

## ABSTRACT

Today, power is a sort of important energy sources, it is widely used in many fields of industry, agriculture and national defence. With the development of electric power and electron technology, a number of the nonlinear loads and all kinds of commutating equipments are widely applied in every walk of life, what they bring a mass of harmonic current make the content of harmonic increase in the power system and quality of power drop. So, it is urgent to eliminate harmonic and improve power quality.

Recently, with the quickly development of power electronic technology, Active Power Filter(APF) is being an important way to eliminate harmonic dynamically. It can outcome the inherent shortcomings of LC filters. APF is an advanced power electronic device, which can be used for compensating harmonics, reactive power and negative sequence current. Compared with conventional LC filter, APF has advantages of real-time and accuracy. So APF has foreground widely. but, in china, the studies and exploitations in APF are at its beginning stage, and large capacity mature products have not been coming out yet, so the studies in APF have important significance.

Based on electrician's theory, it is analysed that it is not the sine circuit that produces the power of distortion; Apparent power, active power and inactive power, can't form the right triangle; Apparent power, active power, inactive power and the power of distortion form the power quadrangle. Utilize power quadrangle, can by active power, inactive power and the power of distortion calculates the power factor of base wave of the circuit, the total power factor  $\lambda$  and factor cosf of total displacement, can also calculate the power of distortion, physical quantities, such as distortion angle and distortion factor, etc. And survey the data and formula in the article from the scene , carry on the calculation of the relevant physical quantity.

The studies in this paper have some guidances and referrences on the exploitation of the active power filter experimental system. the result show that the method is right and exact. At last, I design a virtual software to calculate a great deal data for "quadrangle theory".

**Key words:** harmonic; APF; quadrilateral distortion triangle; the testing method of harmonic; Matlab simulation

## 学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是我在指导教师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确说明并表示谢意。

作者签名： 白丽丽      日期： 2017.3

## 学位论文使用授权声明

本人完全了解大庆石油学院有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或其指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅。有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

学位论文作者签名： 白丽丽      导师签名： 荀小彬  
日期： 2017.3      日期： 2017.3

### 创新点摘要

本文重点研究电力系统中含有谐波情况下的电工计量，为解决功率三角形不能解决的一些问题，例如，求含有谐波电流的非正弦电路的电气参数问题：在非正弦交流电路中，因存在谐波电流而导致产生畸变功率，使电路中的视在功率、有功功率和无功功率不再符合直角三角形的关系，出现了视在功率的平方大于有功功率和无功功率的平方和的现象。根据电工理论提出了由视在功率、有功功率、无功功率和畸变功率构成的功率四边形。功率四边形也可看成是由基波功率三角形和谐波功率三角形组成的。由功率四边形进一步确立了非正弦交流电路中的电流四边形和导纳四边形，以及它们和功率四边形的相似关系。以现场实测数据为例，利用四边形理论计算了非正弦交流电路中的畸变功率、谐波畸变角、总谐波电流、畸变导纳、谐波导纳等参数。并为“四边形”理论中的相关公式设计软件来更简洁地计算畸变功率、畸变角和畸变因数等参数。

## 引言

随着电力电子技术的发展，电力电子装置的广泛应用给电力系统带来了严重的谐波污染。各种电力电子设备在化工、石油等诸多领域的广泛应用，使电网中的谐波问题日益严重，许多低功率因数的电力电子装置给电网带来额外负担并影响供电质量，谐波使电能的生产、传输和利用效率降低，使电气设备过热、产生振动和噪声，使用寿命降低，甚至发生故障或烧毁。对于电力系统外部，谐波对通信设备和电子设备会产生严重干扰。因此，电力电子装置的谐波污染已成为阻碍电力电子技术发展的重大障碍。故对谐波的分析研究主要是抑制谐波污染，提高功率因数的研究已成为电力电子技术中的一个重大课题。

因为谐波的危害日趋严重，所以对谐波计算和抑制方法的研究变得十分重要。谐波研究的意义，还在于其对电力电子技术自身发展的影响。电力电子技术是未来科学技术发展的重要支柱。然而，电力电子装置所产生的谐波污染已成为阻碍电力电子技术发展的重大障碍。它迫使电力电子领域的研究人员必须对谐波问题进行更为有效的研究。

正弦交流电路中，功率、电压（电流）和阻抗（导纳）分别有相应的直角三角形来确定各自的关系。例如功率  $P$ 、 $Q$  和  $S$  可构成功率三角形但在非正弦电路中，由于谐波电压或电流将产生畸变功率  $N$ ， $S$ 、 $P$  和  $Q$  之间已不再符合直角三角形的关系。本文以电工理论为基础，分析了  $S$ 、 $P$ 、 $Q$  和  $N$  构成了功率四边形。由功率四边形，可以清晰地表达非正弦电路中，三种不同功率因数的意和相互关系，提出了由  $N$  引起的畸变角  $\varphi_N$  的概念，揭示了畸变因数、总谐波畸变和  $\cos \varphi_N$  的内在联系，对电力电子技术的理论研究和在波形畸变条件下的电工计量问题具有实际应用价值。

随着电网中非线性负荷的种类、数量和容量的不断增加，这些非线性负荷的高次谐波对电网的影响和危害日趋严重，已成为电网的主要污染源。因此，谐波抑制方法和非正弦电路中电工计量的研究，将对电力电子技术学科的发展做出积极的贡献。

本课题围绕这一关键问题，通过对电力电子谐波源及其危害的认识和分析，研究有效抑制谐波方法所采用的有源滤波器，对比各种检测方法，通过仿真得出其抑制效果，并提出了在非正弦交流电路中利用“四边形”理论，来计算畸变功率  $N$ 、畸变角  $\varphi_N$  和畸变因数  $\zeta$  等物理量，通过软件得出计算结果，进一步分析谐波。最后对谐波综合治理的发展趋势进行了展望。

## 绪论

"谐波"一词起源于声学。有关谐波的数学分析在 18 世纪和 19 世纪已经奠定了良好的基础。傅立叶等人提出的谐波分析方法至今仍被广泛应用。电力系统的谐波问题早在 20 世纪 20 年代和 30 年代就引起了人们的注意。当时在德国，由于使用静止汞弧变流器而造成了电压、电流波形的畸变。1945 年 J.C.Read 发表的有关变流器谐波的论文是早期有关谐波研究的经典论文。到了 50 年代和 60 年代，由于高压直流输电技术的发展，发表了有关变流器引起电力系统谐波问题的大量论文。70 年代以来，由于电力电子技术的飞速发展，各种电力电子装置在电力系统、工业、交通及家庭中的应用日益广泛，谐波所造成的危害也日趋严重。世界各国都对谐波问题予以充分和关注。国际上召开了多次有关谐波问题的学术会议，不少国家和国际学术组织都制定了限制电力系统谐波和用电设备谐波的标准和规定<sup>[2]</sup>。

### 1 研究电力系统谐波抑制和电工计量的目的和意义

一个理想的电力系统和供电系统，应是以单一恒定的工业频率和规定的电压水平向用户供应电能。但近年来，随着现代工业的不断发展，工矿企业，运输部门，在家用电器装置和高压直流输电等许多领域大量使用电力电子装置，非线性电力负荷（如大容量变压器、大容量变流装置、高压直流输电、家用电器等）迅速增加；尤其是随着现代电力电子技术的发展，大容量电力电子元件的不断推陈出新，使电力电子变流装置的应用更加普及。一方面有利于节能和控制，另一方面这些非线性电力负荷产生的高次谐波，使电网波形发生畸变、电压出现闪变等，严重影响了电网的供电质量，甚至有些地区电网谐波的含量已超出国家规定的范围。因此，对其采取限制措施消除非线性电力负荷产生的高次谐波是当务之急。

随着电网中非线性负荷的种类、数量和容量的不断增加，这些非线性负荷的高次谐波对电网的影响和危害日趋严重，已成为电网的主要污染源。

谐波研究的意义，首先是因为谐波的危害十分严重。谐波使电能的生产、传输和利用效率降低，使电气设备过热、产生振动和噪声，并使绝缘老化，使用寿命降低，甚至发生故障或烧毁。对于电力系统外部，谐波对通信设备和电子设备会产生严重干扰<sup>[2]</sup>。

谐波研究的意义，还在于其对电力电子技术自身发展的影响。电力电子技术是未来科学技术发展的重要支柱。然而，电力电子装置所产生的谐波污染已成为阻碍电力电子技术发展的重大障碍。它迫使电力电子领域的研究人员必须对谐波问题进行更为有效的研究。

由于电网的非零阻抗较小，公用电网中，通常电压波形畸变很小，而电流的波形畸变可能很大。因此，不考虑电压畸变，研究电压波形为正弦波，电流波形为非正弦波的情况，有很大的实际意义。功率三角形、导纳（阻抗）三角形和电流（电压）三角形是正弦交流电路理论中的重要概念，具有广泛的应用。

随着电力电子技术的发展和应用，变流器工作时产生大量的高次谐波电流注入电网，使得正弦电网中非正弦电流成分增大，作为电网负载之一的变流器，其功率、电流和导纳等物理量已不再符合相应的三角形的关系。为了确定非正弦交流电路中功率、电流和导纳等物理量，本文以电工理论为基础，运用等效谐波电流的概念，并参考有关文献<sup>[2][6]</sup>，确立了非正弦交流电路中的功率四边形、电流四边形和导纳四边形理论，可以解决非正弦交流电路中“三角形”理论不能解决的问题。

通过本文的研究，提出了功率四边形、电流四边形和导纳四边形的理论，提供了一种谐波测量仪器的原理。本研究成果可应用于供电和用电部门、科研单位和高等院校对谐波的计算工作，以此理论为基础研发的仪器可进行谐波的测量。

本研究对电力电子学科的发展有一定的意义（论文审稿人评价）。

## 2 目前国内外谐波治理的研究现状

有源电力滤波器作为消除电力公害、改善供电质量的有力工具，在美国、日本、德国等发达工业国家已广泛用于国民经济的各个生产部门。自 1982 年世界上第一台 GTO 有源电力滤波器在日本投入运行，最大的一台容量达到 20MVA。日本作为电力电子技术最发达的国家，有源电力滤波器已经到了普及应用阶段。

与国外相比，我国的有源滤波技术还处在研究阶段，北方交通大学王良博士 1991 年研制出 3kVA 的有源无功及谐波综合补偿器 RHCC 实验装置，并对三相不平衡系统无功与高次谐波补偿的理论和方法进行了较为系统的研究。1991 年 12 月初，由华北电力科学研究院和冶金自动化研究院联合研制的 33kVA 双极型晶体管（BJT）电压型 APF 在北京木材厂中心变电站投入工业试运行，补偿 90kW 晶闸管直流电机传动系统，抑制 3、5、7、9、11、13 次谐波电流，各次谐波电流的残留率小于 5%。1993 年，华北电力学院纪延超博士用大规模集成电路完成 3kVar 新型电力有源滤波器实验控制系统。此外，重庆大学等高校的研究人员，也对 APF 或 RHCC 进行了理论研究或实验研究。随着我国国民经济的飞速发展，电力系统高次谐波问题的日益严重，对有源电力滤波器的研制和应用也提高到一个新的认识高度。伴随着我国电能质量治理工作的深入开展，利用 APF 进行谐波治理将会具有巨大的市场应用潜力，有源滤波技术必将得到广泛的应用。

目前，世界上 APF 的主要生产厂家有日本三菱电机公司、美国西屋电气公司、德国西门子子公司等。

APF 从产生到现在，经过了许多科学技术人员的不断改进，已经可以在工业生产中应用，随着各方面技术的发展 APF 也在继续不断地改进，正向着下面几方面发展：

(1) 通过采用 PWM 调制和提高开关器件等效开关频率的多重化技术，实现对高次谐波的有效补偿。当 APF 的容量小于 2MVA 时，通常采用 IGBT 及 PWM 技术进行谐波补偿。当容量大于 5MVA 时，通常采用 GTO 及多重化技术进行谐波补偿。

(2) 大功率滤波装置从经济上考虑，可以采用 APF 与 LC 无源滤波器并联使用的

混合型有源滤波系统，以减小 APF 的容量，达到降低成本、提高效率的目的。其中 LC 无源滤波器用来消除高次谐波分量，APF 用来补偿低次谐波分量。

(3) 从长远角度看，随着大量换流器用于变频调速系统，其价格必然下降。同时，随着半导体器件制造水平的迅速发展，尤其是 IGBT 的广泛应用，混合型有源滤波系统低成本的优势将逐渐消失，而串一并联 APF 由于其功能强大、性价比高，将是一种很有发展前途的有源滤波装置。

(4) 可通过单节点单装置的装设，达到多节点谐波电压综合治理的 APF 的出现，使电力系统谐波治理朝着动态、智能、经济效益好的方向发展。

对于交流电路中的电工计量方面，一般应用“功率三角形”来求电路中的相关物理量，含有谐波的非正弦电路的无功功率情况比较复杂，定义很多，但至今尚无被广泛接受科学而权威的定义。本文围绕这一关键问题，提出了功率四边形、电流四边形和导纳四边形的理论，通过对电力电子谐波源及其危害的认识和分析，设计虚拟测量仪，通过  $P$ 、 $Q$ 、 $S$  实现畸变功率、畸变角、总谐波畸变等物理量的测量。目前，国内虽然有一些谐波测量仪器（例如 PF9811），但对某些物理量，甚至包括与谐波有关的某些物理量亦不能测量，且价格较高。因此有必要开发研制多功能的谐波测量仪器。

### 3 本文所做的工作

本文详细分析和研究了有源电力滤波器的谐波检测和在非正弦交流电路中的电工计量等问题，并提出了利用功率四边形计算非正弦交流电路中的相关物理量的方法，随后在 Matlab 软件环境下对有源滤波器进行了仿真实验，检验其抑制谐波的效果，并用大庆采油二厂提供的数据验证为“四边形”理论设计的虚拟仪器其有效性和准确性。论文的具体结构如下：

**绪 论：**阐述了研究电力系统谐波的目的和意义，并对目前国内国外谐波治理的研究现状做了简单了解。

**第 1 章：**阐述谐波的定义、产生、危害和抑制标准。

**第 2 章：**研究谐波消除和抑制的主要技术措施，包括无源滤波器、有源滤波器。重点分析了有源电力滤波器基本构成、工作原理、谐波电流检测技术方法和本文采用的一种单相谐波检测法。

**第 3 章：**对电力系统谐波分析并进行计算，其中提出了用功率四边形实现非正弦交流电路的电工计量新方法。

**第 4 章：**根据“大庆采油二厂变频输油系统测试报告”提供的大量数据对“四边形”理论进行验证。设计一种由  $P$ 、 $Q$ 、 $S$  计算有关谐波物理量的虚拟仪器。

**结 论：**对整篇论文进行总结，并且对今后的研究工作进行展望。

## 第1章 谐波的产生机理和危害

### 1.1 什么是谐波

供电系统谐波的定义是对周期性非正弦电量进行傅立叶级数分解，除了得到与电网基波频率相同的分量，还得到一系列大于电网基波频率的分量，这部分电量称为谐波。谐波频率与基波频率的比值 ( $n=f_n/f_1$ ) 称为谐波次数。电网中有时也存在非整数倍谐波，称为非谐波 (Non-harmonics) 或分数谐波。谐波实际上是一种干扰量，使电网受到“污染”。电工技术领域主要研究谐波的发生、传输、测量、危害及抑制，其频率范围一般为  $2 \leq n \leq 40\text{Hz}$ <sup>[3]</sup>。

自从使用交流电起，谐波就已经存在于电力系统中了。电力系统中，理论上的电压和电流波形是工频下的正弦波，但实际的波形总有不同的非正弦畸变。谐波的概念实际来自于研究正弦波形畸变的数学方法，国际上公认的谐波定义为：“谐波是一个周期电气量的正弦波分量，其频率为基波的整数倍”。在电力系统中，我们通常所说的谐波主要是指频率是基波频率整数倍的正弦波，也常称为高次谐波。

从数学的角度来分析谐波，可以更清楚地理解它。根据傅立叶级数，任何周期波形都可以被展开为傅立叶级数，即

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)] = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(n\omega_0 t + \varphi_n) \quad (1-1)$$

式中： $f(t)$  是一个角频率  $\omega_0$  的周期函数；

$c_1 \sin(\omega_0 t + \varphi_1)$  是基波分量，幅值为  $c_1$ ，相位为  $\varphi_1$ ；

$c_n \sin(n\omega_0 t + \varphi_n)$  是第  $n (n > 1)$  次谐波分量，幅值为  $c_n$ ，相位为  $\varphi_n$ 。

当电力系统有较强的谐波源，又没有采取有效的抑制措施，电网的电压或电流波形就会发生畸变。可以用傅立叶级数将畸变的电压波形  $u(t)$  或电流波形  $i(t)$  表示成若干个正弦波叠加的形式，即

$$u(t) = \sqrt{2}U_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + \sum_{n=2}^N \sqrt{2}U_n \sin(n\omega_1 t + \varphi_n) \quad (1-2)$$

$$\text{或 } i(t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + \sum_{n=2}^N \sqrt{2}I_n \sin(n\omega_1 t + \varphi_n) \quad (1-3)$$

式中： $U_1$ 、 $I_1$  是基波电压、电流有效值；

$\varphi_1$  是基波电压、电流初相位；

$U_n$ 、 $I_n$  是  $n$  次谐波电压、电流有效值；

$\varphi_n$  是  $n$  次谐波电压、电流初相位。

把含有谐波的电压或电流波形用傅立叶级数表示成数学形式后，就可以很清晰地看出各次谐波的幅值、初相位，便于分析和计算。但是，在大多数情况下，不是要知道各次谐波的大小和相位，而是要知道电压或电流中谐波所占的比例。

用下面两个概念来衡量谐波所占的比例。一个是  $n$  次谐波含有率，另一个是谐波总畸变率，现分述如下：

$n$  次谐波电压含有率  $HRU_n$ (Harmonic Ratio  $U_n$ )表示为：

$$HRU_n = \frac{U_n}{U_1} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中： $U_n$  为第  $n$  次谐波电压有效值； $U_1$  为基波电压有效值。

$n$  次谐波电流含有率  $HRI_n$ (Harmonic Ratio  $I_n$ )表示为：

$$HRI_n = \frac{I_n}{I_1} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中： $I_n$  为第  $n$  次谐波电流有效值； $I_1$  为基波电流有效值。

谐波电压含量  $U_H$  和谐波电流含量  $I_H$  分别定义为：

$$U_H = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} \quad (1-6)$$

$$I_H = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (1-7)$$

电压谐波总畸变率  $THD_U$ (Total Harmonic Distortion  $U$ )和电流谐波总畸变率  $THD_I$ (Total Harmonic Distortion  $I$ )分别定义为：

$$THD_U = \frac{1}{U_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} \quad (1-8)$$

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (1-9)$$

根据上面所给的公式，就可以计算出电压或电流中谐波的含量。

## 1.2 谐波的产生

谐波产生的根本原因是由于非线性负载所致。当电流流经负载时，与所加的电压不呈线性关系，就形成非正弦电流，从而产生谐波。

公用电网中的谐波是如何产生的呢？对于这个问题我们可以从三个方面来分析。

1. 电源本身质量不高产生的谐波

发电机是产生电能的装置，由于三相绕组在制作上很难做到绝对对称，铁心也很难做到绝对均匀一致和其它一些原因，致使电源多少也会产生一些谐波。

2. 输配电系统产生的谐波

输配电系统中主要是电力变压器产生谐波，由于变压器铁心的饱和，磁化曲线的非线性，加上设计变压器时考虑经济性，其工作磁密选择在磁化曲线的近饱和段上，这样就使得磁化电流呈尖顶波形，因而含有奇次谐波。它的大小与磁路的结构形式、铁心的饱和程度有关。

电源和输配电系统虽然产生谐波，但这两方面产生的谐波所占的比例是很小的。

### 3. 用电设备产生的谐波

这方面的谐波所占的比例很大，是电网主要的谐波源。在用电设备中，下面一些设备都能产生谐波：

#### (1) 晶闸管整流装置

由于晶闸管整流在电力机车、铝电解槽、充电装置、开关电源等许多方面得到了越来越广泛的应用，给电网造成了大量的谐波。晶闸管整流装置采用移相控制，从电网吸收的是缺角的正弦波，从而给电网留下的也是缺角的正弦波，显然在留下部分中含有大量的谐波。如果整流装置为单相整流电路，在接感性负载时则含有奇次谐波电流，其中3次谐波的含量可达基波的30%；接容性负载时则含有奇次谐波电压，其谐波含量随电容值的增大而增大。如果整流装置为三相全控桥6脉整流器，变压器原边及供电线路含有5次及以上奇次谐波电流；如果是12脉冲整流器，也含有11次及以上奇次谐波电流。经统计表明：由整流装置产生的谐波占所有谐波的近40%，这是最大的谐波源。

例如：带阻感负载时单相桥式全控整流电路的谐波状况分析<sup>[15]</sup>

忽略换相过程和电流脉动，带阻感负载，直流电感L足够大，变压器二次侧电流：

$$\begin{aligned} i_2 &= \frac{4}{\pi} I_d \left( \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right) \\ &= \frac{4}{\pi} I_d \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{1}{n} \sin n\omega t = \sum_{n=1,3,5,\dots} \sqrt{2} I_n \sin n\omega t \end{aligned} \quad (1-10)$$

变压器二次侧电流谐波分析：

$$I_n = \frac{2\sqrt{2}I_d}{n\pi} \quad n=1,3,5,\dots \quad (1-11)$$

电流中仅含奇次谐波，各次谐波有效值与谐波次数成反比，且与基波有效值的比值为谐波次数的倒数。n=3时， $\frac{I_n}{I_d} \approx 0.300$ ，可以得出3次谐波的含量可达基波的30%。

#### (2) 变频设备

变频装置常用于风机、水泵、电梯等设备中，由于采用了相位控制，谐波成份很复杂，除含有整数次谐波外，还含有分数次谐波，这类装置的功率一般较大，随着变频调速的发展，对电网造成的谐波也越来越多。

#### (3) 电弧炉、电石炉

电弧炉、电石炉的熔炼期，由于加热原料时电炉的三相电极很难同时接触到高低不平的炉料，引起三相负荷不平衡，产生谐波电流，经变压器的三角形连接线圈而注入电网。其中主要是2~7次的谐波，平均可达基波的8%~20%，最大可达45%。

#### (4) 气体放电类电光源

荧光灯、高压汞灯、高压钠灯与金属卤化物灯等属于气体放电类电光源。分析与测量这类电光源的伏安特性，可知其非线性十分严重，有的还含有负的伏安特性，它们会给电网造成奇次谐波电流。

#### (5) 家用电器

电视机、录像机、计算机、调光灯具等，因具有调压整流装置，会产生较深的奇次谐波。在洗衣机、电风扇、空调等有绕组的设备中，因不平衡电流的变化也能使波形改变。这些家用电器虽然功率较小，但数量巨大，也是谐波的主要来源之一。

### 1.3 谐波的危害

电网谐波造成电网污染，正弦电压波形畸变，使电力系统的发供用电设备出现许多异常现象和故障，情况日趋严重。电力系统中谐波的危害是多方面的，概括起来有以下几个方面：

#### 1. 配电线路的危害

##### (1) 影响线路的稳定运行

供配电系统中的电力线路与电力变压器一般采用电磁式继电器、感应式继电器或晶体管继电器予以检测保护，使得在故障情况下保证线路与设备的安全。但由于电磁式继电器与感应式继电器对10%以下含量高达40%时又导致继电保护误动作，因而在谐波影响下不能全面有效地起到保护作用。晶体管继电器虽然具有许多优点，但由于采用了整流取样电路，容易受谐波影响，产生误动或拒动。这样，谐波将严重威胁供配电系统的稳定与安全运行。

##### (2) 影响电网的质量

电力系统中的谐波能使电网的电压与电流波形发生畸变。如民用配电系统中的中性线，由于荧光灯、调光灯、计算机等负载，会产生大量的奇次谐波，其中3次谐波的含量较多，可达40%；三相配电线路中，相线上的3的整数倍谐波在中性线上会叠加，使中性线的电流值可能超过相线上的电流。另外，相同频率的谐波电压与谐波电流要产生同次谐波的有功功率与无功功率，从而降低电网电压，浪费电网的容量。

#### 2. 对电力设备的危害

##### (1) 对电力电容器的危害

当电网存在谐波时，投入电容器后其端电压增大，通过电容器的电流增加得更大，使电容器损耗功率增加。对于膜纸复合介质电容器，虽然允许有谐波时的损耗功率为无谐波时损耗功率的1.38倍；对于全膜电容器允许有谐波时的损耗功率为无谐波时的1.43倍，但如果谐波含量较高，超出电容器允许条件，就会使电容器过电流和过负荷，损耗

功率超过上述值，使电容器异常发热，在电场和温度的作用下绝缘介质会加速老化。尤其是电容器投入在电压已经畸变的电网中时，还可能使电网的谐波加剧，即产生谐波扩大现象。另外，谐波的存在往往使电压呈现尖顶波形，尖顶电压波易在介质中诱发局部放电，且由于电压变化率大，局部放电强度大，对绝缘介质更能起到加速老化的作用，从而缩短电容器的使用寿命。一般来说，电压每升高10%，电容器的寿命就要缩短1/2左右。再者，在谐波严重的情况下，还会使电容器鼓肚、击穿或爆炸。

#### (2) 对电力变压器的危害

谐波使变压器的铜耗增大，其中包括电阻损耗、导体中的涡流损耗与导体外部因漏磁通引起的杂散损耗都要增加。谐波还使变压器的铁耗增大，这主要表现在铁心中的磁滞损耗增加，谐波使电压的波形变得越差，则磁滞损耗越大。同时由于以上两方面的损耗增加，因此要减少变压器的实际使用容量，或者说在选择变压器额定容量时需要考虑留出电网中的谐波含量。除此之外，谐波还导致变压器噪声增大，变压器的振动噪声主要是由于铁心的磁致伸缩引起的，随着谐波次数的增加，振动频率在1KHZ左右的成分使混杂噪声增加，有时还发出金属声。

#### (3) 对电力电缆的危害

由于谐波次数高频率上升，再加之电缆导体截面积越大趋肤效应越明显，从而导致导体的交流电阻增大，使得电缆的允许通过电流减小。另外，电缆的电阻、系统母线侧及线路感抗与系统串联，提高功率因数用的电容器及线路的容抗与系统并联，在一定数值的电感与电容下可能发生谐振。

#### (4) 对电动机的危害

谐波对异步电动机的影响，主要是增加电动机的附加损耗，降低效率，严重时使电动机过热。尤其是负序谐波在电动机中产生负序旋转磁场，形成与电动机旋转方向相反的转矩，起制动作用，从而减少电动机的出力。另外电动机中的谐波电流，当频率接近某零件的固有频率时还会使电动机产生机械振动，发出很大的噪声。

#### (5) 对低压开关设备的危害

对于配电用断路器来说，全电磁型的断路器易受谐波电流的影响使铁耗增大而发热，同时由于对电磁铁的影响与涡流影响使脱扣困难，且谐波次数越高影响越大；热磁型的断路器，由于导体的集肤效应与铁耗增加而引起发热，使得额定电流与脱扣电流降低；电子型的断路器，谐波也要使其额定电流降低，尤其是检测峰值的电子断路器，额定电流降低得更多。由此可知，上述三种配电断路器都可能因谐波产生误动作。

对于漏电断路器来说，由于谐波汇漏电流的作用，可能使断路器异常发热，出现误动作或不动作。对于电磁接角器来说，谐波电流使磁体部件温升增大，影响接点，线圈温度升高使额定电流降低。对于热继电器来说，因受谐波电流的影响也要使额定电流降低。在工作中它们都有可能造成误动作。

#### (6) 对弱电系统设备的干扰

对于计算机网络、通信、有线电视、报警与楼宇自动化等弱电设备，电力系统中的

谐波通过电磁感应、静电感应与传导方式耦合到这些系统中，产生干扰。其中电感应与静电感应的耦合强度与干扰频率成正比，传导则通过公共接地耦合，有大量不平衡电流流入接地极，从而干扰弱电系统。

### 3. 谐波对雷达系统、测空设备的影响

航天航空的地面测空系统，雷达系统的正常工作关系到国家人民的巨大利益，设备供电电源中任何瞬时脉冲、浪涌和谐波都会引起各类精密测试仪器、控制系统一连串的不正常的反应，哪怕某一个继电器的接触点由于谐波造成接触点表面形成阻抗很小的氧化膜，使继电器灵敏度降低而造成的危害将是无法弥补的。

### 4. 谐波对人体有影响

从人体生理学来说，人体细胞在受到刺激兴奋时，会在细胞膜静息电位基础上发生快速电波动或可逆翻转，其频率如果与谐波频率相接近，电网谐波的电磁辐射就会直接影响人的脑磁场与心磁场。

### 5. 谐波对各类蓄电池充电设备的影响

无论是 UPS 中的蓄电池还是汽车、地铁、电动车甚至小到手机中的蓄电池，大家都知道一个普遍现象就是使用一段时间后蓄电池的蓄电量会大大低于原出厂标定值，有些生产这类蓄电池的厂家也会由于出厂电池达不到设计值而想尽办法。其实真正的原因就是在蓄电池的充电过程中电源中由于整流、换流等非线性的原理，使谐波的含量很高，不但使各类蓄电池的极板表面严重氧化而充电不足，而且使充电过程中的电能浪费达到惊人的程度。

我们可以发现随着电路系统中高科技设备(大多数是非线性用电负载)的日益增多，电路中的谐波等杂质会越来越多，通过对电路系统的分析、设计、安装 EP 装置可达到非常良好的效果。

## 1.4 谐波限制标准

我国于 1998 年 12 月 14 日发布了国家标准 GB17625.1-1998《低压电气及电子设备发出的谐波电流限值(设备每相输入电流≤16A)》，等效采用 IEC6100-3-2：1995，但在技术内容上与该国际标准完全一致。GB17625.1 规定了准备接入公用低压配电系统中的电气、电子设备(每相输入电流≤16A)可能产生的谐波的限值<sup>[17]</sup>。只有经过试验证实符合该标准限值要求的设备才能接入到配电系统中。这样就可以对低压电气及电子产品注入供电系统的总体谐波电流水平加以限制。

该标准对以下四类设备确定了产生谐波电流时发射限值：A 类设备：平衡的三相设备以及除 B、C 和 D 类外的所有其它设备；B 类设备：便携式电动工具；C 类设备：包括调光装置的照明设备；D 类设备：输入电流具有标准所定义的“特殊波形”，且其有功功率不大于 600W 的设备。该标准还规定了试验电路和对试验电源的要求、对测量设备的要求和试验条件等内容。

此外，1993 年颁发的国家标准 GB/T14549-1993《电能质量公用电网谐波》，该标准

考虑了不同谐波源叠加计算的方法，规定了各级电网电压谐波总畸变率和用户注入电网的谐波电流容许值，对限制公用电网中的谐波起到了积极的作用。

该标准包含谐波电压限值和諦波电流允许值；諦波电压限值是指公用电网諦波电压(相电压)限值，见表 1-1。

表 1-1 公用电网諦波电压限值

电网标称 电压 (KV)	电网总諦波畸变率 %	各次諦波电压含有率 %	
		奇 次	偶 次
0.38	5.0	4.0	2.0
6	4.0	3.2	1.6
10			
35	3.0	2.4	1.2
66			
110	2.0	1.6	0.8

諦波电流允许值是指公共连接点的全部用户向该点注入的諦波电流分量(方均根值)不应超过表 1-2 中规定的允许值。

表 1-2 注入公共连接点的諦波电流允许值

标准 电压 KV	基准 短路 容量 MVA	諦波次数及諦波电流允许值(A)																			
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
0.38	10	78	62	39	62	26	44	19	21	16	28	13	24	11	12	9.7	18	8.6	16	7.8	
	6	43	34	21	34	14	24	11	11	8.5	16	7.1	13	6.1	6.8	5.3	10	4.7	9.0	4.3	
	10	100	26	20	13	20	8.5	15	6.4	6.8	5.1	9.3	4.3	7.9	3.7	4.1	3.2	6.0	2.8	5.4	2.6
	35	250	15	12	7.7	12	5.1	8.8	3.8	4.1	3.1	5.6	2.6	4.7	2.2	2.5	1.9	3.6	1.7	3.2	1.5
	66	500	16	13	8.1	13	5.4	9.3	4.1	4.3	3.3	5.9	2.7	5.0	2.3	2.6	2.0	3.8	1.8	3.4	1.6
	110	750	12	9.6	6.0	9.6	4.0	6.8	3.0	3.2	2.2	4.3	2.0	3.7	1.7	1.9	1.5	2.8	1.3	2.5	1.2

## 本章小结

本章主要讲述了谐波理论的一些基础知识，分析了谐波的来源、谐波危害和諦波的限制标准。

## 第2章 谐波消除和抑制的主要技术措施

由于电力系统中存在着各式各样的谐波源，使得高次谐波的干扰成了当前电力系统中影响电能质量的一大“公害”，各国对电力电网电压正弦波形畸变的极限值都有明确的规定，要求用户对接入电网的设备产生的谐波应采取一定措施进行抑制。谐波抑制是提高电能质量，保证供用电设备安全可靠运行的重要手段之一。谐波污染问题的抑制方法可分为预防性的和补救性的两类：

(1) 预防性的解决方法是指避免谐波及其后果出现的措施，包括：

- ① 变流器中的相位抵消或谐波控制。
- ② 开发有效的过程和方法来控制、减小或消除电力系统设备（主要是电容器、变压器和发电机）的谐波。

(2) 补救性的解决方法是指为克服既存谐波问题所采用的技术。如使用无源滤波器和有源滤波器。

使用无源滤波器其主要是改变在特殊频率下电源的阻抗，适用于稳定、不改变的系统。传统的方式多选用无源滤波器，无源滤波器出现最早，因其结构简单、投资少、运行可靠性较高以及运行费用较低，至今仍是谐波抑制的主要手段。而使用有源滤波器主要是用于补偿非线性负载。其基本原理是从补偿对象中检测出谐波电流，由补偿装置产生一个与该谐波电流大小相等而极性相反的补偿电流频谱，以抵消原线路谐波源所产生的谐波，从而使电网电流只含有基波分量。其中，核心部分是谐波电流发生器与控制系统，即其工作靠数字信号处理(DSP)技术控制快速绝缘双极晶体管(IGBT)来完成。

目前，在具体的谐波治理方面，出现了无源滤波器(LC滤波器)与有源滤波器互补混合使用的方式，充分发挥LC滤波器结构简单、易实现、成本低，有源电力滤波器补偿性能好的优点，克服有源电力滤波器容量大、成本高的缺点，两者结合使用，从而使整个系统获得良好的性能。

### 2.1 无源滤波器

无源滤波器(PF: Passive Filter)也称为LC滤波器，是由滤波电容器、电抗器和电阻器适当组合而成的滤波装置。无源滤波器的工业应用已经有相当长的历史，其设计方法稳定可靠，有大量的实际工程经验可以参考。在交流系统中，无源滤波器不仅可以起到滤波作用，而且还可以兼顾无功补偿的需求。无源滤波器可分为单调谐滤波器、双调谐滤波器、三调谐滤波器和C型滤波器等。

以单调谐滤波器为例，单调谐滤波器由电容元件C、电感元件L和电阻元件R串联而成，其阻抗 $Z_f$ 与频率 $\omega$ 之间的关系为

$$Z_f = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) \quad (2-1)$$

在理想情况下，如果滤波器的谐振频率 $\omega_r$ 正好等于某一次谐波频率，则对于该次谐波而言，滤波器的阻抗为极小值R。由于滤波支路对于该次谐波电流阻抗很小，所以

经其分流，可以减小注入交流系统的谐波电流，从而达到对该次谐波的抑制作用。

双调谐滤波器有两个谐振频率，同时吸收两个频率的谐波，其作用可以近似等效于两个并联的单调谐滤波器。双调谐滤波器与两个单调谐滤波器相比，它在基频下的功率损耗较小，且只有一个电感器承受全部冲击电压。出于占地面积以及经济性的考虑，双调谐滤波器越来越多地被实际工程所采用。

无源滤波器具有设计简单的优点，但其滤波效果依赖于系统阻抗特性，并容易受温度漂移、网络上谐波污染程度、滤波电容老化及非线性负荷变化的影响。此外，由于无源调谐滤波器仅可对特定谐波进行有效地衰减，出于经济和占地面积方面的考虑，滤波器个数均是有限的，所以对于谐波含量丰富的场合，无源滤波器滤波效果往往不够理想。

## 2.2 有源滤波器（APF）

与无源电力滤波器对应的是有源电力滤波器（APF：Active Power Filter）。有源电力滤波器的思想最早出现于 1969 年 B.M.Bird 和 J.F.Marsh 的论文中，文中描述了通过向交流电源注入三次谐波电流以减少电源中的谐波并改善电源电流波形的新方法。文中所述的方法被认为是有源电力滤波器思想的诞生。进入 20 世纪 80 年代以来，新型电力半导体器件的出现，PWM 技术的发展，尤其是 1983 年日本的 H.Akagi 等人提出了“三相电路瞬时无功功率理论”，以该理论为基础的谐波和无功电流检测方法在三相有源电力滤波器中得到了成功地应用，极大地促进了有源电力滤波器的发展。

经过几十年的发展，有源电力滤波器技术已取得了很大的进步。与无源电力滤波器相比，有源电力滤波器具有以下优点：

- (1) 对功率器件工作频率以内的各次谐波都有较好的滤波效果；
- (2) 当系统阻抗和频率变化时，滤波特性不受影响；
- (3) 不会与电网发生串/并联谐振现象，且能有效地抑制系统与无源滤波器间的谐振；
- (4) 不存在过载现象，当负载谐波电流较大时，仍能继续运行。

### 2.2.1 有源电力滤波器的基本原理

有源电力滤波器(APF)根据与补偿对象连接的方式不同，可分为并联型和串联型两种，实际应用中多为并联型。下面以并联型有源滤波器为例，来介绍其工作原理。

图 2-1 为有源滤波器系统基本构成原理图。图中， $e_s$  为交流电源；负载为非线性负载，产生谐波并消耗无功。

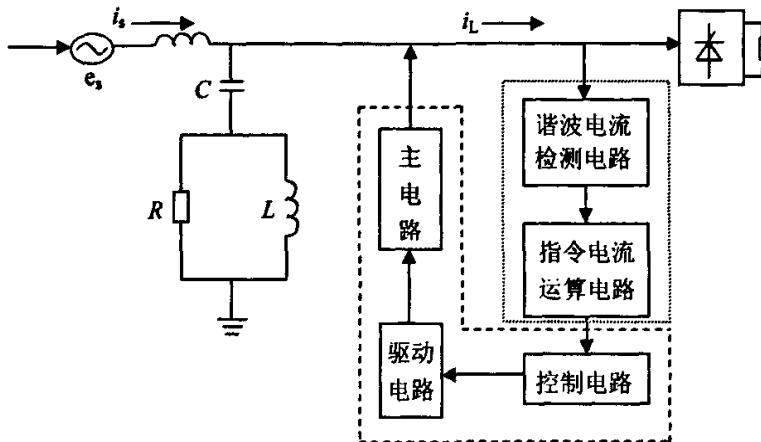


图 2-1 有源电力滤波器系统基本结构

有源电力滤波器系统可分为两部分，一部分是谐波检测电路和谐波运算电路，统称为谐波检测部分；另一部分是补偿电流发生电路，它由电流跟踪控制电路、驱动电路和主电路三个部分构成。谐波检测电路的核心是检测出补偿对象电流中的谐波和无功等电流分量，补偿电流发生电路是指由谐波检测电路得出补偿电流的指令信号，产生实际的补偿电流。

有源电力滤波器作为一种用于动态抑制谐波、补偿无功的新型电力电子装置，其基本原理是产生与电网中谐波大小相等、方向相反的谐波注入谐波源，将谐波抵消掉，使之不会流入系统电源。其具体工作过程为：以图 2-1 中为例，谐波检测部分对负载电流进行检测，分离出谐波及基波无功电流部分，经指令电流运算电路计算得出补偿电流的指令信号，经控制电路产生控制信号，由驱动电路将信号放大，来驱动主电路工作，得出补偿电流，补偿电流与负载电流中要补偿的谐波及无功等电流分量相抵消，最终得到期望的电源电流。

## 2.2.2 有源电力滤波器的两种分类方法

有源电力滤波器可以按照所使用的变流器类型、主电路结构和电源相数来进行分类。按照所使用的变流器类型可分为：电流型有源滤波器(CSI)和电压型有源滤波器(VSI)；按照与负载连接的拓扑结构可分为：并联型、串联型和串、并联混合使用型<sup>[20]</sup>；按照使用场合的电源相数可分为：单相、三相三线和三相四线有源电力滤波器等。

下面根据 APF 与负载连接的拓扑结构的分类方式对有源滤波器的基本原理作简单的介绍。

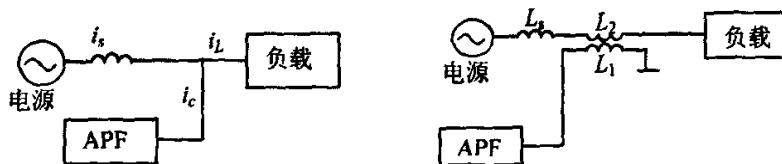


图 2-2 并联型 APF

图 2-3 串联型 APF

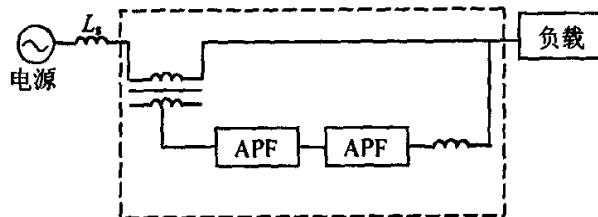


图 2-4 串并联型 APF

图 2-2 并联型 APF 与系统并联，可等效为一个受控电流源。并联型 APF 可产生与负载谐波或无功电流大小相等、相位相反的补偿电流，从而将电源侧电流补偿为正弦波。并联型 APF 主要用于感性电流源型负载的谐波补偿，目前技术上已相当成熟，投入运行的 APF 多为此方案。图 2-3 为串联型 APF，通过变压器串联在电源与负载间，可等效为一受控电压源，主要用于消除带电容的二极管整流电路等电压型谐波源负载对系统的影响，以及系统侧电压谐波与电压波动对敏感负载的影响。串联型 APF 中流过的是正常负载电流，损耗较大，而且投切、故障后退出及各种保护也较复杂。图 2-4 所示为串并联型 APF，其兼有串、并联型 APF 的功能，可解决配电系统发生的绝大多数电能质量问题，具有较高性价比。这是有源电力滤波器中最基本的形式，也是目前应用最多的一种。

### 2.2.3 有源电力滤波器的谐波电流检测技术及其发展

有源电力滤波器技术包含着三个关键技术，即功率器件制造技术、谐波电流检测技术和电流控制技术，三大技术的发展决定着 APF 技术的发展。

有源电力滤波器的工作性能在很大程度上取决于对谐波、无功和负序电流的实时准确检测。谐波电流检测技术也就是指对补偿电流的检测技术。补偿电流的检测是为了给出补偿电流发生电路所需的输出给定信号，以使 APF 产生相应的补偿电流。目前，国内外学者已经提出了大量的谐波电流检测方法，按照检测分析的数学方法的不同，可以把这些方法分为频域法和时域法两大类，而这两类方法建立的基础则是功率的定义，前一类方法是建立在平均功率基础上的，而后者则是建立在瞬时功率基础上的。

以下是主要的谐波电流检测方法<sup>[21]</sup>：

#### (1) 用模拟带通滤波器检测的方法

该方法使用模拟滤波器来实现谐波电流检测。即采用陷波器将基波电流滤除，得到谐波分量，或采用带通滤波器得出基波分量，再与被检测电流相减得到谐波分量。该检测法的优点是电路结构简单，造价低，输出阻抗低，品质因数易于控制。由于滤波器中心频率固定，当电网频率波动时，滤波效果会大大下降。此外滤波器的中心频率对元件参数十分敏感，这样要使滤波器得到理想的幅频特性和相频特性是很困难的，并且这种方法也不能同时分离出无功电流和谐波电流。当电网频率发生波动时，不仅影响检测精度，而且检测出的谐波电流中含较多的基波分量，大大增加了有源滤波器的容量和运行损耗。这种方法多用于补偿效果要求不高的场合，它已不能适应现代电力系统的需要。

#### (2) 基于 Fryze 功率定义的检测方法

其原理是将负载电流分解为与电压波形一致的分量，将其余分量作为广义无功电流(包括谐波电流)。它的缺点是：因为 Fryze 功率定义是建立在平均功率基础上的，所以要求的瞬时有功电流需要进行一个周期的积分，再加其它运算电路，要有几个周期延时。因此，用这种方法求得的“瞬时有功电流”实际是几个周期前的电流值。

#### (3) 基于频域分析的 FFT 检测法

该方法的基础是傅立叶级数分析，将检测到的畸变电流(或电压)进行傅立叶变换，分解为高次谐波代数和的形式，再将其合成为总的补偿电流。此方法的优点是检测精度较高，缺点是需要一定时间的电流值，计算量大，需花费较多的计算时间，当要求消除的谐波次数很高时，微机的适时计算有困难，不适合实时控制。以上是对稳态谐波的检测而言的，对于时变谐波的检测而言，由于傅立叶变换存在着在频域完全局部化而在时域完全无局部性的缺陷而使其难以实现对时变谐波的检测。

#### (4) 基于瞬时无功功率理论的谐波电流检测法

1983 年，日本学者赤木泰文 (H.Akagi) 等人基于时域提出了非正弦条件下的基于瞬时无功功率理论，该方法以瞬时有功功率  $P$  和瞬时无功功率  $Q$  的定义为基础，即 PQ 理论。该方法是通过将三相瞬时电压电流经旋转  $\alpha-\beta$  正交坐标变换，得到瞬时的两相电压和两相电流，进一步合成为旋转电压矢量和电流矢量，使这两个矢量在  $\alpha$  轴、 $\beta$  轴上投影，得到三相电路瞬时有功电流和瞬时无功电流，进而得到瞬时有功功率和瞬时无功功率，再从其中分离出高次谐波并经过反变换，最终可得到谐波电流分量，该方法又称 p-q 法<sup>[49]</sup>。

但是，基于瞬时无功功率理论的 p-q 方法也有一些缺点，主要表现在：使用时三相电压  $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$  不能有畸变，否则这种方法的检测结果将存在误差，不能准确地检测出各次谐波。基于对瞬时无功功率理论的瞬时空间矢量法不断改进，涌现了以下几种方法：以计算瞬时有功电流  $i_p$  和瞬时无功电流  $i_q$  为出发点的  $i_p-i_q$  法<sup>[20]</sup>；基于同步旋转坐标变换的 d-q 法。这两种方法弥补了 p-q 法的缺点，它们都能准确地检测对称三相电路的谐波值，实时性较好，在只需测量谐波时可省去锁相环电路。 $i_p-i_q$  法不仅在电网电压畸变时适用，在电网电压不对称时也同样有效，因按  $i_p$ 、 $i_q$  运算方式时只读取  $\sin\omega t$  和  $\cos\omega t$  参与运算，畸变电压的谐波成份在运算中不出现，因而它在电源电压畸变情况下也能准

确检测出谐波电流：基于同步旋转坐标变换的 d-q 法可在电网电压不对称、畸变情况下精确地检测出谐波电流，其优点是当电网电压对称且无畸变时，各电流分量(基波正序无功分量、不对称分量及高次谐波分量)的检测电路比较简单。

近年来，国内外科学家对瞬时无功功率理论进行了发展，提出了广义瞬时无功功率理论，在此基础上出现了基于广义瞬时无功功率理论的谐波检测方法<sup>[11]</sup>，并且受到重视，开始进入工程应用。广义瞬时无功功率理论与瞬时无功功率理论一样，主要在解决谐波总量实时测量方面很有优势，而不能解决各次谐波检测问题。因此，受电机 d-q 旋转坐标变换的启发，有学者还提出了基于广义 d-q 旋转坐标变换的谐波检测方法<sup>[12]</sup>，该方法可以实现各次谐波的检测，不过该方法由于电路耗费相当大，目前尚保持在理论探讨上，工程应用研究并不深入。

基于瞬时无功功率理论的谐波检测研究已非常深入，对于谐波和无功补偿装置的研究和开发起了极大的推动作用，在工程实际中也得到应用，是总谐波实时检测的主要方法。瞬时无功功率理论的方法也是目前 APF 中应用最广的一种检测谐波电流方法，其优点是当电网电压对称且无畸变时，检测基波正序无功分量、不对称分量及高次谐波分量的实现电路比较简单，并且延时小，具有很好的实时性。

但是此理论是基于三相三线制电路提出的，对于单相电路，必须首先将三相电路分解，然后再构造基于瞬时无功功率理论的单相电路的谐波检测电路，电路复杂，不易控制。同时，这种方法的测量精度在很大程度上受到实际工况中多种因素的影响<sup>[13]</sup>，因此它不是最理想的测量谐波电流的方法。

#### (5) 基于神经网络理论的谐波电流检测法

神经网络(Neural Network —NN)的研究始于 1943 年，经过 D.O.Hebb、F.Rosenblatt、B.Window 和 J.Jhopfield 等人对学习算法、神经网络模型的不断改进，使神经网络不断发展，尤其是 Webos 的多层前馈网络的反向传播算法(Back Propagation—BP 算法)的提出，给神经网络的研究和在实际中应用带来了希望。近年来，又出现了许多模型和算法，在自适应滤波、预测和模式识别中有所应用。同时，人工神经网络(Atificial Neural Network—ANN)的兴起也给电力谐波测量提供了一种新的研究途径。人工神经网络是由一些称之为神经元的基本单元按一定规则互联而成的自适应系统，它具有人脑神经网络的一些基本特征，诸如信息的分布式存储和大规模并行处理、自适应和自学习能力等功能。应用神经网络可以检测出各次谐波分量，这种方法是用一个多层次前馈神经网络替代模拟并行式谐波测量装置中的带通滤波器，使各次谐波都可以用这个训练过的神经网络测量出来。

谐波的神经网络检测方法的优点有：

- ①计算量小；
- ②检测精度高，各次谐波检测精度均不低于傅立叶变换和小波变换，能取得令人满意的结果；
- ③对数据流长度的敏感性低于傅立叶变换和小波变换；

- ④实时性好，可以同时实时检测任意整数次谐波；
- ⑤抗干扰性好，在谐波检测中可以应用一些随机模型的信号处理方法，对信号源中的非有效成份（如直流衰减分量）当作噪声处理，克服噪声等非有效成份的影响。虽然神经网络响应速度快，但是对各次谐波分量全部进行检测会使网络规模增大、结构复杂；使训练样本增大，占用大量的存储空间；同时也使网络的实时性变差，不利于在线应用。

#### （6）基于小波变换理论的谐波电流检测法

小波分析是近年来研究的一个热门领域，它是在傅立叶变换的基础上发展起来的新的信号处理方法，也是时域分析的一种重要工具。它克服了傅立叶变换在非稳态信号分析方面的缺点，尤其适合突变信号的分析与处理。

小波分析主要是利用正交小波在  $L^2(\mathbb{R})$  空间线性张成的标准正交小波基和小波函数时域局部性的特点，将谐波时变幅值投影到小波函数和尺度函数张成的子空间上，从而把时变幅值的估计问题转化为常系数估计，利用最小二乘法即可实现时变谐波的检测。同时加权递推最小二乘法的应用可实现谐波的在线跟踪，指数加权的递推最小二乘法可以得到较快的收敛速度。

近年来，一些文献将小波变换应用于电力系统电能质量分析<sup>[14]</sup>、故障检测及继电保护等方面，表明小波变换在电力系统具有广阔的应用前景。当前小波分析在谐波检测中的应用研究成果主要有<sup>[15][16]</sup>：

①基于 WT 的多分辨分析，将含有谐波的原信号分解成不同频率的块信号，将低频段上的结果看成基波分量，高频段为各次谐波，利用软件构成谐波检测环节，快速跟踪谐波的变化。

②利用 WT 和最小二乘法相结合来代替基于 Kalman 滤波的时变谐波跟踪方法，它将各次谐波的时变幅值投影到正交小波基张成的子空间，然后利用最小二乘法估计其小波系数，将时变谐波的幅值估计问题转换成了常系数估计问题，从而具有较快的跟踪速度。

③提出暂态时变非周期谐波畸变指标的定义，并用 WT 实现这些指标的量化，从而有效检测各种谐波分量。

④利用 WT 的小波包具有将频率空间进一步细分的特性，及电力系统中产生的高次谐波投影到不同尺度上，会明显地表现出高频、奇异高次谐波信号的特性进行谐波分析。

⑤通过对含有谐波信号进行正交小波分解，分析原信号的各个尺度的分解结果，达到检测各种谐波分量的目的，从而具有快速的跟踪速度。

⑥将小波变换和神经网络结合起来对谐波进行分析，并设计和开发基于小波网络的谐波监测仪。

虽然小波分析克服了傅立叶变换在频域完全局部化而在时域完全无局部性的缺点，但是小波变换并不能完全取代傅立叶变换，这是因为一方面小波分析在稳态谐波检测方面并不具备理论优势，另一方面小波变换的理论和应用研究时间相对较短，小波分析应

用在谐波测量方面尚处于初始阶段，还存在着许多不完善的地方。例如，缺乏系统规范的最佳小波基的选取方法；缺乏构造频域行为良好，即分频严格、能量集中的小波函数以改善检测精度的规范方法。因此 WT 与 FT 存在互补的优势。

小波分析只是在理论和仿真上证明了它的有效性，但是在实际现场还没有证明它的可行性，有待进一步的研究。

谐波检测方法研究将以改善 FFT 为主转向探索新的有效方法。由于 DFT、FFT 受使用条件的限制，对 WT、瞬时无功功率理论、d-q 旋转坐标变换、NN、遗传算法等开展深入研究是一种必然选择，这些新的谐波检测方法被广泛应用是一种发展趋势。

### 2.3 一种单相电路及基波电流检测方法

目前的有源电力滤波器系统大多为三相的，而事实上由单相电路中的非线性负载所引起的谐波危害也很严重（如电力机车），其抑制也是人们很关心的问题。和三相有源电力滤波器系统相似，当单相有源电力滤波系统只需补偿高次谐波时，其关键技术是如何实时地检测非线性负载电流中的基波分量和谐波分量，以获得系统控制电路所需要的补偿参考电流指令信号，其准确与否将影响到整个综合有源电力滤波系统的滤波特性。目前有的许多单相电路的谐波检测方法大都存在一些问题，比如采用固定频率滤波器的直接滤波法，有较为严重的相移和频率漂移问题；基于 FFT 的采样数字计算方法，由于需要一定的采样计算时间，造成谐波检测速度慢。把基于瞬时无功功率理论的三相电路谐波检测方法推广到单相电路，由于要先构造三相电流或要对畸变电流进行 90 度相移，所以电路结构过于复杂，不便于用模拟电路实现。本文对单相有源电力滤波系统中的瞬时谐波及基波电流检测法进行了研究，采用了又一种检测方法，该方法不但成功地解决了单相电路的瞬时谐波及基波电流的实时检测的难题，而且算法更为简单、可靠，有利于硬件实现<sup>[21]</sup>。

进一步考察基于三相电路瞬时无功功率理论的一系列检测方法，不难发现其实质是把待测的三相瞬时电流、电压，经线性变换后相乘，从而使得基波电流所对应的瞬时功率为一直流量，以便于分离出去。由此得出下面一种用于单相电路瞬时谐波及基波电流实时检测的算法。

一般的电网瞬时电流  $i_s(t)$  总可以分解为

$$i_s(t) = i_p(t) + i_q(t) + i_h(t) = i_f(t) + i_h(t) \quad (2-2)$$

式中  $i_p(t)$  为瞬时基波有功电流， $i_q(t)$  为瞬时基波无功电流， $i_h(t)$  为瞬时谐波电流， $i_f(t)$  为瞬时基波电流。设电网电压为  $u_s(t) = U_m \cos \omega t$ ，而含有谐波的周期性非正弦电网电流可以用傅立叶级数表示，即式 (2-2) 可进一步写为

$$i_s(t) = I_p \cos \omega t + I_q \sin \omega t + \sum_{n=3}^{\infty} I_n \cos(n\omega t + \phi_n) \quad (2-3)$$

一般认为电网电流中都只含有三次以上的谐波，因此，式(2-3)中n以3为下限。式(2-3)中电网电流可以测出，而 $\cos \omega t$ 是与电网电压同相位的正弦量。即要分离出基波电流分量，即 $i_p(t)$ 与 $i_q(t)$ 的和。

则由式(2-2)应补偿的谐波电流也可得出。即

$$i_h(t) = i_s(t) - [i_p(t) + i_q(t)]$$

设系统控制电路产生的正、余弦信号分别为： $\cos(\omega t + \theta)$ 、 $\sin(\omega t + \theta)$ ，而电网电压、电流的解析式同前， $\theta$ 则为正、余弦信号与电压的相位差( $0 \leq \theta \leq 2\pi$ )。则(2-3)式两边同时乘以 $\cos(\omega t + \theta)$ 为

$$\begin{aligned} i_s(t) \cos(\omega t + \theta) &= \frac{I_p}{2} [\cos(2\omega t + \theta) + \cos \theta] + \frac{I_q}{2} [\sin(2\omega t + \theta) - \sin \theta] + \\ &\quad \sum_{n=3}^{\infty} \frac{I_n}{2} \{ \cos[(n+1)\omega t + \phi_n + \theta] + \cos[(n-1)\omega t + \phi_n - \theta] \} \end{aligned} \quad (2-4)$$

式中的直流分量为

$$I_p' = \frac{I_p}{2} \cos \theta - \frac{I_q}{2} \sin \theta \quad (2-5)$$

可以发现，(2-4)式中除了直流分量 $I_p' = \frac{I_p}{2} \cos \theta - \frac{I_q}{2} \sin \theta$ ，其它各项都是由正弦函数组成。给上式两边在 $U_s$ 的一个周期内积分后取平均值。根据正弦函数的正交性，右边除直流分量 $I_p'$ 保持不变外其余各项都等于零。即

$$I_p' = \frac{1}{T} \int i_s(t) \cos(\omega t + \theta) dt = \frac{I_p}{2} \cos \theta - \frac{I_q}{2} \sin \theta$$

将 $I_p'$ 经一增益为2的放大器后为

$$I_p'' = I_p \cos \theta - I_q \sin \theta \quad (2-6)$$

将(2-6)两边同时乘以 $\cos(\omega t + \theta)$ 为

$$\begin{aligned} I_p'(t) &= I_p \cos(\omega t + \theta) \cos \theta - I_q \cos(\omega t + \theta) \sin \theta \\ &= \frac{I_p}{2} [\cos(\omega t + 2\theta) + \cos \omega t] - \frac{I_q}{2} [\sin(\omega t + 2\theta) - \sin \omega t] \end{aligned} \quad (2-7)$$

同理，把(2-3)式两边同时乘以  $\sin(\omega t + \theta)$  为

$$\begin{aligned} i_s(t) \sin(\omega t + \theta) &= \frac{I_p}{2} [\sin(2\omega t + \theta) + \sin \theta] - \frac{I_q}{2} [\cos(2\omega t + \theta) - \cos \theta] + \\ &\sum_{n=3}^{\infty} \frac{I_n}{2} \{ \sin[(n-1)\omega t + \phi_n + \theta] - \sin[(n-1)\omega t + \phi_n - \theta] \} \end{aligned} \quad (2-8)$$

将式(2-8)两边积分取平均为

$$I_q' = \frac{1}{T} \int_0^T i_s(t) \sin(\omega t + \theta) dt = \frac{I_p}{2} \sin \theta + \frac{I_q}{2} \cos \theta \quad (2-9)$$

将  $I_q'$  经一增益为 2 的放大器后为

$$I_q'' = I_p \sin \theta + I_q \cos \theta \quad (2-10)$$

将式(2-10)两边同时乘以  $\sin(\omega t + \theta)$  为

$$\begin{aligned} I_q''(t) &= I_p \sin(\omega t + \theta) \sin \theta + I_q \sin(\omega t + \theta) \cos \theta \\ &= -\frac{I_p}{2} [\cos(\omega t + 2\theta) - \cos \omega t] + \frac{I_q}{2} [\sin(\omega t + 2\theta) + \sin \omega t] \end{aligned} \quad (2-11)$$

则式(2-7)与式(2-11)相加得为

$$i_f(t) = I_p'(t) + I_q''(t) = I_p \cos \omega t + I_q \sin \omega t = i_p(t) + i_q(t) \quad (2-12)$$

式(2-12)即为瞬时基波电流，可见相角  $\theta$  并不影响基波电流的检测，即对谐波电流的检测没有影响。因此，不必用锁相环产生与电网电压同频同相的正、余弦信号，只需系统控制电路产生与电网电压同频的正、余弦信号即可，即省略了锁相环，简化了系统。而谐波电流为：

$$i_h(t) = i_s(t) - [i_p(t) + i_q(t)]$$

总之，通过以上推导过程可以看出，在只要求检测谐波电流的情况下（如在混合式串联有源滤波系统中），可以省去锁相环，而在实现时可以让系统内部自己产生的与电网电压同频的正余弦信号参与计算，这样实现起来更简单。且不需要固定频率的滤波器，只需两个积分器和两个增益即可，电路结构简单。其电路构成如图 2-5 所示。电路输入信号可以是要检测的任何畸变电流。对 APP 来说，视采用的控制方法，它可以是负载电流、电源电流或负载电流和电源电流的组合。图 2-5 电路的输出电流分别为基波电流  $i_f(t)$ ，和谐波电流  $i_h(t)$ ，其中  $i_h(t)$  可作为系统控制电路的补偿参考电流指令信号。

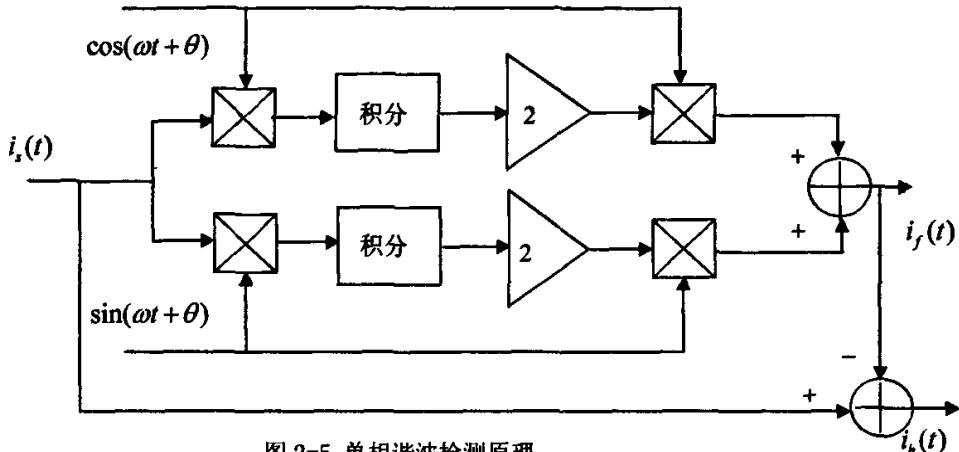


图 2-5 单相谐波检测原理

## 本章小结

本章主要介绍了谐波消除和抑制的主要措施，其中包括无源滤波器和有源滤波器，着重分析了有源滤波器的原理、两种分类方法和諧波电流检测技术及其发展，最后采用了一种单相电路諧波及基波电流检测方法。具体包括如下内容：

- 1、介绍了无源滤波器的组成、优缺点及各种无源滤波器的电路结构。
- 2、介绍了有源电力滤波器的各种类型，详细分析了有源电力滤波器各种类型的结构原理、滤波原理和他们适用的场合及各自的优缺点。
- 3、对比分析了现有的各种检测方法，包括模拟滤波、快速傅立叶变换、小波变换、瞬时无功功率理论、广义 d-q 旋转坐标变换和神经网络等。
- 4、采用了一种单相电路諧波及基波电流检测方法。该方法不但成功地解决了单相电路的瞬时諧波及基波电流的实时检测的难题，而且算法更为简单、可靠，有利于硬件实现。

## 第3章 电力系统中含谐波时的电工计量

随着电力事业的日益发展，用电设备的种类和数量越来越多，谐波源几乎无处不在。正如前面章节所述，谐波源产生的谐波注入到电力网中，给电力网带来了严重的污染；并且产生许多危害，甚至引发灾难性事故。谐波的存在对用户的用电收费存在着争议。传统地用频率和电压两个指标来衡量电网电能质量的方法已远远不能适应电力事业的发展需要，要反应电网电能质量和电力事业的发展水平，必须要着重考虑电网的谐波状况。因此，在电力系统中，含有谐波时的电工计量工作就显得尤为重要。

### 3.1 谐波和无功功率分析基础

#### 3.1.1 谐波

在供用电系统中，通常总是希望交流电压和交流电流呈正弦波形。正弦波电压可表示为：

$$u(t) = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \varphi_u) \quad (3-1)$$

式中， $U$  为电压有效值； $\varphi_u$  为初相角； $\omega$  为角频率， $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ ； $f$  为频率； $T$  为周期。

当正弦波电压施加在线性无源元件电阻、电感和电容上，其电流和电压分别为比例、积分和微分关系，仍为同频率的正弦波。但当正弦波电压施加在非线性电路上时，电流就变为非正弦波，非正弦电流在电网阻抗上产生压降，会使电压波形也变为非正弦波。当然，非正弦波电压施加在线性电路上时，电流也是非正弦波。对于周期为  $T = 2\pi/\omega$  的非正弦电压  $u(\omega t)$ ，一般满足狄里赫利条件，可分解为如下形式的傅立叶级数

$$u(\omega t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (3-2)$$

式中

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) d(\omega t) \\ a_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) \cos n\omega t d(\omega t) \\ b_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) \sin n\omega t d(\omega t) \quad n=1, 2, 3, \end{aligned} \quad (3-3)$$

或

$$u(\omega t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (3-4)$$

式中， $c_n$ 、 $\varphi_n$ 和 $a_n$ 、 $b_n$ 的关系为

$$\begin{aligned} c_n &= \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \\ \varphi_n &= \arctan(a_n / b_n) \\ a_n &= c_n \sin \varphi_n \\ b_n &= c_n \cos \varphi_n \end{aligned} \quad (3-5)$$

在式(3-2)或式(3-4)的傅立叶级数中，频率与工频相同的分量称为基波(fundamental)，频率为基波频率整数倍(大于1)的分量称为谐波，谐波次数为谐波频率和基波频率的整数比。以上公式及定义均以非正弦电压为例，对于非正弦电流的情况也完全适用，把式中 $u(\omega t)$ 转成 $i(\omega t)$ 即可。

### 3.1.2 功率因数

正弦电路中，电路的有功功率就是其平均功率，即

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} uid(\omega t) = UI \cos \varphi \quad (3-6)$$

式中， $U$ 、 $I$ 分别为电压和电流的有效值； $\varphi$ 为电流滞后于电压的相位差。

视在功率为电压、电流有效值的乘积，即

$$S = UI \quad (3-7)$$

许多用电设备均是根据电磁感应原理工作的，如配电变压器、电动机等，它们都是依靠建立交变磁场才能进行能量的转换和传递。为建立交变磁场和感应磁通而需要的电功率称为无功功率，因此，所谓的“无功”并不是“无用”的电功率，只不过它的功率并不转化为机械能、热能而已，无功功率定义为

$$Q = UI \sin \varphi \quad (3-8)$$

在功率三角形中，有功功率 $P$ 与视在功率 $S$ 的比值，称为功率因数 $\lambda$ ，其计算公式为有功功率 $P$ 和视在功率 $S$ 的比值：

$$\lambda = \frac{P}{S} \quad (3-9)$$

此时无功功率 $Q$ 与有功功率 $P$ 、视在功率 $S$ 之间有如下关系

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (3-10)$$

在正弦电路中，功率因数是由电压和电流的相位差 $\varphi$ 决定的，其值为

$$\lambda = \cos \varphi \quad (3-11)$$

在非正弦电路中，有功功率、视在功率、功率因数的定义均和正弦电路相同，功率因数仍由式（3-9）定义。公用电网中，通常电压的波形畸变很小，而电流波形的畸变可能很大。因此，不考虑电压畸变，研究电压波形为正弦波、电流波形为非正弦波的情况有很大的实际意义。

设正弦波电压有效值为  $U$ ，畸变电流有效值为  $I$ ，基波电流有效值及与电压的相位差分别为  $I_1$  和  $\varphi_1$ 。这时有功功率为

$$P = UI_1 \cos \varphi_1 \quad (3-12)$$

功率因数为

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{UI_1 \cos \varphi_1}{UI} = \frac{I_1}{I} \cos \varphi_1 = \nu \cos \varphi_1 \quad (3-13)$$

式中， $\nu = I_1 / I$ ，即基波电流有效值和总电流有效值之比，称为基波因数，而  $\cos \varphi_1$  称为位移因数或基波功率因数。可见，功率因数由基波电流相移和电流波形畸变这两个因素共同决定。

含有谐波的非正弦电路的无功功率情况比较复杂，定义很多，但至今尚无被广泛接受的科学而权威的定义。一种简单的定义是仿照式（3-10）给出的

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (3-14)$$

这样定义的无功功率  $Q$  反映了能量的流动和交换，目前被较广泛的接受，但该定义对无功功率的描述很粗糙。

也可仿照式（3-8）定义无功功率，为和式（3-14）区别，采用符号  $Q_f$ ，忽略电压中的谐波时有

$$Q_f = UI_1 \sin \varphi_1 \quad (3-15)$$

在非正弦情况下， $S^2 \neq P^2 + Q_f^2$ ，因此引入畸变功率  $D$ ，使得

$$S^2 = P^2 + Q_f^2 + D^2 \quad (3-16)$$

比较式（3-14）和（3-16），可得

$$Q^2 = Q_f^2 + D^2 \quad (3-17)$$

忽略电压谐波时

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_f^2} = U \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (3-18)$$

这种情况下， $Q_f$  为由基波电流所产生的无功功率， $D$  是谐波电流产生的无功功率。

在非正弦交流电路中，由于高次谐波电流的影响，将产生畸变功率，因而系统功率因数，采用有功功率  $P$  与视在功率  $S$  的比来确定，或用基波电流与电源电压夹角的余弦来确定，均存在偏差。传统的对于含有谐波的非正弦电路的无功功率定义描述的还比较粗糙，而对于畸变功率也只是引入定义，对这种情况下的电气参数的研究尚不深入。功率三角形、电流三角形和导纳三角形已不适合非正弦电路，应以包括畸变功率、畸变电流和畸变导纳在内的相应四边形来代替。本文提出了由视在功率  $S$ 、有功功率  $P$ 、无功功率  $Q$  和畸变功率  $N$  构成的功率四边形的新概念，给出了实际功率因数的计算公式；确定了实际功率因数、总功率因数和位移因数之间的大小关系。

### 3.2 用功率四边形实现非正弦交流电路的电工计量

为解决功率三角形不能解决的一些问题，例如求含谐波电流的非正弦电路的电气参数问题。根据电工理论提出了由视在功率  $S$ 、有功功率  $P$ 、无功功率  $Q$  和畸变功率  $N$  构成的功率四边形。功率四边形也可看成是由基波功率三角形和谐波功率三角形组成的，并由功率四边形进一步确立了非正弦交流电路中的电流四边形和导纳四边形，以及它们和功率四边形的相似关系。以现场实测数据为例，利用四边形理论计算了非正弦交流电路中的畸变功率、谐波畸变角、总谐波电流、畸变导纳、谐波导纳等参数。

功率三角形、导纳（阻抗）三角形和电流（电压）三角形是正弦交流电路理论中的重要概念，具有广泛的应用。随着电力电子技术的发展和应用，变流器工作时产生大量的高次谐波电流<sup>[31]</sup>注入电网，使得正弦电网中非正弦电流成分增大，作为电网负载之一的变流器，其功率、电流和导纳等物理量已不再符合相应的三角形的关系。为了确定非正弦交流电路中功率、电流和导纳等物理量，以电工理论为基础，运用等效谐波电流的概念，并参考有关文献<sup>[32] [33]</sup>，确立了非正弦交流电路中的功率四边形、电流四边形和导纳四边形理论，可以解决非正弦交流电路中“三角形”理论不能解决的问题。

#### 3.2.1 等效谐波电流

由于变流器的结构特点，它产生的高次谐波电流中一般均不含有直流分量；电流构成正负交替的周期性函数，这些电流波形均能满足狄里赫利条件<sup>[34]</sup>，故可把电流  $i$  展开成傅氏级数的形式，即

$$\begin{aligned} i &= \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \sqrt{2}I_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots \\ &= \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{k=2}^{\infty} \sqrt{2}I_k \sin(k\omega t + \varphi_k) \end{aligned} \quad (3-19)$$

或写成

$$i = i_1 + i_2 + \dots = i_1 + \sum_{k=2}^{\infty} i_k \quad (3-20)$$

式中,  $i_1 = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$  称为基波电流,  $A$ ;  $i_k = \sqrt{2}I_k \sin(k\omega t + \varphi_k)$  称为高次谐波,  $A$ 。

实际上, 一个具体的变流器工作时, 不一定含有式(3-19)中的所有各项电流, 一般只含有基波电流  $i_1$  和某些满足一定规律的谐波电流。

以式(3-20)为基础, 可画出变流器的等效电路如图3-1所示, 总电流  $i$  的有效值  $I$  为

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{k=2,3,4,\dots} I_k^2} \quad (3-21)$$

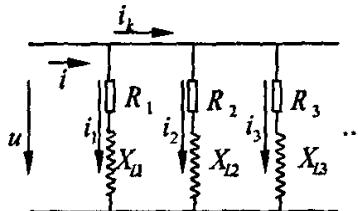


图3-1 变流器的并联等效电路

仿照把非正弦波等效成正弦波的方法, 可以把  $\sum i_k$  等效为一个频率为  $n\omega$  的谐波电流  $i_n$ , 即  $i_n = \sum i_k = \sqrt{2}I_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$

式中,  $n > 1$ ,  $n$  为待定的正实数。不难理解  $n$  不等于任何一个  $k$  值, 按电流有效值的定义可知,

$$I_n = \sqrt{\sum I_k^2} \quad (3-23)$$

$I_n$  与变流技术中纹波电流  $I_R$  的定义相吻合<sup>[35]</sup>, 此时,  $i = i_1 + i_n$ 。由式(3-21)知

$$I = \sqrt{I_1^2 + \sum I_k^2} = \sqrt{I_1^2 + I_n^2} \quad (3-24)$$

由于无穷大电网的非零阻抗较小<sup>[36]</sup>, 故可近似认为, 电网电压  $u$  仍为标准的正弦波, 即

$$u = U_m \sin \omega t = \sqrt{2}U \sin \omega t \quad (3-25)$$

因此, 以电压正弦、电流非正弦为依据做如下分析并确立相应结论。

### 3.2.2 功率四边形

正弦交流电路中, 功率、电压(电流)和阻抗(导纳)分别有相应的直角三角形来确定各自的关系。例如功率  $P$ 、 $Q$  和  $S$  可构成功率三角形。功率因数  $\cos \varphi_1$  与  $P/S$  是统一的。但在非正弦电路中, 由于谐波电压或电流将产生畸变功率  $N$ ,  $S$ 、 $P$  和  $Q$  之间已不再符合直角三角形的关系。以电工理论为基础, 分析了  $S$ 、 $P$ 、 $Q$  和  $N$  构成了功率四边形。由功率四边形, 可以清晰地表达非正弦电路中, 三种不同功率因数的意义, 并可进行有关物理量的计算。

1. 由于三角函数的正交性，非正弦电流  $i$  中，只有与电压  $u$  同频率  $\omega$  的基波电流  $i_1$  能形成基波有功功率  $P$  和无功功率  $Q$ ；其值分别为

$$P = UI_1 \cos \varphi_1, \quad Q = UI_1 \sin \varphi_1 \quad (3-26)$$

基波视在功率

$$S_1 = UI_1 = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3-27)$$

显然， $S_1$ 、 $P$  和  $Q$  构成基波功率三角形。

变流器输入侧的视在功率

$$S = UI = U \sqrt{I_1^2 + I_n^2} \quad (3-28)$$

$$\begin{aligned} S^2 &= U^2 (I_1^2 + I_n^2) = (UI_1)^2 + (UI_n)^2 = (UI_1)^2 (\cos^2 \varphi_1 + \sin^2 \varphi_1) + (UI_n)^2 \\ &= (UI_1 \cos \varphi_1)^2 + (UI_1 \sin \varphi_1)^2 + (UI_n)^2 \\ &= P^2 + Q^2 + N^2 \\ &= S_1^2 + N^2 \end{aligned} \quad (3-29)$$

$$N = UI_n \quad (3-30)$$

$N$  定义为畸变功率<sup>[38]</sup>，单位可定为 AV（安伏），它是由谐波电流产生的功率<sup>[39]</sup>。依式 (3-29)，并在基波功率三角形的基础上，可得符合实际意义的功率四边形，如图 3-2 所示。图 3-2 中  $SS_1N$  构成谐波功率三角形。由式 (3-29) 知，它也是直角三角形。由于谐波产生的畸变功率  $N$ ，故  $S$ 、 $P$  和  $Q$  之间已不再符合直角三角形的关系了。图 3-2 中  $\varphi_N$  是由畸变功率  $N$  引起的，故定义为畸变角； $\varphi_1$  是基波相位角。

由于  $I > I_1$ ，故  $S > S_1$ ；图 3-2 中的谐波功率三角形部分明显地表达了这一结论。

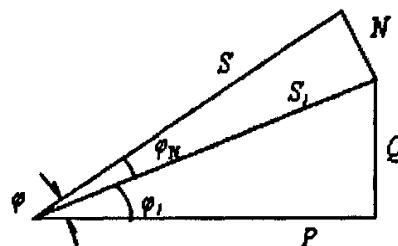


图 3-2 功率四边形

## 2. 三种不同的功率因数

### (1) 基波功率因数 $\cos \varphi_1$

由图 3-2 知, 基波功率因数为

$$\cos\varphi_1 = \frac{P}{S_1} \quad (3-31)$$

$\cos\varphi_1$  也称位移因数<sup>[38]</sup>, 当电路为正弦电路时, 它就是有功功率因数。

### (2) 总功率因数 $\lambda$

总功率因数  $\lambda$  定义为

$$\lambda = \frac{P}{S} \quad (3-32)$$

由图 3-2 知  $P/S$  并不具有合适的几何意义<sup>[38]</sup>。实际上  $P, S$  不是直角三角形的两条边。二者不能直接相比; 由图 3-3 可知,  $P/S$  的意义为

$$\cos\varphi' = \frac{P}{S} \quad (3-33)$$

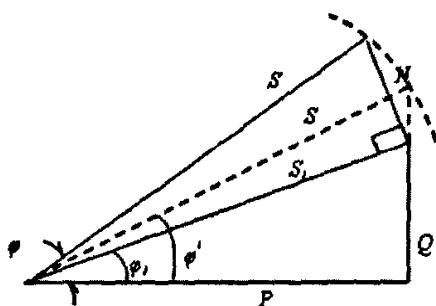


图 3-3  $P/S$  的几何意义

此时, 相当把  $S$  与  $P$  之间的夹角  $\varphi$  人为地减少到  $\varphi'$ ;  $\varphi, \varphi_1$  和  $\varphi'$  的关系为

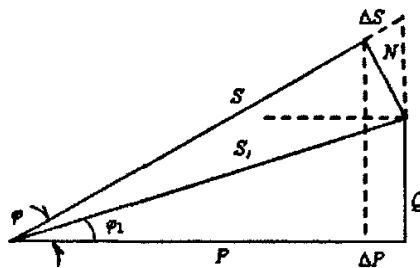
$$\varphi_1 < \varphi' < \varphi$$

$\varphi'$  是个概念角度, 实际上并不存在; 由于  $\varphi_1 < \varphi' < \varphi$  故知

$$\cos\varphi_1 > \cos\varphi' > \cos\varphi \quad (3-34)$$

### (3) 总位移因数 $\cos\varphi$

仿照把  $\cos\varphi_1$  定义为位移因数的做法, 把  $S$  与  $P$  之间的夹角  $\varphi$  的余弦定义为总位移因数; 由图 3-4 知

图 3-4 总位移因数  $\cos\varphi$ 

$$\begin{aligned} \cos\varphi &= \frac{P}{S+\Delta S} = \frac{P-\Delta P}{S} = \frac{P-N\cos(90^\circ-\varphi_1)}{S} \\ &= \frac{P-N\sin\varphi_1}{S} = \frac{P}{S} - \frac{N}{S} \cdot \frac{Q}{S_1} \end{aligned} \quad (3-35)$$

由式 (3-35) 知, 式 (3-34) 可表达为

$$\frac{P}{S_1} > \frac{P}{S} > \frac{P-N\sin\varphi_1}{S} \quad (3-36)$$

### 3. 倍变因数 $\xi$ 、总谐波畸变 THD 和倍变角 $\varphi_N$

由总功率因数  $\lambda$  和谐波功率三角形知

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{S_1 \cos\varphi_1}{S} = \frac{S_1}{S} \cdot \cos\varphi_1 = \cos\varphi_N \cdot \cos\varphi_1 \quad (3-37)$$

$$\text{或 } \lambda = \frac{P}{S} = \frac{UI_1 \cos\varphi_1}{UI} = \frac{I_1}{I} \cdot \cos\varphi_1 = \xi \cos\varphi_1 \quad (3-38)$$

比较式 (3-37) 和式 (3-38) 知, 倍变因数  $\xi$  为

$$\xi = \frac{I_1}{I} = \frac{S_1}{S} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{S} = \cos\varphi_N \quad (3-39)$$

式 (3-39) 提供了由  $S$ 、 $P$ 、 $Q$  直接计算倍变因数的方法, 它不考虑主回路的接线方式, 因此有望用于工程实践。

当把总谐波电流  $I_N$  与基波电流  $I_1$  之比  $I_N/I_1$  定义为总谐波畸变<sup>[37]</sup>THD(Total Harmonic Distortion), 即  $THD=I_N/I_1$  时, 则不难推得  $\xi$  与 THD 之间得关系为

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1+THD^2}} \quad (3-40)$$

$$\text{或 } THD = \sqrt{\frac{1}{\xi^2} - 1} \quad (3-41)$$

倍变角  $\varphi_N$  为

$$\varphi_N = \arccos \frac{S_1}{S} = \arccos \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{S} \quad (3-42)$$

### 3.2.3 电流四边形

#### 1. 电流四边形的构成

由谐波功率三角形知,  $S^2 = S_1^2 + N^2$ , 即  $(UI)^2 = (UI_1)^2 + (UI_n)^2$ ; 故由此得

$$I^2 = I_1^2 + I_n^2 \quad (3-43)$$

式(3-43)表明, 总输入电流  $I$ 、基波电流  $I_1$  和等效谐波电流  $I_n$  之间符合直角三角形的关系, 它们构成谐波电流三角形。在满足  $n\omega t = 2m\pi (m=1, 2, 3\dots)$  时, 谐波电流三角形将是矢量三角形, 见图 3-5。

又由式(3-26)和式(3-27)可得  $(UI_1)^2 = (UI_1 \cos \varphi_1)^2 + (UI_1 \sin \varphi_1)^2$ ,

即  $I_1^2 = (I_1 \cos \varphi_1)^2 + (I_1 \sin \varphi_1)^2 \quad (3-44)$

依式(3-44)可画出基波电流三角形, 由于基波电流三角形和谐波电流三角形中均含有  $I_1$  这项, 故可结合在一起构成电流四边形。同样, 在满足  $n\omega t = 2m\pi (m=1, 2, 3\dots)$  时, 可构成矢量电流四边形, 见图 3-5。

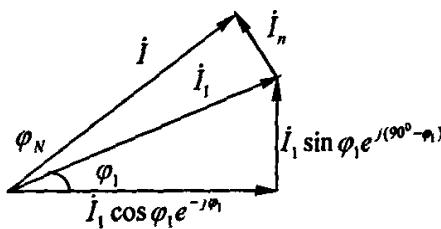


图 3-5 电流四边形

#### 2. 与功率四边形的相似性

由图 3-2 中  $S$ 、 $S_1$  和  $N$  构成的谐波功率三角形知, 崩变角  $\varphi_N$  为

$$\varphi_N = \arccos \frac{S_1}{S} = \arccos \frac{UI_1}{UI} = \arccos \frac{I_1}{I} \quad (3-45)$$

由图 3-5 中  $I$ 、 $I_1$  和  $I_n$  构成的谐波电流三角形知, 崩变角  $\varphi_N$  为

$$\varphi_N = \arccos \frac{I_1}{I} \quad (3-46)$$

可见，其畸变角相等，它们又都是直角三角形，故谐波电流三角形和諧波功率三角形是相似形。

由于图 3-2 中所示的基波功率三角形和图 3-5 中所示的基波电流三角形存在相同的基波相位角  $\varphi_1$ ，它们又都是直角三角形，故基波电流三角形与基波功率三角形是相似形。

综上分析可知，电流四边形与功率四边形是相似形。

### 3.2.4 导纳四边形

由图 3-1 所示的变流器并联等效电路，并由 KCL 定律知，

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \cdots \\ &= \dot{I}_1 + \dot{I}_n \end{aligned} \quad (3-47)$$

设变流器总输入阻抗为  $Z$ ，基波阻抗为  $Z_1$ ，总的等效諧波阻抗为  $Z_n$ ， $Z_n$  定义为畸变阻抗 ( $\Omega$ )。由图 3-5 中的諧波电流三角形知  $\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z}$ ， $\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{Z_1}$  和  $\dot{I}_n = \frac{\dot{U}}{Z_n}$ ，代入式(3-47)

得出复阻抗表达式为

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_n} \quad (3-48)$$

又由于  $S = U \cdot I = U \cdot \frac{U}{|Z|}$ ， $N = U \cdot \frac{U}{|Z_n|}$  和  $S_1 = U \cdot I_1 = U \cdot \frac{U}{|Z_1|}$ ，利用  $S^2 = S_1^2 + N^2$  的关系，

得

$$\left(\frac{1}{|Z|}\right)^2 = \left(\frac{1}{|Z_1|}\right)^2 + \left(\frac{1}{|Z_n|}\right)^2 \quad (3-49)$$

上式表明，电路总导纳与基波导纳、諧波畸变导纳之间构成直角諧波导纳三角形。

由基波功率三角形（见图 3-2）知

$$S_1 = U \cdot I_1 = U \cdot \frac{U}{|Z_1|}， \quad P = UI_1 \cos \varphi_1 = U \frac{U}{|Z_1|} \cos \varphi_1， \quad Q = UI_1 \sin \varphi_1 = U \frac{U}{|Z_1|} \sin \varphi_1$$

利用  $S_1^2 = P^2 + Q^2$  的关系知

$$\left(\frac{U^2}{|Z_1|}\right)^2 = \left(\frac{U^2}{|Z_1|} \cos \varphi_1\right)^2 + \left(\frac{U^2}{|Z_1|} \sin \varphi_1\right)^2$$

即

$$\left(\frac{1}{|Z_1|}\right)^2 = \left(\frac{1}{|Z_1|} \cos \varphi_1\right)^2 + \left(\frac{1}{|Z_1|} \sin \varphi_1\right)^2 \quad (3-50)$$

式(3-50)中仅含有基波导纳,故其构成直角基波导纳三角形,把式(3-50)代入式

$$(3-49) \text{ 得 } \left(\frac{1}{|Z|}\right)^2 = \left(\frac{1}{|Z_1|} \cos \varphi_1\right)^2 + \left(\frac{1}{|Z_1|} \sin \varphi_1\right)^2 + \left(\frac{1}{|Z_n|}\right)^2 \quad (3-51)$$

可见,由基波导纳三角形和谐波导纳三角形构成导纳四边形,见图3-6。导纳四边形和电流四边形、功率四边形是相似形,其证明较易,此处从略。

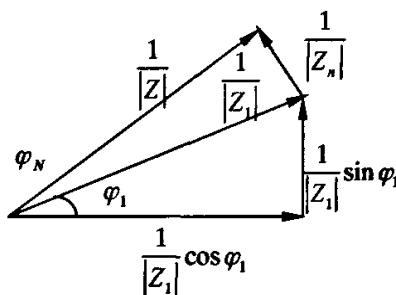


图3-6 导纳四边形

### 3.2.5 应用举例

“四边形”理论,可以解决“三角形”理论不能解决的非正弦交流电路的电工计量问题。经对大庆油田采油二厂9套变频输油系统在不同输出频率条件下测试的45个采样数据\*分析表明,均不同程度地存在着 $S^2 > P^2 + Q^2$ 的现象,说明电路存在谐波电流,与理论分析相吻合。现以其中一组测试数据为例,应用“四边形”理论,计算有关物理量。测试数据为:  $S = 20.910 \text{ kVA}$ ,  $P = 13.392 \text{ kW}$ ,  $Q = 16.013 \text{ kvar}$ ,  $U = 395.650 \text{ V}$ ,

$I = 30.514 \text{ A}$ , 电网频率  $f_1 = 50.1 \text{ Hz}$ ,  $PF = 0.642$ 。变频器输出频率  $f_2 = 37.8 \text{ Hz}$ 。

#### 1. 功率四边形的应用

由功率四边形,如图3-2可知,畸变功率 $N$ 为

$$N = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} = 1.211 \text{ kAv}$$

计算得,  $S^2 = 437.228$ ,  $P^2 + Q^2 = 435.762$ , 可见  $S^2 > P^2 + Q^2$ ; 故  $S$ 、 $P$  和  $Q$  之间不再符合直角三角形的关系。

\*付永山. 大庆油田采油二厂变频输油系统测试报告[R].1996.11

基波视在功率  $S_1 = \sqrt{P^2 + Q^2} = 20.875 \text{ kVA}$ , 可见  $S_1 < S$ 。

$$\text{畸变角 } \varphi_N = \arcsin \frac{N}{S} = 3.320^\circ$$

$$\text{基波相位角 } \varphi_1 = \arccos \frac{P}{S_1} = 50.174^\circ$$

$S$  与  $P$  的夹角  $\varphi = \varphi_1 + \varphi_N = 53.494^\circ$

$$\cos \varphi = 0.595$$

$$\cos \varphi_1 = 0.640$$

$$\cos \varphi' = \frac{P}{S} = 0.641$$

由上述结果可见,  $\cos \varphi_1 > \cos \varphi' > \cos \varphi$ , 这与本文中所得结论相符。

由图 3-2 知,  $P$  与  $S$  并没有构成封闭的三角形,  $\frac{P}{S} \neq \cos \varphi$ ;  $\frac{P}{S}$  仅限于一种人为的定义, 其物理意义并不准确, 但一般定义变流器功率因数  $PF = \frac{P}{S}$ , 此处  $PF = \frac{P}{S} = 0.641$ , 与实测  $PF$  值 0.642 相比, 有 0.001 的误差, 相对误差为 0.016%。由计算可知  $\frac{P}{S} > \cos \varphi$ ; 由  $\frac{P}{S}$  计算的功率因数相当减小了  $P$  与  $S$  的夹角, 此时  $P$  与  $S$  的夹角由  $53.494^\circ$  减小到  $50.059^\circ$ 。

## 2. 电流四边形的应用

由图 3-5 的电流三角形知,

$$\text{总谐波电流 } I_n = I \cdot \operatorname{tg} \varphi_N = 1.770 \text{ A}$$

$$\text{基波电流 } I_1 = I \cos \varphi_N = 30.463 \text{ A}$$

## 3. 导纳四边形的应用

由电工理论知, 电路为单相时,  $S = UI$ ; 电路为三相时,  $S = \sqrt{3}UI = \frac{\sqrt{3}U^2}{|Z|}$ , 故此

$$\text{时变流器每相输入总阻抗 } |Z| = \frac{\sqrt{3}U^2}{S} = 12.967 \Omega$$

$$\frac{1}{|Z|} = 77.119 \times 10^{-3} \text{ S}, \text{ S 为导纳的单位, 西门子。}$$

由导纳四边形, 如图 3-6 知,

$$\text{基波导纳 } \frac{1}{|Z_1|} = \frac{1}{|Z|} \cos \varphi_N = 76.990 \times 10^{-3} \text{ S}$$

$$\text{基波阻抗 } |Z_1| = 12.989 \Omega$$

$$\text{谐波导纳 } \frac{1}{|Z_n|} = \frac{1}{|Z|} \cdot \sin \varphi_N = 4.466 \times 10^{-3} \text{ S}$$

$$\text{谐波阻抗 } |Z_n| = 223.906 \Omega$$

由于非正弦电路中存在谐波电流，电路中产生畸变功率  $N$ 、 $S$ 、 $P$  和  $Q$  不再符合正弦电路中直角三角形的关系； $S$ 、 $P$ 、 $Q$  和  $N$  构成功率四边形。运用功率四边形可以解决功率三角形不能说明和处理的问题，并可由  $S$ 、 $P$ 、 $Q$  利用相关公式，计算  $N$ 、 $S_I$ 、 $\varphi_N$ 、 $\xi$ 、 $I_N$ 、 $I_I$ 、 $\cos \varphi_I$ 、 $\lambda$ 、 $\cos \varphi$ 、 $THD$  和  $\varphi$  等物理量。而且，功率四边形清楚地表达了  $\cos \varphi_I$ 、 $\lambda$  和  $\cos \varphi$  的意义及相关关系；并可以不考虑主电路连接方式，计算电路真实的畸变因数  $\xi$ 。

四边形理论和文中结论，有望用于工程实践。

## 本章小结

- 含有谐波电流的非正弦电路中（例如变流器电路），由于谐波产生畸变功率  $N$ ，功率、电流和导纳各自的关系已不再符合正弦交流电路中直角三角形的关系了，应以相应的四边形代替。
- 由基波功率三角形和谐波功率三角形构成功率四边形；由基波电流三角形和谐波电流三角形构成电流四边形；由基波导纳三角形和谐波导纳三角形构成导纳四边形。
- 由于图 3-2 中所示的基波功率三角形和图 3-5 中所示的基波电流三角形存在相同的基波相位角  $\varphi_1$ ，它们又都是直角三角形，故基波电流三角形与基波功率三角形是相似形。功率四边形、电流四边形和导纳四边形是相似形。
- 利用“四边形”理论，可求非正弦电路（例如变流器电路）的畸变功率、畸变角、谐波电流、基波相位角、基波阻抗和谐波阻抗等一些电气参数；“四边形”理论解决了非正弦电路中“三角形”理论不能处理的问题。

## 第4章 仿真分析及“四边形”理论程序设计

计算机仿真是现代科学研究所中的一种重要手段，是以相似原理、系统技术、以及仿真应用领域的有关技术为基础，以计算机系统、与应用有关的物理效应设备及仿真器为工具，利用模型对系统进行研究的。应用软件在计算机上模拟实际的系统，尤其应用在实际试验可能对元件具有破坏性的系统中。在电力电子技术方面，由于实际试验可能会造成元件或试验设备的烧毁，尤其在高压电力系统中去进行试验，甚至发生更严重的事故。因此，计算机仿真已经成为一种公认的经济、有效设计方法。通过仿真对其进行各方面性能的检测，避免了一些事故的发生，也降低了开发成本。

### 4.1 单相整流电路仿真

本章在简化系统结构，并不影响说明问题的基础上，采用单相电路进行分析。图4-1是单相桥式整流电路的仿真模型。其中，电源电压为220V，频率为50Hz，电网阻抗为 $1\Omega + j1mH$ ，负载电阻为 $10\Omega$ ，整流电容为 $1500\mu F$ 。

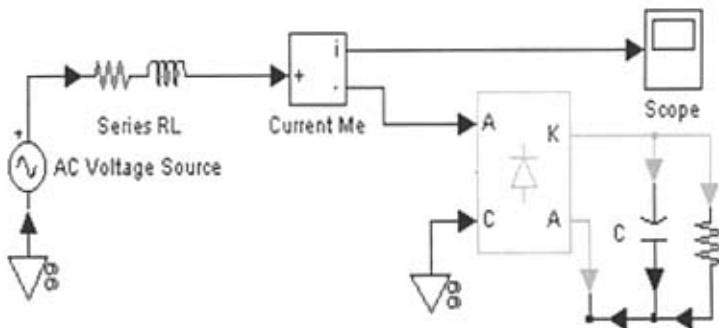


图4-1 单相桥式整流电路仿真模型

对图4-1进行仿真，从示波器Scope中得到的电流波形如图4-2所示。

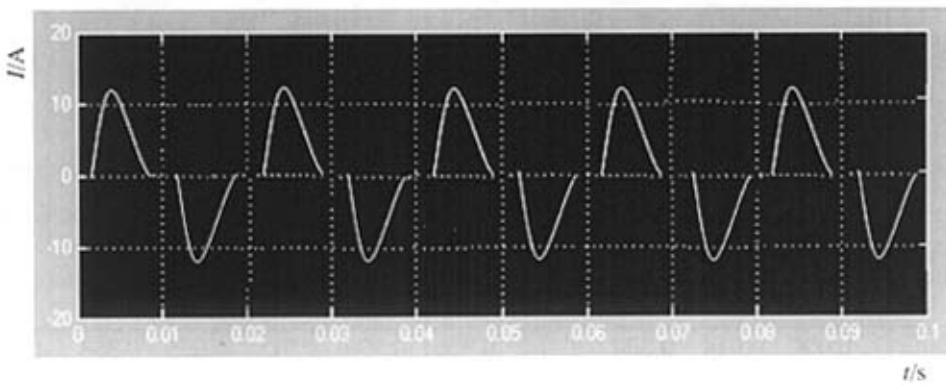


图4-2 电源侧电流波形

将图4-2中的电流波形与理想的正弦波形相比，我们可以看出电流发生了畸变，这

个畸变电流是由非线性负载——不控整流桥产生的。当非线性负载越多，电流畸变的程度愈大，甚至出现波形为方波的畸变电流。

## 4.2 单相电路的谐波及基波电流检测方法的仿真

在对第3章单相电路的谐波及基波电流检测方法的分析基础上，利用Matlab软件来进行仿真。在Simulink仿真环境下，调用相应模块，把图2-5所示各部分单元电路定义成相应的子系统模块后组合起来，形成具体的仿真电路。

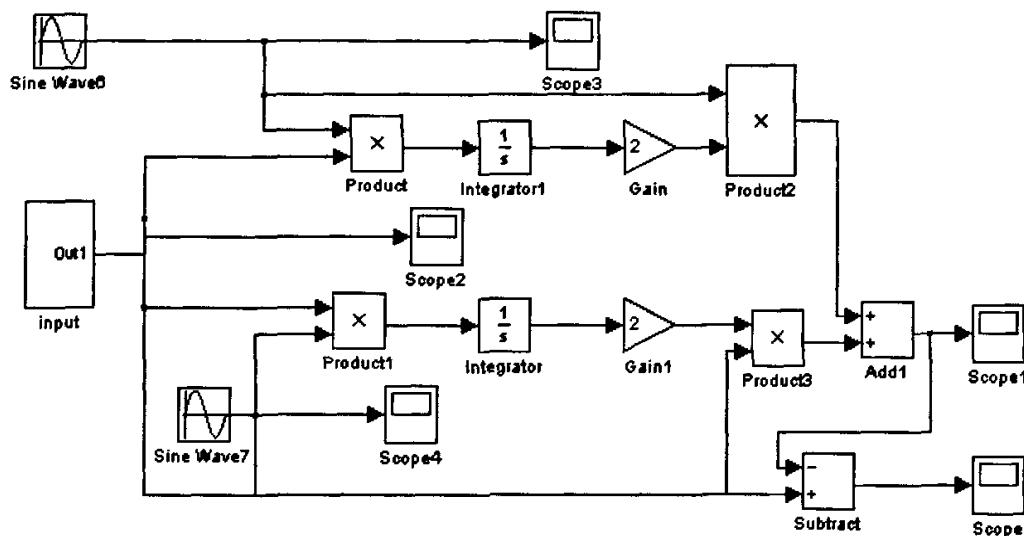


图4-3 单相谐波检测原理建模图

设输入信号为50Hz的正弦基波与3、4、5、7、9次谐波之和。

输入信号表达式为：

$$\begin{aligned}
 i(t) = & 10\sin\omega t + 4\sin\left(3\omega t + \frac{\pi}{3}\right) + 3\sin\left(4\omega t + \frac{\pi}{6}\right) + \sin\left(5\omega t + \frac{\pi}{4}\right) + \\
 & 0.4\sin\left(7\omega t + \frac{\pi}{7}\right) + 0.8\sin\left(9\omega t + \frac{\pi}{10}\right)
 \end{aligned} \quad (4-1)$$

表4-1为基波理论值与Matlab仿真过程中所得基波实际输出值的比较结果，表4-2则为谐波理论值与Matlab仿真过程中所得谐波实际输出值的比较结果。从表中数据可以看出，无论基波理论值与实测值相比较，还是谐波理论值与实测值相比，其结果都精确到小数点后一位，可见此检测方法是可行的。

表4-1 基波理论值与实际值比较

理论值(A)	0.000	0.014	0.394	0.714	0.926	0.996	0.915	0.695	0.368	-0.014
实测值(A)	0.000	0.013	0.387	0.725	0.934	0.960	0.934	0.682	0.369	-0.021
时间(s)	0.000	0.001	0.002	0.004	0.005	0.006	0.008	0.009	0.011	0.012

理论值 (A)	-0.394	-0.714	-0.926	-0.996	-0.915	-0.695	-0.368	-0.014	0.000
实测值 (A)	-0.379	-0.732	-0.934	-0.976	-0.914	-0.654	-0.378	-0.013	0.000
时间 (t/s)	0.014	0.015	0.016	0.018	0.019	0.021	0.022	0.023	0.025

表 4-2 谐波理论值与实测值比较

理论值(A)	2.627	6.134	0.909	-4.277	-1.392	-0.065	1.314	2.256	0.372	-0.938
实测值(A)	2.638	6.108	0.914	-4.232	-1.387	-0.064	1.300	2.247	0.368	-0.947
时间(s)	0.000	0.001	0.002	0.004	0.005	0.006	0.008	0.009	0.011	0.012

理论值 (A)	-3.909	-0.919	4.392	5.261	-4.314	-7.453	2.627	6.134	0.909
实测值 (A)	-3.916	-0.937	4.378	5.256	-4.319	-7.444	2.655	6.127	0.918
时间 (t/s)	0.014	0.015	0.016	0.018	0.019	0.021	0.022	0.023	0.025

图 4-4 至图 4-8 所示为仿真结果。

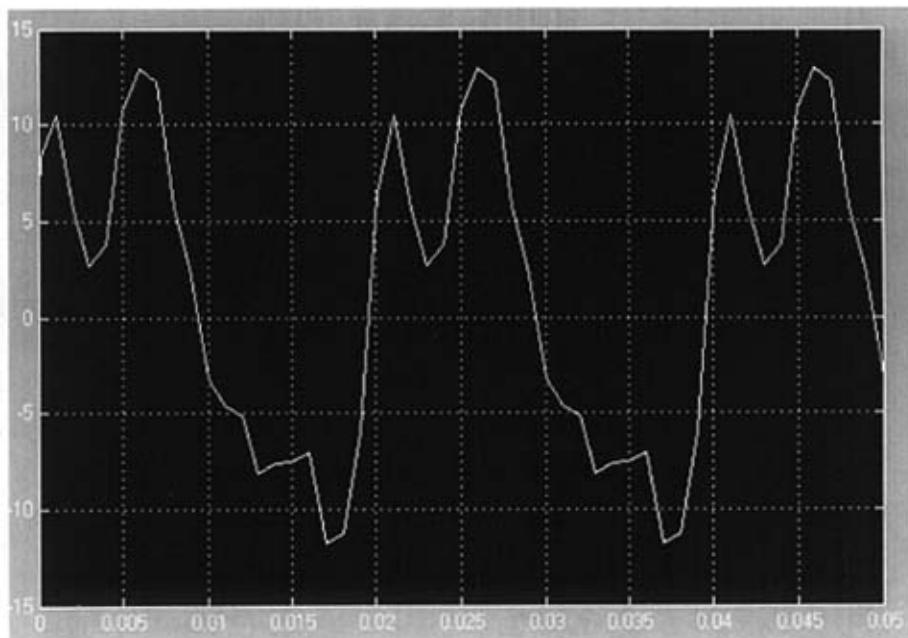


图 4-4 输入信号

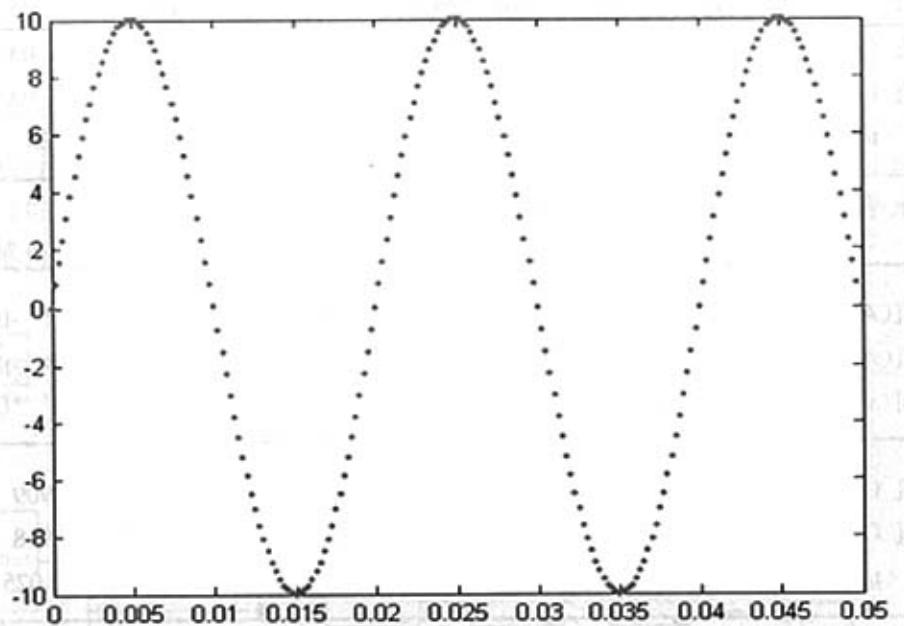


图 4-5 理论基波信号

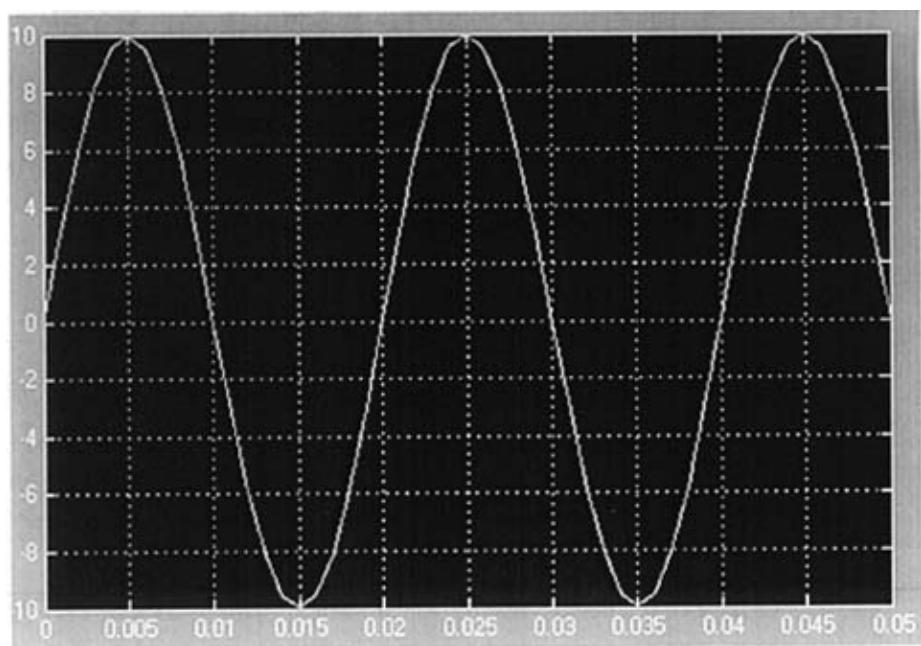


图 4-6 实测基波信号

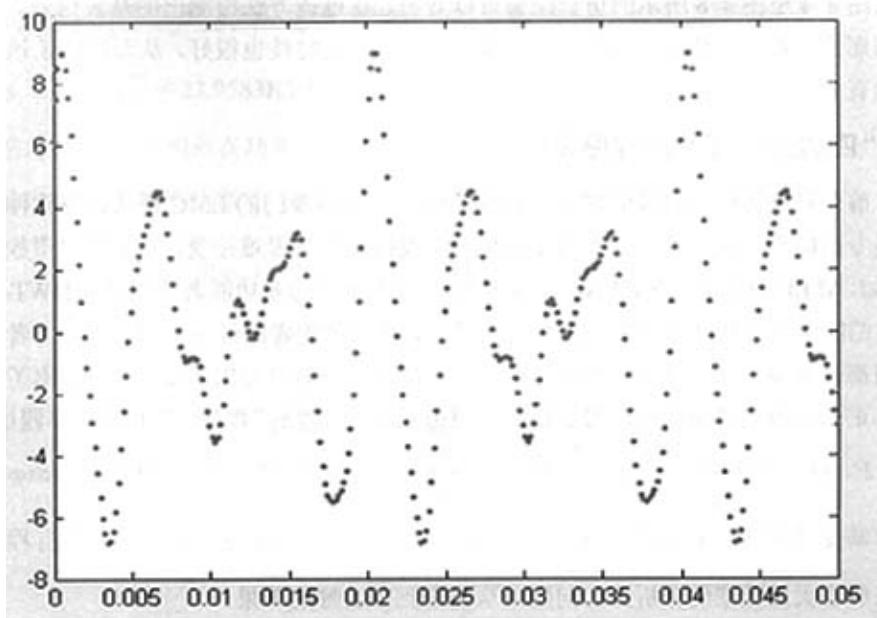


图 4-7 理论谐波信号

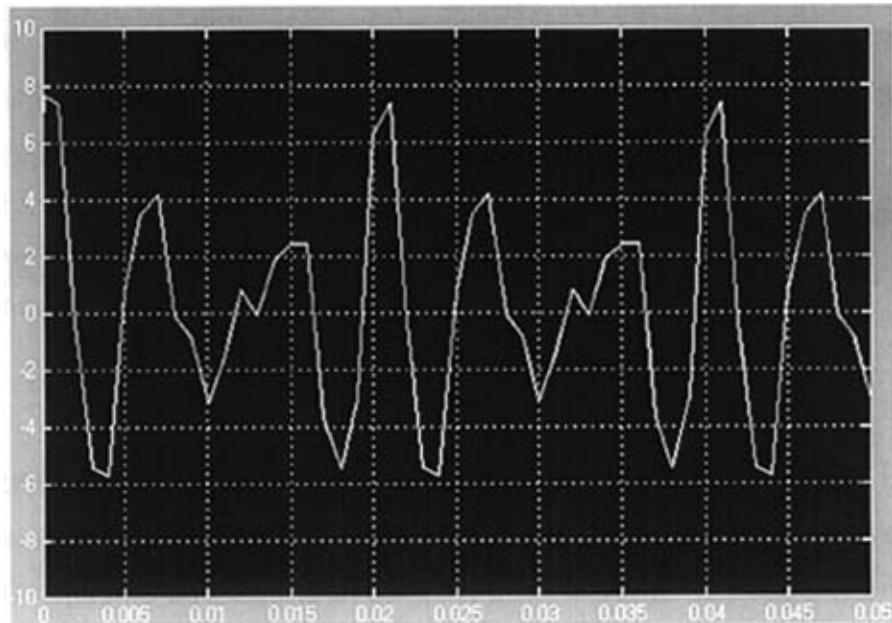


图 4-8 实测谐波信号

从图4-4至图4-8所示的仿真结果可以看出，通过该方法检测出的基波信号、谐波信号与理论上的基波信号、谐波信号基本相同，同时实时性也很好，从而证明了该方法是正确有效的。

### 4.3 “四边形”理论的程序设计

目前，对电力高次谐波的测量手段有两个：一个是专门的EMC评估计算软件；另一个是专门的谐波测量仪。前者太专业化，一般技术人员很难接受；后者是“贵族”仪器，比如，AFLEX3003可绕型VA谐波测试仪、日本万用的多功能谐波测试仪HWT-1000等，它们的价格均在2万元以上，费用太高，会增加使用者的经济负担。由于二者的推广应用都有难度，所以用软件来代替硬件的测量方法将显得突出重要。本文提出了一种用于非正弦交流电路中对某些参数量的计算方法—“四边形”理论。它利用功率四边形，由  $S$ 、 $P$ 、 $Q$  计算电路中的基波功率因数  $\cos\varphi_1$ 、总功率因数  $\lambda$  和总位移因数  $\cos\varphi$ ，还可计算畸变功率  $N$ 、畸变角  $\varphi_N$  和畸变因数  $\zeta$  等物理量。基于这种理论为其进行程序设计，来解决大量数据的分析计算问题，从而达到了良好的效果。

下面是计算软件的运行界面：

一般配置的电脑在安装JDK后均可运行此程序。

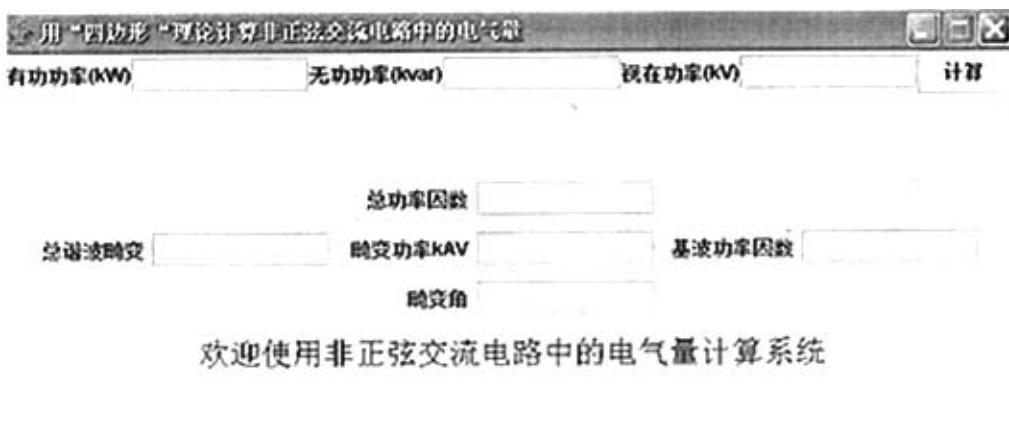


图4-9 计算非正弦交流电路中某些参数的软件界面

以功率四边形为基础，可以计算非正弦电路中的一些物理量。为此对大庆油田采油二厂20台变频输油电路，进行了现场测试，均发现不同程度地存在  $S > \sqrt{P^2 + Q^2}$  的现象。说明电路存在谐波电流，现以其中一台变频电路测试数据为例，利用文中的公式，进行相关计算。有关数据<sup>[54]</sup>为：三相有功功率  $P=15.80\text{kw}$ ，三相无功功率  $Q=18.01\text{kvar}$ ，三相视在功率  $S=23.97\text{KVA}$ ； $PF=0.642$ ；

由于  $S^2=574.5609$ ； $P^2=249.64$ ； $Q^2=324.3601$ ； $P^2+Q^2=574.0001$ ；

可见,  $S > \sqrt{P^2 + Q^2}$ ,  $S$ 、 $P$ 、 $Q$  不能构成直角三角形

$$S_1 = \sqrt{P^2 + Q^2} = 23.9583 \text{ kVA} \text{ 可见 } S > S_1$$

输入参数: 三相视在功率  $S$ ; 三相有功功率  $P$ ; 三相无功功率  $Q$ ;

输出参数: 畸变因数  $\xi$ ; 基波功率因数  $\cos \varphi_1$ ; 总功率因数  $\lambda$ ; 畸变功率  $N$ ;

畸变角  $\varphi_N$ ; 总谐波畸变  $THD$

其中:

$$\text{总功率因数 } \lambda = \frac{P}{S}$$

$$\text{总谐波畸变 } THD = \sqrt{\frac{S^2}{P^2 + Q^2} - 1}$$

$$\text{畸变功率 } N = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$$

$$\text{畸变因数 } \xi = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{S}$$

$$\text{基波功率因数 } \cos \varphi_1 = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

$$\text{畸变角 } \varphi_N = \cos^{-1} \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{S}$$

根据以上式子, 用设计好的软件来便捷地算非正弦交流电路中的一些电气参数。把测试数据:  $S = 20.910 \text{ kVA}$ ,  $P = 13.392 \text{ kW}$ ,  $Q = 16.013 \text{ kvar}$  分别输入软件, 得出结果如下:

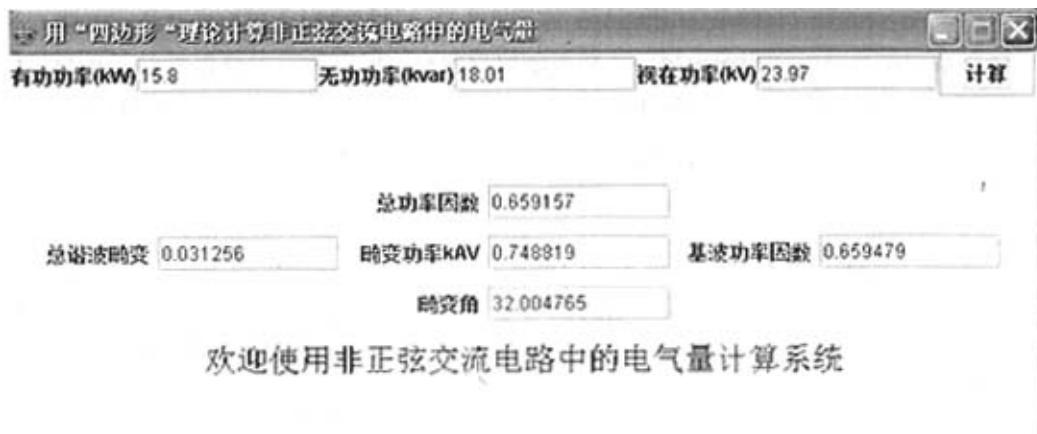


图 4-10 输入参数后的计算结果

从计算结果，可以得出：总谐波畸变为 0.031256；总功率因数为 0.659157；畸变功率为 0.748819KAV；畸变角为 32.004 度；基波功率因数为 0.659479。

由此，完成了用现场实测数据和文中公式对非正弦交流电路中的某些物理量的实例计算。

## 本章小结

本章应用 Matlab 软件中的 Simulink 工具箱对一种单相电路的谐波及基波电流检测方法进行仿真，利用仿真所得到的图形说明其有效性。并设计程序计算非正弦交流电路中的某些电气参数。具体内容如下：

- 1、通过单相整流电路说明电网波形发生畸变的情况。
- 2、采用了一种单相电路的谐波及基波电流检测方法，在分析原理的基础上，给出了原理图及其在 Matlab 环境下的仿真结果。
- 3、利用“四边形”理论提出的公式，设计计算程序来减少手工计算的工作量，提高准确性，采用大庆采油二厂的大量数据，验证其理论的有效性。

## 结论

随着电力电子技术的飞速发展，各种电力电子装置在电力系统、工业、交通及家庭中的应用日益广泛，谐波所造成危害也日趋严重，对电力系统的电气环境造成了巨大的影响，对电力设备产生了严重的危害。为了保证电力系统的正常运作和电力电子设备的正常工作，必须采用一定的手段对电力系统的谐波进行检测。

本文在对现今电网存在的谐波污染进行讨论的基础上，详细地分析了谐波的产生、危害以及抑制谐波的措施和谐波含量的标准，重点对用于抑制谐波的有源电力滤波器和非正弦交流电路中的电工计量进行论述，采用了一种单相电路的谐波及基波电流检测方法，在分析原理的基础上，给出了原理图及其在 Matlab 环境下的仿真结果。在谐波相关计算方面，提出了用“四边形”理论来计算非正弦交流电路中的畸变角、畸变功率和总功率因数等物理量。

本文所作的具体工作如下：

- 1、在比较分析了几种谐波检测方法的优缺点的基础上，采用了一种单相电路的谐波及基波电流检测方法，此方法在只要求检测谐波电流的情况下（如在混合式串联有源滤波系统中），可以省去锁相环，而在实现时可以让系统内部自己产生的与电网电压同频的正余弦信号参与计算，这样实现起来更简单。
- 2、以电工理论为基础，分析了非正弦交流电路中，因存在谐波电流而产生畸变功率  $N$ ；使电路中的视在功率  $S$ 、有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  不再符合直角三角形的关系，出现了  $S^2 > P^2 + Q^2$  的现象。 $S$ 、 $P$ 、 $Q$  和  $N$  构成功率四边形。利用功率四边形，可由  $S$ 、 $P$ 、 $Q$  计算电路的基波功率因数  $\cos \varphi_1$ 、总功率因数  $\lambda$ 、畸变功率  $N$ 、畸变角  $\varphi_N$  和畸变因数  $\xi$  等物理量。并用现场实测数据和文中公式对相关物理量进行了计算。除了功率四边形，还进一步推导出电流四边形和导纳四边形，这些理论被《西南交通大学学报》的审稿人认为对这门学科的发展存在一定的帮助。
- 3、Matlab 软件进行仿真实验。在分析原理的基础上，对于采用的一种单相电路的谐波及基波电流检测方法，给出了原理图及其在 Matlab 环境下的仿真结果。
- 4、“四边形”理论中的相关公式设计软件来更简洁地计算畸变功率  $N$ 、畸变角  $\varphi_N$  和畸变因数  $\xi$  等参数。

由于本人能力有限以及时间、实验条件的限制，本文尚有一些不足之处：

- 1、用“四边形”理论计算的软件设计上还有待于进一步提高，丰富其要求形式。
- 2、仿真中模块参数的设置还需更加精确合理。
- 3、在仿真过程中，应用的都是理想模块，与实际元件将有一定的差异，没有对其进行具体分析。

## 参考文献

- [1] 吴国沛, 刘育权, 任震. 电力系统谐波对继电保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(7): 78-79.
- [2] 李玉梅, 马伟明, 唐爱红. 电力有源滤波器的研究现状及发展[J]. 海军工程学院学报, 1999, (3): 56-65.
- [3] Joseph. S Subjak, JR, John S. Mcquilkin. Harmonics-causes, effects, measurements and analysis: an update[J]. IEEE Transon IA,1990,26(6): 1034-1402.
- [4] 中国国家标准 GB/T14549-1993: 电能质量公用电网谐波. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [5] 付光杰, 曲玉辰, 郭静. RBF 神经网络在谐波检测中的应用[J]. 大庆石油学院学报, 2005, 29(6): 76-79.
- [6] 张存礼. 谐波对感应式电能表影响的分析及对策[J]. 电气应用, 2005, 24 (8): 85-87.
- [7] 吴正国. 电力有源滤波技术. 通信电源技术, 2001, (4):11-14. 2002, (6): 1-3.
- [8] George J Wakileh 著, 徐政译. 电力系统谐波[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 1-45.
- [9] 张哲, 陈红坤. 谐波源辨识研究的现状和发展[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(5): 21-25.
- [10] 李丹青, 李汉青. 浅析变压器谐波的产生、危害及抑制[J]. 机电工程技术 2004, 33(8): 157-158.
- [11] T.R.Rietman, A.Edris, etc.The Unified Power Flow Controller: A new Approach to Power Transmission Control[J]. IEEE Trans. On Power Delivery, 1995, 10: 1085-1093.
- [12] H.Sasaki, T.Machida.A new method to eliminate ac harmonic currents by magnetic compensation consideration on basic design[J].IEEE Trans, on powerApparatus and Systems, 1971, 90(5): 2009-2019.
- [13] L.Gyugyi.Active AC Power Filter[J].Proc. of IEEE/IAS Annual meeting, 1976: 529-535.
- [14] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components[J]. IEEE Trans. On Industry Applic- ations, 1984, 20(3): 625-630.
- [15] F. Z. Peng,, H. Akagi, A. Nabae. A New Approach to Harmonic Compensation in Power Systems-A Combined System of Shunt Passive and Series Active Filers[J].IEEE Trans. On Industry Applications,1990, 26(6): 625-630.
- [16] H.Fujita, H.Akagi. A Practical Approach to Harmonic Compensation in Power Systems Series Connection of Passive and Active Filters[J].IEEE Trans. On Industry Applications,

- 1991, 27(6): 625-630.
- [17] L.Gyugyi. A Unified Power Flow Control Concept for Flexible AC Transmission Systems. Inst.Elect.Eng.Proc., 1992, 139(4): 323-331.
- [18] L.Gyugyi, T.R.Rietman, A.Edris, etc. The Unified Power Flow Controller: A new Approach to Power Transmission Control[J]. IEEE Trans. On Power Delivery, 1995, 10: 1085-1093.
- [19] 李燕青, 陈志业, 李鹏, 谢红玲. 电力系统谐波抑制技术[J]. 华北电力大学学报, 2001, 28(4): 19-22.
- [20] 胡铭, 陈珩. 有源滤波技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2000, (2): 66-70.
- [21] 李兵, 王科飞, 王树文. 电力系统谐波及滤波技术[J]. 农机化研究, 2005, (4): 121-123. [21] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [22] 吴竞昌. 供电系统谐波[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 1-6.
- [23] 李庚银, 陈志业, 丁巧林等. d-qo 坐标系下广义瞬时无功功率定义及其补偿[M]. 北京: 中国电机工程学院, 1996, 6(1): 176~179.
- [24] 张波, 易颂文, 何晓敏. 基于广义 d-q 旋转坐标变换的谐波电流检测方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, (3): 5-29.
- [25] 余健明. 基于瞬时无功理论的瞬时谐波电流检测误差与消除对策[J]. 西安理工大学学报, 1998, 14(4): 357~361.
- [26] 殷桂梁, 容亚君, 肖丽萍. 非线性负载的谐波模型研究[J]电力系统及其自动化学报, 1998, 10 (3): 58-61.
- [27] 杨斌文, 刘丽英, 王文虎. 电力系统中谐波的危害与产生[J]. 电气时代, 2002, (2): 30-31.
- [28] 张予临. 谐波对并联电容器的危害[J]. 电气时代, 2000, (5): 26-27.
- [29] 胡俊达, 张著彬. 电力系统中谐波的产生、危害和抑制[J]. 湖北电力, 2003, 27(5): 2-4.
- [30] 张绍文. 电网谐波对电动机的影响[J]. 节能技术, 2005, 23(1): 47-49.
- [31] 李圣清, 周有庆, 朱英浩, 刘光晔. 基于加权一阶局域理论的综合电力滤波器谐波电流预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2004. 6 (VOL24): 19—21
- [32] 曹玉泉. 变频调速系统畸变功率和功率因数的分析[J]. 石油学报, 2000. 3 (VOL21): 95—99
- [33] 曹玉泉, 王琼, 王刚. 谐波功率测量仪原理[J]. 西北农林科技大学学报 2004. 5 (VOL32): 110—111
- [34] 秦曾煌. 电工学[M]第六版. 北京: 高等教育出版社, 2004. 1: 145—147
- [35] 黄俊, 王兆安. 电力电子变流技术(第三版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996. 10:

- [36]何益宏, 卓放. 利用瞬时无功功率理论检测谐波电流方法的改进[J]. 电工技术学报, 2003. 1 (VOL18): 87—89
- [37]邱关源. 电路[M] 第四版. 北京: 高等教育出版社 2003. 2: 272
- [38]胡 铭, 陈 琦. 有源滤波技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2000, (2): 66-70.
- [39]马玉泉, 韩淑芬, 陈海锋. 整流机组谐波滤波器功率因数补偿不足的原因分析[J]. 电工技术杂志, 2004. 5 (VOL23): 62—63
- [40]卓放, 王兆安. 有源电力滤波器技术的发展与电能质量的提高[J] 电工技术杂志,
- [41]Angrisani L, D Aponte.A Measurement Method based on The Wavelet Transform for Power Quality Analysis[J].IEEE Trans. On Power Delivery, 1998, 13(4): 990-998.
- [42]谢运祥, 朱立新, 唐中琦. 有源滤波器输出电感值的选取方法[J]. 华南理工大学学报, 2000, 28 (9): 73-76.
- [43]肖雁鸿, 毛莜, 周靖林等. 电力系统谐波测量方法综述[J]. 电网技术, 2002, 26 (6): 61-64.
- [44]李圣清, 朱英浩, 周有庆, 何立志. 电网谐波检测方法的综述. 高电压技术, 2004, 30 (3): 39-42.
- [45]S. Santoso, W. M. Grady, E. J. Powers, J. Lamoree, S. C. Bhatt. Characterization of distribution power quality events with Fourier and wavelet transforms[J]. IEEE Trans. On Power Delivery, 2000, 15 (1): 247-254.
- [46]薛 蕙, 杨仁刚. 基于 FFT 的高精度谐波检测算法[J]. 中国电机工程学报, 2002 , 22(12):106-110.
- [47]潘文, 钱愈涛, 周鹗. 基于加窗插值 FFT 的电力谐波测量理论双插值 FFT 理论. 1994, 9 (2): 50-54 .
- [48]庞浩, 李东霞, 祖云霄等. 应用 FFT 进行电力系统谐波分析的改进型算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 50-54.
- [49]Tanaka T, Akagi H.A new method of harmonic power detection based on the instantaneous active power in three-phase circuits[J].IEEE Trans on Power Delvery,1995,10(4): 1737-1742.
- [50]李圣清, 罗飞, 张昌凡. 基于 ip 及 iq 运算方式的改进型谐波电流检测方法[J]. 电气传动, 2003, 33(2): 48-50.
- [51]黄文梅, 熊桂林, 杨勇. 信号分析与处理——MATLAB 语言及应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2000.
- [52]楼顺天, 李博菡. 基于 MATLAB 的系统分析与设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社. 1998.
- [53]许东, 吴铮. 基于 MATLAB6. x 的系统分析与设计——神经网络[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003 年 10 月.
- [54]A.Edris, etc.The Unified Power Flow Controller: A new Approach to Power

- Transmission Control[J]. IEEE Trans. 1995, 10: 1085-1093.
- [55] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [56] 吴竞昌. 供电系统谐波[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 1-6.
- [57] George J Wakileh 著, 徐政译. 电力系统谐波[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 1-45.
- [58] 张哲, 陈红坤. 谐波源辨识研究的现状和发展[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(5): 21-25.
- [59] 李丹青, 李汉青. 浅析变压器谐波的产生、危害及抑制[J]. 机电工程技术 2004, 33(8): 157-158.
- [60] 殷桂梁, 容亚君, 肖丽萍. 非线性负载的谐波模型研究[J]电力系统及其自动化学报, 1998, 10 (3): 58-61.
- [61] 杨斌文, 刘丽英, 王文虎. 电力系统中谐波的危害与产生[J]. 电气时代, 2002, (2): 30-31.
- [62] 张予临. 谐波对并联电容器的危害[J]. 电气时代, 2000, (5):26-27.
- [63] 胡俊达, 张著彬. 电力系统中谐波的产生、危害和抑制[J]. 湖北电力, 2003, 27(5):2-4.
- [64] 张绍文. 电网谐波对电动机的影响[J]. 节能技术, 2005, 23(1):47-49.
- [65] 吴国沛, 刘育权, 任震. 电力系统谐波对继电保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(7): 78-79.

## 发表文章目录

本论文是在 2005—2006 黑龙江省研究生创新科研资金项目“用功率四边形分析非正弦交流电路的功率因数”的基础上整理完成。(项目申请人: 白丽丽, 项目编号: YJSCX2006-33HLJ)

1. 变频调速输油系统谐波电流和畸变角的计算. 曹玉泉, 白丽丽, 艾清慧, 孙辉. 天然气与石油, 2005, 23(1):46-48.

**摘要:** 由于变频输油电路中, 存在谐波电流, 并产生畸变功率  $N$ , 为此以电工理论为基础, 确定了畸变功率  $N$ 、有功功率  $P$ 、无功功率  $Q$  和视在功率  $S$  构成的功率四边形, 得出了计算畸变功率  $N$ 、谐波电流、功率因数、畸变角等物理量的方法。并运用功率四边形理论, 对现场工程实例进行了有关计算。

**关键词:** 非正弦交流电路, 谐波, 功率四边形, 畸变角

2. 功率四边形、电流四边形和导纳四边形及应用. 曹玉泉, 白丽丽, 李梦达, 颜伟中. 西南交通大学学报 (核心期刊并被 EI 检索), 0258-2724(2006)03-0305-05

**摘要:** 为解决功率三角形不能解决的一些问题, 例如求含谐波电流的非正弦电路的电气参数问题, 根据电工理论提出了由视在功率  $S$ 、有功功率  $P$ 、无功功率  $Q$  和畸变功率  $N$  构成的功率四边形。功率四边形也可看成是由基波功率三角形和谐波功率三角形组成的。由功率四边形进一步确立了非正弦交流电路中的电流四边形和导纳四边形, 以及它们和功率四边形的相似关系。以现场实测数据为例, 利用四边形理论计算了非正弦交流电路中的畸变功率、谐波畸变角、总谐波电流、畸变导纳、谐波导纳等参数。

**关键词:** 非正弦交流电路, 基波, 谐波, 功率四边形, 电流四边形, 导纳四边形, 畸变功率, 畸变角

3. 用功率四边形分析非正弦交流电路的功率因数. 曹玉泉, 白丽丽, 颜伟中. 西北农林科技大学学报 (自然科学版, 核心期刊), 1671-9387(2006)02-0153-04

**摘要:** 以电工理论为基础, 分析了非正弦交流电路中, 因存在谐波电流而导致产生的畸变功率  $N$ , 使电路中的视在功率  $S$ 、有功功率  $P$ 、无功功率  $Q$  不再符合直角三角形的关系, 出现了  $S > \sqrt{P^2 + Q^2}$  的现象。利用  $S$ ,  $P$ ,  $Q$  和  $N$  构成功率四边形, 由  $S$ ,  $P$  和  $Q$  计算非正弦交流电路的基波功率因数  $\cos\varphi_1$ 、总功率因数  $\lambda$ 、总位移因数  $\cos\varphi$ 、畸变功率  $N$ 、畸变角  $\varphi_N$  和畸变因数  $\xi$  等物理量, 对  $\xi$  等物理量的表达式做了分析。并用现场实测数据和文中公式对相关物理量进行了实例计算。

**关键词:** 谐波电流, 畸变功率, 功率四边形, 功率因数, 畸变角, 畸变因数

## 致谢

首先要感谢我的导师曹玉泉教授对我的悉心指导。在我的研究生学习期间，他给予了我很多关心和帮助，无论是从开题设计还是到查找资料，再到论文发表等方面。他严谨的治学风范以及精益求精的科研态度使我感触颇深。在整个学习期间，导师的博学多才、严谨的治学态度、对事业的执着追求、自强不息的精神面貌，永远是我学习的楷模。致此论文完成之际，表达对导师深深的敬意和衷心的感谢。

感谢付光杰老师对我学习上的支持与帮助；感谢徐建军老师为我创造了良好的学习环境；感谢电气工程系的全体教师，在学习和生活上都给予了我很大的帮助，从他们身上我学到了很多做人的道理，对人生观、价值观有了更深层次的认识。

感谢与我共同度过三年研究生生活的同学们。在闲暇时间，是他们带给我快乐；遇到困难时，是他们帮助我、鼓励我。

最后还要特别感谢我的父母、姐姐对我的关心、支持和鼓励，他们的爱是我前进的动力，没有他们对我生活上无微不至的关怀，我也就不可能有今天的成长。