

现场人员专业基础培训适用

继电保护 自动装置 及二次回路应用基础

周武仲 编著



现场人员专业基础培训适用

继电保护 自动装置 及二次回路应用基础

周武仲 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书从电路基础知识、数字逻辑基本知识、微机保护基础知识、继电保护整定计算的基本知识、电气二次回路的基本知识、电力系统各元件的保护、电力系统的线路保护、安全自动装置等方面介绍了继电保护、自动装置及二次回路的相关知识,同时还列举了有关保护整定计算、微机保护、二次回路和安全自动装置的应用实例,便于读者能更好地理解掌握专业基础知识。

不同于院校教材,本书是对现场人员专业基础知识的补充,结合实例使读者对现场操作知其然,亦知其所以然。本书具有针对性强、深入浅出、通俗易懂的特点,满足了现场人员对新技术、新设备相关知识了解的需求。

本书可作为有关继电保护专业的技术人员、管理人员、工人的培训及自学教材,也可作为电力院校师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

继电保护、自动装置及二次回路应用基础 / 周武仲编著. —北京: 中国电力出版社, 2012.7

ISBN 978-7-5123-3259-1

I. ①继… II. ①周… III. ①继电保护—基本知识 ②继电自动装置—基本知识 ③二次系统—基本知识 IV. ①TM77
②TM645.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 152016 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 1 月第一版 2013 年 1 月北京第一次印刷
850 毫米×1168 毫米 32 开本 9.125 印张 238 千字
印数 0001—3000 册 定价 25.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

随着我国电力工业的飞速发展，电力系统的装机容量日益增大，电网的电压及复杂性日益增高，对电网运行的安全性和可靠性的要求也越来越高，因而继电保护及安全自动装置的制造和运行技术也随之得到了发展。特别是近年来计算机技术在电力系统中的大量应用，使继电保护及安全自动装置在微机化方面取得了显著的进步和提高，从而进一步提高了电力系统的安全性和可靠性。

为了适应对微机保护等新式继电保护方面的知识、设计、操作、整定等方面的技能要求，满足读者在继电保护的基础知识方面的需要，本书将有关继电保护的基础知识进行了汇总，包括交流电路的分析基础、数字逻辑代数基础、微机保护基础、二次回路基本知识、继电保护整定计算基础知识、各元件的保护、线路的保护、安全自动装置等知识，同时，为了使读者对实际问题有一个较清晰的认识，在本书中还列举了有关保护整定计算、微机保护、二次回路和安全自动装置的应用实例。掌握这些基础知识后，将为读者阅读其他有关继电保护的书籍和资料带来方便，并有助于对其他书籍的理解。

本书可作为有关继电保护专业的技术人员、管理人员、工人的辅助工具，也可作为大中专学校师生的参考用书。

由于编者的水平、时间以及本书的篇幅有限，书中难免有不足之处，恳请读者提出意见和批评。

编 者

目 录

前言

第一章 电路基础知识	1
第一节 单相正弦交流电路的分析与计算	1
第二节 三相交流正弦电路的分析与计算	12
第三节 对称分量法及其应用	18
第四节 非正弦周期电流电路的分析与计算	22
第五节 电磁与磁路的分析与计算	25
第二章 数字逻辑基本知识	30
第一节 数字逻辑基础	30
第二节 数字逻辑电路在继电保护中的应用	39
第三章 微机保护基础知识	50
第一节 微机保护装置的特点	50
第二节 微机保护装置硬件原理	51
第三节 微机保护装置软件原理	59
第四章 继电保护整定计算的基本知识	74
第一节 电力系统的运行方式与短路电流计算	74
第二节 整定计算用的各种系数的定义与取值	89
第三节 各种保护的通用整定方法	100
第四节 整定计算实例	100
第五章 电气二次回路的基本知识	106
第一节 概述	106

第二节	电气二次回路的组成	107
第三节	交流电流和电压的二次回路	115
第四节	电气二次回路接线	121
第五节	电源系统	158
第六章	电力系统各元件的保护	164
第一节	变压器保护	164
第二节	发电机保护	180
第三节	电动机保护	192
第四节	母线保护和断路器失灵保护	197
第五节	电容器保护	208
第七章	电力系统的线路保护	217
第一节	中低压线路的相间短路保护	217
第二节	线路的接地保护	226
第三节	线路的距离保护	232
第四节	线路的纵联保护	245
第八章	安全自动装置	264
第一节	自动装置的组成	264
第二节	自动重合闸	267
第三节	备用电源自动投入装置	275
第四节	自动低频减载装置	279

电路基础知识

第一节 单相正弦交流电路的分析与计算

一、单相正弦交流电路的基本概念

单相正弦交流电路是交流电路中最基本的电路，随时间按正弦规律变化的电压和电流称为正弦电压和正弦电流，其波形是正弦波，可用时间的正弦（sin）函数表示，也可用时间的余弦（cos）函数来表示，在图 1-1 中表示了正弦电压的波形，该波形可以用下列关系式来表示，即

$$u(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi_u) \quad (1-1)$$

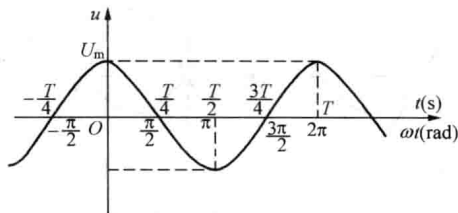


图 1-1 正弦电压波形图

在图 1-1 中， U_m 为电压的最大值或振幅， ωt 是一个随时间变化的角度， ω 是一个与频率 f 有关的常量，称为角频率，它表示了电压每秒变化的弧度数，单位为弧度/秒（rad/s），即

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi f \quad (1-2)$$

式 (1-2) 中的 T 为周期，它是波形再次重复出现所需的最短时间间隔，单位为秒（s）。而频率则是单位时间内的循环（周期）

数。显然， $f=1/T$ 。频率的单位是赫兹（Hz）。我国电力系统提供的正弦电压的频率为 50Hz，周期为 0.02s。

在 $u(t)$ 关系式中的 $(\omega t + \varphi_0)$ 称为相位角，简称相位。其中的 φ 称为初相角（如图 1-2 所示），简称初相，它反映了正弦波初始值的大小，即 $u(0) = U_m \cos \varphi$ 。对于两个同频率的正弦电压（或电流），其初相角之差称为相位差，即

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (1-3)$$

当相位差为零时，两个正弦波为同相位，当相位差为 π 时，两个正弦波为反相位。其波形如图 1-3 所示。

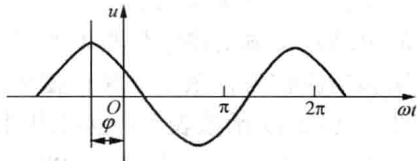


图 1-2 初相角

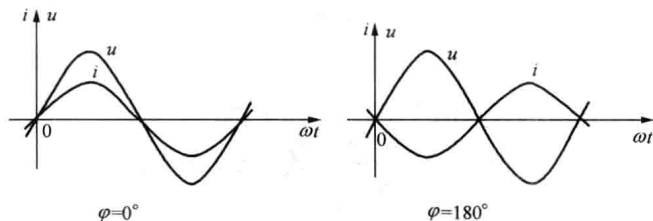


图 1-3 同相位和反相位波形

由上述 $u(t)$ 表达式可见，一个正弦波可以由最大值、频率（或角频率或周期）以及初相三个参数确定，这三个参数称为正弦波的三要素。

除了上述的三要素外，还有一个常用的参数，即有效值，其定义为：把直流电流 I 和交流正弦电流 i 分别通入同一个电阻，如果在相等的时间内，这两个电流产生的热量相等，则这个直流电流 I 的大小称为正弦电流 i 的有效值，用大写字母 I 表示。有效

值和最大值的关系为

$$I = \frac{1}{\sqrt{2}} I_{\max} = 0.707 I_{\max} \quad (1-4)$$

当用有效值表示时，正弦电流可写为

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i) = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \varphi_i) \quad (1-5)$$

通常所说的正弦电流、正弦电压的数值指的是有效值，交流电气设备铭牌上的额定电流和电压也指的是有效值。

【例 1-1】 已知正弦电流 $i(t) = 100 \cos(\omega t - \pi/4)$ (mA)， $\omega = 2\pi$ ，试求在 (1) $t = 0.5$ s 时；(2) $\omega t = 2.5\pi$ 时；(3) $\omega t = 90^\circ$ 时，电流的大小和方向。

解 (1) 当 $t = 0.5$ s 时

$$\begin{aligned} i &= 100 \cos(2\pi \times 0.5 - \pi/4) = 100 \cos(\pi - \pi/4) \\ &= -100 \cos(\pi/4) = -100 \times \sqrt{2}/2 = -70.7 \text{ (mA)} \end{aligned}$$

(2) 当 $\omega t = 2.5\pi$ 时

$$\begin{aligned} i &= 100 \cos(2.5\pi - \pi/4) = 100 \cos(2\pi + \pi/4) = 100 \cos \pi/4 \\ &= 70.7 \text{ (mA)} \end{aligned}$$

(3) 当 $\omega t = 90^\circ$ 时 ($90^\circ = \pi/2$)

$$i = 100 \cos(\pi/2 - \pi/4) = 100 \cos \pi/4 = 70.7 \text{ (mA)}$$

上述计算中，电流的正负表示与参考方向相同或相反。

二、相量法在正弦交流电路中的采用

对于正弦交流电路的分析和计算，最常用的方法就是相量法，采用相量法进行分析与计算可以省去对解析式或波形图的分析与计算，从而将对正弦交流电路的分析与计算简化为对相量的分析与计算。下面我们对相量法进行说明。

相量法是基于数学中的复数的表示方法，在数学中一个复数可以用下列的公式来表示

$$A = a_1 + ja_2 \quad (1-6)$$

式中： $j = \sqrt{-1}$ 为虚数单位。

在运用时往往采用“Re”和“Im”表示复数的实部和虚部，即

$$\operatorname{Re}(A) = \operatorname{Re}(a_1 + ja_2) = a_1 \quad (1-7)$$

$$\operatorname{Im}(A) = \operatorname{Im}(a_1 + ja_2) = a_2 \quad (1-8)$$

复数还可以用极坐标的形式来表示，由欧拉公式可得

$$e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta \quad (1-9)$$

则式 (1-9) 还可以写为

$$A = ae^{j\theta} = a \angle \theta \quad (1-10)$$

直角坐标和极坐标可以互相转换，即

$$a = (a_1^2 + a_2^2)^{1/2} \quad (1-11)$$

$$\theta = \arctan a_2 / a_1 \quad (1-12)$$

图 1-4 是复数 A 的模和幅角在坐标上的表示图。

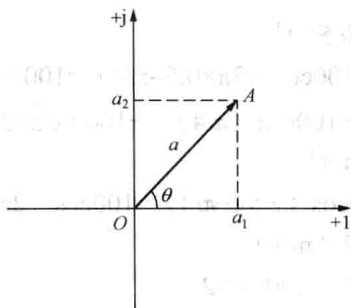


图 1-4 复数 A 的模和幅角在坐标上的表示

对于正弦电压和电流则可以用下列关系式来表示

$$\text{设} \quad u(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi_u) \quad (1-13)$$

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \varphi_i) \quad (1-14)$$

则用复数可表示为

$$u(t) = \operatorname{Re}[U_m e^{j(\omega t + \varphi_u)}] = \operatorname{Re}(U_m e^{j\varphi_u} e^{j\omega t}) \quad (1-15)$$

$$= \operatorname{Re}(\dot{U} e^{j\omega t}) = \operatorname{Re}(\dot{U} \angle \omega t)$$

$$i(t) = \operatorname{Re}[I_m e^{j(\omega t + \varphi_i)}] = \operatorname{Re}(I_m e^{j\varphi_i} e^{j\omega t}) \quad (1-16)$$

$$= \operatorname{Re}(\dot{I} e^{j\omega t}) = \operatorname{Re}(\dot{I} \angle \omega t)$$

式 (1-15) 与式 (1-16) 中

$$\dot{U} = U_m e^{j\varphi_u} = U_m \angle \varphi_u \quad (1-17)$$

$$\dot{I} = I_m e^{j\varphi_i} = I_m \angle \varphi_i \quad (1-18)$$

$\dot{U}(I)$ 是一个与时间无关的复值常数, 其模为该正弦电压(电流)的最大值, 幅角为该正弦电压(电流)的初相。

下面进一步说明如何用相量来表示正弦量。

相量与 $e^{j\omega t}$ 的乘积是时间 t 的复值函数, 在复平面上可用以恒定角速度 ω 逆时针方向旋转的相量表示, 在图 1-4 中表示了旋转相量在 $t=0$ 和 $t=t_1$ 两个不同时刻的位置。旋转相量在实轴上的投影就是式 (1-18) 所示的正弦电流。

正弦量不是旋转相量, 而是旋转相量在纵轴上的坐标, 而旋转相量是时间相量, 不是一般的空间相量, 为了有区别地表示, 我们分别用 \dot{U} 、 \dot{I} 来表示电压和电流。由图 1-5 可得

$$i(t) = \operatorname{Re}(\dot{I} \angle \omega t) = I_m \cos \omega t \quad (1-19)$$

$$i(t) = \operatorname{Im}(\dot{I} \angle \omega t) = I_m \sin \omega t \quad (1-20)$$

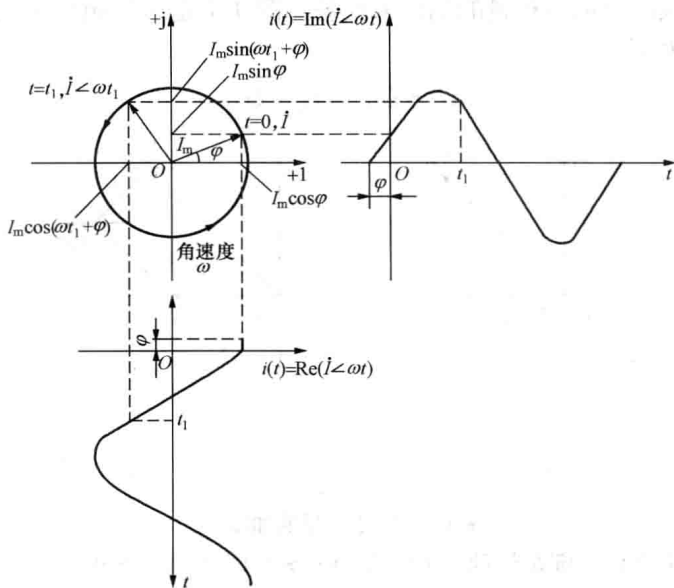


图 1-5 旋转相量及其在实轴和虚轴上的投影

在复平面内的相量也可以用复数表示。图 1-6 中, 相量 \dot{I} 在

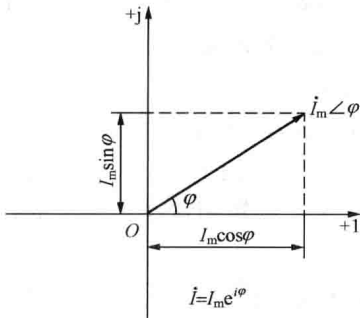


图 1-6 电流的相量图

实轴上的投影 $I_m \sin \varphi$ 为复数的实部，在虚轴上的投影 $I_m \cos \varphi$ 为复数的虚部，其相量的长度为复数的模，与实轴之间的夹角 φ 为复数的幅角。

三、用相量的加、减方法表示正弦量的加、减

相量的加、减法运算的法则是多边形法则，即几个相量相加时，把第二个相量的首端平行移动到第一个相量的尾端重合，再把第三个相量的首端平行移动到第二个相量的尾端重合，依次类推，直到最后一个相量。几个相量相减，可以用相量的加法来代替，图 1-7 是电压相量的加、减法，表示

$$\dot{U}_s = \dot{U}_{ab} + \dot{U}_{bc} + \dot{U}_{cd}$$

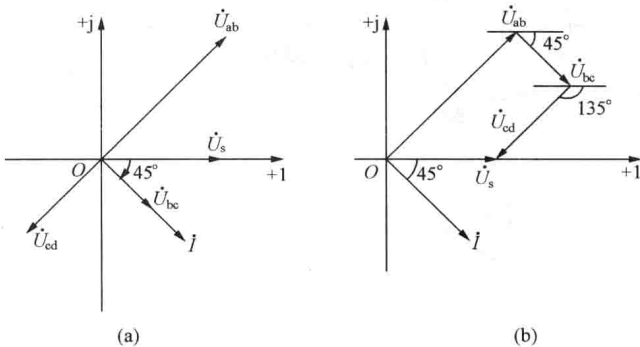


图 1-7 电压相量的加减法

(a) 各个电压相量在坐标轴上的位置；(b) 各个电压相量的合成在坐标上的表示

下面我们举例说明该方法的具体应用。

【例 1-2】 已知： $u_{ab} = -10 \cos(\omega t + 60^\circ)$ ； $u_{bc} = 8 \sin(\omega t + 120^\circ)$ 。

求 u_{ac} 。

解

$$u_{ac} = u_{ab} + u_{bc}$$

各电压均为同频率的正弦波，以相量表示后得

$$\dot{U}_{ac} = \dot{U}_{ab} + \dot{U}_{bc}$$

根据已知条件得

$$\dot{U}_{ab} = -10 \angle 60^\circ = -5 - j8.66$$

$$\dot{U}_{bc} = 8 \angle (120^\circ - 90^\circ) = 6.94 + j4$$

$$\dot{U}_{ac} = -5 - j8.66 + 6.94 + j4 = 5.05 \angle -67.4^\circ$$

$$u_{ac} = 5.05 \cos(\omega t - 67.4^\circ) \text{ V}$$

这一关系，可从这三个相量形成的闭合三角形来表示，如图 1-8 所示。

四、简单电路的分析与计算

在电路中，可以由电阻、电容和电感元件的串、并联组成各种电路，对于交流电路中的基本元件可以用表 1-1 来表示。表中的 Z 和 Y 分别称为阻抗和导纳，同一元件的阻抗和导纳互为倒数，即 $Z=1/Y$ 。

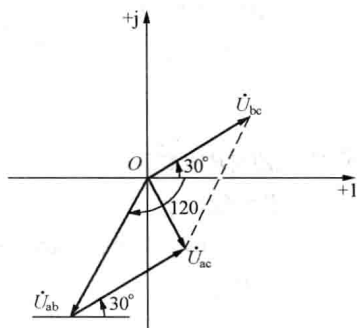


图 1-8 计算例相量图

表 1-1 基本元件的阻抗和导纳

元件	Z	Y
R	R	$G=1/R$
C	$1/j\omega C$	$j\omega C$
L	$j\omega L$	$1/j\omega L$

在交流电路中，电压和电流可以用相量来表示它们之间的关系，即

$$\dot{U} = R\dot{I} \quad (1-21)$$

$$\dot{U} = 1/(j\omega C) \times \dot{I} \quad (1-22)$$

$$\dot{U} = j\omega L\dot{I} \quad (1-23)$$

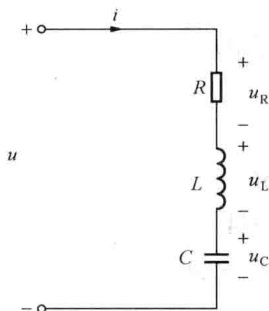


图 1-9 RCL 串联电路的分析与计算

下面我们就对 RCL 串联电路的分析与计算进行说明。

【例 1-3】 图 1-9 是 RCL 串联电路。已知电源电压 $u(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi_u)$ ，求稳态电流 $i(t)$ 。

(1) 用相量表示电压的关系

$$\begin{aligned}\dot{U} &= \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C = R\dot{i} + jX_L\dot{i} - jX_C\dot{i} \\ &= [R + j(X_L - X_C)]\dot{i} = (R + jX)\dot{i} \\ &= Z\dot{i}\end{aligned}$$

式中 $X = X_L - X_C$ 。

(2) RCL 串联电路的阻抗为

$$Z = R + jX = |Z| \angle \varphi$$

式中 $|Z| = [R^2 + X^2]^{1/2}$;

$$R = |Z| \cos \varphi;$$

$$X = |Z| \sin \varphi; \quad \varphi = \arctan X/R.$$

(3) 电流为

$$\begin{aligned}\dot{i} &= \dot{U} / Z \\ &= U \angle \varphi_u / |Z| \angle \varphi \\ &= I_m \angle \varphi_i\end{aligned}$$

式中 $\varphi_i = \varphi_u - \varphi$

(4) 根据所求得的相量，写出相应的正弦时间函数，即

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \varphi_i)$$

式中：电压与电流的相位差角为 $\varphi_u - \varphi_i = \varphi$ 。

此即为阻抗 Z 的幅角，又称为阻抗角，根据阻抗角的正负，就可以判断电流与电压的相位关系。当 $\omega L > 1/(\omega C)$ 时，阻抗角为正，说明 $\varphi_u > \varphi_i$ ，电流滞后电压；当 $\omega L < 1/(\omega C)$ 时，阻抗角为负，说明 $\varphi_u < \varphi_i$ ，电流超前电压；当 $\omega L = 1/(\omega C)$ 时，阻抗角为零，说明 $\varphi_u = \varphi_i$ ，电流和电压同相。

图 1-10 为 RLC 串联电路相量图。

对于 RLC 并联电路 [如图 1-11 (a) 所示]，一般以电压为参

考相量，根据各元件上电流与电压的相位关系，作出相量图，如图 1-11 (b) 所示，图中设 $X_C < X_L$ 。

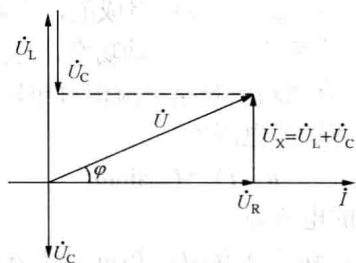


图 1-10 RLC 串联电路相量图

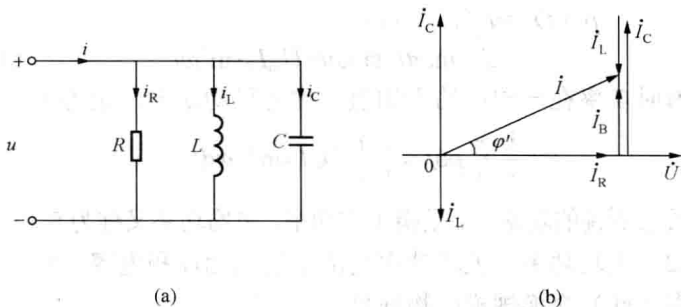


图 1-11 RLC 并联电路

(a) 电路图；(b) 相量图

(1) 对电流用相量表示

$$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_L + \dot{I}_C = \dot{U} / R + \dot{U} / (jX_L) + \dot{U} / (-jX_C) \quad (1-24)$$

(2) 为便于计算可用导纳来表示，即

$$\left. \begin{array}{l} \text{电导 } G \text{ —— 电阻的倒数, } G = 1/R; \\ \text{感纳 } B_L \text{ —— 感抗的倒数, } B_L = 1/X_L = 1/(\omega L); \\ \text{容纳 } B_C \text{ —— 容抗的倒数, } B_C = 1/X_C = 1/(\omega C). \end{array} \right\} \quad (1-25)$$

则式 (1-25) 可表示为

$$\left. \begin{array}{l} \dot{I} = (G + jB) U = Y\dot{U} \\ Y = (G^2 + B^2)^{1/2} \quad (Y \text{—复导纳}) \\ Y = |Y| \angle \phi' \end{array} \right\} \quad (1-26)$$

$$\varphi = \arctan B/G = \arctan (B_C - B_L) / G \quad (\varphi - \text{导纳角}) \quad (1-27)$$

五、功率和功率因数

电路是由电阻、电感和电容所组成的，当电流通过这些元件时，就会产生功率，功率可以分为有功功率、无功功率和视在功率。

(1) 有功功率。有功功率是指电流流过电阻时所消耗的功率。设施加于电阻两端的电压为

$$u(t) = U_m \sin \omega t \quad (1-28)$$

则流过该电阻的电流为

$$i(t) = u(t) / R = U_m / R \sin \omega t = I_m \sin \omega t \quad (1-29)$$

因此电阻吸收的瞬时功率为

$$\begin{aligned} p(t) &= u(t) i(t) \\ &= U_m \sin \omega t I_m \sin \omega t = U_m I_m \sin^2 \omega t \end{aligned} \quad (1-30)$$

瞬时功率在一周内的平均值，称为平均功率，记为 P ，即

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T 2UI \sin^2 \omega t dt = UI \quad (1-31)$$

通常所说的功率，都是指平均功率，平均功率又称为有功功率。

(2) 无功功率。无功功率是衡量电抗元件和电容元件（统称为动态元件）交换规模的物理量。

设流过电感元件的电流为

$$i(t) = I_m \sin \omega t \quad (1-32)$$

则其电压为

$$u = L di/dt = L dI_m \sin \omega t / dt = \omega L I_m \cos \omega t = U_m \sin (\omega t + 90^\circ) \quad (1-33)$$

瞬时功率为

$$p(t) = ui = U_m \sin (\omega t + 90^\circ) I_m \sin \omega t \quad (1-34)$$

利用三角公式可将上式转换为

$$p(t) = UI \sin 2\omega t \quad (1-35)$$

平均功率为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI \sin 2\omega t dt = 0 \quad (1-36)$$

从上式可见，电感只是储存与释放能量，其平均功率为零。

对于电容元件加在两端的电压为

$$u(t) = U_m \sin \omega t \quad (1-37)$$

则电流为

$$\begin{aligned} i(t) &= Cdu/dt = CdU_m \sin \omega t / dt = \omega CU_m \cos \omega t \\ &= I_m \sin(\omega t + 90^\circ) \end{aligned} \quad (1-38)$$

瞬时功率为

$$\begin{aligned} p(t) &= ui = U_m \sin \omega t I_m \sin(\omega t + 90^\circ) \\ &= UI \sin 2\omega t \end{aligned} \quad (1-39)$$

上述功率的平均功率也为零，说明电容与电源之间也只存在能量交换。

我们定义瞬时功率的最大值为无功功率，记为 Q ，即

$$\left. \begin{aligned} \text{对电感而言, } Q &= UI = I^2 X_L = U^2 / X_L \\ \text{对电容而言, } Q &= UI = I^2 X_C = U^2 / X_C \end{aligned} \right\} \quad (1-40)$$

式中 $X_L = \omega L$, $X_C = 1/\omega C$

(3) 视在功率。视在功率是用来表示电气设备的容量的，采用的单位是伏安。

$$\left. \begin{aligned} \text{用有效值表示时, 对视在功率 } S &= UI \\ \text{对有功功率 } P &= UI \cos \varphi \\ \text{对无功功率 } Q &= UI \sin \varphi \end{aligned} \right\} \quad (1-41)$$

这三者构成功率三角形，如图 1-12 所示。

由图 1-10 可知， P 、 Q 、 S 三者之间的关系是：

$$\left. \begin{aligned} P &= S \cos \varphi \\ Q &= S \sin \varphi \\ S &= (P^2 + Q^2)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (1-42)$$

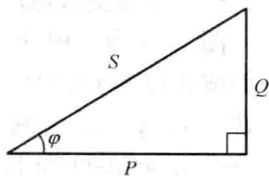


图 1-12 功率三角形

(4) 功率因数。从图 1-12 可见，有功功率是在视在功率上打一个折扣。这折扣就是 $\cos \varphi$ ，称为功率因数，而阻抗角 φ 也称为功率因数角。

功率因数对提高设备利用率，降低线路损耗及线路电压损耗