

BING LIAN DIAN RONG BU CHANG

并联电容补偿

节能、提高功率因数



4

云南人民出版社

责任编辑：彭有成
封面设计：蒋敏学

并联电容补偿

陆富年 编著

云南人民出版社出版

(昆明市书林街100号)

云南新华印刷厂印刷 云南省新华书店发行

*

开本：787×1092 1/32 印张：5.75 字数：127,000

1981年10月第一版 1981年10月第一次印刷

印数：1—4,640

统一书号：15116·136 定价：0.50元

序 言

能源在当前是世界各国极为关心的问题，而节约电力是节约能源的一个重要部分。实现大量电力的节约，对于发展国民经济，加快四化建设是有很大大意义的。

节约电力的途径有多方面，进行无功功率补偿是行之有效的一种办法，其中又以并联电容补偿应用较为广泛。这种措施普遍推广之后，就全国范围来说，不仅能节省大量电力，且对改善电能质量、保证电力系统经济运行也起着极大的作用。

在使用“并联电容补偿”装置的过程中，许多企业已积累了宝贵经验，但也出现过一些问题，如电容器箱渗漏，甚至发生爆炸，引起人身伤亡、设备损坏等严重事故。所以，采用并联电容补偿，怎样选用、维护和安装设备，是大家迫切需要了解的问题。

《并联电容补偿》一书就是为了适应上述需要而编写的。本书系统地讲述了并联电容补偿装置各方面的问题：交流电的基本知识，无功功率的概念，电力生产与应用；无功功率对于供用电网的不良影响和应该采取的相应措施，并联电容补偿的原理及其在技术经济上的效益，补偿装置中核心部件电容器的构造、性能，整个并联电容补偿装置的选定、保护、自动投退及运行中遇到的各种问题的处理；补偿装置的安装、维护、防止爆炸等有关注意事项。

本书在编写过程中，曾吸取了供用电部门多方面的建设性意见，较好地处理理论与实际问题之间的关系，在理论与实际

应用上有着一定的参考价值。

该书可供各工业企业的电工、电气技术人员使用，并可供高、中等院校电气专业师生阅读参考。

孙 新 传

编者的话

在我国四化建设迅速发展中，工农业各方面对电力的需求不断增加，电力工业势必更要加速发展。而节约电力是发展电力工业的另一重要途径，意义极为重大。如果并联电容无功功率补偿这项节电措施得到普遍推广，以用电负荷功率因数从0.8提高为0.9计算，就可以从现有电力设备中挖掘10%以上的容量，或节约电力2%以上，大量地节约了电力投资与运行费用，效益非常显著。本书就是介绍节约用电措施中比较简便且行之有效的方法——并联电容补偿。它阐述了并联电容补偿的原理、选用原则、安装及运行过程中的技术问题。在编写时力求浅显，通俗易懂，并注意了理论与具体实际问题之间的关系，以便于应用参考。

本书的编写，得到云南省经委、云南省电力局有关负责同志的支持与赞助，云南省电力局总工程师孙新传同志为本书写了序言。在编写过程中，曾蒙云南省电力设计院工程师彭翰元、杨琰，云南省设计院工程师郁天同，云南工学院讲师顾诵谷，以及具有多年实际工作经验的工程技术人员金明漾、曾元永等同志校阅，并提出了不少宝贵的意见，在此特表示感谢。

本书经由潘志英高级工程师、原云南省三电办公室负责人杨恭工程师审核，后者并参与了部分章节的编写。

由于编者水平有限，难免有不妥和错误的地方，请读者批评指正。

目 录

第一章 交流电的基本概念

- 1—1 交流电的产生.....(1)
- 1—2 交流电路与无功功率.....(4)
- 1—3 三相交流电路.....(10)
- 1—4 交流电的输送.....(14)
- 1—5 三相交流负载.....(19)
- 1—6 小结.....(22)

第二章 无功功率的不良影响及其补偿措施

- 2—1 无功功率的不良影响.....(23)
- 2—2 无功功率的自然补偿.....(29)
- 2—3 用旋转电机进行无功功率补偿.....(37)
- 2—4 用移相电容器进行无功功率补偿.....(40)
- 2—5 小结.....(43)

第三章 移相电容器的构造与电气特性

- 3—1 移相电容器的一般构造.....(45)
- 3—2 电容器的电气特性.....(50)
- 3—3 电容器的断开.....(64)
- 3—4 电容器的接入.....(69)
- 3—5 小结.....(73)

第四章 移相电容器的补偿方式与容量的选定

- 4—1 并联电容补偿的基本原理及其主要作用.....(76)

4—2	并联电容补偿与串联电容补偿的比较·····	(86)
4—3	并联电容器的补偿方式·····	(90)
4—4	并联电容补偿装置容量的选定·····	(94)
4—5	电容器装置的联结·····	(107)
4—6	小结·····	(116)

第五章 并联电容补偿装置的运行与保护

5—1	并联电容补偿装置的构成·····	(119)
5—2	高次谐波的影响·····	(122)
5—3	并联电容补偿可能引起交流电动机的自激 ·····	(127)
5—4	电容器装置的保护与选用·····	(129)
5—5	电容器装置的自动控制·····	(135)
5—6	小结·····	(148)

第六章 并联电容补偿装置的安装与维护

6—1	电容器装置的安装·····	(150)
6—2	电容器装置的运行、维护·····	(155)
6—3	电容器的修理与防爆·····	(158)
6—4	小结·····	(159)

附 录

1	用电设备的需用系数·····	(161)
2	移相电容器比补偿容量 (补偿率) ·····	(163)
3	移相电容器的技术参数·····	(164)
4	静电 (移相) 电容器柜·····	(169)

第一章 交流电的基本概念

积极的节电措施之一——并联电容补偿的应用，无论从电力系统中无功补偿，或是用户功率因数提高的角度来看，都是极为有效的。本书拟从提高功率因数、就工业企业变（配）电站装设并联电容器的情况、应用实例及其技术经济效益方面进行阐述。为便于理解，先从交流电的基本概念讲起。

1—1 交流电的产生

电与磁是物质的属性，是物质运动的一种基本形式。电、磁之间存在着密切的联系，服从一定的规律。其中，电磁感应定律是反映交流电路中电、磁关系的基本的重要的规律，也是交流电路理论的基础之一。

电磁感应定律：一个由导体组成的回路处于变化的磁场中时，回路内就会有电动势产生（称为感应电动势）。其方向总是由它引起的电流产生另一个磁场，以阻止原有磁场的变化；感应电动势的大小则和原有磁场的磁感应强度 B 、导体垂直切割磁场的有效长度 L 、导体与磁场两者间的相对速度 V 成正比。

$$E = BLV \sin \alpha$$

式中， $V \sin \alpha$ ——是将导体的运动进行分解，所得沿垂直于磁场方向的分量。

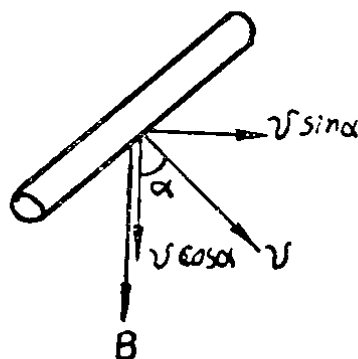


图 1—1
导体运动方向的分解。

从感应电动势的公式可以看出，在这种切割方式下，即长度固定的线匝在均匀磁场中以一定方向作等速旋转时，所产生的感应电动势决定于导线切割磁场的角度。

图 1—2 所示为利用电磁感应原理产生交流电动势的单相交流发电机原理图。图中，线圈与磁场间产生相对旋转运动，使单匝线圈的两个有效边切割磁场（或者说成是导线处于变动的磁场中）。这种状态符合电磁感应定律。所以，线圈中产生感应电动势，于线圈端点之间出现了电压，在测量仪表中可以显示出来。

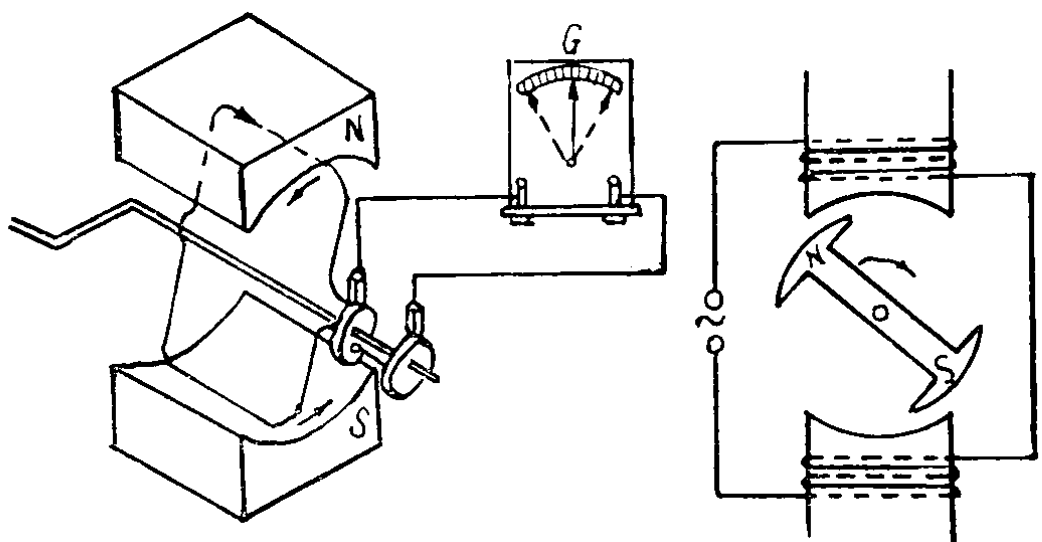


图 1—2

交流发电机的原理图。 (a) 线圈旋转于磁场中；
(b) 线圈不动，磁场在旋转。

在图 1—3 中可以看到，当导线位置在 1 时，因为导线运动的方向与磁力线平行，恰好沿着磁力线滑过去，并不切割磁力线，所以不产生感应电动势。

当导线位置在 2 时，导线以极偏斜的方向切割磁力线。导线切割磁力线的角度很小，所以产生的感应电动势也很小。

导线位置在 3 时，导线切割磁力线的角度比较大，产生的

感应电动势就大些。

导线位置在 4 时，导线旋转到磁极中央，导线运动的方向和磁力线垂直，产生的感应电动势最大。经过位置 4 后，导线切割磁力线的方向又逐渐偏斜，因此产生的感应电动势也逐渐减少。到位置 7 时，导线的感应电动势又减到零。导线经过位置 7 后的情形与前面相似，只不过磁场方向反向，所以感应电动势的方向也相反，是以负的数值重复前面的变化而已。

若将导线旋转一周所产生的感应电动势按其时间先后展示，在垂直的方向按比例画出导线在不同时间点上(即不同位置上)所产生的感应电动势，规定一个方向上所产生的感应电动势为正(如向左的一个方向)，相反方向的电动

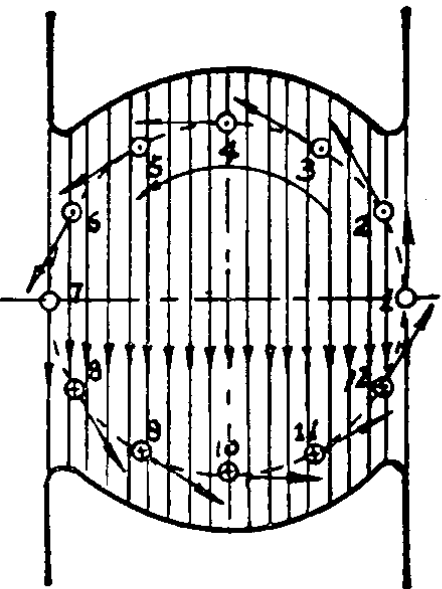


图 1—3

导线作旋转运动时所产生
的交变电动势。

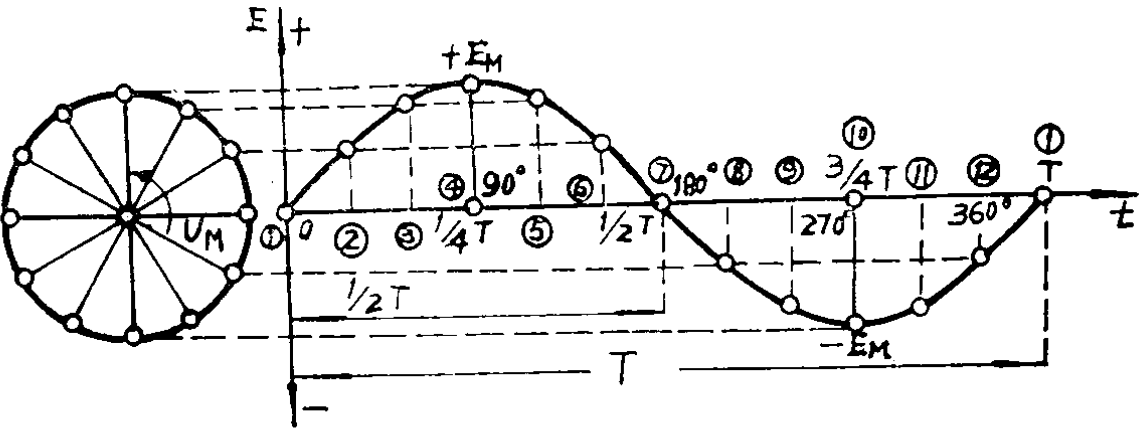


图 1—4

正弦形交流电动势。

势为负（如向右的方向），显然可以得出图 1—4 所示的变动曲线。这一条曲线为正弦曲线，所以这种电动势称为正弦交流电动势，或者简称为交流电势。

导线在磁场中旋转一整圈，交流电势就完成一次正负变化，叫做一周。在单位时间（1 秒）内交流电势变动的周数，称为交流电势的频率，用符号 f 表示，单位为赫芝。频率的倒数叫周期，也就是旋转一周所需要的时间，以符号 T 表示，单位为秒。当导线初始位置是 θ 角度以角速度 ω 值旋转时，交流电势可用下式表示。

$$E = E_M \sin (\omega t + \theta)$$

式中， E_M ——电势的最大值；

θ ——称为初相角。

将交流电势作用于电路，就得到了由它推动的交流电流。

1—2 交流电路与无功功率

如图 1—2 所示，将外电路经由电刷而接于滑环时，电路中由于交流电势的作用而有交流电流，在外电路上可以测量出电压来。

为了便于学习，常将交流电路与所熟悉的直流电路类比。在实用上采用热效应相等的直流电流来表示交流电流的大小，也就是采用交流电流有效值的概念：交流电流通过某一电阻时，在一定的时间内所产生的热量，如与某一直流电流通过该电阻，在同样长时间内所产生的热量相等，则该直流电流的值被称为交流电流的有效值。

正弦交流电流的有效值，是交流电流的最大值（或称幅

自感现象：任何通电导线的周围都有它自己产生的磁场，当导线中电流发生变动时，导线周围的磁场也跟着变动，可以使导线自身产生感应电势，称为自感电势。这时导线具有自感。

自感在电路中的影响，可以比喻为物体运动时的惯性，尤如旋转飞轮具有一定质量（惯性的量度），阻碍着其运动速度的变化，电路中的自感是电路中电流增长或减少的阻碍。

自感的影响在具有铁芯的线圈中特别厉害。当线圈中通过交流电流时，因为自感作用产生自感电势，从而产生电流，阻止原来磁场的改变。这样的电流垂直地滞后于电路电压，它与电路中原来通过的电流会产生迭加，阻止电路中电流的变化，使电流总是滞后于电压，形成了相位差。

在电感性负载电路中，形成相位差的另一个原因是互感现象：若有两个放在一起的线圈在第一个线圈中通过电流，使第二个线圈处于第一个线圈的磁场中时，第二个线圈将因第一个线圈中电流的变化（也就是磁场变化）而产生感应电势的现象，这就是互感现象。这时两者间具有互感。

在交流电路中，所有电动机、变压器和电抗器线圈都是电感性负载，均具有电感 L （自感与互感的组合），会形成感抗 $X_L = \omega L$ 。当交流电路仅有这种电感性负载（一个忽略了电阻，且不带铁芯的线圈）时，称为纯电感电路，在这样的电路中只存在电感电流，所以电流滞后于电压 90° ，存在 $\phi = 90^\circ$ 的相位差。

我们在计算纯电感电路的瞬时功率时，可以画出图 1—8 所示曲线。显然，功率的变化速度是电流（或电压）变化速度的一倍，还能看出功率曲线所包围住的正值面积与负值面积恰好相等，它们在一个周期范围内的总和等于零。它的物理意义是，瞬时功率在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 和 $270^\circ \sim 360^\circ$ 的两个四分之一的周

相位上是一致的，它们同时地改变其大小与方向，服从关系式 $\dot{U} = R \dot{I}$ ，如图 1—6 所示。

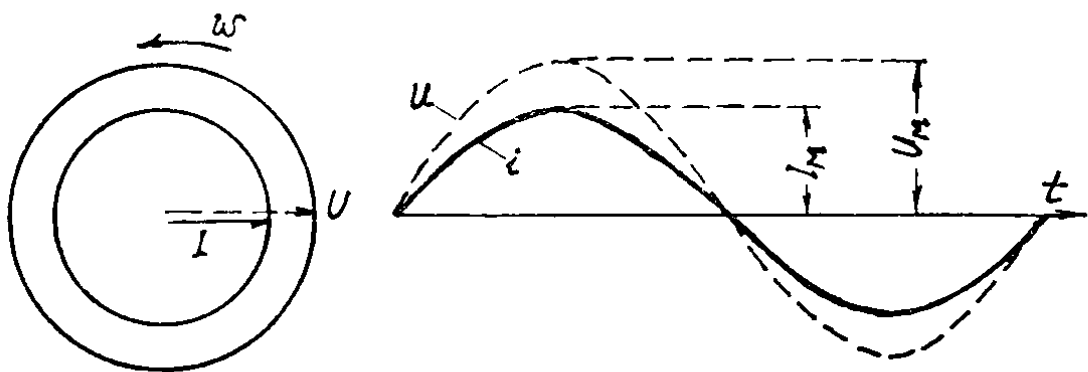


图 1—6

电压与电流在相位上一致， $\phi = 0$ 。

当交流电流和交流电压的周期相同，在相位上并不一致，也就是它的最大值及零点的时间不一样，有一固定的差值，则说电压与电流之间在相位上发生了相移，存在着相位差（如图 1—7 所示），即 $\phi \neq 0$ ，电流滞后或超前于电压。

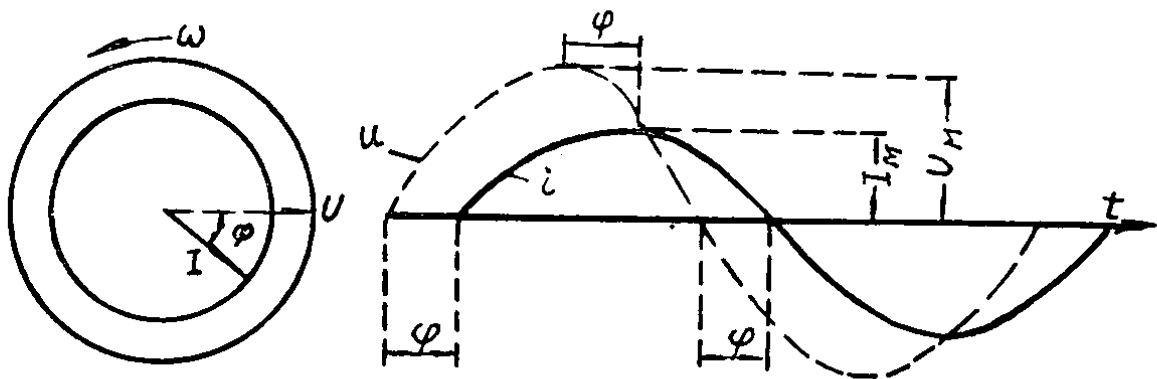


图 1—7

电压与电流之间在相位上不一致， $\phi \neq 0$ 。

具有电动机、变压器等电感性负载的电路，常会形成相位差，存在着电磁感应（自感和互感）现象。

电容电路。电容将形成容抗 X_C ，具有相反于纯电感电路中的情形：电路中只有电容电流流动，它超前于电压 90° 地变化，也就是电流与电压间的相位差为 $\phi = -90^\circ$ 。

这种电路中流过正的电流，表示对电容充电；电流改变方向为负值时，表示电容放电。电路在交流电压作用下，不断地进行着充放电，建立了交变电场，形成了不断来回的交流电流。这种交流电流超前于电压，所以产生方向相反于纯电感电路中的无功功率。而这种无功功率，是建立交变电场需要的功率。可用下面式子计算。

$$Q_C = UI_C = U^2 / X_C$$

在实际的交流电网中，由于工业企业负载组成的电力系统，除电感性负载之外，还有用白炽灯、电阻炉等组成的电阻性负载，而且异步电动机、变压器等电感性负载的导线本身也具有电阻。所以，电

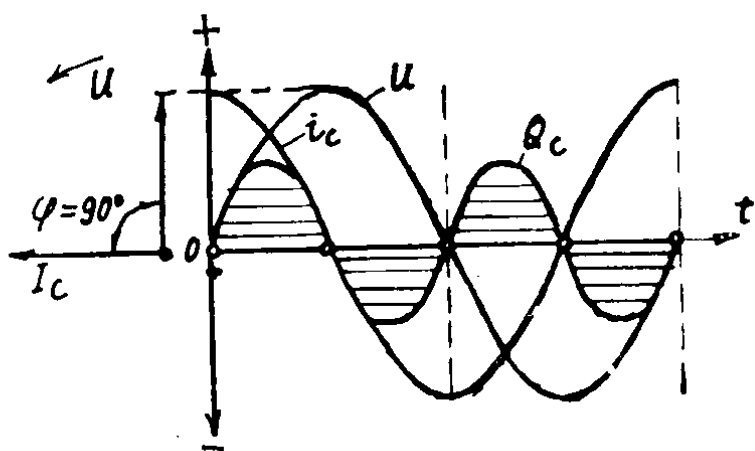


图 1—9

路中电压与电流之间的相位差并不正好是 90° ，而取决于电感性负载与电阻性负载两者的大小。当电阻性负载大时相位差减少，电感性负载大时相位差增加，在 $0 \sim 90^\circ$ 范围内变化。

图 1—10 所示，为相位差小于 90° 的情形。这种滞后于电压一定相位的电流，可以分解为两个分量，一个是与电压相位一致的电阻性分量 $I_a (=I \cos \phi)$ ，另一个是滞后于电压 90° 的电感性分量 $I_b (=I \sin \phi)$ 。前一个分量产生电阻性有功功率

期内为正值，表示电路要从电源取得能量，并将它转换为磁场能贮藏在电感内；瞬时功率在一周的另外两个四分之一周期内为负值，表示电路将贮藏的磁场能量转变为电能，又送还给电源。正负面积相等，是表示从电源取得的能量等于后来送还给电源的能量。也就是说，在纯电感电路中，并没有能量消耗，只是建立了交变磁场，在电源与电感线圈之间进行着能量的不断转换。

电流在电阻负载上的消耗，称为有功功率 P ，而单位时间内电感电路转换的能量，称为无功功率 Q_L ，其最大值用下式计算。

$$Q_L = UI = I^2 \omega L$$

式中， Q_L ——电感性无功功率，用千乏（KVAR）做单位。

所以，在电感电路内的无功功率是建立交变磁场需要的功率。

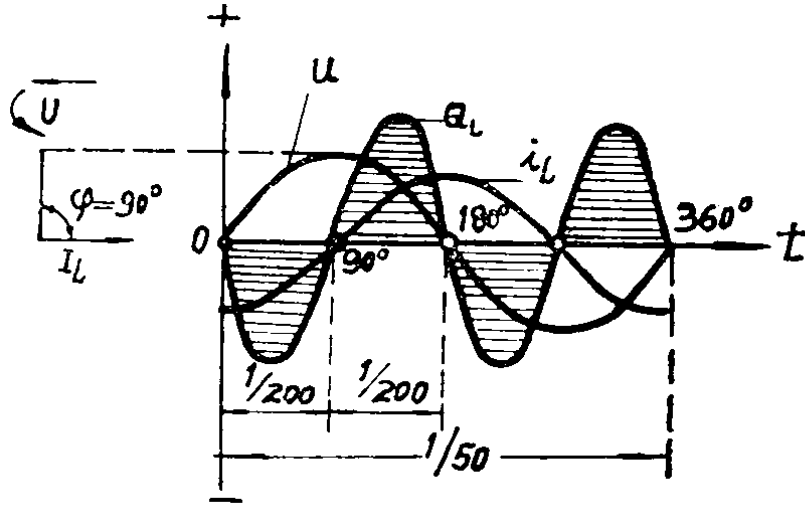


图 1—8
纯电感电路中的无功功率。

只有电容 C 的交流电路（设不存在电阻和电感），称为纯

电容电路。电容将形成容抗 X_C ，具有相反于纯电感电路中的情形：电路中只有电容电流流动，它超前于电压 90° 地变化，也就是电流与电压间的相位差为 $\phi = -90^\circ$ 。

这种电路中流过正的电流，表示对电容充电；电流改变方向为负值时，表示电容放电。电路在交流电压作用下，不断地进行着充放电，建立了交变电场，形成了不断来回的交流电流。这种交流电流超前于电压，所以产生方向相反于纯电感电路中的无功功率。而这种无功功率，是建立交变电场需要的功率。可用下面式子计算。

$$Q_C = UI_C = U^2 / x_C$$

在实际的交流电网中，由于工业企业负载组成的电力系统，除电感性负载之外，还有用白炽灯、电阻炉等组成的电阻性负载，而且异步电动机、变压器等电感负载的导线本身也具有电阻。所以，电

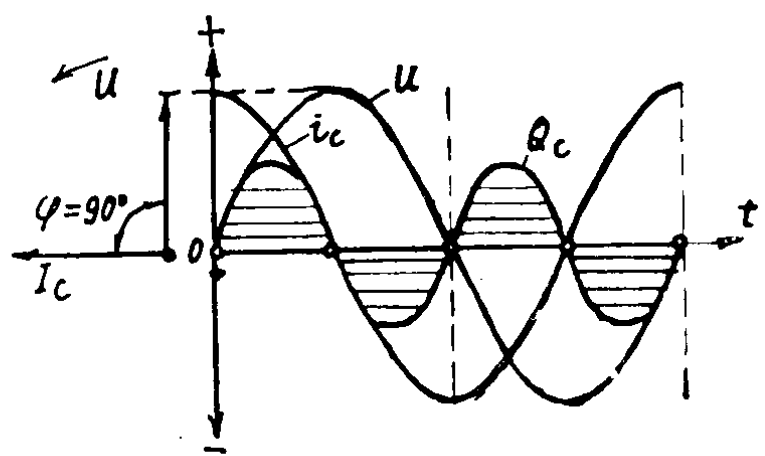


图 1—9

路中电压与电流之间的相位差并不正好是 90° ，而取决于电感性负载与电阻性负载两者的大小。当电阻性负载大时相位差减少，电感性负载大时相位差增加，在 $0 \sim 90^\circ$ 范围内变化。

图 1—10 所示，为相位差小于 90° 的情形。这种滞后于电压一定相位的电流，可以分解为两个分量，一个是与电压相位一致的电阻性分量 $I_a (= I \cos \phi)$ ，另一个是滞后于电压 90° 的电感性分量 $I_p (= I \sin \phi)$ 。前一个分量产生电阻性有功功率

$P (=UI \cos \phi)$ ，后一个分量仅产生电感性无功功率 $Q_L (=UI \sin \phi)$ 。将这两个功率合成，就得出总电流 I 所产生的功率，称之为视在功率 S 。

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

式中， $P = UI \cos \phi = S \cos \phi$ ；

$Q = UI \sin \phi = S \sin \phi$ ；

$\cos \phi$ ——称为功率因数（也称为

力率），它反映了有功功率在视在功率中占有比率的大小。也就是说，由于存在相位差，并不是总电流都产生有功功率。有功功率仅是视在功率与功率因数（ $\cos \phi$ ）的乘积，是反映电能转变为光、热、机械、化学等形式的能量的那部分有用的功率。无功功率是建立交变电、磁场所需要的功率，是为利用电能所必需的，但形成相位差，引起功率因数 $\cos \phi$ 的降低，造成电源等效容量中无功功率增大，有功功率减小。

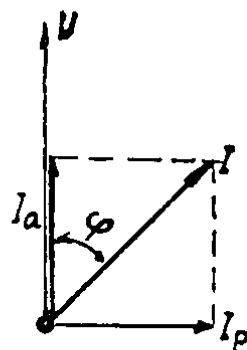


图 1—10
电流向量的分解。

1—3 三相交流电路

将两台同样的单相交流发电机用联合器接装在一起转动，这两台发电机能产生相同频率的交流电势，但是交流电势的相位并不一致，它决定于两台发电机接装在同一转动轴上的相对位置。如果不是将几台发电机联在一起转动，而是在同一台交流发电机的转子上绕置几组线圈，它们经由不同的滑环与各自的电路相联，也可以获得同样的结果。在这种情形下，各电动势的相位将取决于线圈之间的相对位置。

实际的三相发电机正是这样。如图 1—11 所示，在发电机