

# 低压配电系统谐波抑制及治理设计方法

茅 靖<sup>1</sup> 方健美<sup>2</sup>

(1. 国网宁波慈溪供电公司, 浙江 慈溪 315000;  
2. 浙江东禾工程设计有限公司, 浙江 宁波 315040)

**摘要** 随着电力系统的迅速发展, 电能质量问题越来越引起广泛关注。由于各种非线性负荷应用普及, 产生的谐波对电网的污染日益加重, 因此谐波治理已成为国内外广泛关注的课题。本文主要阐述了谐波污染及其危害, 谐波治理及其抑制的方法, 并对产生谐波源的电气设备做了具体的分析。

**关键词:** 电能质量; 谐波危害; 谐波抑制治理; 设计方法; 容量计算

## Discussion on Harmonic Suppression and Control Design Method of Low Voltage Distribution System

Mao Jing<sup>1</sup> Fang Jianmei<sup>2</sup>

(1. State Grid Ningbo Cixi Power Supply Company, Cixi, Zhejiang 315000;  
2. Zhejiang Donghe Engineering Design Co., Ltd, Ningbo, Zhejiang 315040)

**Abstract** With the rapid development of power system, power quality problems caused by more and more attention. Due to the popularity of a variety of nonlinear load, the pollution of harmonics is increasing, so the harmonic governance has become a widespread concern at home and abroad. This paper mainly expounds the harmonic pollution and its harm, methods of harmonic suppression and suppression, and the electrical equipment of the generated harmonic source to do a specific analysis.

**Keywords:** power quality; harmonic harm; harmonic suppression; design method; capacity calculation

一个理想的电力系统应该具备一个恒定的频率和恒定的正弦波形, 并按照特定的电压标准向电网及电力用户提供相对比较理想的电源。电能质量一般由电源的频率、电源的幅值和电源的波形畸变来体现。

发电厂调节并控制电力系统的振幅和频率, 非线性负荷引起波形畸变。对于电阻, 电阻加热丝, 磁感应, 白炽灯等这些传统线性负荷, 其电流波形为正常的正弦波。而对于家用视听设备、电气设备、焊接设备、通信设备、充电电气设备、不间断电源等这些非线性负荷, 其电流波形为非正常的正弦波。由于电网及电力用户中存在着这些非线性负荷, 导致了大量谐波的产生, 而大量谐波的产生不仅危害着电能质量, 而且危害着电力用户。谐波的存在使得电网电压降低, 线路损耗增加, 造成电网容量的浪费; 谐波的存在使得设备的稳定性降低, 导致各

类自动及保护装置误动作; 谐波的存在使得电动机效率降低, 增大了电动机的工作噪声; 谐波的存在使得电力变压器的铁损及铜损增加, 影响着电力变压器的使用效率, 缩短了电力变压器的使用寿命; 因此谐波的治理刻不容缓。

## 1 谐波的表示方法

谐波失真研究的一种有效方法为傅里叶分解, 可以通过傅里叶分解的方法分析各组成部分的畸变波形, 即

$$f(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} A_h \sin(h\omega_0 t + \varphi_h) \quad (1)$$

式中,  $A_0$  为直流分量;  $A_1 \sin(h\omega_0 t + \varphi_1)$  为基波分量;  $A_h \sin(h\omega_0 t + \varphi_h)$  为第  $h$  次谐波分量。

谐波畸变的度量采用总谐波畸变表示, 分为电

压畸变率和电流畸变率。

$$IHD_U = \frac{1}{U_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2} = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{rms}}}{U_1}\right)^2 - 1} \quad (2)$$

( $U_h$ 为第  $h$  次电压谐波有效值)

$$IHD_r = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} = \sqrt{\left(\frac{I_{\text{rms}}}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (3)$$

( $I_h$ 为第  $h$  次电流谐波有效值)

单次谐波畸变采用单次谐波含有率表示：

单次电压含有率为

$$HRU_h = \frac{U_h}{U_1} \times 100\% \quad (4)$$

单次电流含有率为

$$HRI_h = \frac{I_h}{I_1} \times 100\% \quad (5)$$

## 2 产生谐波的电气设备

产生谐波的电气设备、电子设备在当今社会应用相当广泛，例如：中频电炉、超声波装置、家用视听设备等，这些电气设备具有明显的非线性特性，工作时都会产生大量的谐波电流和谐波电压，若此类谐波电流及谐波电压超过注入公共连接点的谐波电流允许值和公用电网谐波电压限值，则将会危害电力用户和电网。

1) 空调机电气设备。空调机电气设备功率较大，每台功率 500W 到数千瓦不等，根据相关的试验结果表明：空调机谐波电流的大小随着工作状态的变化而变化，制热状态下 THDI% 在 22%~34% 区间；制冷状态下在 20%~27% 区间；只开风扇未制热制冷状态下在 6%~9% 区间，在此工作状态下以 2~17 次谐波为主。可见，无论是制热还是制冷工作状态下，THDI 都不是很小，甚至有可能还比较大。

2) 电池充电器等电气设备。用于各种对充电电池充电的装置均可称之为电池充电器，此类电气设备的谐波含有率取决于电池的数量和容量。随着全球气候变暖、资源枯竭以及在国家节能减排的优惠政策的驱动下，属于新能源行列的电动汽车在未来将会有广泛的应用，因此未来其可能成为主要的产生谐波电流、谐波电压的家用电器之一。充电器的连接与单相共整流电路相同，通过对电流的分解即可获得高次、奇次、以及各次谐波电流。作为电源系统的负荷之一，变压器的励磁电流也应考虑在内。

对于充电器，在负荷电流中的励磁电流的比例是远远大于电力变压器，因此充电器等电气设备的谐波危害亦不容忽视。

3) 计算机等电气设备。一般计算机电气设备谐波电流和谐波电压及用电负荷的非线性用电主要来自显示器 CRT。家用计算机和商场计算机的应用普及以及计算机电气设备的谐波含有率相对比较高，这将引起电视机的谐波电流和计算机的谐波电流相位重合的可能性大大增加，从而导致计算机等电气设备的谐波效应会迅速增加，因此计算机等电气设备的谐波危害显而易见。

4) 稳压泵、消防水泵、消防电梯、不间断电源、生活水泵等电气设备主要谐波含量为 5、7、9 次谐波，以 5 次谐波比重较大。

5) 电视机。电视机群是电网及电力用户谐波影响最大的家用电器之一。同一相电压向多台电视机供电具有相同的谐波相位，当同时使用率相对较高时，则造成配电网谐波也相应的增加，尤其是 9 次谐波、7 次谐波、5 次谐波和 3 次谐波最为严重。

6) 荧光灯。不同的荧光灯谐波电流含有率存在较大差异，因为不同的荧光灯采用的整流器也不同，而谐波电流的产生很大一部分都由荧光灯整流器产生。在以往普通的长管荧光灯为主要的照明灯具，但现在照明灯具越来越多样性，越来越多的采用紧凑型灯具，在各种各样的灯具满足了人们需求的同时，也造成了谐波污染的多样性。其中电子镇流器脉冲型各奇次含有率亦高达 15%~18%，特别是 3 次谐波居然高达 70%~80%，3 次谐波含有率较高的绕线式镇流器，一般可达 8%~10%。谐波次数越高，含有率则越低；高频时各次谐波含有率相对比较低，一般可达 3%~15% 左右。

## 3 谐波对电力系统的危害

谐波对电力系统的危害是比较严重的，主要体现在以下方面。

1) 部分供电线路的损耗由谐波引起。集肤效应和邻近效应使线路电阻随频率增加而提高，造成电能的损失和浪费；谐波电流可能造成线路过载过热，损害导体绝缘，同时高频谐波可能造成集肤效应降低电缆的载流能力。

2) 谐波影响各种电气设备的正常工作。谐波电流的存在导致电力变压器产生附加的损耗，从而引起过载、过热，加速了绝缘介质的老化，导致绝缘

损坏。正序和负序谐波电流在旋转电动机定子中分别形成正向和反向旋转磁场，导致电动机效率降低，发热增加。而正序和负序谐波电流在同步电动机的转子中分别形成正向和反向旋转磁场，造成局部发热，缩短其使用寿命。

3) 谐波电流会使电子电气设备出现较大的误差，甚至引起电子电气设备的失灵。谐波电流及谐波电压影响通信及通信设备一般通过磁感应、电容耦合、电感应及电气传导等方式，磁感应、电气传导、电感应及电容耦合等方式对低频信号影响更大。例如，变流器等电气设备在换相时注入的高压脉冲含有较高的谐波频率，甚至可以达到1MHz，这些谐波频率将会影响通信设备、通信线路的正常工作，从而导致通信系统处于瘫痪的状态。

4) 对谐波频率比较敏感的电力电容器，因其自身的容性阻抗特性，以及频率与容抗成反比的特性，使得谐波电流容易被电力电容器吸收从而引起电容器发热过载。此外，基波电压与谐波电压叠加时使电压波形增多了起伏，倾向于增多每个周期中局部放电的次数，相应地增加了每个周期中局部放电次数的功率，使电力电容器产生发热、噪声、鼓肚、击穿以及绝缘寿命缩短等危害。

#### 4 谐波限值

针对目前电网受谐波影响，国家也是规定了一些相关规范，电力谐波时刻危害着电力用户和电网，因此，国内和国际已公布相应的规范标准及其制定了相应的措施从而到达限制电力谐波的目的，防止其对电力用户和电网的危害。例如：限制公共电网谐波的GB/T 14549—1993、IEEE 519—1992、公用电网间谐波GB/T 24337—2009、IEC 61000-3-4、IEC 61000-3-2、GB/Z 17625.6—2003、GB/Z 17625.1—2003等相应的规范标准。所有规范标准都基于以下目标：

1) 对其他系统不产生干扰，使其在正常的状态下工作。

2) 根据用户需求的电压波形向用户供电，使其满足用户的需要。

3) 根据系统及其所接设备能够允许的水平，将电力系统电流和电压波形的畸变控制在一定的范围内。

注入公共连接点的谐波电流允许值和公用电网谐波电压限值见表1、表2。

表1 公用电网谐波电压限值(GB/T 14549—1993)

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
6.00	4.0	3.2	1.6
10.00			
35.00	3.0	2.4	1.2
66.00			
110.00	2.0	1.6	0.8

表2 注入公共链接点的谐波电流允许值(GB/T 14549—1993)

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
0.38	10	78.0	62.0	39.0	62.0	26.0	44.0	19.0	21.0
6.00	100	43.0	34.0	21.0	34.0	14.0	24.0	11.0	11.0
10.00	100	26.0	20.0	13.0	20.0	8.5	15.0	6.4	6.8
35.00	250	15.0	12.0	7.7	12.0	5.1	8.8	3.8	4.1
66.00	500	16.0	13.0	8.1	13.0	5.4	9.3	4.1	4.3
110.00	750	12.0	9.6	6.0	9.6	4.0	6.8	3.0	3.2
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							
		10	11	12	13	14	15	16	17
0.38	10	16.0	28.0	13.0	24.0	11.0	12.0	9.7	18.0
6.00	100	8.5	16.0	7.1	13.0	6.1	6.8	5.3	10.0
10.00	100	5.1	9.3	4.3	7.9	3.7	4.1	3.2	6.0
35.00	250	3.1	5.6	2.6	4.7	2.2	2.5	1.9	3.6
66.00	500	3.3	5.9	2.7	5.0	2.3	2.6	2.0	3.8
110.00	750	2.4	4.3	2.0	3.7	1.7	1.9	1.5	2.8
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							
		18	19	20	21	22	23	24	25
0.38	10	8.6	16.0	7.8	8.9	7.1	14.0	6.5	12.0
6	100	4.7	9.0	4.3	4.9	3.9	7.4	3.6	6.8
10	100	2.8	5.4	2.6	2.9	2.3	4.5	2.1	4.1
35	250	1.7	3.2	1.5	1.8	1.4	2.7	1.3	2.5
66	500	1.8	3.4	1.6	1.9	1.5	2.8	1.4	2.6
110	750	1.3	2.5	1.2	1.4	1.1	2.1	1.0	1.9

#### 5 治理谐波的措施

当谐波电压超过连接点处的限值，谐波源的自然功率因数较高(如核磁共振机、变频调速器等电气设备)，非线性负荷的谐波电流较大，谐波波频较宽(如

大功率电气设备)时,谐波按下列原则进行治理:

- 1) 采用专用配电回路或专用变压器供电。
  - 2) 当非线性负荷容量占配电变压器容量的比例较大,设备的自然功率因数较高时,应在变压器低压配电母线侧集中装设有源电力滤波器。
  - 3) 当配电变压器仅为少数重要的非线性设备提供电源时,宜采取就地装设有源电力滤波器或者选用具备抑制谐波功能的设备对每台产生谐波源的电气设备进行抑制及治理。
- 选择合理的供电和配电系统应按照以下原则进行配置:①将线性负荷与非线性负荷的供电电源有效的进行隔离;②尽可能的将非线性负荷设置在电源端;③由短路容量较大的配电变压器或不同母线段供电。

1) 对于功率较大且谐波含量较高的重要电气设备(医疗建筑中的核磁共振机、CT机、X光机加速器治疗机、整流装置、变频、大型计算机系统等谐波源)应采用专路供电。

2) 合理配置谐波源,同一段母线上直接具备互补功能的谐波源设备,从而达到互相抵消谐波的目的。

3) 将单相负荷、两相负荷等不对称负荷分散接到不同的供电点上或均匀合理的分配到各相,从而改善三相不平衡度,达到抑制和治理谐波的目的。三相不平衡引起电压不平衡,而不平衡的电压将导致半导体交流设备产生附加的谐波电流(非特征谐波),由此可见,三相平衡具有一定的抑制谐波的作用。Dyn11型结线组别的三相电力变压器具有抑制高次谐波的特性,在进行电力变压器选择时,Dyn11可作为首选。

对容量较大,频谱特性复杂,自然功率因数较低,负荷比较稳定,3、5、7次谐波含量高的谐波源,抑制此类谐波源可采用有源与无源电力滤波器共同来完成。无源电力滤波器是由滤波电容器、电阻器和电抗器适当组合而成,其包括3种基本形式:并联滤波、串联滤波和低通滤波。并联滤波同谐波源并联,不但具有滤波作用,而且还有无功补偿的作用;串联滤波主要适用于3次谐波的治理;低通滤波主要适用于高次谐波的治理。这种方法的主要缺点是补偿特性受电网阻抗和运行状态影响,只能补偿固定频率的谐波,且易与系统发生并联谐振,导致谐波放大,使无源电力滤波器过载甚至烧毁。有源电力滤波器能对幅值和频率都变化的谐波进行跟踪补偿,其补偿特性不受电网阻抗和运行状态的

影响,无谐波放大的危险。

电力系统的谐波干扰包括系统外部谐波干扰和系统内部谐波干扰两部分。谐波干扰属于电力系统外部,应尽可能的避免串联谐振的发生;以5次和7次为主的谐波干扰,应避免串联谐振发生;谐波干扰属于电力系统内部的,应以抑制和滤除为主。

为抑制及治理谐波源在工程设计中经常采用无功功率补偿电力电容器组串联电力电抗器的方案,电力系统中可能产生谐波放大的最低次谐波的频率高于L-C串联支路的谐振频率,可有效避免系统谐波放大效应。

依据《并联电容器装置设计规范》相关规定,串联电力电抗器的电抗率选择应根据电容参数与电网参数经相关计算分析来综合考虑确定,串联电力电抗器的电抗率取值范围应满足下列要求:用于限制谐波时,电抗率应根据并联电力电容器电气设备接入电网处的背景谐波含量的测量值进行选择。当谐波为3次及以上时,电抗率取值应在12.0%左右,亦可采取4.5%~5.0%与12.0%两种电抗率混装方式;当谐波为5次及以上时,电抗率取值应在4.5%~5.0%区间;仅用于抑制涌流时,电抗率取值应在0.1%~1.0%区间。

谐波隔离抑制装置应装设在用电设备前。配电线路上的变频设备,应靠近被控设备安装。将敏感信息技术电气设备置于干扰源附近(如不间断电源、家用视听设备、气体放电灯、变频器、配电变压器、逆变器等)不合适。

## 6 谐波抑制及治理的容量设计

### 6.1 谐波电流的估算

谐波电流本身的计算与测量相对比较复杂,数据的收集亦相对比较困难,对于谐波电流的近似估计可采用下列公式:

$$I_{THD} = \frac{S_r K_1 THD_i}{\sqrt{3} U_S \sqrt{1+THD_i^2}} \quad (6)$$

式中, $K_1$ 为配电变压器的负荷率,常规设计时一般取0.7~0.8; $THD_i$ 为电流总谐波畸变率, $THD_i$ 取值如下(表3); $S_r$ 为变压器额定容量(kVA); $U_S$ 为变压器低压测额定电压(kV)。

### 6.2 谐波补偿装置的容量估算和选型

可根据估算的谐波电流值进行设备选型,亦可根据公共联接点(PPC)或内部联接点(IPC)对谐波的要求进行技术经济合理的选型。

表 3 电流总谐波畸变率表

建筑类型	典型 $THD_f/\%$	主要谐波源
办公	15	计算机设备、中央空调、各类节能灯、办公类用电设备、大型电梯
医疗	20	重要医疗设备、核磁共振设备、加速器、CT、X光机、UPS 等
通信	35	大功率 UPS、开关电源
金融	20	UPS、电子设备、空调、电梯
工业	20	变频驱动、直流调速驱动
水处理	25	变频器、软起动器
公共建筑	25	可控硅调光系统、UPS、中央空调

1) 采用无源滤波电气装置时, 可按每千乏(kvar)无功容量折算成电流后按0.2~0.3的系数来计算谐波抑制电流(当非线性负荷较多时, 则取0.25)。例如, 200kvar的无功容量其消谐式无功补偿电流大约为288A, 此时按系数0.25折算, 即可抑制72A的谐波电流。

2) 可依据谐波电流估算值的大小来进行设计选型有源滤波电气装置。

3) 计算举例如下: 当选择配电变压器容量为1600kVA, 电流总谐波畸变率取值为25%, 配电变压器的负荷率取值为0.8, 配电变压器变比为10/0.4kV时, 根据上述公式可得出谐波电流值为448A。消谐式无功补偿容量根据配电变压器容量进行计算, 当消谐式无功补偿装置取500kvar时, 其补偿电流为720A, 抑制的谐波电流按系数0.3折算即216A。然而消谐式无功补偿只能在一定的范围内抑制部分谐波, 需要达到系统允许的谐波标准要求, 单单选用消谐式无功补偿是不够的, 想要达到系统标准则需要三相有源滤波器的配合。考虑到部分谐波电流已经被消谐式无功补偿滤除了, 根据计算232A为系统还未被滤除的谐波电流。根据需要选用的三相有源滤波器容量为200~300A即可抑制谐波。

4) 无源滤波器结构简单, 成本低, 但滤波性能不佳, 而有源滤波器正好相反。因此可采用无源与有源滤波器配合共同完成谐波的治理。采用并联有源滤波器和并联无源滤波器此种模式可以有效的进行谐波治理, 其中无源滤波器可以包括多组单调谐滤波器及高通滤波器, 也可以只包括高通滤波器(此时, 无源滤波器补偿吸收比较固定的无功功率和频

率较高的谐波成分, 而有源滤波器补偿较快的冲击性无功功率和频率较低的谐波成分)。在这种模式下, 有源滤波器仍起着谐波补偿的作用, 无源滤波器滤除大部分谐波, 因此有源滤波器容量很小。

## 7 结论

综上所述, 人们的生活因电子电力设备的使用而变得更加便利高效, 然而大量电子电力设备的使用也为谐波的危害埋下了伏笔。总之, 谐波的治理是一个漫长求索的过程, 只有各个方面都严格按照国内和国际公布的相应规范标准执行, 才能有效减少谐波带来的危害。特别是在设计阶段就应采取有效的设计方法, 配置合理的补偿容量和补偿设备, 积极主动地进行谐波治理, 才能既减少电能损耗, 又能保证电气设备安全稳定运行。

## 参考文献

- [1] GB/T 14549—1993. 电能质量公用电网谐波[S].
- [2] GB/T 15576—2008. 低压成套无功功率补偿装置[S].
- [3] GB 50227—2008. 并联电容器装置设计规范[S].
- [4] GB 50052—2009. 供配电系统设计规范[S].
- [5] DBJ/T 11-626—2007. 建筑物供配电系统谐波抑制设计规程[S].
- [6] 张杨俊, 王大伟, 闫民华. 电力系统谐波的危害及其抑制措施[J]. 电源世界, 2011(1): 36-38.
- [7] 熊杰锋, 李群, 袁晓冬, 等. 电力系统谐波和间谐波检测方法综述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 125-133.
- [8] 辛卫东, 孙国歧, 梁慧媛, 等. 基于10kV配网节能降损与提高电能质量的STATCOM装置的研究与应用[J]. 电气技术, 2016, 17(1): 145-150.
- [9] 于海, 谢冬阳, 王厚军. 基于APF电能质量调节装置的研究[J]. 电气技术, 2016, 17(2): 114-116.
- [10] 秦显慧, 周波, 黄海涛, 等. 不对称调制下双级矩阵变换器的谐波分析[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 102-111.
- [11] 许胜, 费树岷, 赵剑锋, 等. 多模块APF并联系统高频谐波环流分析与控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(5): 60-68.

## 作者简介

茅 靖(1963-), 男, 浙江慈溪人, 本科, 工程师, 主要从事高低压配电运行管理工作。