

浅谈谐波的产生与消除

孙 莉

(昆山市供电公司, 江苏 昆山 215334)

摘 要: 电力电子设备的广泛应用势必造成电网的谐波污染, 过量的谐波注入将会影响用电负载的稳定运行。该文分析了谐波产生的根源, 并根据昆山某铝业公司谐波特性设计滤波装置, 就其应用效果进行了对比分析。结果表明, 该滤波装置运行效果显著。

关键词: 高次谐波; 谐波滤波器; 隔离变压器; 有源谐波调节器

0 引言

随着现代化建设的迅猛发展, 大量的电力电子设备广泛应用于各个行业中, 特别是冶金、电气化铁路等所用的直流电源设备就是由三相对称的交流系统经过可控硅整流设备整流后实现的, 在此过程中将不可避免会产生高次谐波。谐波使公用电网中的元件产生附加损耗, 降低了发电输电及用电设备的效率; 会影响电气设备的正常工作使电机产生机械振动和噪声等; 使变压器、电容器、电缆等设备过热、绝缘老化、寿命缩短, 以至损坏。谐波可能引起电网谐振, 这种谐振可能使谐波电流放大几倍甚至数十倍, 会对电力系统特别是对电容器和与之串联的电抗器形成很大威胁, 引起电容器和电抗器烧毁。谐波导致继电保护和自动装置不正确动作造成不必要的供电中断和生产损失。谐波使电气测量仪表测量产生误差, 给供电部门或电力用户带来经济损失。谐波还可能对临近的通讯系统产生干扰, 轻则产生噪声, 降低通讯质量; 重则导致信息丢失, 使通讯系统无法正常工作。在用户变电站安装并联电容器来提高功率因数, 同时安装交流滤波装置可以消除高次谐波。本文主要就昆山某铝业公司谐波补偿装置的应用, 对高次谐波的产生和消除讨论。

1 高次谐波的产生

在理想的供电系统中, 其电流和电压都是正弦波的。在只含线性元件(电阻、电感及电容)的简单电路里, 流过的电流与施加的电压成正比, 流过的电流是正弦波。在实际的供电系统中, 由于有非线性电力元件和负荷的存在, 不可避免地形成非正弦电流。任何非正弦波形均可分解为一个基频正弦波加上许多谐波频率的正弦波。谐波频率是基频的整

倍数。例如基频为 50Hz, 二次谐波为 100Hz, 三次谐波则为 150Hz。因此畸变的电流波形可能有二次谐波、三次谐波……可能直到第三十次谐波组成。总而言之, 谐波的产生, 电网谐波来自于 3 个方面: 一是发电设备产生谐波; 二是输配电系统产生谐波; 三是用电设备产生的谐波。其中用电设备产生的谐波最多。

(1) 发电机由于三相绕组在制作上很难做到绝对对称, 铁心也很难做到绝对均匀一致和其他一些原因, 发电设备多少也会产生一些谐波, 但一般来说很少。

(2) 输配电系统中谐波主要是电力变压器产生的。由于变压器铁心的饱和, 磁化曲线的非线性, 加上设计变压器时考虑经济性, 其工作磁密选择在磁化曲线的近饱和段上, 这样就使得电流呈尖顶波形, 因而含有奇次谐波。它的大小与磁路的材料、结构、制造工艺有关, 反应于铁心的饱和程度有关。铁心的饱和程度越高, 变压器工作点偏离线性越远, 谐波电流也就越大, 其中 3 次谐波电流可达额定电流的 0.5%。

(3) 在用电设备中, 下面一些设备都能产生谐波, 如晶闸管整流设备。晶闸管整流设备在电力机车、铝电解槽、充电装置、开关电源等许多方面得到了越来越广泛的应用, 给电网造成了大量的谐波。晶闸管整流装置采用移相控制, 给电网留下的也是另一部分缺角的正弦波, 显然在留下部分中含有大量的谐波。如果整流装置为单相整流电路, 在接感性负载时则含有奇次谐波电流, 其中 3 次谐波的含量可达基波的 30%; 接容性负载时则含有奇次谐波电压, 其谐波含量随电容值的增大而增大。如果整流装置为三相全控桥 6 脉整流器, 变压器原边及供电线路含有 5 次及以上奇次谐波电流; 如果是 12

脉冲整流器，含有 11 次及以上奇次谐波电流。经统计表明：由整流装置产生的谐波占有谐波总量的近 40%，这是最大的谐波源。

变频装置。变频装置常用于风机、水泵、电梯等设备中，由于采用了相位控制其谐波成份很复杂，除含有整数次谐波外，还含有分数次谐波，这类装置的功率一般较大。随着变频调速的发展，对电网造成的谐波也越来越多。

电弧炉、电石炉。由于加热原料时电炉的三相电极很难同时接触到高低不平的炉料，引起三相负荷不平衡，产生谐波电流，经变压器的三角形连接线圈而注入电网。其中主要是 2~7 次的谐波，平均可达基波的 8%~20%，最大可达 45%。

气体放电类电光源。荧光灯、高压汞灯、高压钠灯与金属卤化物灯等属于气体放电类电光源。分析与测量这类电光源的伏安特性，可知其非线性十分严重，有的还含有负的伏安特性，它们会给电网造成奇次谐波电流。

家用电器。电视机、录像机、计算机、调光灯具、调温炊具等，因具有调压整流装置，会产生较深的奇次谐波。在洗衣机、电风扇、空调器等有绕组的设备中，因不平衡电流的变化也能使波形改变。这些家用电器虽然功率较小，但数量巨大，也是谐波的主要来源之一。

2 昆山某铝业公司高次谐波的消除

2.1 昆山某铝业公司安装谐波滤波前的情况

该公司是一家生产铝板、带材的企业，主要生产工艺为铝锭的熔铸、热轧、冷轧及板带精加工。由苏州昆山秦峰 220kV 变电站 110kV 供电，两台 16MVA 主变。秦峰 220kV 变电站 110kV 的最小短路容量为 1166MVA，最大短路容量按最小短路容量的 1.2 倍估算，约为 1399MVA。两台主变参数：电压 110kV/10kV，阻抗电压为 10.5%。其设备大多为直流设备和整流加热设备，如热轧机和冷轧机的主机动力为 3 台直流电机同轴传动，有多台大功率的加热炉和退火炉为便于调整均为直流供电，全厂 26 台 10kV 变压器的其中 18 台为整流变压器，整流负荷如下：

12 相整流负荷设计容量为 10970kVA，最大运行容量为 7895kVA，正常运行容量为 5360kVA。

6 相整流负荷设计容量为 1207kVA，最大运行容量为 1207kVA，正常运行容量为 1000kVA。

要求预留 2050kW（12 相整流负荷）发展余地。

合计最大谐波负荷运行容量约为 11500kVA，其中 12 相整流负荷 9945kW，6 相整流负荷为 1000kW。

根据整流器厂家数据，该公司的 10kV 整流负荷的谐波电流最大值如表 1 所示。

表 1 昆山某铝业公司的 10kV 整流负荷的谐波电流最大值

谐波次数	12 相整流谐波电流/A	12 相整流谐波电流/A	总谐波电流/A	谐波次数	12 相整流谐波电流/A	12 相整流谐波电流/A	总谐波电流/A
1	513.84	67.47	581.309	14	1.39	0.00	1.393
2	5.84	0.51	6.352	15	1.76	0.00	1.757
3	14.01	1.20	15.212	16	1.03	0.00	1.082
4	4.31	0.35	4.661	17	1.21	3.98	5.193
5	7.38	13.49	20.872	18	1.68	0.00	1.680
6	4.93	0.21	5.134	19	1.18	3.51	4.690
7	3.81	9.65	13.455	20	1.18	0.00	1.182
8	3.30	0.14	3.446	21	1.42	0.00	1.423
9	4.00	0.25	4.248	22	1.28	0.00	1.279
10	2.02	0.19	2.207	23	22.34	2.90	25.242
11	46.71	6.14	52.852	24	1.91	0.00	1.911
12	1.67	0.18	1.850	25	20.55	2.70	23.252
13	39.53	5.19	44.752				

从表 1 中可看出，由于整流设备的原因，奇次的谐波分量是比较大的，如果不进行滤波处理，对电网的危害是显而易见的。

2.2 昆山某铝业公司安装谐波滤波后的情况

（1）据上述情况，3、5、7、11 次谐波分量较大，3 次分量采用 DYN 变压器隔离，考虑只设 5 次、7 次、11 次的滤波之路。

（2）设置电压为 10kV，容量为 2 套 3900kVAR 的滤波装置，可发无功功率 5720kVAR。

（3）经计算，初步确定的两套滤波器总参数如表 2 所示。

表 2 昆山某铝业两套滤波器设计参数表

滤波支路/电容器	5 单调	7 单调	11 单调
电容器安装总容量/kVAR	2400	600	4800
单台电容器容量/kVAR	200	100	200
每相电容器并联数/台	4	2	8
每相电容器串联数/台	1	1	1
在 10kV 时总基波容量/kVAR	1791.8	438.2	3490.2
滤波支路/电抗器	5 单调	7 单调	11 单调
电抗器安装总容量/kVA	98.88	12.61	167.89
单台电抗器容量/（kVA/台）	16.48	2.1	27.98
电抗器品质因素	40	40	40
台数	6	6	6
电阻器			
单台功率/kW	-	-	10
台数	-	-	6

按本设计的方案在最小、最大运行方式时，不同等效运行频偏下流入电网的 10kV 谐波电流（A）如表 3、表 4 所示。

可以看出滤波的效果非常好。只是为避免产生 11 次，反之亦然。谐振，补偿装置投运时，一定要先投 5、7 次，后投

表 3 最小运行方式时，不同等效运行频偏下流入电网的 10kV 谐波电流

谐波次数	不同等效运行频偏下流入电网的 10kV 谐波电流/A										谐波电流	国际要求
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4		/A	/A
2	7.13	7.13	7.14	7.14	7.15	7.15	7.16	7.16	7.17		6.352	109.2177
3	21.03	21.10	21.18	21.26	21.34	21.42	21.51	21.60	21.70		15.212	52.3371
4	13.01	13.55	14.19	14.96	15.88	17.02	18.46	20.35	22.92		4.661	54.6089
5	6.37	3.70	1.41	1.22	3.08	4.89	6.57	8.15	9.62		20.872	87.3742
6	7.27	7.94	8.69	9.55	10.55	11.77	13.33	15.43	18.51		5.134	36.4059
7	7.91	4.66	1.75	1.55	4.14	6.77	9.37	11.94	14.50		13.455	47.3189
8	7.22	6.80	6.44	6.14	5.89	5.68	5.50	5.34	5.20		3.446	27.3044
9	1.84	1.83	1.82	1.81	1.80	1.79	1.78	1.78	1.77		4.248	29.1247
10	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38		2.207	21.8435
11	5.64	5.65	5.65	5.65	5.65	5.65	5.65	5.66	5.66		52.852	36.5052
12	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23		1.850	18.2023
13	6.98	6.99	6.99	7.00	7.01	7.01	7.02	7.02	7.03		44.721	32.5834
14	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25		1.393	15.4725
15	0.35	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36		1.757	17.2928
16	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.23	0.23		1.028	13.6522
17	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20		5.193	25.4811
18	0.40	0.40	0.40	0.40	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41		1.680	11.8319
19	1.16	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17		4.690	22.7537
20	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30		1.182	10.9218
21	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37		1.423	12.7421
22	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34		1.279	10.0116
23	6.78	6.79	6.79	6.80	6.81	6.81	6.82	6.82	6.83		25.242	19.1131
24	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52		1.911	9.1015
25	6.38	6.39	6.39	6.40	6.40	6.41	6.41	6.42	6.42		23.252	17.2928
总电压畸变率/%	2.91	2.89	2.88	2.89	2.91	2.91	3.01	3.09	3.19			
未投滤波装置总电压的畸变率/%										11.56		

表 4 最大运行方式时，不同等效运行频偏下流入电网的 10kV 谐波电流

谐波次数	不同等效运行频偏下流入电网的 10kV 谐波电流/A										谐波电流	国际要求
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4		/A	/A
2	7.10	7.10	7.11	7.11	7.12	7.12	7.13	7.13	7.14		6.352	109.2177
3	20.77	20.84	20.91	20.99	21.06	21.14	21.22	21.31	21.40		15.212	52.3371
4	12.29	12.76	13.30	13.95	14.72	15.66	16.83	18.33	20.32		4.661	54.6089
5	6.65	3.85	1.46	1.26	3.17	5.01	6.73	8.31	9.79		20.872	87.3742
6	7.17	7.80	8.50	9.29	10.20	11.30	12.68	14.50	17.10		5.134	36.4059
7	8.34	4.87	1.82	1.59	4.24	6.88	9.46	11.98	14.47		13.455	47.3189
8	7.76	7.33	6.95	6.63	6.36	6.13	5.93	5.76	5.61		3.446	27.3044
9	1.93	1.92	1.90	1.89	1.88	1.88	1.87	1.86	1.85		4.248	29.1247
10	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39		2.207	21.8435
11	5.83	5.83	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.85		52.852	36.5052
12	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24		1.850	18.2030
13	7.19	7.19	7.20	7.21	7.21	7.22	7.22	7.23	7.23		44.721	32.5843
14	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26		1.393	15.4725
15	0.36	0.36	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37		1.757	17.2928
16	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23		1.082	13.6522
17	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.24		5.193	25.4841
18	0.41	0.41	0.41	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42		1.680	11.8319
19	1.19	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20		4.690	22.7537
20	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31		1.182	10.9218
21	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38		1.423	12.7421
22	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35		1.279	10.0116
23	6.95	6.96	6.96	6.97	6.98	6.98	6.99	6.99	7.00		25.242	19.1131
24	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.54	0.54	0.54		1.911	9.1015
25	6.54	6.55	6.55	6.56	6.56	6.57	6.57	6.58	6.58		23.252	17.2928
总电压畸变率/%	2.86	2.86	2.85	2.85	2.88	2.91	2.96	3.02	3.11			
未投滤波装置总电压的畸变率/%										11.19		

3 结论由畸变电流造成的电压畸变取决于电源阻抗。

阻抗愈大则由同一电流畸变所造成的电压畸变就愈大。对于 10 次以下的谐波而言，供电网络通常是感性的，所以电源阻抗就和频率成正比，谐波次数越高，所造成的畸变就越大。通常不可能减小供电系统的阻抗，所以需要采用别的步骤来保证电压畸变不超过电网允许限度。可能的解决方法有：装用谐波滤波器、装用隔离变压器和装用有源的谐波调节器。

参考文献：

- [1] 张明,孟庆民. 电力谐波检测及其仿真[J]. 电测与仪表, 2009(S2).
- [2] 何志江,潘映莉. 变频器中高次谐波的危害及其抑制[J]. 中国西部科技,2008, 07(08):20-21.
- [3] 姚宏伟. 浅谈变频器的谐波及对策[J]. 科技风, 2010(15).

作者简介：

孙 莉（1959—），女，工程师，主要从事电力系统继电保护、调度运方、用电监察、安全检查工作。