



国家电网公司
电力科技著作出版项目

电力行业电力电容器标准化技术委员会 编著

并联电容器装置 技术及应用



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

电力行业电力电容器标准化技术委员会 编著

并联电容器装置 技术及应用



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 简 介

本书是在多年积累的试验研究成果和大量运行、制造经验的基础上,结合目前的工程实际编写而成的。全书共分八章,主要对无功补偿的原理、作用及补偿配置的原则,并联电容器装置中主要设备的性能和质量要求,装置的关键技术问题,装置结构及其参数选择,装置的故障保护,装置的运行及电力系统无功、电压优化控制等方面作了系统的介绍。

本书从电力系统安全生产、经济运行的角度出发,注重理论与实践相结合,内容丰富全面,不但深入讨论了并联电容补偿的基本理论和系统分析,而且着重提供了并联电容器装置设计、制造和工程应用的主要方法,同时还介绍和诠释了最新的相关电力行业标准及规范、国家标准和 IEC 的有关规定。

本书可供电力系统和并联电容器及其装置制造行业工程技术人员以及大专院校相关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

并联电容器装置技术及应用/电力行业电力电容器标准化技术委员会编著. —北京:中国电力出版社,2010.12

ISBN 978-7-5123-1183-1

I. ①并… II. ①电… III. ①移相电容器-电容器成套装置
IV. ①TM531.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 245575 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>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 4 月第一版 2011 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 28.25 印张 693 千字

印数 0001—3000 册 定价 65.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

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



编审人员名单

主 审 倪学锋（教授级高级工程师）

副 主 审 张章奎（教授级高级工程师）

 谢 诚（教授级高级工程师）

主 编 宋 森

副 主 编 汪启槐 杨一民 虞忠年

编写人员 宋 森（教授级高级工程师）

 汪启槐（教授级高级工程师）

 汪延宗（高级工程师）

 杨一民（教授级高级工程师）

 史 班（高级工程师）

 盛国钊（高级工程师）

 虞忠年（高级工程师）

 冯申荣（教授级高级工程师）

 吕杭勇（工程师）

 吕 健（副研究员）

序

电力电容器行业是国产化做得最好的电器制造行业之一。2000 年之前, 并联补偿用电容器及电抗器几乎 100% 为国内厂商的产品, 2001 年之后, 生产无功补偿设备的国外厂商通过合资形式逐步进入中国。但到目前为止, 无功补偿用的电力电容器和并联电抗器的国内厂商市场占有率仍达 80% 以上。特别是并联电容器, 目前国内生产厂商都进行了技术改造或新厂建设工作, 不论是生产设备还是生产条件都是世界上最好的, 这一良好局面的形成得益于三个方面: 一是国家的大力支持和扶持; 二是老一辈无功设备运行及技术管理人员和生产厂商技术人员的努力; 三是我国电力行业的发展。

在 20 世纪 80 年代之前, 我国电力电容器行业还采用很落后的油浸纸绝缘电容器, 电容器质次价高, 年故障率达到 27% 左右, 爆炸着火情况严重。为改变这种局面, 1980 年电力工业部和机械工业部联合, 痛下决心采取两大措施解决此问题: ①电力工业部对国内电容器厂的产品停止订货一年, 同时调拨 2000 万元供电容器生产厂进行技术改造; ②从运行技术上进行改革, 将高压电容器的 Δ 形接线全部更换成 Y 形接线方式。这些措施的实施, 使电力电容器很快从油浸纸绝缘技术发展到了膜纸复合绝缘技术, 电容器运行的年故障率从 1979 年的 27.3% 下降到 1980 年的 10.7%, 1981 年降到 2.47%。到 20 世纪 90 年代, 电力电容器年故障率基本上维持在 0.5% 左右的水平, 接近国际先进水平。电容器质量的提高, 使企业获得了良好的经济效益, 也为电容器技术不断进步创造了有利的条件。在这个变化之初, 国内的电力电容器制造商是十分痛苦的, 但电容器行业最终像凤凰涅槃, 经过改革, 顺利完成了产品由油浸纸绝缘向膜纸复合绝缘的更新换代, 为该行业承担起民族工业建设对电力电容器需求奠定了基础。在随后的 30 年中, 电力电容器及无功补偿装置制造行业健康发展, 一直由民族工业为主导, 并得到不断的发展和进步, 这一巨大的成就与这一时期的无功专业技术工作者的奉献是密不可分的。

1997 年, 国家启动城乡电网改造工程, 已打下了一定基础的电容器制造业抓住了这次国家支持和扶持的机会, 迅速完成由膜纸复合电容器制造技术向全膜电容器技术的转变。虽然这个转变过快, 为质量保证留下了许多隐患, 但这个过程的完成使得我国电容器行业跟上了国际发展的步伐。因此, 这两次国家的支持和扶持对电容器行业来说是功在千秋的。

改革开放后, 由于各厂为自身的利益, 都对同行生产厂、用户封锁技术机密, 导致技术交流不畅, 使得电容器在迅猛发展过程中的许多关键问题未研究透彻, 从而埋下隐患。在这个关键时期, 国家电网公司实行了新的设备采购方法, 使得国家电网公司可以集中专家来解决电容器制造行业发展中留下的一些问题。以电力行业电力电容器标准化技术委员会和老专家组成的团队经过认真分析, 梳理电容器装置运行中存在的主要问题后, 根据问题的轻重缓急和生产厂家可以接受的程度, 确定了解决电容器和电容器装置的五年规划, 即: 先用一年

时间解决电容器装置的配置和电容器的发展方向问题，再用一年时间解决装置的结构和接线正确问题，其后用一年时间解决电容器装置保护正确问题，最后用一年时间解决电容器装置的爆炸着火问题。这样用四年时间解决电容器装置在运行中的安全性问题后，再用一年解决电容器和电容器装置的可靠性问题。经过五年的努力工作，电容器装置的配置结构、爆破能量限制、保护及电容器的发展方向等问题得到了较好的解决。

本书是专为从事无功补偿装置制造和使用技术人员编写的技术专著。该书较系统地从无功补偿的基本概念、基础知识，电容器装置的基本构成、补偿原理，装置及各部件的性能要求、制造过程、质量要求及应注意问题，电容器装置的运行要求及存在的问题，无功配置及调度等方面作了较系统的介绍，这样可使读者对无功补偿装置的运行应用、制造及质量控制都有一个较全面的了解。这对改变目前电力系统运行及技术人员熟悉无功补偿装置的运行应用，却不了解设备内部结构及制造的质量控制，制造厂家技术人员熟悉设备内部结构及制造的质量控制，却对无功补偿装置的运行应用不熟悉的局面是十分有益的。

该书的完成得益于这批老专家亲身经历了从油纸绝缘到膜纸绝缘再到全膜绝缘的发展过程，更得益于他们经历了 20 世纪 80 年代生产厂家与运行单位良好的合作。因此，这批老专家不仅具有雄厚的无功补偿装置运行技术，而且对无功补偿装置及部件的制造有深入的了解和研究。作者中有五位已年过七旬，此书的编写耗费了他们巨大的精力和体力，但如不将他们宝贵的技术积累留给后来的无功补偿专业工作者，将是无功补偿专业的一大损失。本书在编写过程中虽多有波折，但最终这些老专家聚三年之功，终于顺利地完成了书稿的编写工作。在此，由衷地感谢各位专家的辛勤劳动，并感谢日新电机（无锡）有限公司及其有关技术人员的支持和参与。

由于这批老专家长期从事无功补偿装置运行技术工作，擅长写论文和技术报告，著书并非他们所长，这也更加重了他们写作的负担。谨希望广大读者在阅读此书时能心情愉快并大有收获，也在此祝该书发行顺利。

电力行业电力电容器标准化技术委员会主任委员

倪学锋

2011 年 1 月

前言

交流电力系统由发电机、变压器、输配电线路、电动机和各种用电设备组成，其物理性能有电阻性、电感性和电容性，所以电力系统在运行时内部有电磁交换功率，这个功率用于电场、磁场能量的变化，反复吸收和放出相等（不消耗）的能量，在我国称为无功功率（简称无功）。

无功补偿技术利用电感和电容不同的物理性能，电感性电流相位落后电压 90° （感性无功功率）和电容性电流相位超前电压 90° （容性无功功率），即感性无功功率与容性无功功率具有互补的特点，采用安装容性设备（电容器）或感性设备（电抗器）的方式对电力系统中不同地点（时间）需要的无功功率进行补偿，减少无功功率在系统中的流动，达到就地平衡的目的，以满足电力系统安全、经济和电压质量的要求。

随着交流电力系统容量的扩大，电压等级的提高和输电距离的增加，无功补偿技术和补偿设备也有很快的发展，尤其是并联电容器装置有了更快的发展。例如，以前我国电容器采用纸浸矿物油，单台容量为 $10\sim 12\text{kvar}$ ，质量比特性约为 2kg/kvar ，介质损耗为 3W/kvar 的产品，目前绝大部分电容器已经采用全膜，单台容量为 $334\sim 500\text{kvar}$ ，质量比特性为 0.2kg/kvar 左右，介质损耗下降到 0.3W/kvar 以下，年损坏率在 1% 以下的产品，接近国际水平。另外，开发了带有内熔丝电容器和具有中国特色的高压大容量集合式电容器。电容器组由电压等级 10kV 、单组容量 8000kvar 左右发展到 $35\sim 66\text{kV}$ 、 $40\sim 60\text{Mvar}$ 为一组电容器组，目前最大的单组容量已达 120Mvar ，产品基本满足了电力系统对无功功率的需求。由于电容器单组容量的增大和电压等级的提高，对主接线和配套设备（开关设备、放电线圈、串联电抗器、熔断器等）的选择与参数配合要求也更为严格、复杂。同时，为了满足超高压直流输电系统稳定、安全运行，在换流站的交流侧，并联母线上的并联电容器已经投入运行，随着 $330\sim 500\text{kV}$ 超高压交流电力系统的发展和城市变电站使用电缆的增多，并联电抗器的使用也在不断增加。能够迅速跟踪负荷变化（无功功率大小和方向）的新型静止型动态无功功率补偿装置（SVC）的使用也有所增多。

目前，我国电力发电装机容量已达 8 亿 kW 以上， 1000kV 电压等级的输变电工程也已投入试运行，初步形成了全国性的输电网络，容性无功装机容量已达 4 亿 kvar 以上，其中绝大部分是并联电容器装置。这些无功补偿设备为电力系统稳定安全运行、改善电能质量、降低电能损耗、增加输配电能力等发挥了很好的作用。

为了管好、用好无功补偿设备，长期以来特别是 20 世纪 80 年代以后从事无功补偿工作的专业技术人员，尽职尽责对无功补偿设备的发展方向、存在问题、解决措施等方面倾注了很多精力，现在这些同志大部分已经退休，离开了工作岗位。为了进一步提高无功补偿专业技术人员的技术水平，掌握无功补偿设备的技术发展、存在问题与解决措施，充分用好无功补偿

设备，防止在运行中发生事故造成不必要的损失，电力行业电力电容器标准化技术委员会组织了国内专家编写了本书。编著者根据电力行业颁发的各种有关导则、标准和规定的要求，从安全生产、经济运行的角度出发，对无功补偿的基础知识、作用和补偿原则、并联电容器及配套设备的选择、运行和预防事故的技术措施等方面的内容作了全面系统的介绍。本书理论性和实用性都比较强，特别是对装置的主接线选择、电容器及配套参数的选择和配合、电容器内部故障元件继电保护的计算和整定、电容器组用串联电抗器的电抗率选择和系统谐波的关系及抑制谐波措施、单台保护用熔断器的选择等作了详细的论述，对保障电力系统安全、稳定、经济、优质、高效运行具有一定的指导作用。

本书共分八章，第一章无功功率与无功补偿的基础知识由汪启槐执笔，第二章无功功率作用及补偿配置由汪延宗执笔，第三章并联电容器由杨一民、史班、冯申荣执笔，第四章并联电容器装置主要配套设备和器件由史班、杨一民、吕杭勇执笔，第五章并联电容器装置中的主要技术问题由史班、汪启槐、吕健执笔，第六章并联电容器装置及其参数选择由盛国钊、史班、杨一民执笔，第七章高压并联电容器装置的故障保护由盛国钊执笔，第八章并联电容器装置的运行由虞忠年执笔，宋森负责全书统稿。

本书在编写过程中得到了日新电机（无锡）有限公司的大力支持，浙江省电力试验研究院赵启承、安徽省电力试验研究院俞德柱在编写过程中提出了不少宝贵建议，在此一并表示衷心感谢。

由于编写时间仓促和作者水平所限，书中内容难免存在不足之处，欢迎各位专家、读者多提宝贵意见。

编 者

2011 年 1 月

目 录

序

前言

第一章 无功功率与无功补偿的基础知识	1
第一节 交流正弦电的基本概念	1
第二节 交流正弦电路的功率和无功功率的概念	4
第三节 电力系统中的感性和容性无功功率要在保证电压质量情况下平衡	11
第二章 无功功率作用及补偿配置	19
第一节 供用电设备对无功功率的需求	19
第二节 无功功率与电压	26
第三节 无功补偿与线损及输变电设备利用率	55
第四节 无功补偿配置	57
第五节 无功及补偿的自动控制	62
第三章 并联电容器	69
第一节 电容器的基本概念	69
第二节 国内外电力电容器制造技术的发展	84
第三节 并联电容器用主要原材料	88
第四节 并联电容器的结构	90
第五节 并联电容器的主要制造工艺	102
第六节 并联电容器的额定值、常用规格和型号标志方法	110
第七节 并联电容器使用的环境条件	115
第八节 高压并联电容器通用质量和性能要求及主要检验方法	119
第九节 几类电容器特定的质量和性能要求	134
第四章 并联电容器装置主要配套设备和器件	141
第一节 并联电容器装置开关设备	141
第二节 并联电容器装置用的高压熔断器	150
第三节 金属氧化物避雷器	158
第四节 串联电抗器	162

第五节	放电线圈	179
第六节	自动控制器	191
第七节	电流互感器	195
第五章	并联电容器装置中的主要技术问题	200
第一节	并联电容器的局部放电机理	200
第二节	电容器内熔丝的工作原理	203
第三节	并联电容器组的操作过渡过程	213
第四节	并联电容器与电网谐波的关系	234
第五节	并联电容器的耐爆能量和外壳 10%破坏概率曲线	244
第六章	并联电容器装置及其参数选择	267
第一节	并联电容器装置的概况	267
第二节	并联电容器装置主要性能要求	271
第三节	并联电容器装置主接线及布置	282
第四节	并联电容器装置主要参数和类型的选择原则	306
第五节	并联电容器装置的结构和安装	339
第六节	常用装置结构方案介绍	351
第七节	并联电容器装置的检验	371
第七章	高压并联电容器装置的故障保护	375
第一节	概述	375
第二节	电容器内部故障保护	376
第三节	电容器组的不平衡保护	377
第四节	装置的延时电流速断保护和过电流保护	401
第五节	装置的过电压保护和低电压保护	403
第六节	保护之间的配合分析	405
第七节	装置的谐波保护和缺相保护	406
第八章	并联电容器装置的运行	407
第一节	新并联电容器装置投入运行	407
第二节	并联电容器装置正常运行	409
第三节	并联电容器装置异常运行现象与处理对策	421
第四节	电力系统无功、电压优化运行自动控制	425
附录	引用的相关标准一览表	434
参考文献		437

无功功率与无功补偿的基础知识

掌握了解交流电路的无功功率与无功补偿和相关的基础知识,有利于提高无功补偿装置的技术水平,为保障电力系统安全、稳定、经济运行发挥作用。本章着重介绍交流正弦电的基础知识、交流正弦电的功率与无功功率的概念、电力系统中感性和容性无功功率的平衡,以及无功补偿作用等相关知识。

第一节 交流正弦电的基本概念

人们早期使用的是直流电,电功率等于电压和电流的乘积,即 $P=UI$ 。自从感应电动机问世以后,交流电的使用给人们带来了很大方便,因此交流电很快发展起来,但此时人们发现,在交流电路中,电功率 $P \neq UI$,而是 $P=UI \cos \varphi$, $\cos \varphi$ 为电压和电流相角差的余弦。也就是说,在交流电路中,电压和电流的方向不一定是一致的,而是存在一定的相角差 φ 。这一物理现象是在交流电路中由于电感和电容的存在而产生的,从而在交流电路中除了有功功率之外,要引入一个“无功功率”的概念。为了更好地理解无功功率这一概念,有必要对交流电路的一些基础知识作一介绍。

一、概述

按正弦规律随时间变化的电压或电流称为正弦交流电压和电流。正弦交流电流瞬时值用 $i(t)$ 表示,即

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

式中 $\omega t + \varphi_i$ ——相位角或相位,反映了正弦量变化的进程;

φ_i ——初相角,是当 $t=0$ 的相位角,rad 或 $(^\circ)$;

ω ——角频率,或者说是相位角变化速率,rad/s。

$$\omega = \frac{d}{dt}(\omega t + \varphi_i) \quad (1-2)$$

式 (1-1) 电流的变化规律可以用图 1-1 的波形图表示。

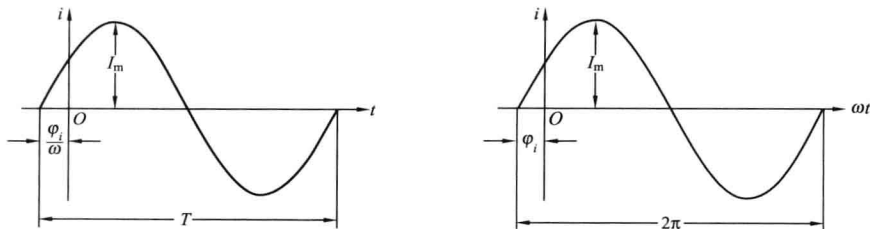


图 1-1 正弦交流电的电流波形图

显然, 正弦电流可以由 I_m 、 ω 和 φ_i 这三个参数决定, 故称这三个参数为正弦量的特征量, 亦称正弦量的三要素。

角频率表示正弦量变化快慢的特征量, 它的单位是弧度/秒 (rad/s)。除此以外, 通常还用频率和周期来表示正弦量变化的快慢。

频率表示正弦量每秒变化的次数, 用 f 表示, 它的单位是赫兹 (Hz), 因为正弦量变化一次经历了 2π 电角度, 因而有

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad \text{或} \quad \omega = 2\pi f \quad (1-3)$$

周期表示正弦量变化一次所需的时间, 用 T 表示, 它的单位是秒 (s), 周期和频率的关系为

$$T = \frac{1}{f} \quad \text{或} \quad f = \frac{1}{T} \quad (1-4)$$

我国电力系统提供的电源频率 $f=50\text{Hz}$ (称为工频), 角频率 $\omega=2\pi\times 50\text{rad/s}$ 。

正弦量的最大值叫幅值, 如正弦电压和电流的幅值分别为 U_m 和 I_m 。

二、正弦量的有效值

交流电的瞬时值是随时间而变化的, 如何来表征一个正弦电压、电流的大小, 通常用有效值来表示。以正弦电流为例, 电流的有效值是指在同一时间段与其同等直流电流热效应相等的直流电流数值, 这个时间段通常是指正弦电流的一个周期内, 也就是说, 在一个周期时间内, 正弦电流通过一个电阻时的发热量与直流电流流过该电阻在同样时间内 (一个周期) 发热量相等, 即

$$Q_{ac} = \int_0^T P(t) dt = \int_0^T i^2 R dt = R \int_0^T i^2 dt$$

直流电流流过该电阻在周期内的发热量为

$$Q_{dc} = PT = I^2 RT$$

两者相等, 即

$$Q_{ac} = Q_{dc}$$

$$RI^2 T = R \int_0^T i^2 dt$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (1-5)$$

定义正弦电流的有效值为 I , 从此定义可知, 正弦电流的有效值等于它的瞬时值的平方在一个周期内的积分的平均值再取平方根, 因此, 有效值又称方均根值。

如正弦电流

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

代入式 (1-5)

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2(\omega t + \varphi_i) dt}$$

$$\text{其中} \quad \int_0^T \sin^2(\omega t + \varphi_i) dt = \int_0^T \frac{1 - \cos 2(\omega t + \varphi_i)}{2} dt = \frac{T}{2}$$

所以

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 I_m$$

同理, 对于正弦电压其有效值

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0.707 U_m$$

故正弦电流和电压可按下式表达

$$i = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \varphi_i)$$

$$u = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \varphi_u)$$

一般情况下, 工程上指的正弦电压和电流的大小均指其有效值。

三、正弦量的相位差

为了比较相同频率的正弦量的相位关系, 引入了相位差的概念。相位差就是两个同频率正弦量的相位之差, 一般用 φ 表示。

例如, 有两个同频率的正弦电流

$$i_1 = I_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1)$$

$$i_2 = I_{2m} \sin(\omega t + \varphi_2)$$

它们之间的相位差

$$\varphi = (\omega t + \varphi_1) - (\omega t + \varphi_2) = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (1-6)$$

式 (1-6) 表明同频率两个正弦量的相位差与时间无关, 而决定两者之间的初相角。

当两个相同频率的正弦量的

相位差 $\varphi = 0$ 时, 即 $\varphi_1 = \varphi_2$, 如

图 1-2 (a) 所示, 即 i_1 和 i_2 相角相同, 同时过零, 同时达到最大值;

当 $\varphi > 0$ 时, 即 $\varphi_1 > \varphi_2$ 如图 1-2

(b) 所示, i_1 先于 i_2 达到零值、最大值, 称 i_1 超前 i_2 一个 φ 角;

当两个正弦量的相位差 $\varphi = \pm \pi$ 时, 如图 1-2 (c) 所示, 若 i_1 达到正的最大值, 则 i_2 此时达到负

的最大值, 称这两正弦量反相;

当两个正弦量的相位差为 $\pm \frac{\pi}{2}$ 时,

如图 1-2 (d) 所示, 则 i_1 达到最大值时, i_2 正好过零点, 这样的

两个频率相同的正弦量称为正交。

需要注意的是, 超前、滞后是相对的, 例如在图 1-2 (b) 中可以说 i_1 超前 i_2 一个 φ 角, 也可以说 i_1 滞后于 i_2 一个 $(2\pi - \varphi)$ 角, 规定 $|\varphi| \leq \pi$ 。

四、正弦量的相位表示法

一个正弦量具有幅值、频率及初相位三个特征, 而这些特征表示方法通常有三角函数和波形, 此外还可以用相量法即复变函数来表示, 应用此方法简化了计算程序。

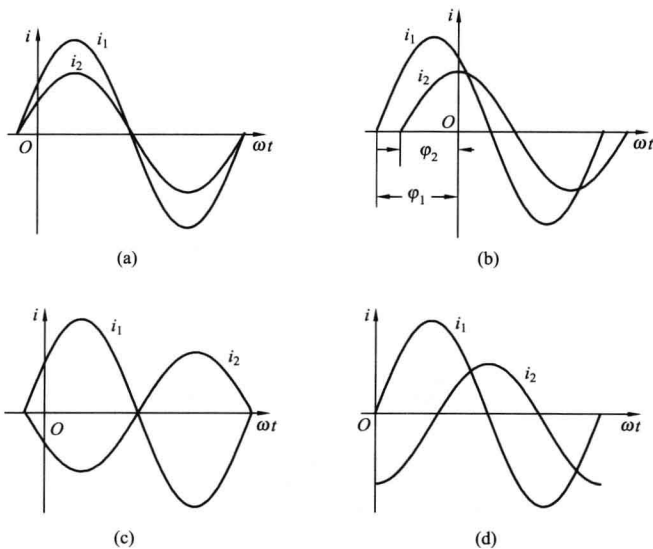


图 1-2 正弦量的相位差图

(a) $\varphi=0$; (b) $\varphi_1 > \varphi_2$; (c) $\varphi=\pm\pi$; (d) $\varphi=\pm\frac{\pi}{2}$

设平面中有一复数 A , 其模为 r , 幅角为 φ , 相量表示图如图 1-3 所示。

按复变函数分析

$$A = a + jb = r\cos\varphi + jr\sin\varphi = r(\cos\varphi + j\sin\varphi) \quad (1-7)$$

或简写为

$$A = r \angle \varphi \quad (1-8)$$

式 (1-7) 称为复数的代数式, 式 (1-8) 称为极坐标式。

复数的加减运算用代数式简单, 乘除法用极坐标式简单。

由上可知, 一个复数由模和幅角两个特征来确定, 而正弦量由幅值、初相角和频率三个要素来确定。但在分析线性电路时, 正弦量的频率是已知的, 因此, 一个正弦量由幅值 (或有效值) 和初相角就可确定。注意, 正弦量可以用复数表示, 为了与一般的复数相区别, 把表示正弦量的复数称为相量, 并在大写字母上注 “·”。

$$\text{如表示正弦电压} \quad \dot{U} = U(\cos\varphi + j\sin\varphi) = Ue^{j\varphi} = U \angle \varphi \quad (1-9)$$

式 (1-9) 中 j 是复数中的虚数单位, 即 $j = \sqrt{-1}$, $j^2 = -1$, $\frac{1}{j} = -j$ 。

按照各个正弦量的大小和相位关系画出的各个相量图形, 称为相量图。在相量图上形象地看出各个正弦量的大小和互相之间的相位关系。一个正弦量可以用一个旋转的矢量来表示, 其矢量的旋转频率为正弦量的频率, 由图 1-4 可知, 电流 $\dot{I}_1$ 比电流 $\dot{I}_2$ 超前 φ 角, 也就是正弦电流 i_1 比正弦电流 i_2 超前 φ 角。

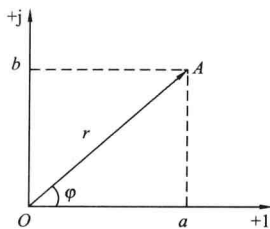


图 1-3 相量表示图

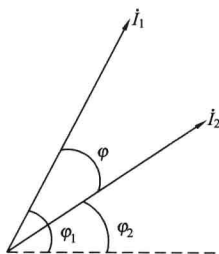


图 1-4 相角图

第二节 交流正弦电路的功率和无功率的概念

一、交流正弦电路的功率的定义

在交流电路中, 由于电压和电流是随时间而变化的, 故在工程计算上, 瞬时功率 p 的实用性不大, 通常在工程计算和测量中都是引入平均功率的概念。平均功率是指瞬时功率在一个周期内的平均值, 用大写字母 P 表示, 即功率的定义为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt \quad (1-10)$$

二、交流正弦电阻电路和有功功率

如图 1-5 的交流正弦电阻电路, 在电阻 R 上施加交流正弦电压 u 。

在电阻回路中流过的交流电流为 i , 根据欧姆定律

$$U = iR$$

在交流正弦电阻电路中,电压和电流都是时间的周期函数,设

$$i = I_m \sin \omega t = \sqrt{2} I \sin \omega t$$

$$\begin{aligned} \text{则电压} \quad u &= R I_m \sin \omega t \\ &= R I \sqrt{2} \sin \omega t \end{aligned}$$

$$\text{可见} \quad U_m = R I_m \quad \text{或} \quad U = R I$$

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i = 0$$

由于电阻上的电压和电流都是时间的周期函数,所以功率 $p = ui$ 也是时间的周期函数,这一功率称为瞬时功率,瞬时功率

$$p = ui = \sqrt{2} U \sin \omega t \cdot \sqrt{2} I \sin \omega t = 2UI \sin^2 \omega t = UI(1 - \cos 2\omega t)$$

根据交流功率的定义,故

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI(1 - \cos 2\omega t) dt \\ &= UI - \frac{1}{T} \int_0^T \cos 2\omega t dt \end{aligned} \quad (1-11)$$

由于 $\cos 2\omega t$ 是一个 2 倍频的余弦函数,它在一个周期内的积分为零,故

$$P = UI$$

因为 $U = IR$, 所以电阻上的功率为

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

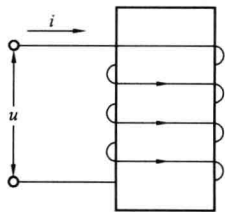
由图 1-5 可知:

- (1) 在交流正弦电阻电路中电压和电流的方向始终一致,即电压和电流是相位相同的。
- (2) 功率曲线是时间的函数,功率曲线始终在零线的上方,即瞬时功率均为正值,这意味着这一功率始终是由电源提供的。

交流正弦电阻回路中电压和电流的方向完全一致,瞬时功率始终是正值,这一功率完全是由电源提供的,这种平均功率称为有功功率。可见,在交流正弦电路中,有功功率是指一个周期内的平均功率。

三、交流正弦电感电路和感性无功功率

在稳态直流回路中电感是不起作用的。在交流回路中,由于电流随时间而变化,存在



电流变化率 $\frac{di}{dt}$, 故在交流正弦电感电路中,电感就呈现为感抗,交流电流在电感元件上会产生电压降,如图 1-6 所示,在电感元件上流过交流电流时,电感周围将产生磁通 Φ ,磁通穿过每匝线圈,如线圈有 N 匝,则电感元件的参数

$$L = \frac{N\Phi}{i}$$

图 1-6 电感元件原理图

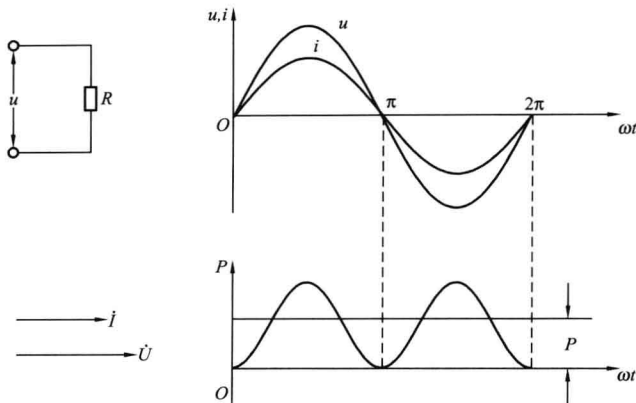


图 1-5 交流正弦电阻电路的电压、电流、功率波形图

当电感中流过电流 i 时

$$U = L \frac{di}{dt}$$

设

$$i = \sqrt{2} I \sin \omega t$$

则

$$U = L \frac{di}{dt} = L \frac{d(\sqrt{2} I \sin \omega t)}{dt} = \sqrt{2} \omega L I \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

$$U_m = \omega L I_m$$

$$U = \omega L I$$

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i = \frac{\pi}{2}$$

从而可知, 在交流电感回路中, 电流滞后于电压 $\pi/2$, 则电压和电流是正交的, 可以记作

$$\dot{U} = j\omega L \dot{I}$$

瞬时功率

$$p = iu = I_m \sin \omega t U_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

$$= I_m U_m \sin \omega t \cos \omega t$$

$$= 2IU \sin \omega t \cos \omega t$$

$$= UI \sin^2 2\omega t$$

(1-12)

由式 (1-12) 可知, 在交流正弦电感回路中, 瞬时功率是时间的周期函数, 其角频率为 2ω 。按交流正弦回路中功率的定义为一周期内的平均功率, 即功率 P 为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T UI \sin^2 2\omega t dt = 0$$

所以, 在交流正弦电感回路中, 一周期内的平均功率为零, 也就是说在交流正弦电路中电感元件是不消耗电源的有功功率。如图 1-7 的功率曲线所示, 在工频的第一个和第三个 $1/4$ 周期内, 电压和电流分别均为正值或负值, 即电压和电流同向, $\frac{di}{dt}$ 为正值, 在这期间内功率曲线的瞬时功率为正值, 由于 $\frac{di}{dt}$ 为正值, 意味着这时电感上的功率是由电源提供的, 说明

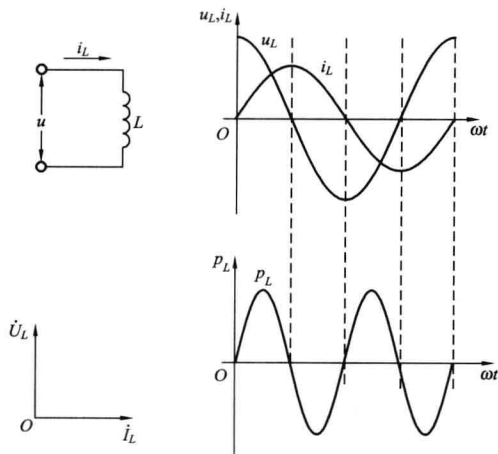


图 1-7 电感元件交流正弦电路的电压、电流、功率波形图

电感内的磁场是在形成过程, 电流由零增至峰值 I_m , 磁场能量由零增加至最大值 $W_{LM} = \frac{1}{2} LI_m^2$, 这个磁场能量是由电源提供的; 而在工频的第二个和第四个 $1/4$ 周期内, 电压和电流分别为正值和负值, 在此期间内电压为负值而电流为正值, 或电压为正值电流为负值, 由于 $\frac{di}{dt}$ 为负值, 这是磁场消失的过程, 电压和电流反向, 瞬时功率为负值, 说明在此期间内由电源吸收功率, 电感输出功率, 磁场能量由最大值减小至零, 电感中所建立的全部磁场能量返回电源。所以, 在一个周期内有两个 $1/4$ 周期

(第一、第三)是由电源提供能量在电感中建立磁场,此时的瞬时功率为正,另外两个 $1/4$ 周期(第二、第四)电感中的磁场能量又全部返回电源,电感元件在一个工频周期内的平均功率为零,这说明在交流正弦电感电路中,在一个工频周期内,电感和电源进行了四次能量交换,其中两次是由电源给电感提供能量以建立磁场,另外两次为电感向电源返回磁场能量,在电感回路中分别经历的二次磁场的建立和消失过程,这只是发生在电感电路和电源之间的能量交换,并没有消耗能量,这种电路中纯能量交换的功率叫做无功功率,记作 $Q_L = UI$,单位是乏(var)。电力系统中,把这种电感元件在交流正弦电压作用下的无功功率叫感性无功功率,又称为无功负荷。

无功功率尽管不存在能量的消耗,即在一个周期内的平均功率为零,但是它是电源和电气设备之间的一种客观存在的能量交换,而这种交换是以无功电流的形式在电源与电气设备之间经供电线路来回流动实现的。由于供电线路存在着电阻,流动的电流在此电阻上会形成压降和有功损耗,这也是人们要研究它的原因。

四、交流正弦电容电路和容性无功功率

在交流正弦电容电路中,流过电容元件的电流为电容电流,电容元件的电容量

$$C = \frac{q}{u}$$

式中 q ——电容器上储有电荷, C;

u ——电容上施加的电压, V。

电容元件在交流电压作用下流过的电流

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt}$$

设电压

$$u = U_m \sin \omega t$$

$$\text{即 } i = C \frac{du}{dt} = C \frac{d}{dt}(U_m \sin \omega t) = \omega C U_m \cos \omega t = \omega C U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (1-13)$$

$$I_m = \omega C U_m \quad \text{或} \quad I = \omega C U \quad (1-14)$$

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i = -\frac{\pi}{2}$$

式(1-13)表明,在交流电容电路中,电压的相位角滞后于电流 $\frac{\pi}{2}$,或者说电容电流的相位角超前于电压的相位角 $\frac{\pi}{2}$,电压和电流在相位上是正交的。

从式(1-14)可以导出

$$\frac{U}{I} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (1-15)$$

这说明在交流正弦电容电路中,电压与电流之比不仅与电容有关,而且还与频率有关, $\frac{1}{\omega C}$ 也具有电阻的量纲即欧姆(Ω),称为容抗,以 X_C 表示,即

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (1-16)$$

式(1-16)表明,容抗 X_C 与频率 f 成反比,当 $f=0$ 时,即为直流电路, $X_C \rightarrow \infty$,此时相当于开路,也就是说电容有隔离直流的作用。随着频率 f 的升高,容抗 X_C 随之而减小。当 $f \rightarrow \infty$ 时, $X_C \rightarrow 0$,此时电容相当于短路。