

[谐波治理]

单调谐滤波器在照明谐波抑制的应用

文/西安高压电器研究院有限责任公司 胡 勋
西安西电气研究院有限责任公司 万 媛
陕西清水川能源股份有限公司 胡 博

对典型照明设备的谐波情况进行了理论分析，以某商场的谐波治理为背景，对配电变压器低压侧的三相电压、三相电流进行测试，得到各次谐波的具体含量。在充分了解单调谐滤波器的结构和基本原理的基础上，综合考虑造价及实用性，利用工程设计方法设计滤波器，并基于PSCAD仿真对工程实例进行模拟。

随着节能减排及绿色照明策略的广泛实施，新型高效的优质节能光源获得了更多的青睐。如此不仅很大程度地提高了照明光源的能效，而且节约了大量宝贵的电能。

然而节能光源本身的运行特征决定了它在运行时非线性电流的严重性，尤其以大功率光源为主，使得大量高次谐波流入配电网中，进而加剧了电路中高次谐波电压含量。综上，有必要研究现代绿色光源条件下所带来的谐波问题。

非线性设备的广泛使用，尤其是单个设备的功率愈发增加，照明配电中所带来的谐波电流对电网系统造成的危害也愈加严重，有些时候甚至是非常严重的。主要集中在以下几个方面。

1) 额定50 Hz工频电流上附加大量高次谐波电流，使得电网系统过载，造成高温和过热，设备的绝缘性能加速老化，这样就会存在严重的安全隐患。

2) 过电流保护设备会因大量高次谐波电流的注入而引起频繁动作，以致影响光源的正常使用，且一般家用型电流表反映不出线路上的实际电流值，如此常常会给检修工作带来误判断，为事故埋下安全隐患。

3) 谐波电流产生的同时会带来一定大小的谐波电压，高次谐波电压施加到电源回路中，特别是无功补偿电容器上，将会产生发热、加剧损耗

和过电流等影响，严重缩短其使用的正常寿命，并会对相邻敏感的设备带来严重的干扰。

单调谐滤波器是系统中最普遍也最经济的电力滤波器，不仅能够补偿基波无功，而且能够有效滤除系统中的谐波电流，兼具了两种装置的作用，是当今治理谐波的主要方法。但所选单调谐滤波器参数如果不合理会严重影响其滤波效果及经济效益。

单调谐滤波器特性

单调谐滤波器的结构原理和特性为：滤波器装置一般由一组或多组单调谐滤波器组成。单调谐滤波器利用RLC电路串联谐振原理构成，整个滤波器采用星形接法如图1所示。主要优点是：①无论任何一个电容器击穿时，短路故障电流较小；②电抗器只需采用“半绝缘”，不承受短路电流冲击，因为系统单相接地时，电抗器对地电压仅为相电压；③便于分相调谐。

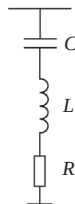


图1 单调谐滤波器原理图

单调谐滤波器能有效吸收 n 次谐波电流,但基于电网系统频率存在一定的偏差,会导致滤波设备失谐。电抗器电阻、电容器的介质损耗,外加电阻以及接线电阻共同组成了单调谐滤波器的 n 次谐波电阻,其中起主要作用的是电抗器电阻及外加电阻。当某次谐波滤波器调谐到此频率时,滤波器总阻抗对外表现为零,因而该次谐波会全部被吸收,如图2所示。

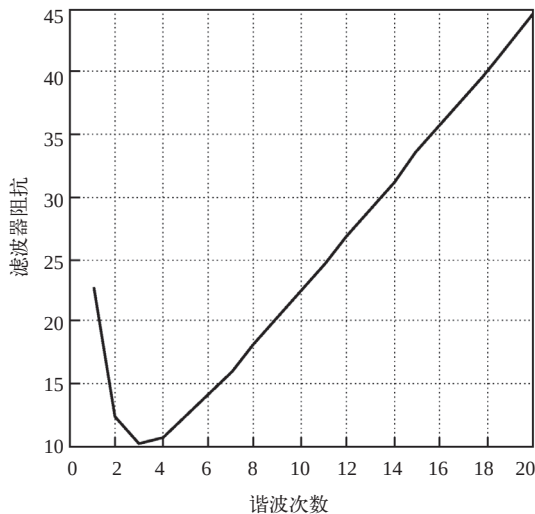


图2 单调谐滤波器阻抗频率特性

单调谐滤波器应用设计

1. 谐波测试

利用电能质量分析仪对某商业建筑（系统用户中应用大量电子节能灯）进行现场测试，测试系统如图3所示。分别采集变压器低压侧各相电压、电流值数据并分析。

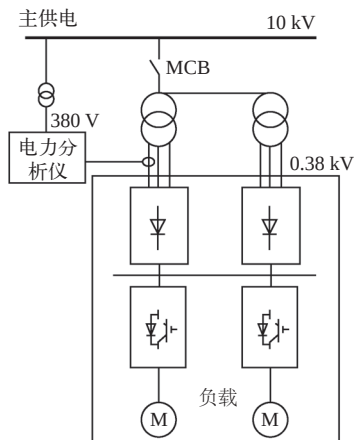


图3 测试系统示意图

当负载不工作时，变压器一次电流如图4所示，谐波电流满足国家标准。

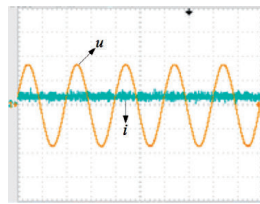


图4 空载电压电流波形

当负载整体投入工作时，电流电压波形如图5所示。测得数据如表1所示。

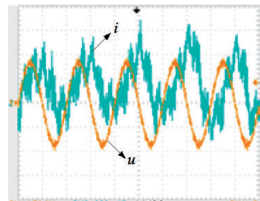


图5 带载电压电流波形

表1 未投入滤波装置前变压器总进线处数据

被测谐波次数	U_A/V	U_B/V	U_C/V	I_A/A	I_B/A	I_C/A
1	230.43	229.95	230.32	231.2	246.3	274.3
3	30.35	30.38	30.39	70.2	70.2	81.0
5	2.54	2.55	2.76	23.7	23.5	31.7
7	2.84	2.14	2.66	32.2	30.3	32.4
9	2.73	2.72	2.76	2.1	2.4	3.4
11	1.19	1.4	1.16	9.4	8.5	8.3
13	0.84	1.24	0.63	5.0	5.6	2.6
15	0.57	1.05	0.6	0.4	2.1	0.3
17	0.25	0.3	0.19	0.8	0.7	1.7
19	0.24	0.08	0.16	1.0	0.7	1.8
其他数据	U_A/V	232.97	I_A/A	244.4	P/kW	167
	U_B/V	232.16	I_B/A	261.1	Q/kvar	76
	U_C/V	232.47	I_C/A	286.0	S/kV·A	184
	U_{ave}	232.53	I_{ave}	263.8	λ	0.91

根据所测电流、电压数据对应其频谱如图6、图7所示。

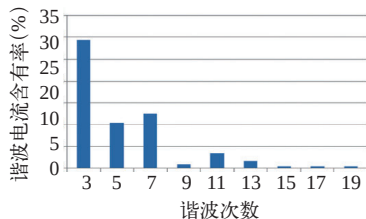


图6 滤波前电流谐波频谱

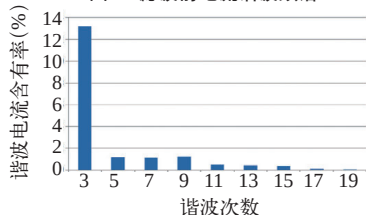


图7 滤波前电压谐波频谱

公用电网系统公共连接点的所有用户向该点注入的谐波电流分量（方均根值）不应超过表2中规定的允许值。

表2 谐波电流允许值

标准电压 /kV	基准容量 /MV·A	谐波次数及谐波电流允许值/A									
		2	3	5	7	9	11	13	15	17	19
0.38	10	78	62	62	44	21	28	24	12	18	16
10	100	26	20	20	15	6.8	9.3	7.9	4.1	6	5.4
110	750	12	9.6	9.6	6.8	3.2	4.3	3.7	1.9	2.8	2.5

谐波测试结果分析：通过比对0.38 kV母线的实测数据和相关的系统参数，充分表明商场负荷在运行过程中向电网注入了大量的谐波电流，其谐波电流组成主要为3次、5次、7次谐波电流，但5次与7次谐波数值在国家标准限定的允许值内。3次最大谐波电流达81.0 A，超标1.31倍。

2. 滤波器设计

由谐波测量结果分析可知, 3次谐波电流超标, 需设置3次单调谐滤波器。设基频下流过电容

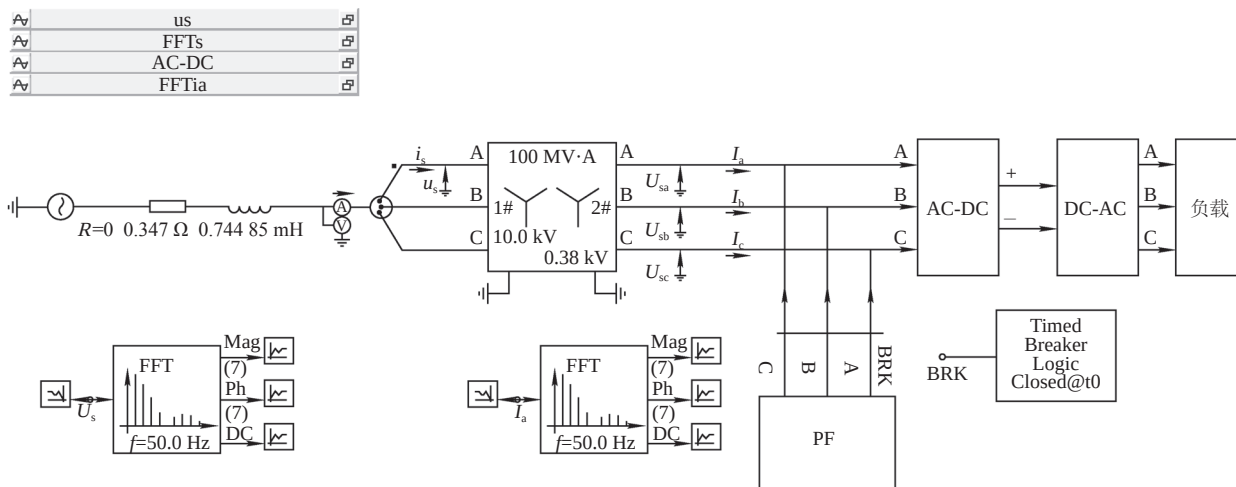


图8 单调谐滤波器的电气仿真图

未投入滤波器前, 总电流波形如图9所示, 各次谐波电流幅值如图10所示, 3次谐波最大, 读取各次谐波幅值, 对应数据如表3所示。

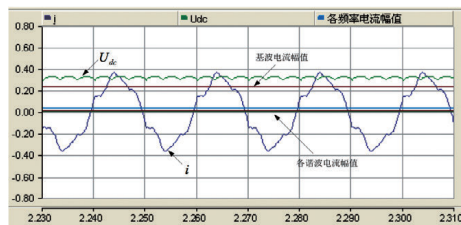


图9 不投滤波器电流波形

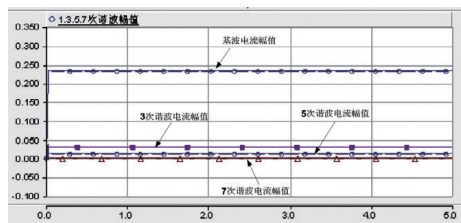


图10 各次谐波电流幅值

表3 不投滤波器各次谐波电流幅值

谐波次数	基波	3	5	7
电流幅值/A	232	41	15	0.5

根据仿真数据，选取对应滤波器参数，投入滤波器后，电流波形如图11所示。

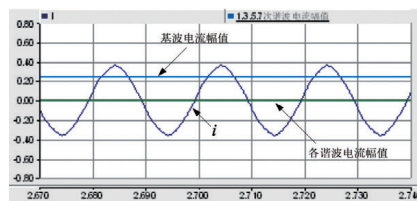


图11 投滤波器电流谐波频谱

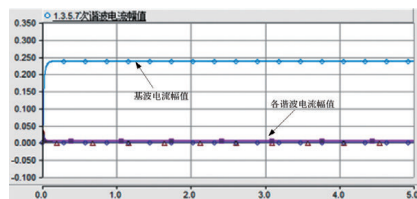


图12 各次谐波电流幅值

根据图12读取各次谐波电流幅值如表4所示,可以看出,3次谐波明显降低,而且5次与7次谐波并未放大。

表4 投入滤波器各次谐波电流幅值

谐波次数	基波	3	5	7
电流幅值/A	237	4	1.3	0.3

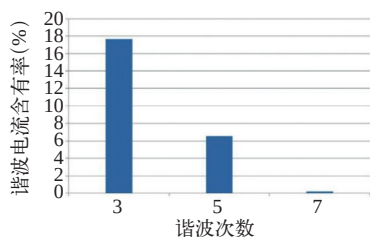


图13 滤波前电流谐波频谱

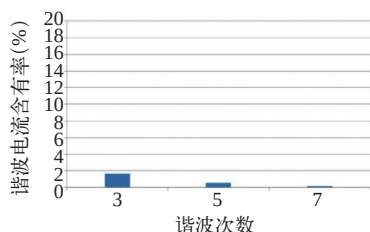


图14 滤波后电流谐波频谱

仿真波形显示,以此计算方法能够滤除相应谐波。在现实工况中,考虑到系统频率的变化、滤波装置中电容的时漂、温漂及电抗器的工艺误差和铁心电抗器的非线性,这些因素的不可控性可能会导致滤波器特征频率阻抗呈容性而引起谐波放大。考虑到确保滤波器长期可靠地运行,本次工况所取3次调谐频率小于其特征频率250 Hz。设调谐系数 $k=0.85$,则滤波器调谐次数为 $n=2.55$,3次单调谐滤波器调谐频率为127.5 Hz。考虑工程造价,综合选取品质因数为 $q=45$ 。此时以三个标准来确定。

1) 过电压

$$\sqrt{U_{c1}^2 + \sum_{n=2}^{\infty} U_{cn}^2} \leq 1.1 U_{CN}$$

$$U_{CN} \geq \sqrt{270^2 + 945.7} / 1.1 \text{ V} = 247 \text{ V}$$

2) 过电流

$$\sqrt{I_{C1}^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_{Cn}^2} \leq 1.3 I_{CN}$$

$$I_{CN} \geq \sqrt{250.6^2 + 724.2} / 1.3 \text{ A} = 203.6 \text{ A}$$

3) 容量平衡

$$Q_{CN} = \frac{I_n \times U_{CN}^2}{\sqrt{1.69 U_{CN}^2 - \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \times U_{lm}\right)^2}}$$

综上选取容量: $Q_{CN}=28.5 \text{ kvar}$,此时滤波器设备参数为

$$C = \frac{Q_{CN}}{\omega \times U_{CN}^2} = 1487.7 \mu\text{F}$$

取 $L=1.05 \text{ mH}$,为方便安装,且满足分组运行,滤波器设计为参数一致的多组。实际应用中,投入一组滤波器装置后,所测数据如表5所示,投入二组滤波数据从略。

表5 投入1组滤波器后的数据

被测量	U_A/V	U_B/V	U_C/V	I_A/A	I_B/A	I_C/A
谐波次数	1000:5					
1	234.55	232.35	232.44	258.8	248.1	280.65
3	19.02	18.98	19.28	38.6	44.85	53.1
5	2.83	1.94	3.57	38.5	33.05	40.85
7	2.48	2.11	1.67	22.8	21.3	22.65
9	2.82	2.69	2.97	3.2	4.8	4.5
11	0.40	0.40	0.23	3.6	1.95	1.8
13	0.75	1.23	0.49	6.4	7.35	4.8
15	0.29	0.42	0.12	1.7	1.65	0.6
17	0.22	0.14	0.20	1.1	0.75	0.9
19	0.14	0.25	0.15	0.8	0.75	0.9

投入一组滤波装置后,流入系统回路的3次谐波电流由最大的81 A减小到53.1 A;投入二组滤波装置后,流入系统回路的3次谐波电流由最大的53.1 A减小到34.5 A。对5次谐波造成放大,放大后电流最高达到48.35 A,属于国家标准允许范围。电压谐波畸变率也在随着滤波器的投入减小,以国标380 V为基准,3次谐波电压含有率为3.4%,达到国标要求的5%的限值。因此,投入滤波器装置后,谐波电流及谐波电压含量皆符合国家标准,本次所设计3次单调谐滤波方案亦达到规定要求。

结束语

本文对典型照明设备的谐波情况进行了分析,针对某商场向电网注入谐波电流,引起变压器过热及噪声污染,利用谐波测试装置对现场进行了实测,得到各次谐波含量。在充分了解单调谐滤波器的结构和基本原理的基础上,利用工程设计方法设计滤波器,搭建PSCAD无源滤波装置的系统仿真模型。通过仿真计算,验证滤波装置设计方法的正确性。综合考虑工程造价及实用性,结合原始数据,确定单调谐滤波器参数。当该设备投入运行后,有效地抑制了系统中3次谐波,并能够保障功率平衡,提高功率因数,优化供电环境,是较为理想的方案。EA

(收稿日期:2018.06.27)

(编辑:朱金凤)