

# 电力系统谐波研究综述

骆鹤松 骆水莲

(兰州理工大学 电气工程与信息工程学院 兰州 730050)

**摘要:** 随着电力工业的发展和电力市场的开放,各种非线性元件在电力系统中大量使用,这些非线性元件产生大量的谐波导致电压和电流的波形产生畸变,严重威胁着电网安全和经济运行。同时谐波对电力系统其他用电设备也产生了严重的危害及影响。因此设计一种更精确的谐波检测方法和设计合理高效的滤波装置将成为未来谐波研究的主要方向。该文从分析谐波的产生与危害出发,归纳总结了目前在谐波研究领域常见的几种谐波的检测方法和各种治理谐波的措施,为谐波的检测和治理提供了有效的参考路径。

**关键词:** 谐波; 谐波检测; 谐波治理; 电力系统

**中图分类号:** TM7      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-0682(2011)05-0064-04

## The over view of study on harmonics in electric power system

LUO Hesong, LUO Shuilian

(College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** With the development of electrical industry and the opening of the electricity market, various electric components of nonlinear that can generate high-order harmonics are widely used in the power system, the harmonics cause the voltage and current waveform distortion and it has been a threat to the safe operation and economic operation of power grids. Meanwhile, harmonics have influence and harm to other electrical equipment of power system. So designing a more accurate harmonic detection methods and reasonably efficient filtering equipment will be the main direction in harmonic study fields. This paper makes generating and harm of harmonics as starting point and summarizes several harmonic detection methods and the various measures of harmonic treatment in harmonic study fields, it can provide effective reference path to detection and treatment of harmonic.

**Key words:** harmonics; harmonics detection; harmonics treatment; power system

## 0 引言

20 世纪 80 年代后期,伴随着计算机技术、通信技术、控制技术 3 大技术的发展,电子技术得到迅速发展,各种电子产品更新换代用于各行各业,电子产品中各种非线性元件的大量使用,对带动经济的发展起到了积极作用,同时它们作为电源与用电设备之间的非线性接口,都不可避免的产生非正弦波注入电网,对电力系统元件的安全经济运行造成严重的威胁,所以电力系统谐波问题已经成为工程管理人员和电力科技领域的重大问题。电力系统谐波含量严重上升的原因主要是各种非线性元件的大量使用和电容器组对谐波的放大和谐振作用。未来几

年,电力电子技术作为电力市场的支柱产业将迅速发展,不可避免的会带来电网谐波的污染问题,所以谐波的检测和治理成为当前人们关注的热点问题。

## 1 谐波的来源

### 1.1 整流装置

整流装置在换流过程中,使得输入电流、电压失去比例关系,引发非正弦的负荷电流波形,整流装置产生的谐波容量相对较大,是电力系统中的主要谐波源。

### 1.2 变压器

变压器中的谐波电流是由励磁回路的非线性引起的,正常情况下,所加电压为额定电压,铁芯工作在线性范围内,谐波电流含量不大,但在轻载时电压升高,铁芯工作在饱和区,此时谐波电流就会大大增加。在变压器正常工作过程中,如果有暂态扰动、负

收稿日期: 2011-03-03

作者简介: 骆鹤松(1979)女,天水武山人,助教,研究方向为电力系统自动化,电网谐波治理。

载剧烈变化都会产生大量谐波。

### 1.3 电弧炉和电弧焊设备

由于电弧炉在工作的时候反复的将电极开路和短路,导致电弧不稳定,负载不平衡,从而产生谐波。

### 1.4 电力机车

电力机车不仅要消耗电能还要向供电系统注入大量的谐波,同时产生不平衡电流,与此同时电力机车也被看做是单相整流负荷,它是谐波治理领域较大的污染源。

### 1.5 家用电器

家用电器中含有大量的非线性元件,它会产生大量的谐波,如电视机中桥式整流电容平波电路产生的谐波对系统的影响较大,电视机谐波的特点是谐波的峰值与基波峰值重合。

## 2 谐波的危害

### 2.1 对电力系统发、输、配电系统的危害

同步电机感应出的谐波电流在转子表面形成环流,使转子温度升高,高次谐波电流在发电机的定子中产生集肤效应,使得导体对谐波电流的有效电阻增加,增加了设备的功率损耗、电能损耗,使导体的温度升高;谐波不仅要增加感应电动机损耗,使电机温度升高,特别是在当电机的谐波电流的频率与某零件的固有频率很接近时,电动机产生机械振动,发出噪音,影响电机的寿命;负载电流中的谐波在变压器中造成的附加损耗使变压器温度升高,降低了变压器带负载的能力,除此之外,谐波还会引起变压器外壳的钢片和某些附属零件局部严重过热;谐波的产生增加了输电线路的损耗,缩短了电缆的使用寿命,谐波在流过中性线时,导线过载,绝缘老化,发生短路,容易引起火灾(因为正常情况下中性线电流比各相电流小的多,因而设计时中性线较细)。由此可知谐波对电力发输配系统中的危害主要是通过增加损耗,使设备发热,影响设备的使用寿命,降低了发、输、用电设备的效率,降低电能输送过程中的功率因数。

### 2.2 对电力系统中主要电气元件的危害

电力系统中主要的电气元件有电容器组和整换流装置,谐波会引起电容器局部放电,加速电容器介质老化,缩短使用寿命。在一定条件下谐波极易与无功补偿电容器组引起谐振或谐波放大,从而导致电容器因过负荷或过电压而损坏;交流电网的电压畸变可能引起常规变流器控制角的触发脉冲间隔不等,并通过正反馈而放大系统的电压畸变,使整流器

的工作不稳定;而对逆变器则可能发生连续的换相失败而无法正常工作,甚至损坏换相设备。

### 2.3 对继电保护和电气测量仪表的影响

谐波会改变继电保护的性质,引起继电保护误动作或紊乱。工业中的大多数电气测量仪表是按照工频正弦波来设计的,当有谐波时会产生测量误差。

### 2.4 对通信系统的干扰

谐波对通信系统的干扰,小则产生噪音,降低通信的质量,干扰严重时会丢失信息。在基波和谐波的共同作用下,可能会触发电话响铃,危及设备和操作人员安全。

### 2.5 对其他设备的影响

电压互感器因谐振损坏;电视机图像模糊,翻滚;收音机声音不清晰有杂音;断路器开关能力降低;录波系统出现丢失波形,波形异常等现象。

## 3 谐波的各种检测技术

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。它明确了谐波次数 $n$ 必须是一个正整数,目前国内对谐波的研究只是集中在频率为基波频率整数倍的谐波,而对频率为基波非整数倍间谐波的研究未能深入到一定的研究水平。随着对电能质量研究水平的提高,对间谐波的研究也会进一步得到重视。随着电力系统体制的逐步完善,先后出现了几种谐波的测量方法。

### 3.1 模拟滤波器

它是谐波检测中使用最早的一种方法,主要是通过滤波原理来得到谐波分量。

优点:原理和电路结构简单,造价低,能滤除一些固有频率的谐波,输出阻抗低,品质因素易于控制。

缺点:滤波器中心频率易受外界环境的影响,难以获得理想的幅频特性和相频特性,当电网频率发生波动时,大量的基波分量会包含在检测出的谐波分量中。此种方法目前使用的可能性很小。

### 3.2 基于快速傅里叶变换的检测方法

是利用复指数函数的周期性和对称性,充分利用中间运算结果,使计算工作量大大减少。

优点:测量精度较高,计算速度快。

缺点:计算时间长,计算量大,检测结果实时性较差,当信号频率和采样频率不一致时会出现频谱泄漏效应和栅栏效应<sup>[1]</sup>,此种方法计算出的相位误差很大,需要使用锁相器来锁定信号频率和采样频率的同步。

### 3.3 基于三瞬时无功功率理论的检测方法

是由日本学者 H. Akagi 在 1984 年提出的瞬时无功功率理论。此方法不仅适用于正弦波也适用于非正弦波的情况。目前基于瞬时无功功率的检测方法已经成为谐波实时检测的主要方法,也是有源电力滤波器中应用最广泛的一种谐波检测方法<sup>[2]</sup>。

优点: 测量电路简单, 时延小, 实时性高。

缺点: 硬件多, 花费相当大。

### 3.4 基于小波变化的检测方法

小波分析是近代应用数学中迅速发展的一個新领域,它包含了现代分析学中诸如泛函分析、数值分析、傅里叶分析、样条分析、调和分析等众多分析方法的精华,并包罗了它们各自的特色。

优点: 克服了傅里叶变换在频域完全局部性,而在时域完全无局部性的缺点,能够准确把握信号的局部细节,计算精度高,可以分析稳态信号,也可以分析暂态的时变信号,还可以检测动态型和突发型的谐波。

缺点: 窗口能量不集中造成频谱混叠,引起测量误差,只能检测基波和谐波,算法复杂,运算速度慢,实时性差。

### 3.5 神经网络检测方法

神经网络是一种从不同角度、功能来模拟动物神经的技术,由大量处理单元广泛互联而成,基于现代神经生物学和认知科学对人类信息研究成果的网络。

优点: 实时性好,计算量小,检测精度高,对数据流长度的敏感性低于 FFT。

缺点: 理想的训练样本提取困难,影响了网络的训练速度和训练质量。网络结构不易优化,隐含层节点的选取带有一定的盲目性。

### 3.6 基于同步测定的检测方法

它用于改善单相电路的传输电流波形和功率因数,它是一种使补偿后的线路传输电流和电源电压波形相同、相位相等的补偿电流检测的方法。

优点: 信号干扰能力强、波形跟踪快,可实现对三相不平衡系统无功和谐波电流的检测,还能校正功率因数,减少线路损耗,平衡线路电流。

缺点: 时延较大,电路波形发生畸变时将影响检测精度,不能单独检测无功电流和谐波电流,也不能获得各次的谐波含有率,从而限制了应用的范围。

## 4 电力系统谐波抑制的措施

### 4.1 受端治理

从受到谐波影响的设备或系统出发,提高设备

或系统的抗谐波干扰能力。

1) 改善供电环境,选择合理的供电方式: 将谐波源由较大容量的供电点或高一级电压的电网供电,可以减少谐波对系统或其他设备的影响,这些必须在电网规划和设计时考虑(高一级电网的短路容量均大于同系统低一级电网的短路容量),保持负荷的三相平衡,有助于减少 3 次谐波,对谐波源负荷由专门的线路供电,减少谐波对其他负荷的影响,有助于集中抑制和消除谐波。

#### 2) 避免电容器对谐波放大

改变电容器的安装位置(避免并联谐振的发生);限定电容器组的投切容量(减少电容器对谐波的放大);改变电容器的串联电抗器(相当于改变了系统的阻抗,避免谐波电流放大);将电容器组的某些支路改为滤波器。

3) 减少发电机谐波电动势畸变率,减少谐波电动势的措施。

同步电机采用星型连接(此连接不会出现 3 次或 3 的倍数次的各次谐波),凸极同步电动机采用适当极靴宽度和不均匀气隙长度(目的是使得气隙磁场波形尽可能接近正弦分布,减少谐波电动势的产生)短距绕组,增加每极每相槽数,水轮发电机等多极电机,转子励磁绕组常采用分数槽绕组,实现了极对与极对之间的分布,减少谐波的产生。

4) 变压器采取措施,抑制谐波产生(变压器绕组一侧接成三角形,可以有效消除 3 次及其倍数次谐波)。

5) 提高设备抗干扰能力,研制新型抗谐波的设备

6) 改善谐波保护性能(对谐波敏感设备采用灵敏的谐波保护装置,保证谐波含量超标情况下,设备不至于被损坏)

### 4.2 主动治理

从谐波源本身出发,使谐波源不产生谐波或降低谐波源产生的谐波含量

1) 增加整流装置的脉动数。谐波电流近似与谐波次数成反比,脉动数增加时谐波次数也增加,一系列次数较低,幅值较大的谐波得到消除,谐波电流将减少。

2) 改变谐波源的配置或者工作方式(具有谐波互补性的装置应集中,不然会产生谐波的工作方式)。

3) 采用多重化技术(多个变流器联合起来使用,将多个方波叠加,以消除频率较低的谐波,近似得到正弦波,但是成本太高,装置复杂)。

4) 谐波叠加注入采用 3 次谐波源,把谐波电流加到产生的矩形波形上,降低某些给定的运行点处的谐波。

5) 采用 PWM 技术使得变流器产生的谐波频率较高,幅值较低,波形接近正弦,此方法只适用于自关断器件构成的变流器。

6) 设计或者采用高功率因数变流器可以使得变流器产生的谐波非常少,但功率因数可控制为 1 (如采用矩阵式变频器和四象限变流器等)。

#### 4.3 被动治理

外加滤波器,阻碍谐波源产生的谐波注入电网,或者阻碍电力系统的谐波流入负载端。

1) 采用 LC 滤波器(无源滤波器 Passive Power Filter,简称 PPF)

它是几种元件按照一定的参数配置一定的拓扑结构连接成的滤波装置,组成它的元件为电容元件、电感元件、电阻元件。结构简单,设备投资少,运行可靠性较高,运行费用低,但是补偿性受电网阻抗变化和运行状态的影响,只能对特定次的谐波进行补偿。

2) 采用电力有源滤波器 APF(Active Power Filter)

有源滤波器与 LC 滤波器最大的区别在于它是一种向系统注入补偿谐波电流,以抵消非线性负荷所产生的谐波电流的能动态滤波装置。即是一种用于动态抑制谐波的新型电力电子装置,它可对大小和频率都变化的谐波进行补偿。APF 具有高度可控制和快速响应的特性,并能跟踪补偿各次谐波<sup>[3]</sup>,克服了无源滤波器的缺点。

3) 混合型有源滤波器(HAPF)

将无源滤波器的低成本和有源滤波器的优良性能相结合,同时具备了 PPF 和 APF 的优点,采取一定的控制方式后,可使负荷的谐波电流由 APF 来提供,负荷的基波无功功率由 PPF 来提供。它是一种有前途的滤波及无功补偿方式。

4) 有源无源混合滤波器

将 2 种滤波器相结合构成的混合型滤波器,用

APF 来补偿冲击性无功和低频变化的谐波,用 PPF 补偿和吸收缓慢变化的无功功率和高频谐波,它是目前电能质量研究的热点。

## 5 总结与展望

随着电力电子技术的迅速发展和电力市场规模的不断扩大,大量的非线性元件将会投入各个行业使用,一方面促进了工业的发展,另一方面不可避免的要产生高次谐波,这些高次谐波反过来又对电力系统或者电气设备产生危害,使电气设备的使用寿命降低。但是未来几十年,电力电子仍然是电力行业的支柱产业,将对带动电力工业的发展起到决定性的作用,所以如何将这非线性负载产生的谐波准确的测量出来得到相应的治理将是谐波研究领域的热点话题。可以看出,不管是谐波的测量方法还是治理方法,单一的一种方法都有其利弊,对谐波的检测精度和治理效果是很有限的,为此,在谐波源的检测和治理过程中要避免采用一种方法来检测和治理谐波,而是要综合考虑各种因素,例如利用场合、经济条件、各自的优缺点等,将几种方法的优点集中起来,适当克服各自的缺点,找出一种最优的检测谐波的方法和治理谐波的装置。就目前的研究情况和谐波领域的大量研究资料表明,在谐波的检测方面,最好能将小波变换和傅里叶快速变换结合起来,分析其利弊,设计出一种能克服其缺点的检测算法;在谐波的治理方面除了要治理的方式之外,更多的是将关注点放在滤波器的设计上,设计出一种高效、快速、经济、可靠的滤波器来治理谐波。

参考文献:

- [1] 郝珂. 电力系统谐波检测与治理[J]. 中国测试技术, 2005, 31(6): 64-67.
- [2] 王庆祥. 电网谐波的产生及其检测方法分析[J]. 电子技术应用, 2009(9): 181-184.
- [3] 陈恺, 王如政. 电力系统谐波治理与有源滤波器[J]. 华东电力, 2008, 36(8): 55-57.

(上接第 63 页)

系统较好地保持了输出压力值稳定,运行效果达到设计要求,系统调节时间短,调节精度高,稳定可靠。提高了空压机的控制水平。

参考文献:

- [1] 何凤有, 鲍卫宁, 汤场, 等. 基于模糊 PID 控制器的空压机恒压供气系统的设计[J]. 工矿自动化, 2010, 31(3): 91-93.

[2] 胡应占, 冯硕. Fuzzy-PID 在传统空气压缩机改造中的应用[J]. 新余高专学报, 2005, 10(5): 33-37.

[3] 祁海禄, 樊小平. 模糊自整定 PID 控制器设计与仿真研究[J]. 系统仿真技术及其应用, 2008, 11(3): 702-705.

[4] 李西, 李彬, 朱雪丹. 模糊自整定 PID 控制器的设计与仿真[J]. 化工自动化及仪表, 2010, 37(3): 25-28.

[5] 胡包钢, 应浩. 模糊 PID 控制技术研究发展回顾[J]. 自动化学报, 2001, 27(4): 567-579.