

摘要

随着工业技术的发展，电网中的谐波污染日益严重，通常采用无源滤波器和有源滤波器滤除电网中的谐波，使电网中的谐波含量满足国标要求。然而电网中的谐波电压和谐波电流也是一种能量，只是其频率并非电网所采用的基波频率。提取电网中的谐波电能并加以利用，实现在治理电网谐波的同时利用电网谐波电能。

本文提出一种基于谐波相序特性和基波磁通补偿原理、采用单调谐滤波电路与三相变压器相结合提取三相谐波电能的新方法。该方法将单调谐滤波电路与变压器一次侧串联组成滤波电路并联连接在电网和谐波源之间，滤除电网中的某次谐波，同时从变压器二次侧提取谐波电能。在三相变压器一次侧并联基波调谐电路，在基波频率时将谐波提取电路短路，分流单调谐滤波电路中的容性基波电流，实现在不取用电网基波功率的前提下提取纯净的谐波电能。在电网和滤波电路之间串联一个基于基波磁通补偿的变压器，用来提高电网对谐波的阻抗，迫使更多谐波电流流入滤波电路，使谐波提取最大化。

最后依据前文的研究构建三相谐波电能提取电路模型，对其工作原理进行分析。在 MATLAB 中构建三相谐波电能提取电路仿真模型，通过仿真实现了在不取用电网基波电能时提取电网中的 5 次和 7 次谐波电能，并将其作为三相电源为负载提供电能。仿真结果验证了本方法在理论上的正确性和可行性。

关键词：谐波相序；谐波电能；基波磁通补偿；三相谐波提取电路

Abstract

With the development of industrial technology, harmonic pollution is becoming severity in power system. We usually adopt passive filter and active filter to filter the harmonic in power system, and make sure the harmonic distortion rate satisfy the national standards. However, the harmonic voltage and harmonic current are also kinds of energy, merely its frequency is not the same as the fundamental frequency of the grid. The harmonic energy of power grid can be extracted and utilized, meanwhile realize using the harmonic energy and filter the harmonic at the same time.

This paper proposes a new method of harmonic extraction, which base on the harmonic sequence characteristics and the principle of fundamental magnetic flux compensation, and combined the single-tuned filter circuit and three-phase transformer to extract harmonic energy. A single-tuned filter circuit in series with the primary winding of the transformer, and they are paralleled in power system as a whole to filter harmonic, meanwhile extract grid harmonic energy from the secondary winding of the transformer. A fundamental tuned circuit is paralleled with the primary winding of the transformer. The equivalent impedance of the fundamental turned circuit at fundamental frequency is zero and bypasses the capacitive fundamental current, meanwhile makes the harmonic extraction circuit as a short circuit, achieves the goal of extract harmonic energy without consuming fundamental energy. A transformer based on the fundamental magnetic flux compensation series between the grid and the passive filter to improve harmonic impedance of grid, force more harmonic current flow into passive filter and maximize the harmonic extraction.

Finally, the harmonic energy extraction model is built and its working principle is analyzed. Using MATLAB built the harmonic energy extraction model, by means of simulation, this model realize extract the fifth and seventh harmonic energy from power grid without consuming fundamental energy, and provide power to load as a three-phase source. The simulation results verify the feasibility and correctness in theory of this method.

Key words: phase sequence of harmonic; harmonic energy; fundamental magnetic flux compensation ; three-phase harmonic extraction circuit

目 录

摘 要	I
目 录	V
1 绪论	1
1.1 课题的提出与意义	1
1.2 电网谐波电能提取技术研究现状	4
1.3 本文主要研究内容	6
2 电网谐波特性分析	9
2.1 整流装置的特征谐波	9
2.2 谐波相序特性	10
2.3 公用电网谐波标准	12
2.4 电网中的谐波功率	15
2.5 非正弦周期电流电路的功率和功率因数	17
2.6 本章小结	18
3 无源滤波器的设计与仿真	19
3.1 无源滤波器的结构和基本原理	19
3.1.1 单调谐滤波器特性	19
3.1.2 二阶高通滤波器特性	20
3.2 无源滤波器的电容器参数设计方法	22
3.2.1 无源滤波器的无功功率补偿	22
3.2.2 最小滤波电容参数计算方法	23
3.3 系统阻抗对滤波器参数的影响	24
3.4 磁通补偿原理及其应用	26
3.4.1 磁通补偿基本原理	26
3.4.2 磁通补偿实现方法	28
3.4.3 无源基波磁通补偿在本设计中的应用	30
3.5 无源滤波器的仿真研究	31
3.5.1 无基波磁通补偿的无源滤波器仿真	32
3.5.2 有基波磁通补偿的无源滤波器仿真	38
3.6 本章小结	40

4 三相谐波电能提取电路的分析与仿真	41
4.1 三相谐波电能提取电路结构.....	41
4.2 三相谐波电能提取电路的工作原理.....	42
4.3 三相谐波电能提取电路的仿真研究.....	45
4.3.1 无基波磁通补偿的谐波电能提取电路的仿真研究.....	45
4.3.2 有基波磁通补偿的谐波电能提取电路的仿真研究.....	49
4.4 本章小结.....	53
5 结论与展望	55
参考文献	57
作者简历	61
学位论文数据集	63

1 绪论

1.1 课题的提出与意义

电能作为人们日常工作和生活中最重要的能源，其利用程度和效率在一定程度上反映了一个国家科学技术的发展水平。伴随着时代发展和工业进步，电网中的负荷也变得多种多样，这些负荷在利用电能的同时，也给电网的电能质量带来一些负面影响。

在理想电网中，电压和电流的波形应该是工频正弦波。正弦电压施加在线性时不变电阻、电感和电容元件上，其电流和电压分别是比例、积分和微分关系，仍为同频率的正弦波。当正弦电压施加在非线性电路元件上，电流发生畸变而成为非正弦周期波，非正弦周期电流在电网阻抗上产生非正弦周期压降，导致电压波形也变为非正弦周期波 **Error! Reference source not found.**，所以电网中的谐波主要是由电网中负荷的非线性引起的。

电网中的非线性负荷可分为以下三类：第一类是由铁磁饱和型材料制成的电气设备，如变压器、饱和电抗器等；第二类是各种电力电子设备，如各种交直流换流装置，整流器、逆变器、开关电源、变频装置等；第三类是电弧型电气设备，如交流电弧炉、交流电焊机和日光灯等 **Error! Reference source not found.**

随着电力系统中非线性负荷的日益增多，谐波污染问题变得日益严重，对电力环境造成污染，给电网的经济运行和电能质量造成极大影响。作为供电电源与用电设备之间的非线性接口，电力电子装置在实现功率转换和处理的同时，不可避免的产生谐波电流并将其注入电力系统，使电网的电压和电流波形发生畸变。尤其是 70 年代以来，伴随电力电子技术的飞速发展，大量电力电子装置在电网、工业交通和日常生活等方面的广泛应用，使其成为电网中的主要谐波源。

理想的公用电网给负载提供的电压应该是单一固定频率的正弦波，谐波电压和谐波电流的出现，对公用电网是一种污染，给电网中的用电设备的正常工作带来危害。谐波对公用电网及电气设备的危害有以下几个方面：

(1) 谐波使公用电网中的电气设备产生附加的谐波损耗，降低发电机、变压器、输电线路及用电设备的效率，大量的三次谐波电流流过中性线时，会使线路过热而损坏。

(2) 影响电气设备的正常工作。对于电动机来说，谐波除了引起附加的谐波损耗外，还会产生机械振动、噪声和过电压，局部严重过热。谐波

导致设备发热增加，加速绝缘元件的老化，缩短设备寿命，影响电气设备的正常工作，如谐波会造成电缆、电容器设备过热、绝缘老化、寿命缩短，严重时损坏设备。

(3) 引起电网局部谐振。电网中为了提高功率因数在负荷侧装设大量并联电容器，同时为消除电网中的某次谐波装设大量的单调谐无源滤波器。谐波会引起公用电网中局部的并联谐振和串联谐振，从而使谐波放大，严重时烧毁电抗器和电容器而引发事故。

(4) 谐波引起电力计量和测量误差。

(5) 谐波造成继电保护和自动装置误动作。

(6) 谐波对相邻的通信线路产生干扰，降低通信质量。

采用滤波装置就近吸收谐波源产生的谐波，是目前抑制电网谐波污染的主要措施，滤波装置主要有无源滤波器、有源滤波器和混合滤波器。无源滤波器结构简单，技术成熟，成本低，治理电网谐波的同时为电网提供无功补偿，是治理电网谐波的主要方法之一。但无源滤波器也有一些缺点：滤波效果受系统阻抗的影响；无源滤波器与系统阻抗发生谐振，导致某次谐波放大；一条无源滤波支路只能滤除一定频率的谐波，滤除不同频率的谐波需要多个滤波支路；不能对变化的谐波进行动态补偿。

随着电力电子技术的发展，特别是全控型器件和PWM逆变技术的出现，以及瞬时无功功率理论的成熟，使有源电力滤波器成为治理电网谐波和无功补偿的一种新方法。有源滤波器相对于无源滤波器具有明显的优势，能够对电网中的谐波进行动态跟踪补偿，并且其补偿特性不受电网阻抗变化的影响，不容易和电网阻抗发生谐振。有源滤波器的变流电路分为电压型和电流型，目前实用的装置中90%以上是电压型^{Error! Reference source not found.}。从有源滤波器和补偿对象的连接方式来看，有源滤波器分为并联型和串联型，目前并联型占实用装置的绝大多数。

将无源滤波器和有源滤波器通过不同的拓扑结构组成的混合型滤波装置已成为谐波治理研究的热点。混合滤波器结合了有源滤波器和无源滤波器的优点，即无源滤波器成本低，可以滤除大容量谐波，有源滤波器动态补偿谐波，补偿效果不受电网参数影响。将无源滤波器和有源滤波器通过不同的拓扑结构联接，形成多种混合滤波方案，常用的有并联无源与并联有源混合型、有源与无源串联后与电网并联混合型、并联无源与串联有源混合型、统一电能质量控制器等^{Error! Reference source not found.}。

目前对电网谐波抑制的研究大都是针对某种谐波源和滤波

装置单独进行的，实际的供用电系统结构非常复杂，其中电力电子装置等非线性负荷种类繁多，数量众多，容量和谐波特性以及其在供电系统中的位置各异，滤波装置的特性各不相同，谐波源之间、滤波装置之间、谐波源和滤波装置之间相互影响。因此，单纯针对某种滤波装置的研究是远远不够的，必须以整个供用电系统为对象，对谐波的综合治理进行深入研究，建立谐波综合治理的系统理论和技术基础。目前世界范围内对谐波治理的研究趋向于对谐波综合治理系统研究

Error! Reference source not found.

不论是采用无源滤波器还是有源滤波器治理电网中的谐波，其目的都是将电网中的谐波滤除，使电网中的谐波含量降低到国标规定值以下，使电网达到安全运行的要求。安装滤波设备不仅增加投资，还要增加运行费用，加重电网的日常运行管理工作，特别是要抑制的谐波幅值越高，其滤波设备的投资和运行费用就会越高。

值得注意的是电网中的谐波电压和谐波电流也是一种能源，只是其频率并非电网中通常所采用的工频频率。如果将这部分谐波电能提取出来并加以利用，在治理谐波的同时利用谐波电能，不失为一种治理电网谐波的好方法。将抑制谐波转变为利用谐波的能量，实现变废为宝，将利用谐波能量获得的效益，用以补偿有关设备的经济投入，而且也是绿色能源、循环经济发展中的一个有益环节。

电网中的大功率非线性用电负荷，其产生的谐波功率是相当可观的。有研究表明，对某一电解项目进行分析，电解设备用电为 24MW，功率因数 0.7，在变压器 110kV 侧出现 $6k \pm 1$ 次谐波。仿真结果表明可利用的谐波功率为 1.48MW，日利用谐波电能 35520kWh，每年以利用 5000h 计算，可利用谐波电能 740 万 kW·h

Error! Reference source not found.。理论计算一个用电 18MW 的铝电解设备，可利用的谐波功率为 1 MW，日利用谐波电能 24000kW·h，每年以利用 6000 小时计算，可利用谐波电能 600 万 kW·h，相当于节省电费 300 多万元。

将电网中的谐波电能提取出来并加以利用作为治理电网谐波的一种新方法，与传统的采用无源滤波器和有源滤波器治理电网谐波的方法相比，并不是单纯的将谐波滤除，而是将电网中的谐波电能提取出来，经过整流或变频装置将其转化成直流电或基波交流电，在实现谐波治理的同时利用电网中的谐波电能。尤其是在谐波含量比较丰富的变电站以及大型冶炼企业内进行谐波提取，把这些谐波能量转化为基波电能，在减小电网中谐波污染的同时实现能量的最大程度利用。这样既降低电网中谐波含量，提高电能质量，又节约社会资源，具有巨大的经济意

义。

这种治理谐波的方法相对于通过滤波器滤除谐波的方式具有经济方面的

研究价值,已有学者开始这方面的研究。因此,电网谐波电能提取技术这一课题研究具有现实意义和经济价值。

1.2 电网谐波电能提取技术研究现状

电网谐波电能提取技术作为治理电网谐波的一种新方法,在实现治理电网谐波的同时将电网中的谐波电能提取出来并加以利用,目前国内外对这方面的研究较少,还处于探索阶段。

郑州大学赵国生率先提出一种利用电网谐波进行拖动或发电的方法。该方法将电网每相的无源滤波装置与三绕组变压器原边绕组串联组成滤波电路并联于电网,滤除电网中的谐波,从变压器的副边绕组提取谐波电能。为避免在谐波提取过程中消耗基波电能,在变压器的另一副边绕组通过基波消磁电路注入基波无功电流进行基波消磁^{Error! Reference source not found.}。通过基波消磁使变压器铁心中的基波磁通接近为零,从变压器的副边绕组提取出无源滤波装置滤除的电网谐波成分。提取到的谐波电能经过三相全波整流后与直流电动机的电枢绕组相连,或者连接相应的发电设备,将谐波电能作为发电设备的励磁电流。电网中的谐波电压和电流分量是随机变化的,为了抑制这种变化对电动机的影响,在电动机电枢绕组和整流电路之间串联电抗器。为了使直流电动机能在谐波电压波动情况下拖动同步发电机发电,采用调节直流电动机励磁电流的方法来调节发电机输出的电压。

四川大学滕福生提出将电容器与特构变压器相结合提取电网谐波电能。将电容器与特构变压器组成谐波分频电路并联在电网中,构成特定次谐波的谐振通道滤除电网中的谐波,同时在变压器的副边绕组提取电网谐波电能,并将谐波电能转化为可供负载利用的电能^{Error! Reference source not found.}。

郑州大学陈群和杨新志采用基波磁通补偿原理和调谐滤波技术相结合,通过设置三绕组变压器和无源滤波器参数,使变压器的原边绕组和无源滤波器的阻容电路组成调谐电路,从而使电网中的谐波电能流入变压器的原边,同时从变压器的二次绕组提取电网中的谐波电能,并经过变频装置变为可直接利用的基波电能。对于电网基波来说,滤波电路呈容性阻抗,因此在谐波提取时有容性基波电流流入变压器。同时利用变压器的电磁感应和基波磁通补偿原理,将变压器三次绕组通过一个电感与基频电源串联,使变压器三次绕组侧的基波电流与变压器一次侧的容性基波电流大小相等、方向相反,使变压器原边在基频下呈零阻抗消除基波无功,从而使变压器副边提取的谐波电能中尽可能不含基波无功,从而

实现在不取用基波功率的前提下提取电网谐波电能 **Error! Reference source not found.**。

河南机电高等专科学校仝战营提出在三相电路中串入电感和电容组成的基波谐振电路，在基波谐振电路与非线性负载之间并联直流储能设备，通过三个正向二极管和三个反相二极管与电路并联，提取非线性负载不消耗的正、负半周期的剩余谐波电能，将提取到的谐波电能以直流电方式储存在储能设备。该电路对基波电流无影响，对谐波电流呈现高阻抗，从而迫使谐波电流通过二极管电路以正负直流电能的形式流入直流储能设备，储存的直流电能经平波后可直接利用或经逆变装置送回电网 **Error! Reference source not found.**。

为了保证谐波提取后电网谐波含量达到国标要求，抑制电网阻抗对谐波电能提取电路的影响，同时让更多谐波流入单调谐滤波器，使谐波提取最大化，在电网和谐波提取电路之间串联一个基于基波磁通补偿（fundamental magnetic flux compensation, FMFC）的变压器 **Error! Reference source not found.**。在满足基波磁通补偿的条件下，串联变压器对电网基波呈现变压器一次侧绕组漏阻抗，对谐波呈现数倍的变压器励磁阻抗。变压器的漏阻抗通常较小，励磁阻抗通常远大于漏阻抗，从而提高电网侧对谐波的阻抗，被迫谐波电流流入谐波提取电路，使谐波提取最大化。

在基波磁通补偿电路中，鉴于补偿方式的不同，可以将基波磁通补偿分为有源基波磁通补偿和无源基波磁通补偿。有源基波磁通补偿采用检测电路实时检测电网中基波电流的幅值和相位，并由逆变装置产生与一次侧基波电流幅值相等、相位相反的基波电流注入串联变压器二次侧，使其满足基波磁通补偿条件，对电网谐波呈高阻抗 **Error! Reference source not found.**。这种方法需要实时检测电网中基波电流的幅值和相位，对检测电路的实时性要求较高。有源基波磁通补偿的检测方法主要有瞬时无功功率理论检测法、自适应检测法、基于小波变换检测法、基于神经网络检测法及基于空间矢量检测法等。

华中科技大学陈乔夫提出一种有源基波磁通补偿方案，该方案将串联变压器二次侧与一个电压型逆变器连接在一起，通过控制逆变器跟踪一次侧的基波电流，由逆变电路向变压器二次侧绕组注入满足基波磁通补偿的电流，使变压器中基波磁通接近于零 **Error! Reference source not found.**。从变压器的原边来看对基波呈现一次侧绕组漏阻抗，对谐波呈现数倍的励磁阻抗，提高电网侧对谐波的阻抗，实现对谐波电流的隔离，迫使谐波电流流入无源或混合滤波器支路。这种方案只需检测、跟踪电网基波电流，电路结构简单，性能稳定，易于在工程中实现，由于电网中的

基波电流通常较大，对逆变装置的容量要求较高。

无源基波磁通补偿是以无源元件为串联变压器提供基波磁通补偿电流，无源基波磁通补偿方法主要有两种。郑州大学焦留成提出将串联变压器二次侧由基波谐振回路连于电网，通过基波谐振电路提供与串联变压器一次侧幅值相等、相位相反的基波磁通补偿电流，从而使变压器铁心中的基波磁通为零，提高电网侧对谐波的阻抗，迫使谐波电流流入滤波器支路 **Error! Reference source not found.**。河南理工大学韩素敏提出在谐波源前串联变压器，二次侧以基波单调谐电路作为负载，满足基波磁通补偿条件。该环节使得基波电流无衰减通过，而对于谐波电流呈现高阻抗，提高电网对谐波的阻抗，从而使得变压器一次、二次侧只含有基波电流和谐波电压，电源侧基本不含谐波成分，达到隔离电网谐波的目的 **Error! Reference source not found.**。

除了检测电网基波电流外，也可以通过逆变装置给串联变压器二次侧提供一个与电网中谐波电流呈正比的谐波电压。对谐波电流来说，此时串联变压器等效为一个电阻，其阻值远大于电网阻抗和无源滤波器的等效阻抗，阻止谐波电流流向电网，这种方法多用于串联混合型电力滤波器。

1.3 本文主要研究内容

本课题来源于河南省重点科技攻关项目“利用电网谐波进行发电技术的研究”。本文在前人研究的基础上，对电网谐波电能提取方法做进一步的研究，其主要研究内容：

(1) 本文以阻感负载的三相桥式整流电路作为谐波源，分析其产生谐波的特征和谐波相序特性，为提取三相电网中的谐波电能提供理论依据。分析电网谐波的相序特性，探讨提取到的谐波电能是否可作为三相电源。依据现有的国家标准和相关谐波电能数据，分析谐波电能提取的经济性。

(2) 根据无源滤波器的基本原理，以及相关参数设计方法，设计一种无源滤波电路，该滤波电路应该满足在滤除电网谐波的同时补偿电网无功功率，滤波后电网侧的电压和电流谐波含量满足国标要求，为谐波电能提取提供技术支撑。

(3) 分析磁通补偿原理，设计无源基波磁通补偿电路，对其电路结构和工作原理进行分析。该基波磁通补偿电路应该满足对电网谐波呈高阻抗，对电网基波呈低阻抗，在不影响电网基波的情况下实现电网侧对谐波的隔离，使无源滤波效果不受电网系统阻抗变化的影响。建立无源滤波电路仿真模型，对其滤波效果进行仿真验证，并在无源基波磁通补偿条件下对滤波电路进行仿真，分析无源基波

磁通补偿电路对滤波效果的影响。

(4) 设计三相谐波电能提取电路，建立三相谐波电能提取电路模型，对其电路结构和工作原理进行详细分析。所设计的三相谐波电能提取电路应该满足在不取用电网基波电能的情况下，提取电网中的谐波电能，并将提取到的谐波电能作为三相电源。

(5) 在 MATLAB 中建立谐波电能提取电路模型，并对其进行仿真。分析提取到的谐波波形并计算谐波电能，对谐波提取后电网中的电压电流畸变率是否满足国标要求和提取到的三相谐波是否满足相序特性进行检验，验证本文的三相谐波电能提取方法的正确性和可行性。

(6) 总结研究工作的成果，给出其中的不足之处，并对进一步研究做出展望。

2 电网谐波特性分析

2.1 整流装置的特征谐波

电网中的谐波源有变压器、整流器、开关电源、变频装置和电弧炉等，目前电网中的主要谐波源是电力电子装置，在各种电力电子装置中，整流器所占比例较大。晶闸管整流装置采用移相控制，从电网中吸收的是缺角的正弦波，从而给电网留下的是另一部分缺角的正弦波，导致电网中的电压和电流波形发生畸变。整流器是一种典型的谐波源，其直流侧滤波元件有电感和电容两种，因此它们注入电网的谐波也有差异，并且受滤波电感和电容大小的影响。根据直流侧滤波方式的不同，可将这种谐波源分为电压型谐波源和电流型谐波源 **Error! Reference source not found.**

阻感负载的三相桥式全控整流电路，假设直流侧滤波电感足够大，忽略电路的换相过程，直流侧电流为恒稳直流电流 I_d 。每个晶闸管导通时间均为 $2\pi/3$ ，任一时刻均有两个晶闸管导通 **Error! Reference source not found.**。电源供给的电流为晶闸管导通时通过的电流，即交流侧相电流为正、负半波幅值 I_d 且持续时间为 $2\pi/3$ 的矩形波，交流侧三相电流波形相同，相位依次相差 120° 。对该矩形波采用傅里叶级数展开成三角函数级数，即

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

式中

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

以 A 相电流为例，电流 i_a 的傅里叶分析表达式为

$$\begin{aligned} i_a &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left[\sin \omega t - \frac{1}{5} \sin 5\omega t - \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + L \right] \\ &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \sin \omega t + \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \sum_{\substack{n=6k\pm 1 \\ k=1,2,3L}} (-1)^k \frac{1}{n} \sin n\omega t \\ &= \sqrt{2} I_1 \sin \omega t + \sum_{\substack{n=6k\pm 1 \\ k=1,2,3L}} (-1)^k \sqrt{2} I_n \sin n\omega t \end{aligned} \quad (2-2)$$

由式 (2-2) 可知基波和各次谐波电流有效值分别为

$$\begin{cases} I_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \\ I_n = \frac{\sqrt{6}}{n\pi} I_d, \quad n = 6k \pm 1, k = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (2-3)$$

由上述分析可得以下结论：三相全控桥式整流电路注入电网的电流中仅含有 $6k \pm 1$ (k 为正整数) 次谐波，各次谐波有效值与谐波次数呈反比，且谐波电流有效值与基波有效值的比值为谐波次数的倒数。

当整流器直流侧采用电感滤波时，如果滤波电感 L 足够大，其直流侧电流基本保持恒定，注入电网的谐波电流主要由直流侧电流的大小和各半导体器件的切换方式所决定，受交流侧参数影响较小，具有理想电流源的特性，因此直流侧采用大电感滤波的整流器可看成理想谐波电流源。与直流侧电感滤波的整流器相对应，直流侧采用电容滤波的整流器，如果滤波电容足够大，其直流侧电压为恒值，并通过各半导体开关器件的切换加到交流侧，这类谐波源产生的谐波电压主要由直流侧电压的大小和半导体器件的切换方式所决定，受交流侧参数影响较小，具有理想电压源的特性，因此直流侧采用大电容滤波的整流器可以看做电压型谐波源 **Error! Reference source not found.**。在各种谐波源中，变压器、换流器、电弧炉、电气化铁道等属于电流型谐波源，家用电器、变频器、不间断电源和开关电源等属于电压型谐波源。

2.2 谐波相序特性

在对称三相电路中，当负载为线性负载时，三相电压和电流符合正序相序特性，即各相电压和电流大小相等，相位互差 120° 。以相电流为例，三相电流可表示为

$$\left. \begin{aligned} i_a &= \sqrt{2}I \sin(\omega t) \\ i_b &= \sqrt{2}I \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ i_c &= \sqrt{2}I \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

当负载为三相对称的非线性负载时，电网电流波形发生畸变，设 A 相电流的表达式为

$$i_{an} = \sqrt{2}I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (2-5)$$

则 B、C 相电流的表达式分别为

$$\begin{aligned} i_{bn} &= \sqrt{2}I_n \sin[n(\omega t - 2\pi/3) + \varphi_n] \\ &= \sqrt{2}I_n \sin(n\omega t + \varphi_n - 2n\pi/3) \end{aligned} \quad (2-6)$$

$$\begin{aligned} i_{cn} &= \sqrt{2}I_n \sin[n(\omega t + 2\pi/3) + \varphi_n] \\ &= \sqrt{2}I_n \sin(n\omega t + \varphi_n + 2n\pi/3) \end{aligned} \quad (2-7)$$

对上述各式进行分析, 可得出以下结论:

(1) 当 $n = 3k$ ($k=1, 2, 3\cdots$), 即 n 为 3, 6, 9 \cdots 时, 三相谐波电流大小和相位均相同, 即为零序谐波。

(2) 当 $n = 3k+1$, 即 n 为 4, 7, 10 \cdots 时, 三相谐波电流大小相等, B 相电流比 A 相电流滞后 $2\pi/3$, C 相电流比 A 相电流超前 $2\pi/3$, 这些次数的谐波电流均为正序谐波。

(3) 当 $n = 3k-1$, 即 n 为 2, 5, 8 \cdots 时, 三相谐波电流大小相等, B 相电流比 A 相电流超前 $2\pi/3$, C 相电流比 A 相电流滞后 $2\pi/3$, 这些次数的谐波电流均为负序谐波 **Error! Reference source not found.**

阻感负载的三相桥式全控整流电路的 A 相电流傅里叶分析结果如公式 2-2 所示, 由于交流侧三相电流波形相同, 相位依次相差 120° , 则 B 相和 C 相电流的傅里叶分析表达式为

$$\begin{aligned} i_b &= \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t - 2\pi/3) + \sum_{\substack{n=6k\pm 1 \\ k=1, 2, 3L}} (-1)^k \sqrt{2}I_n \sin[n(\omega t - 2\pi/3)] \\ &= \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t - 2\pi/3) + \sum_{\substack{n=6k\pm 1 \\ k=1, 2, 3L}} (-1)^k \sqrt{2}I_n \sin(n\omega t - 2n\pi/3) \end{aligned} \quad (2-8)$$

$$\begin{aligned} i_c &= \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t + 2\pi/3) + \sum_{\substack{n=6k\pm 1 \\ k=1, 2, 3L}} (-1)^k \sqrt{2}I_n \sin[n(\omega t + 2\pi/3)] \\ &= \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t + 2\pi/3) + \sum_{\substack{n=6k\pm 1 \\ k=1, 2, 3L}} (-1)^k \sqrt{2}I_n \sin(n\omega t + 2n\pi/3) \end{aligned} \quad (2-9)$$

当 $n = 6k-1$ 时, B 相谐波电流比 A 相超前 $2\pi/3$, C 相谐波电流比 A 相滞后 $2\pi/3$, 这些次数的谐波电流均为负序谐波。

当 $n = 6k+1$ 时, B 相谐波电流比 A 相滞后 $2\pi/3$, C 相谐波电流比 A 相超前 $2\pi/3$, 这些次数的谐波电流均为正序谐波。

由上述分析可得出以下结论: 阻感负载的三相桥式整流电路产生的特征谐波表现出一定的相序特性, 5、11、17 等次谐波表现为负序特性, 7、13、19 等次谐波表现为正序特性。因此在进行谐波提取时, 可以将这部分谐波电能以三相的方式提取出来, 并作为三相电源利用。

电网中的谐波电压是谐波电流在系统阻抗上产生谐波压降, 导致电网中的谐波电压产生畸变

，电网中的电压畸变程度取决于系统阻抗和谐波电流的大小，由于电网中的谐波电流呈现一定的相序特性，因此电网中的谐波电压与相应次数的谐波电流具有同样的相序特性。

综上所述，对称三相电路中的各次特征谐波具有一定的相序特性。因此，在进行谐波电能提取时利用谐波的这一特性，采用三相变压器提取电网中的某次三相谐波电能，将提取到的谐波电能作为三相电源。这种提取方法与采用三个单相变压器提取电网谐波相比，简化了电路结构，节约投资，同时扩大了谐波电能的应用场合，便于谐波电能的提取利用。

2.3 公用电网谐波标准

国际上公认的谐波含义为：“谐波是一个周期电气量的正弦波分量，其频率为基波频率的整数倍”。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：

$$u(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (2-10)$$

式中

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

在式(2-10)的傅里叶级数中，定义频率为 $1/T$ 的分量称为基波，频率大于基波频率整数倍的分量称为谐波。

谐波含有率(HR)反映某一频率谐波的含有量，第 n 次谐波的含有率表示为第 n 次谐波的有效值与基波分量有效值之比。 n 次谐波电压含有率 HRU_n 可表示为

$$HRU_n = \frac{U_n}{U_1} \times 100\% \quad (2-11)$$

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 表示为

$$HRI_n = \frac{I_n}{I_1} \times 100\% \quad (2-12)$$

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。

总谐波畸变率(*THD*)

)反映的是谐波的总体畸变情况，定义为各次谐波总量的有效值与基波分量的有效值之比。

谐波电压含量 U_H 和谐波电流含量 I_H 分别定义为

$$U_H = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} \quad (2-13)$$

$$I_H = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (2-14)$$

电压谐波总畸变率 THD_u 和电流谐波总畸变率 THD_i 分别定义为

$$THD_u = \frac{U_H}{U_1} \times 100\% \quad (2-15)$$

$$THD_i = \frac{I_H}{I_1} \times 100\% \quad (2-16)$$

为了保证公用电网的正常工作，给电网中的用电负荷提供满足电能质量标准的电能，抑制公用电网中的谐波电流和谐波电压对电网本身和用电设备的正常运行产生影响，世界上许多国家都发布了限制电网谐波的标准。制定这些标准的基本原则是限制谐波源注入电网的谐波电流，把电网谐波电压控制在允许范围内，保证电网的正常运行和接入电网的各种电气设备正常工作 Error! Reference source not found.。

目前在国际上主要有 IEEE 和 IEC 这两种电能质量标准，我国在参考两大电能质量标准的基础上，同时结合我国的国情，制定出我国的谐波标准 GB/T 14549-93 《电能质量 公用电网谐波》。

谐波标准主要用两个参数来表征，即公用电网谐波电压限值和注入电网的谐波电流允许值。对于不同电压等级的公用电网，所允许的电压谐波畸变率也不相同。表 2-1 给出了公用电网谐波电压限值。

表 2-1 公用电网谐波电压（相电压）限值
Tab.2-1 the harmonic voltage (phase voltage) limits of public power grid

电网标称电压 (kV)	电压总谐波畸变率 (%)	各次谐波电压含有率 (%)	
		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			

2 电网谐波特性分析

110	2.0	1.6	0.8
-----	-----	-----	-----

公共连接点的全部用户向该点注入的谐波电流分量（方均根值）不应超过表 2-2 中规定的允许值 **Error! Reference source not found.**。

表 2-2 注入公共连接点的谐波电流允许值
Tab.2-2 the limits of harmonic current injecting into the point of PCC

标准 电压 (kV)	基准 短路 容量 (MVA)	谐波次数及谐波电流允许值(A)											
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0.38	10	78	62	39	62	26	44	19	21	16	28	13	24
6	100	43	34	21	34	14	24	11	11	8.5	16	7.1	13
10	100	26	20	13	20	8.5	15	6.4	6.8	5.1	9.3	4.3	7.9
35	250	15	4.1	7.7	12	5.1	8.8	3.8	4.1	3.1	5.6	2.6	4.7
66	500	16	13	8.1	13	5.4	9.3	4.1	4.3	3.3	5.9	2.7	5.0
110	750	12	9.6	6.0	9.6	4.0	6.8	3.0	3.2	2.4	4.3	2.0	3.7

表 2-2 (续)注入公共连接点的谐波电流允许值
Tab.2-2(continuing) the limits of harmonic current injecting into the point of PCC

标准 电压 (kV)	基准 短路 容量 (MVA)	谐波次数及谐波电流允许值(A)												
		14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
0.38	10	11	12	9.7	18	8.6	16	7.8	8.9	7.1	14	6.5	12	
6	100	6.1	6.8	5.3	10	4.7	9.0	4.3	4.9	3.9	7.4	3.6	6.8	
10	100	3.7	4.1	3.2	6.0	2.8	5.4	2.6	2.9	2.3	4.5	2.1	4.1	
35	250	2.2	2.5	1.9	3.6	1.7	3.2	1.5	1.8	1.4	2.7	1.3	2.5	
66	500	2.3	2.6	2.0	3.8	1.8	3.4	1.6	1.9	1.5	2.8	1.4	2.6	
110	750	1.7	1.9	1.5	2.8	1.3	2.5	1.2	1.4	1.1	2.1	1.0	1.9	

注：220kV 基准短路容量取 2000MVA。

当公共连接点的最小短路容量不同于基准短路容量时，可按公式(2-17)计算实际电网中所允许的谐波电流值，即

$$I_n = \frac{S_{K1}}{S_{K2}} I_{hp} \quad (2-17)$$

式中 I_h 为短路容量为 S_{K1} 时的第 n 次谐波电流允许值(A); I_{hp} 为国标中第 n 次谐波电流允许值(A); S_{K1} 为公共连接点的最小短路容量(MVA); S_{K2} 为基准短路容量(MVA)。

当公共连接点有多个用户时, 每个用户向电网注入的谐波电流允许值按此用户在该点的用电协议容量与其公共连接点的供电设备容量之比进行分配。第 i 个用户的第 n 次谐波电流允许值 I_{ni} 按下式计算:

$$I_{ni} = I_n (S_i / S_t)^{1/a} \quad (2-18)$$

式中 I_n 为按式 2-17 计算的第 n 次谐波电流允许值; S_i 为第 i 个用户的用电协议容量; S_t 为公用连接点的供电设备容量; a 为相位叠加系数, 按表 2-3 取值。

表 2-3 相位叠加系数取值
Tab.2-3 the value of phase superposition coefficient

n	3	5	7	11	13	>13 及偶次
a	1.1	1.2	1.4	1.8	1.9	2

2.4 电网中的谐波功率

电网中的非线性负荷在消耗基波功率的同时, 将一部分基波电能转化为谐波功率反送到电网中, 即向电网提供谐波电流。谐波电流在电网中流动会产生功率损失, 作为电网线损的一部分, 同时对电网中其他负荷的正常运行产生影响, 不利于电网的经济运行 Error! Reference source not found.。

当电网中的谐波电流和谐波电压均符合国标规定时, 电网中的谐波功率只占输电容量的很小份额。10kV 电网供电的三相整流装置, 基波负荷为 2MW, 协议用电容量为 2.5MW, 10kV 电网的供电容量为 10MW, 公共连接点的最小短路容量为 100MW。三相整流装置主要产生 $6k \pm 1$ 次谐波电流, 且 5、7 次谐波电流较大, 因此对该用户注入电网的 5、7 次谐波功率进行计算。

按照国标 GB/T 14549-93 规定, 本电网允许注入的谐波电流值为

$$I_5 \leq 20 \times \left(\frac{2.5}{10} \right)^{1/1.2} = 6.3(\text{A})$$

$$I_7 \leq 15 \times \left(\frac{2.5}{10} \right)^{1/1.4} = 5.6(\text{A})$$

10kV 电网的公共连接点处存在谐波电压 U_5 和 U_7

，谐波电压含有率和总谐波电压畸变率为

$$HRU_5 \leq 3.2\%$$

$$HRU_7 \leq 2.4\%$$

$$THD_u \leq \sqrt{0.032^2 + 0.024^2} = 4\%$$

谐波电压含有率和总谐波电压畸变率都在国标要求范围之内，则该用户注入电网的谐波功率为

$$P_5 \leq \sqrt{3} \times 10 \times 0.032 \times 6.3 = 3.49(\text{kW})$$

$$P_7 \leq \sqrt{3} \times 10 \times 0.024 \times 5.6 = 2.33(\text{kW})$$

5 次和 7 次谐波功率合计为

$$P_5 + P_7 \leq 5.82(\text{kW})$$

即总的谐波功率小于该用户基波功率的 0.29%。当电网容量较小时，采取滤波措施将电网中的谐波电压和谐波电流含量降低到国标要求范围之内，此时电网中所含有的谐波电能比较小，占基波负荷的很小一部分。

但对于较大的电网来说，即使谐波电能占基波负荷的很小一部分，但谐波电能总量是比较大的。一个省的电网或跨省的电网中所有非线性电力用户注入电网的谐波功率总数还是相当大的。例如总负荷为 300 万 kW 的电网，若其谐波源负荷总计为 60 万 kW，它们注入电网的有功功率为这些负荷的 0.2%，则其谐波功率总值高达 1200kW，年损失电量达 1051 万 kW^{Error! Reference source not found.}。

对于电网中功率较大的谐波源，若不对其进行滤波治理，任其超过国标规定的允许值，则其注入电网的谐波功率是很大的，给电网带来巨大的经济损失。某一地区的电气化铁路产生的谐波对当地电网产生影响，向公用电网注入的 3 次和 5 次谐波功率高达 190kW，占平均基波负荷的 1.9%，年损失电量高达 166 万 kW·h。尤其是电网中的大功率的整流负载，其产生的谐波功率是相当可观的，某电解设备用电为 24MW，理论计算可利用的谐波功率为 1.48MW，每年以利用 5000h 计算，可利用谐波电能 740 万 kW·h^{Error! Reference source not found.}。理论计算一个用电 18MW 的铝电解设备，可利用的谐波功率为 1MW，每年以利用 6000h 计算，可利用谐波电能 600 万 kW·h。

由以上分析可以看出，对于电网中的大功率非线性负载，其产生的谐波功率是相当可观的，通过谐波电能提取装置将这部分谐波电能提取出来，并将其转化为基波电能供负载使用，节约社会资源，提高电网的效率，不但净化了电网运行环境，还产生较大的经济效益。因此电网谐波电能提取研究具有很好的应用前景和经济价值。

2.5 非正弦周期电流电路的功率和功率因数

在正弦电流电路中，若负载为线性，电路中的电压和电流都为正弦波。设电压和电流分别表示为

$$\left. \begin{aligned} u &= \sqrt{2}U \sin \omega t \\ i &= \sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (2-19)$$

其中 φ 为电流滞后电压的相角。

电路的有功功率 P 表示为 $P = UI \cos \varphi$ ，无功功率 Q 表示为 $Q = UI \sin \varphi$ ，视在功率 S 表示为 $S = UI$ ，功率因数 λ 表示为 $\lambda = P / S$ 。

在含有谐波的非正弦周期电流电路中，有功功率的定义与正弦电流电路相同，仍为瞬时功率在一个周期内的平均值，即有功功率 P 定义为

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u i d(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \cos \varphi_n \quad (2-20)$$

基波有功功率为 $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$ ，总谐波有功功率为 $P_n = \sum_{n=2}^{\infty} U_n I_n \cos \varphi_n$ 。

无功功率 Q_f 定义为

$$Q_f = \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \sin \varphi_n \quad (2-21)$$

这里 Q_f 是由同频电压和电流正弦分量产生的。在正弦电流电路中，通常规定感性无功功率为正，容性无功功率为负，瞬时无功功率的平均值为零，表示有能量交换但不消耗功率， Q 表示能量交换的量度。然而在非正弦周期电流电路中，同一谐波源有可能某些次谐波的无功功率为感性无功功率，而另一些次无功功率为容性无功功率，从而出现两者互相抵消的情况 **Error! Reference source not found.**。实际上，不同频率的无功功率是无法相互补偿的。因此，引入畸变功率 D ，使得

$$S^2 = P^2 + Q_f^2 + D^2 \quad (2-22)$$

D 是由不同频率的电压和电流分量之间产生的。这时功率因数

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{U I_1 \cos \varphi_1}{U I} = \frac{I_1}{I} \cos \varphi_1 = \nu \cos \varphi_1 \quad (2-23)$$

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。可以看出，功率因数是由基波电流相移和电流波形畸变两个因数决定的，总电流可以看成由基波有功电流、基波无功电流和谐波电流组成。

在正弦电路中，习惯上规定用户吸收有功功率为正，发出有功功率为负。一般谐波源只在几个主要频率上送出谐波有功功率，而在其他频率上可能吸收有功功率，但由谐波源送到电网的谐波功率净值一般是正的 **Error! Reference source not found.**。因此对于谐波源和计量装置来说，计量的有功功率值小于谐波源实际消耗的基波功率 P_1 ，即谐波源将吸收的一部分基波功率转化为谐波功率，并将这部分谐波功率反馈至电网。

2.6 本章小结

本章主要介绍了电网中以阻感负载的整流装置作为谐波源时电网谐波的相关特性，详细分析了电网谐波相序特性和整流装置特征谐波的相序特性，介绍公用电网谐波标准，计算在国标要求范围内电网中的谐波功率。由于本文主要研究电网谐波电能提取，因此对电网中可利用的谐波进行介绍，最后对电网含有谐波时其功率和功率因数的计算方法做了分析。

3 无源滤波器的设计与仿真

3.1 无源滤波器的结构和基本原理

在各种谐波治理方法中，采用电力滤波装置就近吸收非线性负荷产生的谐波，是治理谐波的一种有效措施。在各种滤波装置中，无源滤波器是出现最早、应用范围最广的滤波器，其具有投资少、结构简单、运行可靠性高和运行费用低等优点，至今仍被广泛应用于各种滤波场合。无源滤波器由电容器、电抗器和电阻器通过适当的拓扑结构组合而成，并联连接于电网，为谐波电流提供一个低阻抗通路，分流非线性负荷产生的谐波电流，减小流入电网的谐波电流，从而实现治理谐波的目的。常用的无源滤波器有单调谐滤波器、双调谐滤波器和高通滤波器。通常电力系统的滤波装置是由几组单调谐滤波器和一组高通滤波器组成。

3.1.1 单调谐滤波器特性

单调谐滤波器的电路结构如图 3-1 所示，由电容器 C 、电抗器 L 和电阻 R 串联组合而成。对于 n 次谐波，单调谐滤波器的阻抗 Z_{fn} 为

$$Z_{fn} = R_{fn} + j(n\omega_s L - \frac{1}{n\omega_s C}) \quad (3-1)$$

其中 ω_s 为额定工频角频率， R_{fn} 为滤波器的等值电阻，包括电阻器的电阻，电容器损耗折合成的电阻和电抗器的导线电阻。

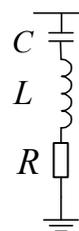


图 3-1 单调谐滤波器
Fig.3-1 single tuned filter

由串联谐振原理可知，当 $n\omega_s L = 1/n\omega_s C$ 时，即 $n = 1/(\omega_s \sqrt{LC})$ ，在谐振点处 $Z_{fn} = R_{fn}$ ，通常 R_{fn} 很小，因此单调谐滤波器对该次谐波呈现低阻抗特性， n 次谐波电流主要由 R_{fn} 分流，滤除电网中的谐波。对其它次数的谐波电流，单调谐滤波器呈现较大的容性或感性阻抗， $Z_{fn} \gg R_{fn}$ ，流过单调谐滤波器的谐波电流比较小。因此要滤除电网中的某次谐波，只要将单调谐滤波器的谐振频率设定为所要滤除的谐波频率，则该次谐波电流将从单调谐滤波器分流，实现滤除该次谐波的目的。

在设计单调谐滤波器时，通常要考虑频率偏移对滤波器性能的影响。电网在实际运行时的频率 f 与其额定值 f_s 总有一定的偏差，这使各次谐波频率也发生相应的偏移。当取滤波器的谐振频率与系统额定频率下的某次谐波频率相等时，在系统频率发生偏移时两者不再相等。此时滤波器的阻抗将偏离其极小值，使滤波效果变差，这种情况称为滤波器的失谐 Error! Reference source not found.。

在分析频率偏移对滤波特性影响时，设电网实际角频率为 ω ，理想情况下电网角频率 ω_s ，两者的偏差与 ω_s 的比值为相对频偏或失谐度，用 δ 表示，即

$$\delta = \frac{\omega - \omega_s}{\omega_s} \quad (3-2)$$

此时单调谐滤波器的阻抗为

$$Z_{fn} = R_{fn} + j[n(1+\delta)\omega_s L - \frac{1}{n(1+\delta)\omega_s C}] \quad (3-3)$$

设滤波器的品质因数为 Q ，则

$$Q = \frac{n\omega_s L}{R_{fn}} = \frac{1}{n\omega_s C R_{fn}} \quad (3-4)$$

通常 $\delta = 1$ ， $\delta^2 \approx 0$ ，则由以上两式可知

$$Z_{fn} = R_{fn}(1 + j2\delta Q) \quad (3-5)$$

除此之外，电容器和电感器的参数在实际运行过程中因工作环境温度的变化、自身发热和绝缘老化等因素的影响，以及在滤波器的安装和调试过程中也会存在一定误差，使滤波器的实际参数和谐振频率偏离设计值，导致滤波器的失谐 **Error! Reference source not found.**。因此，在滤波器的设计过程中，同时考虑频率偏移、电容器参数误差(设为 $\delta_C = \Delta C / C$)和电感器参数误差(设为 $\delta_L = \Delta L / L$)时滤波器在 n 次谐波处的阻抗值为

$$\begin{aligned} Z_{fn} &= R_{fn} + j[n(1+\delta)\omega_s(1+\delta_L)L - \frac{1}{n(1+\delta)\omega_s(1+\delta_C)C}] \\ &= R_{fn}[1 + 2Q(\delta + \frac{\delta_L}{2} + \frac{\delta_C}{2})] \end{aligned} \quad (3-6)$$

对比式(3-5)可知，总的等值频率偏差或总失谐度 δ_{eq} 为

$$\delta_{eq} = \delta + 0.5\delta_L + 0.5\delta_C \quad (3-7)$$

其最大值为 δ_m 。通常电网频率最大变化范围为 $\pm 1\%$ ，电容值的偏差与电容器制造误差、电容器的温度系数以及运行时环境温度等因素有关，电感值的偏差与电抗器的制造误差及电感量的调节方式有关。工程中通常选取 $\delta_\omega = \pm 0.01$ 、 $\delta_L = \pm 0.01$ 、 $\delta_C = \pm 0.02$ ，综合各种因素则 $\delta_m = \pm 0.025$ 。

单调谐滤波器的损耗与 Q 值有密切关系，因为 $R_{fn} = n\omega_s L / Q$ ，提高 Q 值，将使滤波器的基波损耗减小，通常单调谐滤波器的 Q 值选为30~60。

3.1.2 二阶高通滤波器特性

电网中高次谐波含量较低，同时系统阻抗在高次谐波时阻抗大，因此滤除高次谐波不采用单调谐滤波器，为降低成本，通常采用高通滤波器。高通滤波器在很宽的频带范围内呈现低阻抗特性，可以将某一频率以上的高次谐波滤除，当频率低于截止频率时，滤波器阻抗明显增加，使低次谐波电流很难通过。

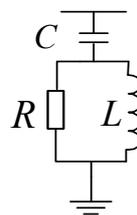


图 3-2 二阶高通滤波器
Fig.3-2 second-order high-pass filter

高通滤波器又称减幅滤波器，常见的高通滤波器有二阶高通滤波器和 C 型高通滤波器。工程中常见的二阶高通滤波器电路结构图如图 3-2 所示，其阻抗与频率关系为

$$Z_{in} = \frac{1}{jn\omega_s C} + \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{jn\omega_s L} \right)^{-1} = \frac{R(n\omega_s)^2 L^2}{R^2 + (n\omega_s)^2 L^2} + j \left(\frac{R^2 n\omega_s L}{R^2 + (n\omega_s)^2 L^2} - \frac{1}{n\omega_s C} \right) \quad (3-8)$$

从二阶高通滤波器的结构和阻抗表达式均可看出，当电阻 $R \rightarrow \infty$ 时，高通滤波器可等效为一个谐振频率为 $\omega_r = 1/\sqrt{LC}$ 的单调谐滤波器；当 $\omega \rightarrow \infty$ 时，滤波器可等效为一低阻抗， $Z_{in} = R$ 。实际上，在谐波频率高于一定频率之后，滤波器在很宽的频带范围内具有低阻抗特性，实现滤除高次谐波。

由二阶高通滤波器的结构图可知，电阻 R 和电感 L 并联，其合成阻抗值不会超过电阻值，正因为如此，二阶高通滤波器不像单调谐滤波器那样，只对某一特定频率的谐波呈现低阻抗特性，而会在高于某一阻抗频率范围内呈现很低阻抗特性。在频率低于截止频率的频率段内，二阶高通滤波器的阻抗值会迅速增大，从而使低于该频率的谐波因为遇到高阻抗而很难通过该滤波器。

高通滤波器的截止频率 f_0 为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3-9)$$

截止频率 f_0 对应的截止谐波次数 n_0 为

$$n_0 = \frac{f_0}{f_1} = \frac{1}{2\pi f_1 CR} \quad (3-10)$$

高通滤波器的形状系数为

$$m = \frac{L}{R^2 C} \quad (3-11)$$

在高通滤波器中，定义 Q 值为

$$Q = \frac{R}{X_0} \quad (3-12)$$

高通滤波器中定义的 Q 与单调谐滤波器中的 Q 值不同，但都用来反映滤波器的调谐锐度。在高通滤波器中，由于电阻与电感是并联连接的，因此电阻值越大调谐曲线越尖锐。

高通滤波器的截止频率一般选为略高于所装设的单调谐滤波器的最高特征谐波频率,通常选为最高次单调谐滤波器次数加 1。在截止频率到无穷大频率范围内,滤波器的阻抗为小于其电阻值 R 的一个低阻抗。 m 是一个与 Q 直接相关的参数,同样影响着滤波器的调谐锐度。一般 Q 值取为 0.7~1.4,相应的 m 取值为 2~0.5 之间。高通滤波器的运行特性对频率失谐度不敏感,在相当宽的频带范围内,其阻抗大致相等,不存在最佳 Q 值的问题 **Error! Reference source not found.**

为了降低高通滤波器的损耗,在滤除高次谐波时可以用 C 型滤波器代替高通滤波器。C 型滤波器是一种低能耗滤波器,滤波性能介于二阶和三阶高通滤波器之间,与二阶高通滤波器一样滤除电网中高次谐波,同时具有能耗低的优点。与二阶高通滤波器相比,C 型高通滤波器中存在基波串联谐振支路,可以大幅减小基波损耗 **Error! Reference source not found.**

3.2 无源滤波器的电容器参数设计方法

3.2.1 无源滤波器的无功功率补偿

电力电子装置等非线性负载在正常工作时除了产生谐波电流外还消耗无功功率,因此在治理谐波的同时需要对电网进行无功补偿。无源滤波器在基波频率下呈容性阻抗,可以为电网提供一定量的无功功率。因此,在设计滤波电路时通常将谐波治理和无功补偿同时考虑。

无源滤波器通常是并联连接在电网中,为谐波电流提供低阻抗通路来滤除电网中的谐波。对于电网基波,滤波器呈容性阻抗,相当于并联电容器,为电网提供一定量的无功补偿,提高电网功率因数和维持电网电压稳定。由于滤波器中含有电抗器,使得滤波器的有效无功补偿容量小于滤波器电容的额定容量。

要使滤波装置在滤除电网谐波的同时满足无功补偿要求,通常采用两种方法:一是按滤波要求设计滤波装置,如果滤波器产生的无功功率不满足电网要求,需加装并联电容器;二是增大滤波装置容量,使其满足无功补偿要求 **Error! Reference source not found.**。相比之下,第一种方法比较经济合理,而且在调节补偿电容器的无功功率时,对滤波效果的影响较小。

通常情况下,电网电压的畸变率较小,假设电网母线的电压为标准正弦波,用 $U_{(1)}$ 表示。在调谐滤波电路中,流过 n 次单调谐滤波器的基波电流 $I_{(1)}^n$ 为

$$I_{(1)}^n = \frac{U_{(1)}}{\frac{1}{\omega_s C} - \omega_s L} = \omega_s C U_{(1)} \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (3-13)$$

该滤波支路提供的基波无功功率为

$$Q_{(1)}^n = U_{(1)} I_{(1)}^n = \omega_s C U_{(1)}^2 \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (3-14)$$

二阶高通滤波器在滤除电网高次谐波的同时也提供一定量的无功补偿，流过二阶高通滤波器的基波电流 $I_{(1)}$ 和无功补偿容量 $Q_{(1)}$ 分别为

$$I_{(1)} = \frac{U_{(1)}}{\frac{1}{\omega_s C} - \frac{R\omega_s L}{R + \omega_s L}} \quad (3-15)$$

$$Q_{(1)} = \frac{U_{(1)}^2}{\frac{1}{\omega_s C} - \frac{R\omega_s L}{R + \omega_s L}} \quad (3-16)$$

在选择电容器组的容量时，必须考虑在电容器中流过两个电流分量：基波电流 I_1 和 h 次谐波电流 I_h ，电流的两个分量在电容器介质中都将产生电能损耗和引起发热。因此，滤波器的电容器容量 $S_{(n)}$ 必须按基波和谐波的无功功率的总和来选择，即

$$S_{(n)} = Q_{(1)} + Q_{(n)} = \frac{1}{\omega_s C} (I_{(1)}^n)^2 + \frac{1}{n\omega_s C} I_{fn}^2 \quad (3-17)$$

但是高通滤波器对基波无功补偿 Q_1 占电网总无功补偿容量 Q_C 比例比较大，因此，在基波损耗不大的情况下，高通滤波器的无功容量利用率相对来说比较高，因而在高通滤波器的设计过程中，应充分考虑二阶高通滤波器对电网的无功补偿

Error! Reference source not found.

3.2.2 最小滤波电容参数计算方法

在滤波器设计中，滤波电容器容量越小，滤波器的成本越低。由于电网的谐波电压最终被限制在很小的数值范围内，可以认为电网电压为标准正弦波，即交流系统电压只含有基波分量 $U_{(1)}$ 。由上述分析可知，滤波器中除了流过 n 次谐波电流 $I_{f(n)}$ 外，还流过由 $U_{(1)}$ 引起的基波电流 $I_{f(1)}$ ，即

$$I_{f(1)} = \frac{U_{(1)}}{\frac{1}{\omega_s C} - \omega_s L} = \omega_s C U_{(1)} \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (3-18)$$

由于滤波电容器中既有基波电流 $I_{f(1)}$ ，又有谐波电流 $I_{f(n)}$ ，故其安装容量 $S_{(n)}$ 应为基波无功容量 $Q_{(1)}$ 与谐波无功容量 $Q_{(n)}$ 之和，即

$$S_{(n)} = Q_{(1)} + Q_{(n)} = \frac{1}{\omega_s C} I_{f(1)}^2 + \frac{1}{n\omega_s C} I_{f(n)}^2 \quad (3-19)$$

滤波器支路输出的基波无功容量为

$$Q_{(1)} = U_{(1)} I_{(1)} = \omega_s C U_{(1)}^2 \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (3-20)$$

由上述两式可知

$$S_{(n)} = \frac{n^2}{n^2 - 1} \left[Q_{(1)} + \frac{U_{(1)}^2 I_{f(1)}^2}{n Q_{(1)}} \right] \quad (3-21)$$

取基准容量为 $S_B = U_{(1)} I_{f(n)}$ ，则上式的标么值形式为

$$S_{(n)}^* = \frac{n^2}{n^2 - 1} \left[Q_{(1)}^* + \frac{1}{n Q_{(1)}^*} \right] \quad (3-22)$$

式中， $S_{(n)}^* = S_{(n)} / S_B$ ， $Q_{(1)}^* = Q_{(1)} / S_B$ 。

由上式可求得当 $Q_{(1)}^* = 1 / \sqrt{n}$ 时， $S_{(n)}^*$ 为最小值为

$$S_{(n)}^* = \frac{2}{\sqrt{n}} \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (3-23)$$

相应的输出基波无功容量为

$$Q_{\min} = \omega_s C_{\min} \frac{n^2}{n^2 - 1} U_{(1)}^2 \quad (3-24)$$

最小电容安装容量对应的电容值为

$$C_{\min} = \frac{I_{f(n)}}{U_{(1)} \omega_s} \frac{n^2 - 1}{n^2 \sqrt{n}} \quad (3-25)$$

在求得最小滤波电容值后，由单调谐滤波器的原理可求得滤波器电感和电阻的值。

3.3 系统阻抗对滤波器参数的影响

无源滤波器通常并联于电网和谐波源之间，为谐波电流提供低阻抗通道来滤除谐波，无源滤波器和系统阻抗形成并联分流电路，因此系统谐波阻抗影响无源滤波器的滤波效果。同时电网谐波电压畸变的大小，既决定于谐波电流，又和系统谐波阻抗值有关。

系统谐波阻抗是滤波器设计的重要依据，可以通过对电网进行解析计算求得系统谐波阻抗，也可用专用仪器实际测量或近似估算获得系统谐波阻抗。当没有必要的测量手段实测又缺少网络参数有关数据而无法计算时，国内外现有的一些导则、规范推荐由基波三相短路容量计算系统谐波阻抗，系统谐波阻抗等于其基波电抗与谐波次数的乘积，基波电抗由该点三相短路容量和额定线电压求得 **Error!**

Reference source not found.

在分析系统等效谐波阻抗对滤波器参数的影响时，不考虑系统中背景谐波电压的作用，将 h 次单调谐以外的所有支路等效为系统等效谐波阻抗 Z_{sh} ， Z_{fh} 为滤

波器等效阻抗。谐波频率下无源滤波电路的等效电路如图 3-3 所示。

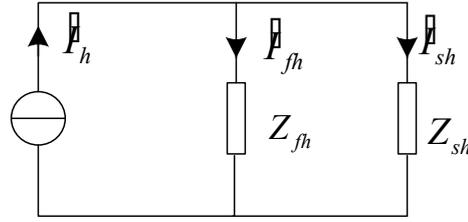


图 3-3 谐波频率下无源滤波电路的等效电路

Fig.3-3 the equivalent circuit of passive filter circuit at harmonic frequency

由图 3-3 可知母线上的 h 次谐波电压表示为

$$U_h = \frac{Z_{fh} Z_{sh}}{Z_{fh} + Z_{sh}} I_h \quad (3-26)$$

式中 I_h 为谐波源产生的 h 次谐波电流。注入电网的谐波电流为

$$I_{sh} = \frac{Z_{fh}}{Z_{fh} + Z_{sh}} I_h \quad (3-27)$$

流入滤波器的 h 次谐波电流为

$$I_{fh} = \frac{Z_{sh}}{Z_{fh} + Z_{sh}} I_h \quad (3-28)$$

将流入系统的 h 次谐波电流 I_{sh} 与 h 次谐波电流 I_h 之比称为流入系统的 h 次谐波系数 K_{sh} ，即

$$K_{sh} = \frac{I_{sh}}{I_h} = \frac{Z_{fh}}{Z_{fh} + Z_{sh}} \quad (3-29)$$

K_{sh} 越小，则流入系统的 h 次谐波电流比例越小。对于功率较大的非线性负载，当其注入电网的谐波不能满足国标要求时，通常可以将其接入电压等级更高或短路容量更大的电网中，因为高压电网的短路容量大，有较强的承担谐波的能力，所以大容量谐波源一般都由更高一级电压的电网供电。由公式 (2-16) 可知，电网的短路容量越大，其允许注入的谐波电流越大。

h 次调谐滤波器在谐振频率时的阻抗为 R_{fh} ，电网中的频率不是固定不变的，在设计滤波器时通常考虑频率偏移对滤波参数的影响。当考虑频率偏移时， h 次单调谐滤波器阻抗 Z_{fh} 表示为 $Z_{fh} = R_{fh} + j \frac{2\delta}{\omega_h C}$ ，代入式 (3-29) 可得

$$K_{sh} = \frac{R_{fh} + j \frac{2\delta}{\omega_h C}}{R_{fh} + R_{sh} + j \left(\frac{2\delta}{\omega_h C} + X_{sh} \right)} \quad (3-30)$$

当 $\frac{\partial K_{sh}}{\partial R_{fh}} = 0$ 时，滤波器的最佳电阻值为

$$R_{fh} = \frac{[\sqrt{(R_{sh}^2 + X_{sh}^2 + 2X_{sh}X_{\delta m})^2 + 4R_{sh}^2X_{\delta m}^2} - (R_{sh}^2 + X_{sh}^2 + 2X_{sh}X_{\delta m})]}{2R_{sh}} \quad (3-31)$$

$$\text{其中 } X_{\delta m} = \frac{2}{\omega_h C} (\delta_m + \frac{\varepsilon}{2}),$$

$$\varepsilon = \frac{[\sqrt{(R_{sh}^2 + X_{sh}^2 + 2R_{sh}R_{fh})^2 + 4R_{fh}^2X_{sh}^2 + 16X_{sh}^2X_{Ch}^2\delta_m^2} - (R_{sh}^2 + X_{sh}^2 + 2R_{sh}R_{fh})]}{2X_{sh}X_{Ch}}$$

由上式可求得无源滤波器的最佳电阻值，一般情况下滤波器的内电阻（电抗器和电容器的等值电阻）大于 R_{fh} ，因此从提高滤波效益、降低损耗角度考虑，一般不宜用外加电阻来降低品质因数。

系统短路阻抗越大，即短路容量越小，滤波器的分流作用越大，注入电网的谐波电流越小。在谐波频率下，滤波支路对谐波电流呈现很低的阻抗，通常低于电网对谐波的等效阻抗，因此大部分谐波电流将被滤波器分流而不再注入电网，从而得到良好的滤波效果。电网阻抗的变化会对滤波装置，尤其是单调谐滤波器的滤波效果产生较大影响。

无源滤波器设计时一般根据电网接入点谐波源的类型、谐波含量大小以及谐波源的特征谐波次数，同时还要考虑电网所需补偿的无功容量，以及相应电压等级下国标规定的谐波电压和电流畸变率的限制标准等来确定无源滤波器的安装类型以及安装组数和组合方式。在确定的系统和谐波源条件下，以最少的投资达到母线电压畸变率和注入电网的各次谐波电流符合规定指标，满足无功补偿要求，保证电网为负荷提供满足要求的电能。

3.4 磁通补偿原理及其应用

3.4.1 磁通补偿基本原理

变压器的 T 型等效电路如图 3-4 所示，变压器一次侧绕组 AX 匝数为 N_1 ，二次侧绕组 ax 匝数为 N_2 ，变比 $k = N_1 / N_2$ ，一次侧电流为 i_1 ，二次侧为电流 i_2 。其中

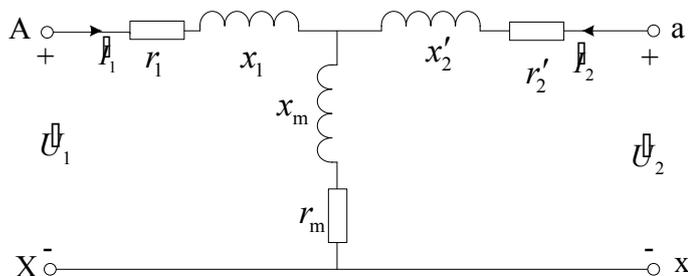


图 3-4 变压器的 T 型等效电路
Fig.3-4 the T-type equivalent circuit of transformer

$Z_1=r_1+jx_1$ 为变压器原边漏阻抗, $Z_m=r_m+jx_m$ 为变压器励磁阻抗, $Z'_2=r'_2+jx'_2$ 为变压器二次侧折算到一次侧的漏阻抗, i_2 折算到变压器一次侧后为 i'_2 。

当变压器二次侧电流为零时, 变压器的磁势为空载磁势 $\dot{F}_1=N_1\dot{I}_1$, 磁势 \dot{F}_1 在变压器铁芯中产生主磁通 $\dot{\Phi}_{mN}$, 该主磁通在变压器一次侧产生的感应电动势 \dot{E}_1 为

$$\dot{E}_1=-j4.44fN_1\dot{\Phi}_{mN}=-\dot{I}_1\dot{Z}_m \quad (3-32)$$

由变压器基本原理可知一次侧电压方程为

$$\dot{U}_1=\dot{I}_1\dot{Z}_1-\dot{E}_1 \quad (3-33)$$

当变压器二次侧的等效电流 \dot{I}_2 为

$$\dot{I}_2=-a\times\dot{I}_1 \quad (3-34)$$

式中, $0\leq a\leq 1$, 它表示电流 \dot{I}_2 和 \dot{I}_1 之间的大小关系, 此时变压器铁芯中的总磁势为

$$\dot{F}_T=N_1\dot{I}_1+N_2\dot{I}_2=(1-\alpha)N_1\dot{I}_1 \quad (3-35)$$

变压器铁芯中的主磁通为 $(1-\alpha)\dot{\Phi}_{mN}$, 它在变压器一次侧产生的感生电动势 \dot{E}'_1 为

$$\dot{E}'_1=-j4.44fN_1\dot{\Phi}_{mN}(1-\alpha)=-\dot{I}_1\dot{Z}_m(1-\alpha) \quad (3-36)$$

将式(3-36)带入(3-33)中可得

$$\dot{U}_1=\dot{I}_1\dot{Z}_1-\dot{E}'_1=\dot{I}_1\dot{Z}_1+(1-\alpha)\dot{I}_1\dot{Z}_m=\dot{I}_1[\dot{Z}_1+(1-\alpha)\dot{Z}_m] \quad (3-37)$$

从变压器一次侧 AX 看进去的等效阻抗为

$$Z_{AX}=\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1}=\dot{Z}_1+(1-\alpha)\dot{Z}_m \quad (3-38)$$

当变压器二次侧电流 \dot{I}_2 发生变化时, 对外电路来说, 变压器呈现的阻抗是一个可变阻抗, 其大小与 α 成一定比例关系。通过改变 α 的大小, 即通过改变变压器二次侧电流的大小, 即可改变变压器对外电路呈现的阻抗值 Error! Reference source not found.。

当 $a=0$ 时, $\dot{I}_2=0$, 变压器二次侧处于开路状态, 主磁通 $\dot{\Phi}_{mN}$ 产生的感应电势为

$$\dot{E}_1=-\dot{I}_1\dot{Z}_m \quad (3-39)$$

其一次侧电压方程为

$$\dot{U}_1=\dot{I}_1\dot{Z}_1+(1-\alpha)\dot{I}_1\dot{Z}_m=\dot{I}_1(\dot{Z}_1+\dot{Z}_m) \quad (3-40)$$

从变压器的一次侧 AX 看进去, 其等效阻抗为

$$Z_{AX}=(\dot{Z}_1+\dot{Z}_m) \quad (3-41)$$

此时变压器的等效电路如图 3-5 所示

，变压器对外电路所呈现的阻抗为一次侧漏阻抗和励磁阻抗的和。变压器的励磁阻抗很大，因此当变压器二次侧空载时，其对外电路呈现高阻抗。

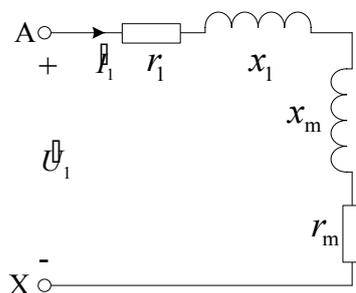


图 3-5 $a=0$ 时变压器等效电路图

Fig.3-5 transformer equivalent circuit when $a=0$

当 $a=1$ 时， $I_2 = -I_1$ ，由式 (3-35) 可知此时变压器的铁芯中总磁势为零，即主磁通为零，一次侧的感应电动势 $E_1 = 0$ ，变压器的一次侧电压方程为

$$U_1 = I_1 Z_1 - E_1 = I_1 Z_1 \quad (3-42)$$

从变压器的一次侧 AX 看进去，变压器的等效阻抗为

$$Z_{AX} = \frac{U_1}{I_1} = Z_1 \quad (3-43)$$

此时变压器的等效电路如图 3-6 所示，变压器对外电路呈现的阻抗为一次侧绕组漏阻抗。变压器的一次侧绕组漏阻抗通常很小，因此当变压器二次侧注入的电流与一次侧电流大小相等、相位相反时，变压器对外电路呈现很小的阻抗。

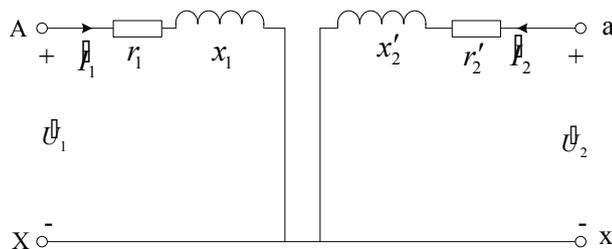


图 3-6 $a=1$ 时变压器等效电路图

Fig.3-6 transformer equivalent circuit when $a=1$

当 $a \in (0,1)$ 时，从变压器一次侧 AX 端看进去，变压器所呈现的阻抗在 Z_1 和 $Z_1 + Z_m$ 之间变化。

3.4.2 磁通补偿实现方法

由以上分析可知，要实现基波磁通补偿，需要在变压器二次侧注入一个与变压器一次侧大小相等、相位相反的基波电流，可以通过有源和无源两种方式提供满足基波磁通补偿条件的电流。

鉴于有源滤波器的工作原理，采用基于瞬时无功功率理论的检测电路检测电网中的基波电流，通过 PWM 调制技术控制逆变器产生满足基波磁通补偿条件的基波电流，从而实现基波磁通补偿 **Error! Reference source not found.**。采用有源方式实现基波磁通补偿，需要实时检测电网中基波电流的大小和相位，电网中的负荷是变化的，因此要实时跟踪电网中基波电流的变化，对检测电路要求较高。由于电网中的基波电流相对较大，对逆变装置容量要求较大，这将增加整个电路成本。

除了采用有源方式实现磁通补偿外，为简化电路结构，探索采用无源方式实现基波磁通补偿。电流互感器和变压器的绕组端子均采用“减极性”接线方式，因此变压器自身满足一次侧与二次侧电流相位相反 **Error! Reference source not found.**。由于变压器的电路结构实现了电流相位相反，因此在无源磁通补偿时，只需要确保变压器二次侧的电流与一次侧电流幅值相等。

由电流互感器工作原理可知，互感器一二次侧绕组匝数分别为 N_1 和 N_2 ，当互感器二次侧回路闭合，且接近短路状态时，其一次侧通过一次电流 i_1 产生磁动势 $i_1 N_1$ ，这部分磁动势被二次电流所产生的磁动势 $i_2 N_2$ 所平衡。在理想的电流互感器中，当互感器一二次侧绕组匝数相等时，由磁动势平衡关系可知，一次绕组磁动势等于二次绕组磁动势， $i_1 N_1 = -i_2 N_2$ ，若 $N_1 = N_2$ ，即一二次侧电流大小相等。因此，当串联变压器二次侧阻抗为零时，满足磁通补偿条件。

采用无源方法实现基波磁通补偿（简称无源基波磁通补偿）时，变压器二次侧以串联基波调谐电路作为负载，变压器变比为 1，同时将变压器二次侧的漏阻抗作为基波调谐电路的一部分 **Error! Reference source not found.**。在基波频率下，调谐电路呈零阻抗，将变压器二次侧短路。当串联变压器一次侧电流为 $i_1 = i_1^{(1)} + i_1^{(n)}$ ， $i_1^{(1)}$ 为一次侧流过的基波电流， $i_1^{(n)}$ 为一次侧流过的 n 次谐波电流。由于变压器二次侧对基波短路，因此变压器二次侧流过与一次侧大小相等的基波电流。由于变压器端子接线满足减极性关系，变压器二次侧的基波电流与一次侧的基波电流相位相反，从而满足基波磁通补偿 $\alpha=1$ 时的条件，串联变压器对电网中的基波电流呈现较小的一次侧漏阻抗。对于 n 次谐波，基波调谐电路对谐波呈高阻抗，变压器二次侧相当于开路，流过变压器二次侧的谐波电流几乎为零，满足 $\alpha=0$ 时的基波磁通补偿条件，此时串联变压器对电网中的 n 次谐波呈 n 倍的励磁阻抗，串联变压器对电网中的谐波电流呈现高阻抗，从而阻止谐波电流通过串联变压器流向电网。

由以上分析可知，在串联变压器二次侧以基波调谐电路作为负载，同时将变压器二次侧漏阻抗作为基波调谐电路的一部分，可以实现变压器满足基波磁通补

偿条件。相比于有源方法实现

磁通补偿来说，无源基波磁通补偿电路结构简单，不需要基波电流检测电路，可以实时跟踪电网中的基波电流变化。由于采用无源电路元件，可以应用于电压较高、容量较大的场合。

3.4.3 无源基波磁通补偿在本设计中的应用

由以上分析可知，由于二次侧注入电流的不同，变压器对外电路所呈现的阻抗是变化的。因此本文在电网与滤波电路之间串联变压器，用来提高电网对谐波的阻抗。通常电网的系统阻抗很小，并且随着运行方式的变化而变化，变压器的励磁阻抗比电网的系统阻抗大得多，在满足基波磁通补偿条件下，其阻抗值不随系统运行方式的变化而变化，因此可以抑制电网阻抗的变化对无源滤波效果的影响。

将变压器一次侧串联在电网和谐波源之间，二次侧以基波调谐电路作为负载，变压器的变比为 1。变压器一次侧流过的电流为基波电流 $i_1^{(1)}$ 和谐波电流 $i_1^{(n)}$ ，即 $i_1 = i_1^{(1)} + i_1^{(n)}$ 。由 3.4.2 节分析可知，变压器二次侧电流 i_2 与一次侧基波电流大小相等，相位相反时，满足 $a=1$ 时的基波磁通补偿条件，即

$$I_2 = -I_1 \quad (3-44)$$

此时变压器对基波的阻抗为 $Z_{AX} = Z_1$ ，即变压器对基波呈现一次侧漏阻抗。由于变压器漏阻抗通常较小，可认为串联变压器对基波电流呈零阻抗，不影响基波电流在电网中的流通。

对于 n 次谐波电流，在变压器二次侧注入的 n 次谐波电流为零，满足 $a=0$ 时的基波磁通补偿条件，从变压器一次侧 AX 端来看，变压器对谐波的等效阻抗为

$$Z_{AX}^{(n)} = \frac{U_1^{(n)}}{I_1^{(n)}} = (r_1 + jnx_1) + r_m + jnx_m \approx nZ_m^{(1)} \quad (3-45)$$

式中 $Z_m^{(1)}$ 为变压器的基波励磁阻抗。

由以上分析可知，在电网和谐波源之间串联变压器，变压器二次侧以基波调谐电路作为负载，变压器二次侧流过的电流是满足基波磁通补偿条件的基波电流，此时串联变压器对基波呈低阻抗，对谐波呈高阻抗，从而阻止谐波电流流入电网，提高电网侧对谐波的阻抗，同时不对电网基波电流产生影响。

串联变压器提高了电网侧对谐波的阻抗，从而迫使更多的谐波电流通过滤波装置被滤除，流入电网的谐波电流变小。谐波电压是由谐波电流与电网系统阻抗共同产生的，谐波电流降低了，同时也降低了电网中的电压畸变率。

电网的运行状态时刻在发生变化，对于滤波装置来说，电网的系统谐波

阻抗也时刻发生变化，由于滤波装置与电网系统阻抗并联分流谐波源产生的谐波电流，所以当系统阻抗发生变化时，对滤波装置的滤波效果产生影响。在电网和滤波装置之间加装串联变压器，由于变压器的励磁阻抗通常较大，远大于电网系统阻抗，并且其阻抗不随电网运行状态的变化而变化，因此在系统阻抗发生变化时，不影响滤波装置的正常工作，提高无源滤波器的工作稳定性，改善无源滤波效果 **Error! Reference source not found.**

3.5 无源滤波器的仿真研究

基于上述理论分析，本文以阻感负载的三相桥式整流电路作为谐波源进行滤波仿真分析。谐波源仿真电路如图 3-7 所示，PB 为直流侧的滤波电感，用来降低直流侧的纹波因数。

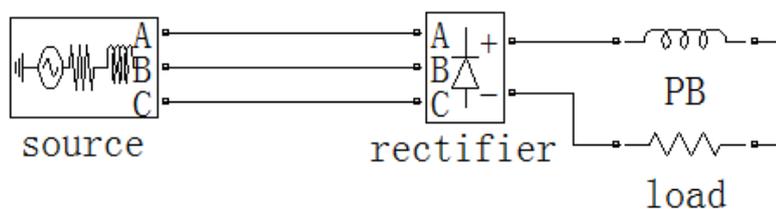


图 3-7 谐波源仿真电路

Fig.3-7 harmonic source simulation circuit

谐波源仿真模型中电网电压为 10kV，负载为 15MW 的铝电解设备，电网的系统阻抗为 $R_s = 0.0232\Omega$ ， $L_s = 1.6\text{mH}$ 。

由于非线性负载的作用，导致电网中的电流波形发生畸变，畸变的电流在系统阻抗上产生非正弦压降，引起电网电压波形发生畸变，畸变的电压和电流波形如图 3-8 所示。

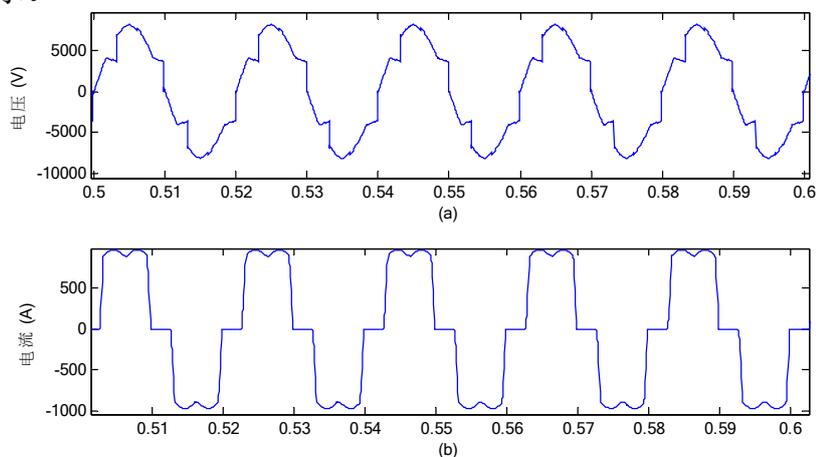


图 3-8 电网中畸变的电压(a)和电流(b)波形

Fig.3-8 distorted voltage (a) and current (b) wave of power grid

从图 3-8

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。
如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/316051132045010105>