

谐波和负序治理理论 与新技术应用

罗隆福 陈跃辉 周冠东 等 著



中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

谐波和负序治理理论与 新技术应用

罗隆福 陈跃辉 周冠东 著
张志文 许加柱 严文交



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 简 介

本书针对冶金、电化工、轨道交通、新能源、直流输电、电动汽车充电等多个工业领域引起的谐波和负序等电能质量问题,提出了感应滤波理论与新技术,集成滤波电感理论与新技术,统一电能质量控制系统(UPMS)理论与新技术,以及其他谐波和负序治理理论与新技术。全书分章节介绍了谐波与负序的概念、影响、危害、传统治理技术,感应滤波理论、新技术、技术方案、工程应用,集成滤波电感理论与新技术,负序治理理论与新技术,重点介绍了 UPMS 理论与新技术。书中提供了大量的设计实例和工程案例。

本书可供电力系统、电气化铁道、电力电子技术、电机与电器及相关领域的研究生、科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

谐波和负序治理理论与新技术应用 / 罗隆福等著. —北京: 中国电力出版社, 2017.6
ISBN 978-7-5123-9834-4

I. ①谐… II. ①罗… III. ①谐波—研究②负序—研究 IV. ①O455②TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 059426 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号(邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 王春娟(chun-juan-wang@sgcc.com.cn) 邓慧都 吴碧羽

责任校对: 马 宁

装帧设计: 张 娟

责任印制: 邹树群

印 刷: 三河市万龙印装有限公司

版 次: 2017 年 6 月第一版

印 次: 2017 年 6 月北京第一次印刷

开 本: 710 毫米×980 毫米 16 开本

印 张: 14.75

字 数: 241 千字

印 数: 0001—3000 册

定 价: 60.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

前言

在冶金、电化工、轨道交通、新能源、直流输电、电动汽车充电等多个工业领域，由于广泛采用大功率变流技术实现交直流电能变换，因此引起谐波和负序等电能质量问题。

电力系统中解决谐波问题的传统技术有无源滤波技术、有源滤波技术、混合有源滤波技术、多重化消谐技术等。电网中解决负序问题的传统技术有静态或动态配置电力系统负载等。电气化铁道中解决负序问题的传统技术有牵引变压器三相进线采用相序轮换、平衡牵引变压器供电等。这些技术都存在一些不足，如无源滤波装置性能欠佳、有源滤波装置价格较高、负序抑制效果不理想等。

作者长期从事谐波和负序治理方面的理论与技术研究，针对无源滤波技术和有源滤波技术的不足，提出了感应滤波理论与新技术。该技术通过在变压器中增设感应滤波绕组并进行特殊设计，配置全调谐 LC 滤波器，以无源滤波的成本达到有源滤波的效果。针对某些需要滤波器但安装空间受限的场合，提出了集成滤波电感理论与新技术。该技术通过非正交解耦理论，将空心滤波电抗器与变压器进行集成。针对电力系统的负序问题，提出了统一电能质量控制系统（UPMS）理论与新技术。UPMS 由无源滤波器和多重化背靠背潮流控制器组成。该技术应用于电气化铁道时，通过控制牵引变压器两相系统的潮流分布，使牵引变压器一次侧三相电流实时对称。上

述三种理论与新技术，都实现了工程应用及产业化。

全书共 4 章。第 1 章概述了谐波与负序的定义、产生的原因、影响及危害、传统治理技术和新技术等。第 2 章阐述了感应滤波理论与新技术，包括感应滤波理论、感应滤波技术在多个领域的实现原理与方案、工程应用案例等。第 3 章介绍了集成滤波电感理论与技术，包括非正交解耦理论与集成方法、集成滤波电感值的工程计算方法和有限元计算方法、耦合度分析、测试技术、工程应用等。第 4 章介绍了负序治理理论与新技术，包括基于新型平衡变压器的负序治理理论与新技术、基于 V_v 牵引变压器的 LC-RPC 负序治理理论、UPMS 理论与新技术、工程应用等。

本书得到了国家自然科学基金项目（51477046、51477044、51377001）、国家电网公司重大专项（5216A014007V）、湖南省自然科学基金重点项目（12JJ2034）等资助。本书得到了国内外同仁的大力支持。作者要特别感谢刘福生教授、李勇教授、罗培副教授、胡斯佳博士等。

由于作者水平有限，书中难免有不足或待改进之处，敬请读者批评指正。

作 者

2017 年 6 月



目录

前言

第1章 概述	1
1.1 引言	1
1.2 谐波与负序的定义	2
1.3 谐波与负序的产生	2
1.4 谐波与负序的影响及危害	7
1.5 谐波与负序传统治理技术	9
1.6 谐波与负序治理新技术	20
第2章 感应滤波理论与新技术	23
2.1 感应滤波基础知识	23
2.2 技术原理	30
2.3 工程应用	40
2.4 感应滤波优势	81
第3章 集成滤波电感理论与技术	88
3.1 概述	88
3.2 非正交解耦理论与集成方法	89
3.3 电感值的计算方法	93
3.4 集成滤波电感变压器各绕组之间的耦合度分析	95
3.5 集成滤波电感变压器的退耦技术	99

3.6	集成滤波电感变压器测试技术	100
3.7	工程应用	103
第 4 章	负序治理理论与新技术	126
4.1	基于新型平衡变压器的负序治理理论与技术	126
4.2	基于 Vv 牵引变压器的新型电气化铁路功率调节系统 LC-RPC 负序治理理论与技术	167
4.3	UPMS 理论与新技术	179
4.4	工程应用	196
参考文献		221

第1章

概 述

1.1 引 言

在冶金、电化工、轨道交通、新能源、直流输电、电动汽车充电等多个工业领域，由于广泛采用大功率变流技术实现交直流电能变换，引起严重的谐波和负序等电能质量问题。

我国钢铁产量已跃居世界第一。钢铁冶炼采用交直流电弧炉、钢铁轧制中采用大功率变流设备，都将产生严重的负序、谐波及低功率因数问题。

近十年来，我国电解冶金行业迅猛发展。目前，电解铝产能达到 2600 万 t，电解锰产能达到 300 万 t，精炼锌产能达到 800 万 t，烧碱产能超过 4000 万 t。这些冶金及电化工行业普遍采用大功率相控整流设备，都产生较大的谐波问题。

我国轨道交通已进入高速发展期。到 2020 年，电气化铁道里程预计达到 5 万 km，拥有轨道交通的城市达到 50 个，城轨总里程达到 6000km。轨道交通领域采用大功率电力电子装置将引起严重的谐波问题，其中由于电力机车采用单相供电方式，还将带来较大的负序问题。随着电气化铁道朝着高速化和重载化方向发展，负序及电压波动问题将更为突出。

清洁能源在未来能源结构中的比重将越来越大。到 2020 年，我国风电和光伏发电装机容量将分别达到 2 亿和 1 亿 kW 以上。风力、太阳能等新能源发电广泛采用电力电子变换技术，也将带来较大的谐波问题。

高压及特高压直流输电是构建全球能源互联网的重要支撑。预计到 2020 年将实现国内联网，2030 年实现州内联网，2050 年实现洲际联网。中国能源网建设投资每年将达 2 万亿元以上。由于高压及特高压直流输电普遍采用大功率整流与逆变技术，将带来较大的谐波问题。

未来十年是我国新能源汽车发展的战略机遇期。我国高度重视电动汽车的

发展,已将其列为战略新型产业之一,电动汽车将迎来新一轮高速发展。电动汽车充电桩的大量采用,同样会带来较大的谐波问题。

综上所述,在冶金、电化工、轨道交通、新能源、直流输电、电动汽车充电等行业长期并存的大背景下,电能质量问题日益突出,将影响电网和用户设备的高效、安全、稳定与经济运行。因此,有必要进行深入研究,提出新的理论与技术,更好解决相关问题。

1.2 谐波与负序的定义

电能质量的主要指标有谐波、负序、电压、频率和波形。

根据 IEEE 第 22 标准协调委员会和其他国际委员会关于电能质量问题的分类和定义,谐波的定义如下:含有基波整数倍频率的正弦电压或电流称为谐波。谐波主要是由于电力系统和电力负荷设备的非线性特性造成的。

当三相系统的供电负荷不平衡时,即会产生负序分量。针对三相不平衡系统,采用对称分量法,可将系统电压或电流分解成正序、负序和零序分量,其中:

正序: A 相领先 B 相 120° , B 相领先 C 相 120° , C 相领先 A 相 120° ;

负序: A 相落后 B 相 120° , B 相落后 C 相 120° , C 相落后 A 相 120° ;

零序: ABC 三相相位相同。

1.3 谐波与负序的产生

谐波是由电力系统中的非线性设备引起的,表征为流过非线性负荷的电流与加在其上的电压不成比例关系。系统中产生谐波的设备即谐波源,其最鲜明的特征为非线性。当前,电力系统的谐波源,就其非线性特性而言主要有三大类:电子开关型设备、电弧型设备以及铁磁饱和型设备,本节主要介绍前两种。

1.3.1 谐波的产生

1.3.1.1 电子开关型设备

电子开关型设备主要应用于大功率整流、变频调速、冶金轧钢、地铁供电、电气化铁道、新能源并网、电动汽车充电等领域。

(1) 大功率整流装置。在各种电力电子装置中,整流器占有相当大的比例。常用的大功率整流电路几乎都采用二极管整流桥电路或晶闸管相控整流桥电路,图 1.1 所示为典型 12 脉波晶闸管整流系统结构图。

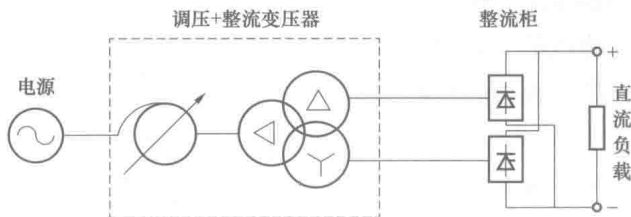


图 1.1 典型 12 脉波晶闸管整流系统结构图

整流装置产生的谐波电流取决于下列因素:

- 1) 整流装置的脉动数 p ;
- 2) 整流装置导通的控制角, 以及换相的重叠角;
- 3) 整流装置的控制方式 (不可控、半控和全控型)。

对于脉动数为 p 的整流装置, 产生的谐波电流次数及大小如下。

特征谐波次数 n 为

$$n = kp \pm 1 \quad (1.1)$$

式中: k 是任意正整数。

特征谐波电流是整流装置的主要谐波电流, 其值较大。 k 以外的谐波次数, 是非特征谐波次数, 其值较小。

特征谐波幅值 I_n 可表示为

$$I_n = I_1/n \quad (1.2)$$

式中: I_1 是基波电流。

(2) 变频装置。变频装置应用电力电子变频技术, 通过改变交流电动机的工作频率来控制其转速。按主回路结构不同, 变频器可以分为交直交变频器、交交变频器。交直交变频器经过整流电路将电网工频交流电变成直流电, 再由逆变电路将直流电转换成可变频率的交流电。整流电路、控制电路、逆变电路是交直交变频器的三个基本组成部分。交交变频器没有直流回路, 每相都由两个相互反并联的整流电路组成, 正桥提供正向相电流, 反桥提供负向相电流, 两整流电路也可以工作在逆变状态。

采用非全控型器件的交直交变频装置和交交变频装置存在低次谐波问题,

其功率因数较低。

(3) 轧钢装置。现代冷、热轧机用电量很大,其有功冲击负荷变化值可达数万千瓦,并且由于冷、热轧机控制性能的要求,轧钢厂的调速轧机和传动装置有些采用直流电动机,有些采用交流变频传动装置。

采用直流电动机的轧钢供电系统的谐波源主要有晶闸管整流装置和利用相控原理控制的晶闸管控制电抗器(TCR)。其中晶闸管整流装置的谐波类型与大功率整流系统类似,晶闸管控制电抗器谐波特性为:①基波电流的变化与触发角不成正比,即具非线性;②特征谐波主要有3、5、7、9、11次和13次谐波。

(4) 地铁。地铁牵引供电系统一般采用DC 1500V架空接触网或DC 750V第三轨供电制式,由牵引变电站整流机组降压整流后提供。整流机组采用24脉波整流方式,在运行过程中整流机组会产生23、25次等谐波。

地铁低压用电设备越来越多地使用变频装置,也造成低压配电系统谐波畸变。照明系统、荧光灯(电子整流器)主要产生3次谐波;EPS电源屏、通风空调、电梯、扶梯等设备主要产生5、7次谐波。该谐波在地铁供电系统流动、叠加甚至放大,直接影响了地铁供电系统的安全,并通过主变压器进入城市电网,造成谐波污染。

(5) 电气化铁路。我国电气化铁路大部分使用单相晶闸管相控整流模式的交直电力机车,如SS4改进型、SS8和SS9型,主要产生较严重的低次谐波,且功率因数低。新型电气化机车均采用交流电机,为交直交型供电方式,如高速铁路中的CRH型机车,由于采用全控型器件,主要产生高次谐波。

(6) 新能源。风电和光伏发电在新能源发电中占有重要比重。风电并网引起的电能质量问题之一就是谐波问题。不论何种类型的风电机组,发电机本身产生的谐波是可以忽略的,谐波电流的真正来源是风电机组中的电力电子元件。以变速恒频双馈风力发电机组为例,典型结构如图1.2所示,其电力电子整流和逆变装置始终处于工作状态,将产生较大的谐波问题。此外,风机的并联补偿电容器可能和线路电抗发生谐振,从而引起谐波放大。

光伏发电系统主要由光伏电池阵列、逆变器、控制保护装置三个部分组成,其发电以及接入电网的过程就是首先通过光伏电池阵列将光能转变为电能,电能以直流电的形式通过逆变器转变为恒幅恒频的三相交流电并入电网。典型的光伏并网发电系统结构图如图1.3所示。

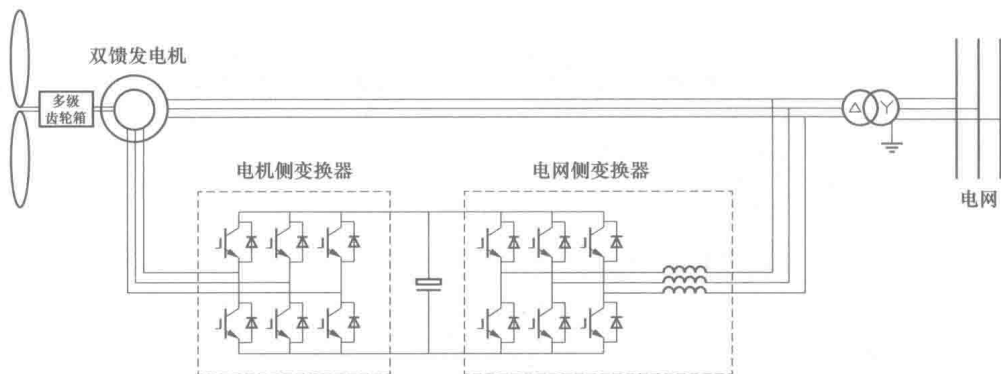


图 1.2 变速恒频双馈风力发电系统结构图

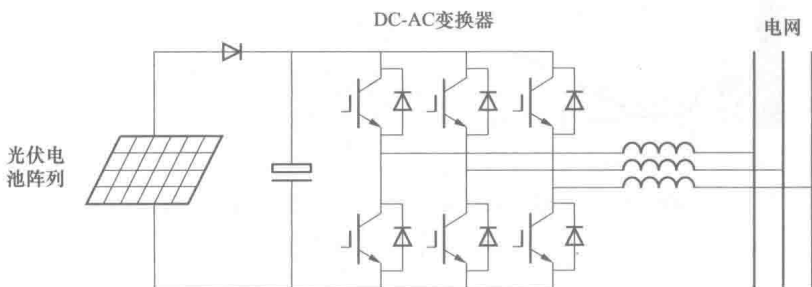


图 1.3 典型的光伏并网发电系统结构图

由于光伏发电系统的发电功率主要取决于光照强度，其输出功率一般都具有间歇性和不稳定性。在使用逆变器将直流电转化为交流电的过程中会产生一定量的谐波电流。研究表明，当并网点处于电网末端，并网逆变器的输出功率越小，则输出谐波的含量将会越大。这对光伏发电设备（特别是逆变器）的安全运行可能会造成严重的危害。

1.3.1.2 电弧型设备

电弧型设备的特点是利用电弧产生的热，即焦耳效应，来达到熔炼金属或焊接的目的。由于在溶解金属过程中负载变化较大且极不规则，电弧的不稳定及弧长极易变化，引起负载电流严重畸变，电流具有连续波动性，是时间的非周期函数。这类设备主要有交流电弧炉、直流电弧炉及交流电焊机等。

交流电弧炉典型供电模型如图 1.4 所示。电弧炉的炼钢过程有熔炼期和精炼期，电流严重畸变发生在熔炼期，其他阶段（富氧精炼期和精炼期）的电流畸变相对较少，具体的熔炼与精炼过程中的典型谐波频谱如图 1.5 所示。

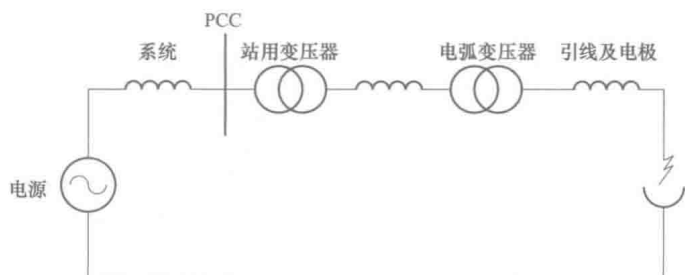


图 1.4 交流电弧炉典型供电模型

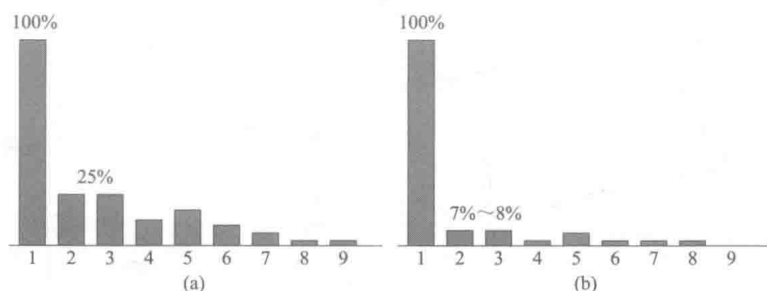


图 1.5 电弧炉熔炼与精炼过程中的典型谐波频谱

(a) 熔炼过程；(b) 精炼过程

直流电弧炉是用直流电源供电的电弧炉，比交流电弧炉多了一套整流设备，因此其谐波特性符合整流装置的基本特征。

电弧炉的电流不规则，变化急剧；波形畸变严重，产生 2 次及以上各次谐波电流，其中主要为 2~7 次，以 2 次和 3 次最大；电弧炉的平均功率因数较低，在发生工作短路时甚至低于 0.1。

由于电弧炉的容量大，导致电网电压闪变和波动严重、负序分量大、高次谐波多、电网功率因数低等问题。这不仅影响电炉自身的产量、产品质量，使电耗、电极消耗增大，也影响电网和其他用户。

1.3.2 负序的产生

当三相系统带不对称负荷时，采用对称分量法对三相电压或电流进行分析，即可分解出三相电压或电流的负序分量。目前，对于电力系统而言，电力机车牵引系统和三相电弧是最主要的三相不平衡负荷。特别是电力机车牵引系统属于典型的单相负荷，对于 Yd11 接线牵引变压器和 Vv 牵引变压器，网侧三相电流始终处于不对称状态。由于牵引供电系统的两供电臂无法时刻保持负荷平衡，即使采用平衡牵引变压器也将使网侧三相电流处于不对称状态，这都将

引起严重的负序问题。

电弧炉在熔化期, 电流波形不规律, 含有较大的负序分量。特别是在一相熄弧另两相短路情况下, 电流的基波负序分量与谐波的等值负序分量可达正序的 50%~70%。

1.4 谐波与负序的影响及危害

谐波与负序的影响及危害主要可归纳为: ① 对电力系统本身的安全运行产生危害; ② 对信号和弱电系统及继电保护产生干扰; ③ 对电能计量产生影响; ④ 对用电设备产生影响。

1.4.1 对电力系统本身的影响

谐波与负序对电力系统本身的安全、经济运行有很大的影响。主要表现在:

(1) 谐波造成发电机的附加谐波损耗, 使其发热, 缩短寿命。谐波电压和谐波电流在定子绕组、转子回路及定子与转子的铁心中产生附加损耗, 这是由于频率升高而使集肤效应、磁滞及涡流引起的损耗增加所致。谐波电流在定子和转子绕组端部建立的漏磁场将产生额外的损耗。对于斜槽转子的感应发电机, 定子和转子的磁通变化都会造成相当大的铁损, 在频率高时尤其突出。这种损耗的大小取决于转子槽的倾斜程度以及硅钢片的铁损特性。

(2) 谐波在电网中可能引起谐振, 放大谐波电流或产生谐波过电压。当发生谐振时, 将导致电容器等设备损坏。其中谐波谐振造成的电容器损坏, 占有相当大的比重。

(3) 谐波对输电线路产生影响。对于采用电缆的输电系统, 谐波除引起附加损耗外, 还可能使电压发生畸变, 导致绝缘应力升高, 电缆绝缘老化, 缩短电缆使用寿命。同时谐波使流过电缆主绝缘的容性电流增加, 绝缘介质损耗增大, 温度上升, 使其寿命进一步减小。

(4) 谐波对变压器造成危害。在谐波下工作的变压器会增加铜损和杂散损耗, 也会增加磁滞、涡流, 从而造成变压器的额外发热。谐波电流除引起变压器绕组附加损耗外, 还会引起变压器外壳、外层硅钢片和某些紧固件发热, 并有可能引起局部的严重过热, 以至损坏变压器。此外谐波还可能使变压器噪声增大。

(5) 谐波对电力系统中的继电保护、自动控制装置产生干扰,严重时导致保护装置误动或拒动。变压器的合闸涌流中若含有大量的谐波分量,幅值大,衰减时间长,容易引起继电保护的误动作。

(6) 负序电流可使变压器某一相电流大大超过额定值,而另外两相却小于额定值,从而使变压器的容量利用率下降。另外负序电流还造成变压器的附加能量损失并在变压器铁心磁路中造成附加发热。

(7) 负序电压在电机中产生较大的负序电流,引起损耗,使电机过热;同时,负序旋转磁场与转子磁场相互作用将产生交变力矩,使发电机产生振动。

(8) 负序电流超标,将造成水轮发电机负序保护跳闸,或烧坏发电机。

1.4.2 对信号和弱电系统及继电保护的影响

电力系统中谐波与负序对信号和弱电系统及继电保护的影响和干扰主要有以下方面:

(1) 谐波对电力系统内部的弱电控制装置与设备产生干扰。当谐波较严重时,可能通过各种耦合方式导致这些装置工作紊乱。

(2) 谐波对各种精密仪器与敏感设备的影响。各种行业都有许多高精密电子仪器与设备,这些设备对于电源要求较高,电源中的谐波会导致这些仪器与设备无法正常工作。

(3) 谐波对于通信线路的干扰,主要是通过电磁感应和耦合使通信线路产生感应电压。由于谐波的频率比基波高,所以更容易经辐射或分布电容耦合至通信线路中,对通信网产生干扰,使通信质量下降,严重时甚至无法工作。

(4) 以负序电流或负序电压为动作条件的继电保护和自动装置,如发电机的负序电流保护装置、线路的相差高频保护装置,以及故障录波器等,当遭受负序侵入时,在谐波的共同干扰下,易使保护误动。

1.4.3 对电能计量的影响

电力系统中的谐波与负序对电力计量产生直接影响,不仅表现在工程上,也表现在经济上。主要影响为:

(1) 传统测量仪表多是按正弦量测量要求设计制造,在测量含有谐波的非正弦量时,会产生误差。

(2) 由谐波造成的附加损耗影响电能的准确计量。如线路中的附加谐波功

率,各种供用电设备的附加谐波损耗等,而这些无形的谐波损耗没有计入测量结果。

(3) 负序增大电能计量误差。在三相三线供电电路中,由于三相电压的不对称,造成计量误差增大。

1.4.4 对用电设备的影响

谐波与负序对用户侧的用电设备也会产生严重的影响,主要包括:

(1) 谐波对电动机的影响。由于集肤效应、磁滞和涡流等现象,谐波电流使电动机的铁心和绕组产生的附加损耗增大。此外,谐波造成电动机的脉动转矩使得转轴产生振动,易造成电动机疲劳过度而损坏。

(2) 谐波对电力电容器的影响。由于电容器对高次谐波呈现低阻抗,在高次谐波的影响下容易被击穿。特别是发生谐振导致谐波电流放大时,更易引起电容过热和过电压,加速老化,缩短寿命,甚至损坏。

(3) 负序对电动机的影响。负序电压在电动机中产生负序电流。对异步电动机而言,正序阻抗很大,负序阻抗很小,很小的负序电压会产生较大的负序电流。该电流与正序电流叠加,引起定子和转子绕组过载、铜损增大,造成局部过热而烧毁。

1.5 谐波与负序传统治理技术

针对电力系统中的谐波治理问题,电力系统广泛采用电力滤波器实现对谐波的抑制,同时兼顾补偿无功功率,提高系统的功率因数;针对电力系统中的负序问题,电力系统和电力用户通过供电结构和系统配置来治理负序。

1.5.1 无源电力滤波技术

1.5.1.1 电路结构

无源电力滤波技术是电力系统中应用最早、最广泛的谐波抑制技术,也可称之为第一代滤波技术。无源电力滤波器,即 L-C 滤波器,通常采用由电力电容器、电抗器和电阻器等无源元件构成在某次频率发生谐振的电路。无源电力滤波器一般并联在电网与地之间,其滤波原理是对某次谐波呈现为低阻抗,使相应的谐波电流大部分流入无源电力滤波器支路,从而减小流入电网的谐波电

流。图 1.6 给出了 6 种无源电力滤波器的电路结构。

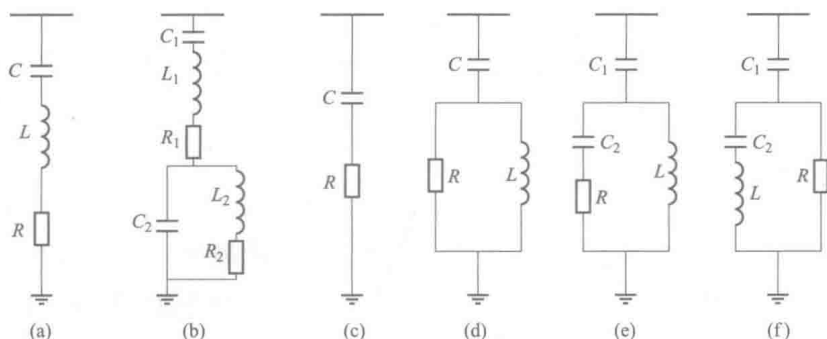


图 1.6 无源电力滤波器的电路结构

(a) 单调谐滤波器；(b) 双调谐滤波器；(c) 一阶高通滤波器；(d) 二阶高通滤波器；

(e) 三阶高通滤波器；(f) C 型高通滤波器

单调谐滤波器结构简单，但滤波特性受系统频率、电感及电容参数的影响大，容易造成失谐，使滤波效果变差。单调谐滤波器只对某次谐波具有滤波作用。若要求同时滤除多次谐波，则需要并联多组滤波器，故占用场地大，成本较高。但该滤波器的优点是参数配置简单，滤波器可单独投入或退出。

对双调谐滤波器而言，在基波情况下，电网电压基本上完全由串联支路承担，而并联支路所承受的电压远低于电网电压。因此，与采用两个独立的单调谐滤波器相比，双调谐滤波器中并联支路器件耐压水平要比单调谐滤波器器件低得多，可降低双调谐滤波器并联支路器件的电压等级，节约器件的绝缘成本，降低了部分设计难度。

双调谐滤波器除串联支路器件承受全部冲击电压外，还有基频功率损耗小的优点；此外，并联电路中的电容 C_2 的容量允许仅按谐波无功容量设计，其值一般较小。故近年来国内外直流输电工程中双调谐滤波器应用较为广泛。我国的葛洲坝—南桥、天生桥—广州和三峡—常州等直流输电工程均采用了双调谐滤波器。

图 1.6 (c)、(d)、(e)、(f) 分别为一阶、二阶、三阶和 C 型四种高通滤波器。在四种高通滤波器中，二阶高通滤波器的滤波性能最好，其次为 C 型高通滤波器，应用最为广泛。其中二阶高通滤波器的基波损耗大于三阶高通滤波器。与二阶高通滤波器相比，三阶高通滤波器在电阻支路中增加一个容量很小的电容 C_2 ，提高了滤波器的基波阻抗，故大大减少了基波损耗，这是三阶高通滤波器的主要优点。但由于其滤波性能不如二阶高通滤波器，故在工程上较少采用。