

低压配电系统的谐波—石化行业

石化企业低压配电系统中的谐波及其治理

关键词：谐波 谐振 功率因数补偿 滤波

摘要：石化工业中，低压配电系统采用变频调速技术成为普遍的趋势。越来越多非线性负荷的应用导致配电系统电源遭受污染，功率因数低下。传统设计中在中压侧进行无功补偿的做法无法避免低压侧对电能的浪费和谐波导致的运行安全隐患。从谐波产生的源头处治理谐波，提高功率因数、降低谐波水平，能够保障生产运行的安全性和经济性。

现代配电系统中的谐波，主要是由于大量采用电力电子设备而产生的。石化行业配电系统产生谐波的主要设备包括：机泵的变频调速装置、不间断电源装置（UPS）、变电所用直流电源成套设备、电动机的软启动设备、新型照明灯具（节能灯、采用电子镇流器的日光灯）等。

目前国际上通用的谐波治理技术主要包括主动的消除式滤波（Active Harmonics Filtering）和被动的吸收式滤波（Passive Harmonics Filtering）。

一般石化企业安装变频调速器的低压系统采用非调谐式滤波补偿装置后，其电能质量参数均可以达到国标要求。综合技术、投资、实施可行性及对配电系统综合影响等方面考虑，采用非调谐滤波补偿是经济、有效和可行的一种治理谐波污染的解决方案。

1、配电系统谐波

配电系统的谐波，狭义上是指在工频 50Hz 基波上叠加的杂波。采用傅立叶分析的方法，这些杂波可以分解为其频率为 50Hz 倍数的正弦波，其频率相对于工频基波（50Hz）的倍数，称为该谐波的次数，例如，100Hz 的波形为 2 次谐波，350Hz 的波形为 7 次谐波等等。

对配电系统，尤其是对低压配电系统产生不良影响的谐波主要是奇数次谐波。

配电系统存在谐波影响是一个由来已久的问题。传统上的谐波影响主要是由于电力变压器的铁磁特性产生的 3 次谐波，这一部分 3 次谐波相对于 50Hz 工频基波的比率比较小，所以在过去的配电系统中基本不考虑其影响。

随着电气和电力电子技术的发展，配电系统的谐波也由传统的仅有少量 3 次谐波的情况变化为多次谐波并存，并且影响甚至危害到配电系统的安全、正常运行。主要表现为以下两个方面：

1.1 整流技术、电力电子技术的广泛应用，导致配电系统中产生大量谐波，这些谐波的存在，降低了用电设备的使用效率，增加了用电负荷，浪费了电能；严重的，由于设备长期处于过负荷运行的状态，甚至引发运行安全问题。

采用这些技术的设备例如：

调光设备（用于会议中心、剧场、体育场馆等），

计算机设备（计算中心、个人电脑），

办公自动化设备（如复印机、传真机等），

不间断电源（UPS），

保证恒压供水和自动集中空调系统运行的变频调速器，

采用新型变频技术（VVVF）控制的电梯，

新型照明灯具（节能灯、采用电子镇流器的日光灯），

其他采用电子整流技术的设备…

1.2 为提高配电系统的功率因数，在所有的配电柜中都安装有无功补偿电容器。这些电容器的投入运行，在有谐波存在的系统中，会放大谐波电流和谐波电压，进一步加剧了谐波的影响。

2、石化企业低压配电系统主要谐波源

下列用电设备是石化企业低压配电系统中较常见的谐波源

2.1 机泵的变频调速装置（VVVF）；

工艺装置或水系统使用变频调速装置主要目的是：

a 节约能源 某些机泵实际工作点(流量、压力)可能偏离设计值，在一个较大的范围内变化，用调节原动机(电动机)转速的方法可以带来显著的节能效果；

b 用调节原动机速率实现控制功能，取代工艺控制阀，避免控制阀的严重磨损；

大多数变频调速装置整流环节为三相桥式可控整流，注入电源系统主要是 5 次谐波，

2.2 不间断电源装置（UPS）；

用于对一级负荷中特别重要的负荷供电，这些负荷包括：工艺过程控制 DCS 系统，配电系统的微机监控系统，火灾报警系统以及工厂智能化信息管理系统等

UPS 产生的谐波主要为 次谐波，按照容量不同可能注入系统的谐波电流为

2.3 变电所用直流电源成套设备；

2.4 电动机的软起动设备；

2.5 新型照明灯具（节能灯、采用电子镇流器的日光灯）

2.6 其它电子设备；

3、谐波对配电系统的危害

谐波对配电系统的影响，在很多方面与污水对水源的影响很相似，是对环境的一种污染。

谐波对配电系统产生影响，有些是表面的、直观的、短暂的，但更多的影响是潜在的、间接的、累积的。

后者所产生的影响，是一种不易察觉的危害，往往成为配电系统安全运行的重大隐患。

谐波污染及其影响和危害，主要表现在以下几个方面：

3.1 电源波形畸变，导致电能质量降低；

3.2 谐波造成附加损耗；

由于谐波是以发热的形式被用电设备消耗掉，所以，谐波会造成配电系统的功率因数降低，增加无功电能的损耗。

3.3 造成设备损坏或缩短使用寿命；

谐波发热和产生的力矩造成用电设备的寿命缩短、旋转设备（如电动机）迅速机械疲劳而损坏；变压器出现异常，运行温度高、噪声大、有振动；电容器发热严重，需要频繁更换或保护用熔断器非正常熔断；

建筑用电中，如前所述，存在大量的开关电源类单相负荷，如个人电脑、照明灯具、办公自动化设备以及仪器仪表等设备，这些负荷所产生谐波的特性表现为典型的三次谐波，并汇聚到零线上，因而造成零线过负荷而发热严重，甚至烧断，使得接入配电系统中的单相用电设备瞬间过电压而烧毁，并使得设备外壳带电，产生安全隐患。

3.4 谐波经电源引入电子设备，造成精密电子设备失效，如信号漂移或采样错误、芯片电压升高烧毁。

3.5 谐波产生的无线电干扰，有时会影响到通讯的正常运行。

4、有关标准对谐波的限制

在国家标准《GB/T14549-93, 电能质量 公用电网谐波》中, 规定了配电系统中允许存在的谐波污染水平。

GB/T 14549-93, 第 4 条, 谐波电压限值 公用电网谐波电压 (相电压) 限值 (表 1)

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	4.0	3.2	1.6
10			
35	3.0	2.4	1.2
66			
110	2.0	1.6	0.8

GB/T 14549-93, 第 5 条, 谐波电流允许值 注入公共连接点的谐波电流允许值 (表 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																								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
0.38	10	78	62	39	62	26	44	19	21	16	28	13	24	11	12	9.7	18	8.6	16	7.8	8.9	7.1	14	6.5	12	
6	100	43	34	21	34	14	24	11	11	8.5	16	7.1	13	6.1	6.8	5.3	10	4.7	9.0	4.3	4.9	3.9	7.4	3.6	6.8	
10	100	26	20	13	20	8.5	15	6.4	6.8	5.1	9.3	4.3	7.9	3.7	4.1	3.2	6.0	2.8	5.4	2.6	2.9	2.3	4.5	2.1	4.1	
35	250	15	12	7.7	12	5.1	8.8	3.8	4.1	3.1	5.6	2.6	4.7	2.2	2.5	1.9	3.6	1.7	3.2	1.5	1.8	1.4	2.7	1.3	2.5	
66	500	16	13	8.1	13	5.4	9.3	4.1	4.3	3.3	5.9	2.7	5.0	2.3	2.6	2.0	3.8	1.8	3.4	1.6	1.9	1.5	2.8	1.4	2.6	
110	750	12	9.6	6.0	9.6	4.0	6.8	3.0	3.2	2.4	4.3	2.0	3.7	1.7	1.9	1.5	2.8	1.3	2.5	1.2	1.4	1.1	2.1	1.0	1.9	

国际标准, IEC61000-2-4(2002-06): 电磁兼容性 第 2-4 部分, 工业现场低频传导扰动的兼容级别 (Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-4: Environment - Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances);

IEC61000-4-7(2002-06): 第 4-7 部分, 试验和测量技术-用于供电系统和连接于其上的设备谐波和间谐波测量及仪器的一般性指导 (Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto)。

以上标准, 给出了配电系统中谐波水平的允许值和测量方法指南。

6 谐波治理

目前国际上通用的谐波治理技术主要包括主动的消除式滤波 (Active Harmonics Filtering) 和被动的吸收式滤波 (Passive Harmonics Filtering)。

一般说来, 有以下三种方式:

1) 无源滤波器。这属于被动的吸收式滤波, 在谐波情况比较简单的配电系统中, 结合功率因数补偿, 选用高性能的滤波电容器串联高线性度的滤波电抗器, 组合成滤波补偿系统, 在吸收系统中主要的谐波分量的同时, 补偿无功功率。其主要技术指标为: 滤波电容器过电流能力 $I \geq 1.5 \times I_n$ (额定电流), 滤波电抗器线性度 $\geq 1.75 \times I_n$, 电抗系数为 7%或 14%。属于被动的吸收式滤波

无源滤波又有调谐的和非调谐的两种滤波技术。调谐式无源滤波技术的主要目的为滤波, 其滤波效率可以达到 70%以上, 但由于其频率接近, 吸收几乎全部相应频率的谐波电流, 所以配置的电容器容量都很大, 最小也在 100kVar, 投入时会造成电压波动, 而且极易容易导致过补, 在控制投切的技术上, 要求最低次谐波的滤波回路最先投入而最后切出, 否则会导致低次谐波电流的放大而造成谐振。同时, 调谐的滤波技

术必须建立在对系统的精确计算之上。该技术的缺点在于计算和配置复杂,无法满足系统运行状态的变化,存在很大的谐振风险。目前该技术已基本被淘汰。

非调谐式无源滤波技术的主要目的是保证补偿,避免谐振,其主要关注的是抑制谐波进入电容器造成放大,导致电容器过载或导致谐振。优点是配置简单,仅考虑功率因数和系统中最低次谐波频率即可,缺点是滤波效果较差,例如针对石化企业通常采用变频调速器而产生的主要以五次为主的谐波,当 LC 回路调谐频率在 189Hz 时,其滤波效果仅为 20%左右,当频率在 204Hz 时,其滤波效果约为 30%,当调谐频率提高到 214Hz 时,滤波效果大约为 50%,但加工 214Hz 电抗器对生产的精度要求极高,且要求配套电容器的过流能力较高,要达到工频额定电流的 2 倍,目前欧洲市场仅有个别厂家生产调谐频率为 214Hz(电抗系数 5.5%)的电抗器,其配套电容器不采用过流能力为 1.3 倍额定电流的常规补偿电容器而是采用过流能力为 2 倍额定电流的滤波补偿电容器。

由于我国目前没有针对电能质量的强制性国家标准,GB/T14549-93 为推荐标准,其规定的限值数值比较宽泛,所以一般石化企业安装变频调速器的低压系统采用非调谐式滤波补偿装置后,其电能质量参数均可以达到国标要求。综合技术、投资、实施可行性及对配电系统综合影响等方面考虑,采用非调谐滤波补偿是经济、有效和可行的一种治理谐波污染的解决方案。

2) 组合滤波器。针对谐波情况复杂、各次谐波均有显现的配电系统,采用组合系数的无源滤波器。在补偿功率因数的同时,抑制三次谐波,吸收五次谐波,降低谐波水平。其主要技术指标为:滤波电容器过电流能力 $I \geq 2.0 \times I_n$ (额定电流),滤波电抗器线性度 $\geq 1.75 \times I_n$,电抗系数为 5.5%~12.5%。

3) 有源滤波器,这属于主动的消除式滤波。在重要负荷处,根据用电设备对谐波污染的敏感程度,为达到最佳的滤波效果,配置动态有源滤波器,充分消除谐波。属于主动的消除式滤波。

主动式滤波即有源滤波器,是采用 IGBT 技术作为开关元件,通过 DSP(数字信号处理)和 PWM(脉宽调制)技术,根据检测到的谐波分量,产生一个幅值相等但移相 180 度的反谐波,在谐波源处注入系统,使得系统中的谐波被彻底消除。该技术的优点是清除谐波效果好,可以滤除系统中 97%以上的谐波电流,且无需对系统的综合感抗/容抗进行计算,可以对三相电流分别滤除,不存在投入容性负荷而导致过补和引起电压波动的负作用,只需根据系统中的谐波电流值选择、配置相应容量的有源滤波器即可,简单方便,但缺点是设备昂贵、投资较大。目前该技术在欧美市场已普遍应用。

7 应用实例

实例一、永坪炼油厂低压配电系统谐波污染治理方案

1) 现状说明

延长油矿管理局永坪炼油厂现有低压配电系统主要包括: I 联合(加氢催化)装置, II 常压装置, II 联合(常压、催化)装置(建设中,部分已投用),锅炉房(包括外配电室及内配电室)。目前存在的主要问题是低压运行功率因数偏低,无功功率消耗较大,需要投入电容补偿以提高功率因数,但大多数低压配电系统投入电容器时,往往造成电容器损坏,甚至影响到系统的正常运行,因而现行的补偿方法为高压集中补偿,以满足供电部门所要求的功率因数指标。

根据低压配电系统的元器件配置特性和运行及电容投切时的现象,初步判断低压系统中存在比较大的谐波污染。这一原因导致电容器投入运行时引起谐振而造成电容器数倍于自身额定容量的过载损坏,同时,谐波污染还造成功率因数降低,无功损耗增加。治理谐波污染,是增加电容器使用寿命,提高功率因数,降低无功损耗,节约电费开支的重要手段。低压配电系统中谐波污染的治理,还可以减少变压器、电缆、电机的发热,增加其使用寿命,延长设备运行的平均无故障时间,降低维护、维修及更换设备的费用,具有附加的间接经济效益。

2) 治理方案

针对永坪炼油厂的具体情况,治理谐波污染的目的,首先是体现直接的经济效益,即保障低压电容补偿系统的正常运行,发挥其应有的作用,降低低压配电系统中谐波总体含量的水平,提高功率因数,减少无功

损耗；其次是体现间接的经济效益，即通过有针对性的谐波污染治理，减少甚至消除其对配电系统的不良影响，保证变压器、电缆、电机的正常运行，延长其使用寿命。

根据这一目的，针对所有低压系统，配置带有滤波功能的电容补偿装置，以吸收系统中主要的谐波分量；在污染严重的低压系统，配置不同滤波系数的组合滤波器；根据投资情况，在重点负荷，配置动态有源滤波器，以达到最佳的治理效果。

谐波污染治理的结果，应满足或高于现行国家标准。预期指标为：系统中谐波总分量 $THD \leq 5\%$ ，功率因数 $\cos \Phi \geq 0.95$ 。

谐波污染情况的检测

根据上述规划方案，于 2003 年 9 月 23 日对永坪炼油厂主要的低压配电系统谐波分布情况做了初步的抽样检测。检测设备为 FLUKE 41B，配钳型电流探头 I3000S，最大检测电流范围为 AC3000A，检测方式为随机检测。

检测点及数据如下：

采样点	I 联合		II 常压		锅炉房（外）		锅炉房（内）		II 联合
	I 段进线 C 相	II 段进线 C 相	I 段进线 C 相	I 段常底泵 C 相	I 段进线 C 相	II 段进线 C 相	I 段进线 C 相	II 段进线 A 相	常压 I 段进线 C 相
电压 V	397	398	394	394	400	397	399	394	401
频率 Hz	50	50	50	50	50	50	50	50	50
COS Φ	0.37	0.62	0.54	0.41	0.37	0.33	0.29	0.24	0.55
THD _v	1.2%	1.1%	1%	0.9%	1.5%	1.9%	1.7%	2.5%	1.2%
THD _i	8.8%	9.8%	1.1%	2.0%	29.7%	19.5%	47.5%	28.4%	15.1%
3 rd %	<1.0		0.5%	1.2	4.0	2.2	9.9	5.8	4.3
5 th %	6.7	6.1	0.7%	1.1	23.0	16.0	39.4	20.9	7.3
7 th %	5.3	5.4		0.6	16.5	8.7	23.3	8.7	7.4
9 th %									
11 th %		3.5			2.4	5.2	4.2	5.8	6.0
13 th %		2.8			3.3	3.5	5.1	3.5	5.3
15 th %									
17 th %						2.9	1.7	2.9	4.0
19 th %						2.2	2.2	2.3	3.0
21 st %									
23 rd %						1.6	1.2	2.0	1.2
25 th %						1.7	1.0	1.5	1.3
27 th %									
29 th %						1.0		1.3	
31 st %							1.1	1.1	

上表中各次谐波分量空白处均为<1.0%。

从上表中可以看出，各配电系统由谐波引起的电压总畸变率均在正常水平内，电流畸变则比较严重。锅炉房（内）由于系统中使用了大量的变频装置，谐波污染极其严重，并影响到锅炉房（外）的谐波情况；二联合部分仅常压 I 段的 UPS 设备投入运行，谐波即比较严重，预期该系统将是谐波污染治理的次重点。二

常压在软启动器启动及停止时曾导致电容器损坏，但检测中未发现谐波污染，表明运行中谐波水平在正常范围之内，需要考虑避免软启动器启停瞬间谐波尖峰导致的电容器谐振过载。

永坪炼油厂于 2004 年 6 月和 2005 年 7 月分别改造了低压补偿系统并在重点配电系统的主要谐波源处安装了有源滤波器。

低压补偿系统采用同容量置换的方式，将原有的补偿装置改造为滤波补偿装置，采用非调谐无源滤波技术，将原电容器组改为串联滤波电抗器的滤波补偿电容器组，同时实现无源滤波和无功补偿功能，其输出的无功容量不变。

在锅炉房、二联合和二常压三个装置的配电系统最大功率变频调速器处，分别安装了 3 台 100A 三相三线有源滤波器，重点针对主要谐波源进行彻底根除。

上述滤波补偿及有源滤波装置投入运行后，取得了明显的效果。各装置变压器功率因数由 0.8 左右提升到 0.9 以上，10kV 侧补偿电容量减少 60%，综合用电效率明显提高，初步估算全厂年节约电费在 30 万元左右。2005 年 7 月，在无源滤波补偿装置和有源滤波器全部投入运行后，对配电系统进行了对比检测。在设备运行条件大致相同的情况下，检测结果如下：

采样点	I 联合		II 常压		锅炉房（外）		锅炉房（内）		II 联合
	I 段进线 C 相	II 段进线 C 相	I 段进线 C 相	I 段常底泵 C 相	I 段进线 C 相	II 段进线 C 相	I 段进线 C 相	II 段进线 A 相	常压 I 段进线 C 相
电压 V	399	399	396	395	401	401	399	397	401
频率 Hz	50	50	50	50	50	50	50	50	50
COS ϕ	0.89	0.91	0.90	0.85	0.80	0.82	0.90	0.91	0.92
THD _v	0.7%	0.8%	0.6%	0.4%	1.0%	1.1%	1.1%	1.5%	0.6%
THD _i	3.8%	4.0%	1.1%	1.7%	5.7%	8.5%	17.2%	13.4%	9.1%
3 rd %	1.9	1.0	1.7%	2.2	5.0	4.2	8.9	5.8	3.7
5 th %	3.8	4.1	0.6%	0.7	13.1	10.0	21.5	12.3	4.4
7 th %	4.3	3.9		0.4	10.5	6.8	13.6	5.7	5.8
9 th %									
11 th %		2.5			2.4	5.2	4.2	5.8	6.0
13 th %		1.8			2.9	2.5	3.7	3.7	4.3
15 th %									
17 th %						2.0	1.2	2.1	3.0
19 th %						1.2	2.2	2.1	3.3
21 st %									
23 rd %						1.1	2.2	3.0	1.0
25 th %						1.5	1.0	1.4	
27 th %									
29 th %									
31 st %								1.0	

上表中各次谐波分量空白处均为<1.0%。

结语：随着许多电力电子产品在电力系统中的使用，谐波污染已成为现代配电系统中一个相当普遍的问题。治理谐波污染的有效途径是：对于新设计的配电系统，应根据所供含有谐波源的负荷容量、台数、性质等

进行必要的谐波计算，如某次(某几次)谐波含量超过国家标准允许值，即应采取有效的治理措施；对于已运行的配电系统，如新增加了某些谐波源负荷，特别是出现了电容器异常损坏、变压器异常发热、电子信息系统误动作等现象，就很可能是谐波污染所引起，解决办法是用符合标准要求的谐波测量仪器，进行实际测量，找出本系统中各次谐波(电流和电压)的具体含量，如超过国家标准允许值(有时是接近国家标准允许值)，就应采取治理措施。我国现行有效抑制谐波的设备，主要是非调谐式无源滤波器、组合滤波器和有源滤波器，前者用于针对系统中最低次谐波，目的是保证补偿、抑制谐振，缺点是滤波效果较差，一般石化企业低压系统因变频调速装置产生以5次为主的谐波，采用非调谐式滤波补偿后，其电能质量参数可以达到国标要求；后者用于系统中可能有几种谐波次数超标或谐波次数可能发生变化的情况，有源滤波器可实现动态跟踪补偿，滤波效果最佳，用于对电能质量要求很高的场所，但此设备价格较昂贵。

总之，在我国电力资源日趋紧张的形势下，减少谐波污染、保证合理用电，由传统的粗放型用电向科学的、合理的、精细量化的用电发展，是解决电能危机的发展方向之一。因而节约能耗、运行稳定，安全、经济、平稳，成为配电系统，尤其是国民经济重要组成部分的石油化工产业配电系统的一个重要主题。