  点所产生的磁感应强度  $dB$  的大小为

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \frac{I dl \sin \alpha}{r^2} \right) \quad (\text{T}) \quad (1-8)$$

式中  $\mu_0$ ——真空磁导率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (\text{H/m})$ ；

$\alpha$ ——单元电流  $I dl$  与电流起始点到  $P$  点的矢径  $r$  之间的夹角；

$l$ ——导线长度 (m)。

式 (1-8) 即为比奥—沙瓦定律。

磁感应强度  $dB$  的方向垂直于单元电流  $I dl$  与矢径  $r$  组成的平面，可用右手螺旋定则决定。从图 1-10 看出，直导线上各个单元电流所产生的  $dB$  均可用比奥—沙瓦定律求得。若欲求长度为  $l$  的载流导体在  $P$  点所产生的总磁感应强度  $B$ ，可沿导线全长积分，即

$$B = \int_l dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_l \frac{dl}{r^2} \sin \alpha$$

### (一) 两个不等长而平行的导体间的电力

如图 1-11 所示， $AB$  与  $CD$  是两根不等长圆截面平行导体，长度分别为  $l_1$  与  $l_2$ ，电流分别为  $I_1$  与  $I_2$ ，其轴线间距离为  $s$ ，今求两导体间电力。

在长度元  $dx$  处，由于长度元  $dy$  流过电流  $I_1$  所产生的磁感应强度为

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \frac{I_1 dy \sin \alpha}{r^2} \right)$$

在  $dx$  处，由于导体  $AB$  全长  $l_1$  流过电流  $I_1$  所产生的磁感应强度的方向垂直于两导体所形成的平面，其大小为

$$B = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi} \int_{l_1} \frac{\sin \alpha}{r^2} dy$$

取  $y$  的正方向与  $I_1$  的方向一致，将  $r$  与  $y$  均化为  $\alpha$  的函数。由图 1-11 知

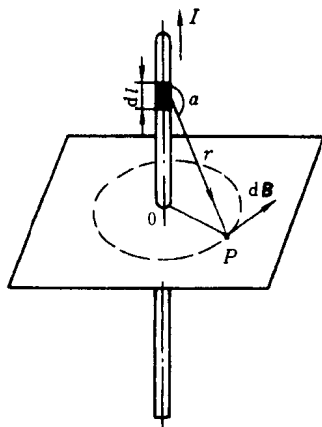


图 1-10 比奥—沙瓦定律示意图

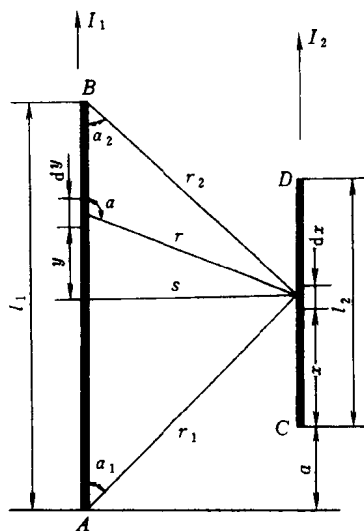


图 1-11 不等长二平行导体

$$y = -s \cot \alpha, \quad dy = \frac{s d\alpha}{\sin^2 \alpha}$$

$$r = \frac{s}{\sin \alpha}$$

代入上式得

$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0 I_1}{4\pi} \int_{l_1} \frac{\sin \alpha}{r^2} dy = \\ &= \frac{\mu_0 I_1}{4\pi} \int_{\alpha_1}^{\pi - \alpha_2} \frac{\sin \alpha}{s} d\alpha = \\ &= -\frac{\mu_0 I_1}{4\pi s} [\cos \alpha]_{\alpha_1}^{\pi - \alpha_2} = \\ &= \frac{\mu_0 I_1}{4\pi s} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) \end{aligned}$$

作用于长度元  $dx$  上的电力为

$$dF = I_2 B dx$$

由导体  $AB$  的电流  $I_1$  在导体  $CD$  全长  $l_2$  上所产生的总电力  $F$  为

$$F = \int_{l_2} I_2 B dx = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi} \int_0^{l_2} \frac{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2}{s} dx \quad (1-9)$$

令

$$K_c = \int_0^{l_2} \frac{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2}{s} dx$$

式中  $K_c$ ——回路系数，它是无量纲系数。

并将  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  (H/m) 代入式 (1-9)，得

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi} K_c = K_c I_1 I_2 \times 10^{-7} (\text{N}) \quad (1-10)$$

今求二不等长平行载流导体的回路系数如下，在图 1-11 中

$$\cos \alpha_1 = \frac{a + x}{\sqrt{s^2 + (a + x)^2}}$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{l_1 - a - x}{\sqrt{s^2 + (l_1 - a - x)^2}}$$

$$\begin{aligned} K_c &= \frac{1}{s} \int_0^{l_2} \left[ \frac{l_1 - a - x}{\sqrt{(l_1 - a - x)^2 + s^2}} + \frac{a + x}{\sqrt{(a + x)^2 + s^2}} \right] dx = \\ &= \frac{1}{s} \left[ \sqrt{(a + x)^2 + s^2} - \sqrt{(l_1 - a - x)^2 + s^2} \right] \Big|_0^{l_2} = \\ &= \frac{1}{s} \left[ \sqrt{(a + l_2)^2 + s^2} + \sqrt{(l_1 - a)^2 + s^2} - \sqrt{s^2 + a^2} - \sqrt{(l_1 - a - l_2)^2 + s^2} \right] = \\ &= \frac{1}{s} [AD + BC - AC - BD] \end{aligned}$$

将上式代入式 (1-10) 得

$$F = \frac{1}{s} [AD + BC - AC - BD] I_1 I_2 \times 10^{-7} (\text{N})$$

当  $l_1 = l_2 = l$ , 则  $a = 0$ , 对两根有限长平行导体, 则

$$\begin{aligned} K_c &= \frac{1}{s} [2\sqrt{s^2 + l^2} - 2s] = \\ &= \frac{2l}{s} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{s}{l}\right)^2} - \frac{s}{l} \right] \end{aligned}$$

$$\text{则} \quad F = \frac{2l I_1 I_2}{s} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{s}{l}\right)^2} - \frac{s}{l} \right] \times 10^{-7} (\text{N})$$

当  $s \ll l$ , 则  $\sqrt{1 + \left(\frac{s}{l}\right)^2} \approx 1$ ,  $\frac{s}{l} \approx 0$

若  $I_1 = I_2 = I$

$$\text{则} \quad F = 2I^2 \frac{l}{s} \times 10^{-7} (\text{N}) \quad (1-11)$$

式中  $F$ ——电动力 (N);

$l$ ——导体长度 (m);

$I$ ——电 流 (A)。

上式与能量平衡法求得的式 (1-7) 相同。

上面研究的是又细又长的圆截面导体, 这种情况下可认为导体的磁场分布与电流沿导体轴线流动时的磁场分布相同。

但是, 对于较大尺寸的圆截面以及矩形截面等导体, 由于电流是分布在导体截面积上的, 导体的截面形状对电动力有一定影响, 此时应在式 (1-10) 中引入截面修正系数  $\lambda$ , 即

$$F = K_c \lambda I_1 I_2 \times 10^{-7} = K I_1 I_2 (\text{N}) \quad (1-12)$$

式中  $I_1$ 、 $I_2$ ——导体 1 与 2 中的电流 (A);

$K$ ——常数,  $K = K_c \lambda \times 10^{-7}$ ;

$K_c$ ——导体 1 与 2 间的回路系数, 其数值与导体形状、尺寸及导体间的相互位置等有关。可查阅《电机工程手册》。

$\lambda$ ——截面积修正系数。它与导体截面尺寸及导体间相互距离有关，可查图 1-12。当

截面的周长远小于导体间距离时，即  $\frac{a-b}{b+h} > 2$  时，则  $\lambda \approx 1$ 。

## (二) 电动力沿导线上各点的分布

应用比奥—沙瓦定律，不但可以求出作用在导体上总的电动力，而且可以求出沿导线各点单位长度所受电动力，以便进行机械强度验算。若沿导体长度平均取若干点，求得各点处单位长度所受电动力，即可绘出电动力沿导体长度的分布曲线，设计电器时可根据此曲线确定有关部件的机械强度。

欲求图 1-13a 两不等长平行导体之一  $l_2$  上各点单位长度承受的电动力  $f$ ，可由式 (1-9) 得

$$f = \frac{dF}{dx} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi s} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) = \frac{I_1 I_2}{s} \left( \frac{h}{r_1} + \frac{l_1 - h}{r_2} \right) \times 10^{-7} (\text{N/m}) \quad (1-13)$$

当导体按图 1-13b 布置时

$$f = \frac{I_1 I_2}{s} \left( \frac{l_1}{r_1} \right) \times 10^{-7} (\text{N/m})$$

若导体按图 1-13c 布置，则

$$f = \frac{I_1 I_2}{s} \left( \frac{h}{r_1} + \frac{l_1 - h}{r_2} \right) \times 10^{-7} (\text{N/m})$$

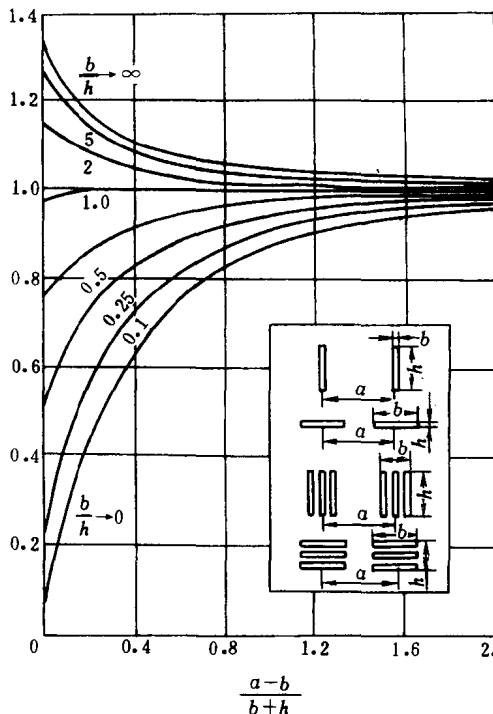


图 1-12 矩形截面导体的截面积修正系数  $\lambda$

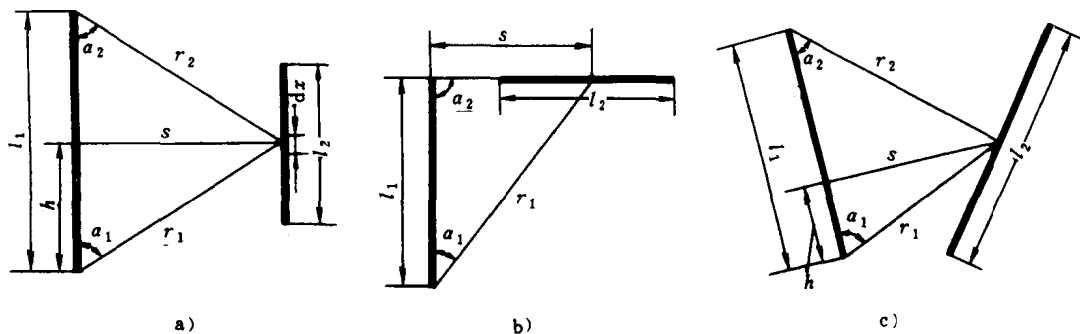


图 1-13 导体作不同形状布置时求电动力

关于作用力的方向，可仍按左手定则判断。

## 第三节 正弦电流产生的电动力

### 一、单相交流电动力

前面所述计算电动力的方法，同样适用于导体通过交变电流时所产生电动力的计算。所不同者仅是交流电流是随时间变化的，因此由它所产生的电动力也是随时间而改变的见图

1-14。此时电流取瞬时值，计算所得电动力也是瞬时值。

若电流为正弦交流， $i = I_m \sin \omega t$ ，代入式（1-12），可得电动力为

$$\begin{aligned} F &= K(I_m \sin \omega t)^2 = \\ &= KI_m^2 \left( \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right) = \\ &= \frac{1}{2} KI_m^2 - \frac{1}{2} KI_m^2 \cos 2\omega t = \\ &= F' + F'' \end{aligned}$$

由上式知，单相交流电动力随时间作脉动变化，电动力大小变化而方向不变，脉动频率为电流频率的两倍。当电流为零时，电动力亦为零。电流为最大值时，电动力亦为最大值。电动力最大值为

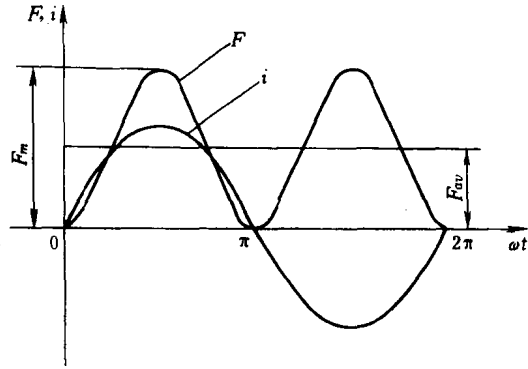


图 1-14 单相交流电动力曲线

$$F_m = \frac{1}{2} KI_m^2 - \frac{1}{2} KI_m^2 \cos \pi = KI_m^2 \quad (\text{N})$$

由图 1-14 可见，电动力的平均值为

$$F_{av} = \frac{1}{2} KI_m^2$$

在单相回路中，两导线的电流方向相反，所以导体间产生互相排斥的电动力。

## 二、三相交流电动力

通常三相导线在同一平面内，设相间距离为  $s$ ，导线长度为  $l$ ，且三相负载平衡，则

$$i_1 = I_m \sin \omega t$$

$$i_2 = I_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$i_3 = I_m \sin(\omega t + 120^\circ)$$

（一）作用于 A 相导体之力（为 B 相及 C 相共同作用于 A 相的电动力之和）

如图 1-15 所示的三相直列导体，B 相作用于 A 相的电动力为

$$\begin{aligned} F_{AB} &= Ki_1 i_2 = KI_m^2 \sin \omega t \sin(\omega t - 120^\circ) = \\ &= K' \sin \omega t \sin(\omega t - 120^\circ) \end{aligned}$$

式中  $K' = KI_m^2$ 。

根据图 1-15 所规定电流  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  的方向，当某瞬间  $i_1$  与  $i_2$  流过导体的方向相同两导线产生互相吸引之力。今规定 A 相被吸向 B 相之力为正方向，令此时  $F_{AB}$  为正值。

又因 A 相与 C 相距离为 A 相与 B 相距离之两倍，所以 C 相作用于 A 相之力为

$$F_{AC} = \frac{1}{2} Ki_1 i_3 = \frac{1}{2} K' \sin \omega t \sin(\omega t + 120^\circ)$$

按图 1-15 所示，今规定  $i_1$  与  $i_3$  方向相同时，A 与 C 导体间产生互相吸引之力为正值。

按图 1-15 所示电流方向，作用于 A 相导体上电动力之和为

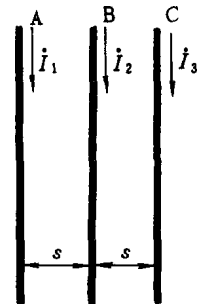


图 1-15 三相直列导体

$$F_A = F_{AB} + F_{AC} = K' \left[ \sin \omega t \sin(\omega t - 120^\circ) + \frac{1}{2} \sin \omega t \sin(\omega t + 120^\circ) \right]$$

由上式求得  $F_{AB}$  为正值，则 A 相受向右的力；若  $F_{AB}$  为负值，则 A 相受向左之力。

由三角学中差化积等公式：

$$\cos(A + B) = \cos A \cos B - \sin A \sin B$$

$$\cos(A - B) = \cos A \cos B + \sin A \sin B$$

$$\sin A \sin B = \frac{1}{2} [\cos(A - B) - \cos(A + B)]$$

$$\begin{aligned} \text{则} \quad \sin \omega t \sin(\omega t - 120^\circ) &= \frac{1}{2} [\cos 120^\circ - \cos(2\omega t - 120^\circ)] = \\ &= -\frac{1}{4} - \frac{1}{2} (\cos 2\omega t \cos 120^\circ + \sin 2\omega t \sin 120^\circ) = \\ &= -\frac{1}{4} + \frac{1}{4} \cos 2\omega t - \frac{\sqrt{3}}{4} \sin 2\omega t \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{又} \quad \frac{1}{2} \sin \omega t \sin(\omega t + 120^\circ) &= \frac{1}{4} [\cos(-120^\circ) - \cos(2\omega t + 120^\circ)] = \\ &= \frac{1}{4} \left[ -\frac{1}{2} - (\cos 2\omega t \cos 120^\circ - \sin 2\omega t \sin 120^\circ) \right] = \\ &= -\frac{1}{8} + \frac{1}{8} \cos 2\omega t + \frac{\sqrt{3}}{8} \sin 2\omega t \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore F_A = F_{AB} + F_{AC} &= K' \left( -\frac{3}{8} + \frac{3}{8} \cos 2\omega t - \frac{\sqrt{3}}{8} \sin 2\omega t \right) = \\ &= K' \left[ -\frac{3}{8} + \frac{\sqrt{3}}{4} (\cos 30^\circ \cos 2\omega t - \sin 30^\circ \sin 2\omega t) \right] = \\ &= K' \left[ -\frac{3}{8} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos(2\omega t + 30^\circ) \right] \end{aligned}$$

根据上式给出 A 相导体受力随时间的变化曲线如图 1-16 所示。

由上式知交流三相电力的频率为电流频率的两倍。当上式中余弦之值为 1 时，A 相受力为向右最大值，即

$$F_A = K' \left[ -\frac{3}{8} + \frac{\sqrt{3}}{4} \right] = 0.058 K'$$

当上式中余弦之值为 -1 时，A 相受力为向左最大值，即

$$F_A = K' \left[ -\frac{3}{8} - \frac{\sqrt{3}}{4} \right] = -0.81 K'$$

比较 A 相所受向右与向左之力，可知就绝对值而言，A 相所受最大电力为  $0.81 K'$ 。

(二) 作用于 B 相导体上的电力

B 相与 A 相电流分别为  $I_2$  及  $I_1$ ，当它们瞬时值方向相同时，B 相受 A 相的吸力，即使 B

相导体向左的力。B相与C相电流分别为  $I_2$  与  $I_3$ ，当它们瞬时值方向相同时，B相受C相的吸力，即使B相向右的力。

B相所受电力是合力，应为受A相吸力及受C相吸力的代数和。如规定B相受向左之力为正值，则向右之力为负值，即

$$\begin{aligned} F_B &= F_{BA} - F_{BC} = \\ &K' \sin \omega t \sin(\omega t - 120^\circ) - K' \sin(\omega t + 120^\circ) \sin(\omega t - 120^\circ) = \\ &\frac{\sqrt{3}}{2} K' \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cos 2\omega t - \frac{1}{2} \sin 2\omega t \right) = \\ &\frac{\sqrt{3}}{2} K' \cos(2\omega t + 30^\circ) \end{aligned}$$

由上式可知， $F_B$  的频率亦为电流频率的两倍。当上式中余弦之值为1时，B相所受向左的电力为最大值（ $0.866K'$ ）。当上式中余弦之值为-1时，B相所受向右的电力为最大值（ $-0.866K'$ ）。B相电力曲线见图1-17。

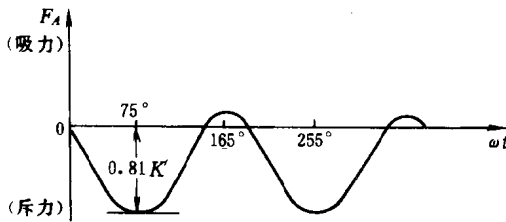


图 1-16 A 相电力曲线

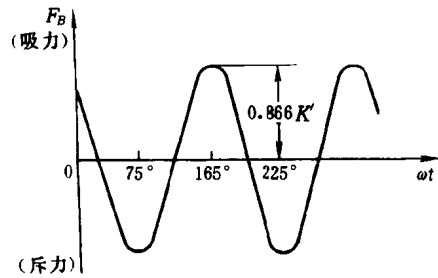


图 1-17 B 相电力曲线

### (三) 作用于C相导体上的电力

同理，当  $I_1$ 、 $I_2$  及  $I_3$  的瞬时值方向相同时，A相与B相对C相均产生吸力，即使C相受向左的力。今规定使C相导体向左之力为正值。则C相所受电力的合力为

$$\begin{aligned} F_C &= F_{CA} + F_{CB} = K' \left[ \sin(\omega t - 120^\circ) \sin(\omega t + 120^\circ) + \frac{1}{2} \sin \omega t \sin(\omega t + 120^\circ) \right] = \\ &K' \left( -\frac{3}{8} \cos 2\omega t + \frac{\sqrt{3}}{8} \sin 2\omega t - \frac{3}{8} \right) = \\ &K' \left[ -\frac{3}{8} + \frac{\sqrt{3}}{4} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \sin 2\omega t - \frac{1}{2} \cos 2\omega t \right) \right] = \\ &K' \left[ -\frac{3}{8} - \frac{\sqrt{3}}{4} \cos(2\omega t + 30^\circ) \right] \end{aligned}$$

当余弦之值为1时， $F_C = -0.81K'$

当余弦之值为-1时， $F_C = +0.058K'$

可见作用于C相导体上的电力  $F_C$  的频率亦为电源频率的两倍。它向左的最大电力为  $0.058K'$ ，向右的最大电力为（ $-0.81K'$ ）。