

[电力系统]

电力系统谐波危害及其治理措施的分析

文/淮南煤矿勘察设计院 陈必荣

随着人们生活水平的提高以及现代工业的发展，在人们对电能需求量日益增加的同时，对供电质量的要求也越来越高。但是，大量的电力电子设备在给人们生活提供便利的同时，也导致非线性负载越来越多，大量的谐波电流注入电网，造成电压正弦波形畸变，使电能质量下降，给发供电设备及用户用电设备带来严重危害。叙述了电力系统中谐波的产生原因，并详细阐述了谐波的危害及允许标准，最后介绍了电力系统谐波的研究现状以及常见的抑制措施，并通过实际应用例子来说明谐波抑制措施的有效性。

目前，世界各国电力工业中，几乎都是采用正弦供电方式。在理想的电力系统中，电源以单一恒定频率（50 Hz或60 Hz）的正弦变化规律向电网供电，系统中各点的电流、电压都是以单一恒定的供电频率随时间按正弦规律变化的量。一般来说，一个实际的电力系统基本上能满足理想电力系统的条件。但随着技术的发展，电力系统中的非线性负载的比重不断增加，理想电力系统的近似程度变差，直接表现是电力系统中的电流和电压波形产生畸变。

在早期的电网中，电力传输线路中谐波含量并不高，可以忽略不计，但是随着科技的进步，现代电网中谐波的含量比例越来越高。电网谐波主要来自于3个方面：一是发电源质量不高产生谐波；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。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，发电源多少也会产生一些谐波，但一般来说很少。输配电系统中主要是电力变压器产生的谐波，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，这样就使得磁化电流呈尖顶波形，因而含有奇次谐波。用电设备产生的谐波是由与电力系统相连的各种非线性负载产生的。这些非线性负载主要是整流器、交流调压电路以及频率变换器等电力电子装置，由于这些电力电子装置都为可变结构非线性电力负荷，工作于非线性状态，在高效利用电能的同时也向电网注入大量的非线性电流，给公共电网的电能质量带来了隐患。近些年来，国内期刊和有关会议上发表的谐波相关问题的研究论文也非常多，谐波问题已经成为研究热点。

电力系统谐波的危害

谐波电流和谐波电压的出现，对公用电网是一种污染。在电力电子设备广泛应用以前，人们对谐波及其危害就进行过一些研究，并有一定认识，但那时谐波污染还不严重，没有引起足够的重视。近几十年来，各种电力电子设备的迅速普及和广泛应用是使谐波污染日趋严重，由谐波引起的各种事故不断发生。由此，谐波危害的严重性才引起人们的高度重视。电力系统中谐波的危害是多方面的，概括起来有

以下几个方面：

1. 对供电线路的危害

(1) 影响线路的稳定运行。供配电系统中的电力线路与电力变压器一般采用电磁式继电器、感应式继电器或晶体管继电器予以检测保护，使得在故障情况下保证线路与设备的安全。但由于电磁式继电器与感应式继电器在谐波含量较高时又导致继电器保护误动作，因而在谐波影响下不能全面有效地起到保护作用。

(2) 影响电网的质量。电力系统中的谐波能使电网的电压与电流波形发生畸变。如民用配电系统中的中性线，由于荧光灯、调光灯、计算机等负载，会产生大量的奇次谐波。

2. 对电力设备的危害

(1) 对电力电容器的危害。当电网存在谐波时，投入电容器后其端电压增大，通过电容器的电流增加得更大，使电容器损耗功率增加。

(2) 对电力变压器的危害。谐波使变压器的铜耗增大，其中包括电阻损耗、导体中的涡流损耗与导体外部因漏磁通引起的杂散损耗都要增加。谐波还使变压器的铁耗增大，这主要表现在铁心中的磁滞损耗增加，谐波使电压的波形变得越差，则磁滞损耗越大。除此之外，谐波还导致变压器噪声增大，变压器的振动噪声主要是由于铁心的磁致伸缩引起的，随着谐波次数的增加，振动频率在1 kHz左右的成分使混杂噪声增加，有时还发出金属声。



图1 谐波导致的电容器鼓胀图

(3) 对电力电缆的危害。由于谐波次数高频率上升，再加之电缆导体截面积越大趋肤效应越明显，从而导致导体的交流电阻增大，使得电缆的允许通过电流减小。另外，电缆的电阻、系统母线侧及线路感抗与系统串联，提高功率因数用的电容器及线路的容抗与系统并联，在一定数值的电感与电容下可能发生谐振。

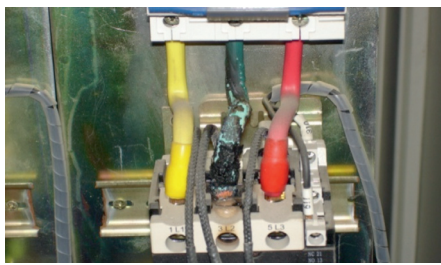


图2 谐波导致的电缆损坏图

(4) 对用电设备的危害。对电动机的危害：谐波对异步电动机的影响，主要是增加电动机的附加损耗，降低效率，严重时使电动机过热。尤其是负序谐波在电动机中产生负序旋转磁场，形成与电动机旋转方向相反的转矩，起制动作用，从而减少电动机的出力。另外电动机中的谐波电流，当频率接近某零件的固有频率时还会使电动机产生机械振动，发出很大的噪声。

(5) 对低压开关设备的危害。对于配电用断路器来说，全电磁型的断路器易受谐波电流的影响使铁耗增大而发热，同时由于对电磁铁的影响与涡流影响使脱扣困难，且谐波次数越高影响越大；热磁型的断路器，由于导体的趋肤效应与铁耗增加而引起发热，使得额定电流降低与脱扣电流降低；电子型的断路器，谐波也要使其额定电流降低，尤其是检测峰值的电子断路器，额定电流降低得更多。

(6) 对弱电系统设备的干扰。对于计算机网络、通信、有线电视、报警与楼宇自动化等弱电设备，电力系统中的谐波通过电磁感应、静电感应与传导方式耦合到这些系统中，产生干扰。

(7) 影响电力测量的准确性。目前采用的电力测量仪表中有电磁型和感应型，它们受谐波的影响较大。特别是电能表（多采用感应型），当谐波较大时将产生计量混乱，测量不准确。

电力系统谐波抑制措施及应用举例

电力电子装置在运行过程中必然会产生各次谐波。根据现有的技术水平，要求它们不产生任何谐波是不现实的。但是，如果谐波限制在一定范围内，使谐波干扰的影响很小，在工程上是可以接受的。为此，我国制定了谐波容许水平，并作为标准实施。在介绍标准之前首先介绍衡量谐波的两个参数。

(1) 总正弦波形畸变率（Total Harmonic Distortion, THD），简称总畸变率。其定义为：

总电压畸变率

$$THD \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2}}{U_1} \times 100\% = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{U_k}{U_1}\right)^2} \times 100\% \quad (1)$$

总电流畸变率

$$THD \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} \times 100\% = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{I_k}{I_1}\right)^2} \times 100\% \quad (2)$$

而k次谐波的电压畸变率 (Harmonic Distortion, HD) 或称谐波含有率 (Harmonic Ratio, HR) 为

$$HD = (U_k/U_1) \times 100\% \quad (3)$$

(2) 相对谐波含量 (Relative Harmonic content, RH), 其定义为

$$RH = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{U_k}{U_1}\right)^2}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{U_k}{U_1}\right)^2}} \times 100\% = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} U_k^2}} \times 100\% \quad (4)$$

它们之间的关系为

$$\frac{THD}{RH} = \sqrt{1 + THD^2} \quad (5)$$

谐波治理的措施主要有三种: 一是受端治理, 即从受到谐波影响的设备或系统出发, 提高它们抗谐波干扰能力; 二是主动治理, 即从谐波源本身出发, 使谐波源不产生谐波或降低谐波源产生的谐波; 三是被动治理, 即外加滤波器, 吸收谐波源产生的注入电网的谐波, 或者阻碍电力系统的谐波流入负载端。

受端治理的措施包括: ① 选择合理的供电方式。将谐波源由较大容量的供电点或由高一级电压的电网供电, 可以减小谐波对系统和其他用电设备的影响, 这必须在电网规划和设计阶段考虑。② 避免电容器对谐波的放大。改变电容器的串联电抗器, 或将电容器组的某些支路改为滤波器, 或限定电容器组的投入容量, 可以有效地减小电容器对谐波的放大并保证电容器组的安全运行。③ 提高设备抗谐波干扰能力。改进设备性能, 使其在谐波环境中能够正常工作, 当然这是有一定限度的, 谐波较大时设备仍将受到严重影响。④ 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, 这能够保证在谐波超标情况下, 设备不致于损坏, 但不能保障设备的正常工作。

主动治理谐波是在设计电力电子装置时, 通过改进技术手段等方法来优化其性能, 达到减少谐波干扰的目的。整流装置是供电系统的主要谐波源之一, 对于整流装置可采用增加整流装置的相数, 即多脉整流又称多重化技术, 是抑制谐波干扰的有效手段。但是24脉及24脉以上的多脉整流器, 变压器连接复杂, 容量也不能充分利用, 成本高。因此小功率电力电子装置, 多用6脉整流, 中等容量的电力电子装置, 约在1 500 kV·A以下, 宜用12脉整流, 大容量电力电子器件则根据实际情况选用24脉及以上的整流。

被动法是电力电子装置已经产生了大量谐波, 如何使谐波少流入电网即采用滤波器对谐波进行补偿, 用可关断电力电子器件和PWM技术减少谐波干扰。

常见的电力系统谐波抑制措施包括:

(1) 无源功率滤波器。通常是利用LC电路进行滤波, 主要是用电容器为高次谐波提供低阻抗的分流电路。这一技术比较成熟, 它的优点也很明显: 电压可以做得较高, 容量可以做的较大; 在吸收高次谐波的同时, 可以补偿无功功率, 改善功率因数; 结构简单, 维修方便, 成本较低; 运行可靠, 技术比较成熟, 操作人员较成熟。工程上可以把无源功率滤波器和无功补偿装置结合起来, 同时改善功率因数, 以取得较好的经济效果。

(2) 有源功率滤波器。原理是用一个逆变器产生一个与电网谐波电流反相的补偿电流, 注入电网, 以抵消电力电子装置产生的谐波电流干扰。有源功率滤波器用一台装置可以处理单个高次谐波或者多个高次谐波; 如果高次谐波的发生量增加, 由于本装置能控制使其不超过额定电流, 所以不会发生过载和损坏。

(3) 有源和无源功率滤波器结合的混合功率滤波器。混合功率滤波器就是将无源滤波器和无源滤波器串联, 再并联于电网, 以补偿谐波的一种滤波器。无源功率滤波器承担主要的补偿容量, 有源功率滤波器用来改善无源功率滤波器的特性。

下面将针对某电厂的谐波情况进行评估和治理。为了评估该厂的谐波情况, 监测点选在10 kV侧高压计量柜, 采集了一定时间的10 kV进线的 U_{ab} 、 U_{bc} 和 U_{ca} 三个线电压以及A

相和C相电流，采样频率为4 800 Hz，每隔1 min记录一次，每次记录时长为0.25 s，分析结果取95%的概率值。监测所得波形如图3和图4所示。

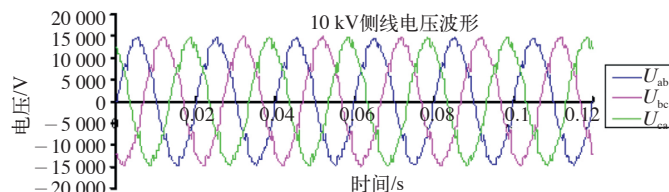


图3 电压监测波形

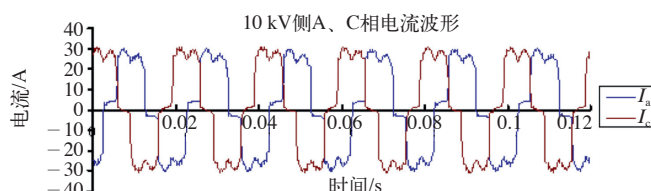


图4 电流监测波形

对于图3和图4所示的监测波形，其中谐波分析的每个数据分析段为960个采样点（即10个周期，频率分辨率为5 Hz）。其有效值计算结果如表1所示。

表1 有效值计算结果

U_a	U_b	U_c	I_a	I_c
9937.9	9945.28	9901.51	21.84	22.79

通过上文中的公式可以计算出该站点所监测到的波形总谐波畸变率如表2所示。

表2 波形总谐波畸变率

$THD_{U_{ab}}$	$THD_{U_{bc}}$	$THD_{U_{ca}}$	THD_{I_a}	THD_{I_c}
6.839	7.707	7.846	27.091	26.931

各次电压电流谐波含有率见表3所示。

表3 各次电压和电流谐波含有率

谐波次数	$U_{ab}(\%)$	$U_{bc}(\%)$	$U_{ca}(\%)$	$I_a(\%)$	$I_c(\%)$
2	0.04	0.043	0.044	0.337	0.294
3	0.488	0.478	0.317	1.472	0.935
4	0.028	0.02	0.019	0.125	0.109
5	3.621	3.642	3.843	21.888	21.983
6	0.023	0.026	0.017	0.064	0.055
7	1.503	1.439	1.795	9.4	8.706
8	0.014	0.015	0.016	0.05	0.055
9	0.352	0.25	0.253	1.069	0.373
10	0.02	0.022	0.018	0.058	0.077
11	2.577	2.824	2.548	7.153	7.704
12	0.021	0.02	0.026	0.054	0.075
13	2.081	1.812	2.413	5.602	5.037
14	0.025	0.024	0.026	0.052	0.056
15	0.638	0.433	0.537	1.023	0.242
16	0.035	0.033	0.026	0.057	0.065
17	2.668	3.148	1.967	3.997	4.609
18	0.039	0.039	0.036	0.057	0.06
19	2.111	1.798	3.052	4.024	3.473
20	0.067	0.085	0.075	0.127	0.107
21	0.45	0.246	0.578	1.021	0.195
22	0.053	0.081	0.082	0.141	0.131
23	1.051	2.585	1.828	2.668	3.257
24	0.018	0.033	0.033	0.053	0.048
25	0.609	1.559	1.892	3.136	2.591

由表3可知谐波电压以5、7、11、13、17、19、23次为主，谐波电压THD和5次谐波电压均已超过国家标准；谐波电流以5、7、11、13、17、19、23次为主，其中5、7、11、13次谐波电流最为突出。

为了对该厂的谐波进行控制，投入了滤波装置。投入滤波装置前后电能质量的对比如表4所示。

表4 各次电压和电流谐波含有率

	投容前	投容后	滤波效果
五次谐波电流/A	292	61	79.1%
七次谐波电流/A	38	18	52.6%
十一次谐波电流/A	66	31	53.0%
基波电流/A	928	653	—
功率因数	0.657	0.981	—
电压畸变率(%)	9.7	4.0	—

通过表4，我们能够发现投入滤波装置后，电压畸变率和各次谐波电流均符合国家标准，电能质量明显改善。

结束语

综上所述，随着越来越多的非线性大功率电子装置的应用，电力系统中谐波问题越来越严重。因此，研究抑制消除电力系统中的谐波，确保电力系统能安全稳定运行是十分必要的。同时，人们对环境保护意识的提高，要求净化电网，形成一个“绿色”电网。有源电力滤波器具有良好的谐波抑制效果，系统控制灵活，具有很大发展潜力。然而，现在虽然有源功率滤波器效果较好，但是因为电子器件功率容量的限制，其价格高。谐波抑制是一个长期的综合性的治理过程，只有各个方面都严格按照规定标准执行，才能既减少电能损耗，又能保证电气设备安全稳定运行。EA

(收稿日期：2015.04.16)

(编辑：白文亭)