

配电系统谐波抑制治理设计

随着电力系统的迅速发展,各种非线性负荷应用的普及,电网谐波污染日益严重,电能质量和谐波治理问题已成为国内外广泛关注的课题。主要阐述了谐波电流允许值、谐波限值、谐波污染及其危害以及谐波治理方法,并对谐波产生源的电气设备和治理设计方法作了具体分析。

马益平/国网宁波供电公司北仑运检站 陈士华/国网台州路桥供电公司
方健美/浙江东禾工程设计有限公司

0 引言

电源质量一般反映在电源频率、电源幅值和电源波形失真等方面。理想的电力系统应具有恒频、恒正弦波形,并根据电网电压标准,为电网和电力用户提供较为理想的供电电源。

电力系统的振幅和频率,波形畸变是由非线性负载引起的。对于电阻、电阻加热导线、磁感应和白炽灯等传统线性负载,其电流波形是正常正弦波。至于日光灯、电视、家用视听设备、焊接设备、复印机、变频设备、中频电炉、超声波设备、计算机、通信设备、充电电器和不间断电源等非线性负载电流波形为非正常的正弦波。由于电网和电力用户的非线性负荷,产生了大量的谐波。谐波的存在,使电动机的效率降低,增加了电动机的工作噪声;由于谐波的存在使得变压器的铁损耗和铜损耗增加,影响了电力变压器的效率,缩短了其使用寿命;谐波的存在使得电网电压下降,线路损耗增加,导致电力容量的浪费。因此,配电系统谐波抑制和治理势在必行。



马益平/高级工程师

关键词/Keywords

电能质量 ·
谐波治理 ·
谐波抑制 ·
容量设计 ·

1 谐波的表示方法

从严格的意义来讲,谐波是指电流中所含有的频率为基波的整数倍的电量,一般是指对周期性的非正弦电量进行傅立叶级数分解,其余大于基波频率的电流产生的电量。

研究谐波失真的一种有效方法是傅立叶分解,用傅立叶分解法分析各分量的畸变波形,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。

用单次谐波失真表示单次谐波,单次电流含有率为

$$HRI_h = \frac{I_h}{I_1} \times 100\% \quad (2)$$

单次电压含有率为

$$HRU_h = \frac{U_h}{U_1} \times 100\% \quad (3)$$

周期性交流量中的谐波含量的方均根值与其基波分量的方均根值之比(用百分数表示)。电压总谐波畸变率以 THD_u 表示,电流总谐波畸变率以 THD_i 表示。

$$THD_i = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \quad (4)$$

式中, I_h 为第 h 次电流谐波有效值。

$$THD_u = \frac{1}{U_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2} = \sqrt{\left(\frac{U_{rms}}{U_1}\right)^2 - 1} \quad (5)$$

式中, U_h 为第 h 次电压谐波有效值。

2 谐波电流允许值和谐波限值

针对谐波功率的影响，国内外相继公布了相应的标准，并制定了相应的措施来限制电力谐波，以避免其对电力用户和电网的危害^[1-4]。

例如，限制公共电网谐波的GB/T 14549—1993、IEEE 519—1992、GB/T 24337—2009、IEC 61000—3—4、IEC 61000—3—2、GB/Z 17625.6—

2003和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不干扰其他系统，使其处于正常状态；②根据用户需求的电压波形，向用户提供电源，满足用户的需求；③根据系统的允许值及其连接设备，在一定范围内控制电力系统电流和电压波形的畸变^[5]。

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，如表1所示。

表1 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/MV·A	不同谐波次数的谐波电流允许值/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

表2 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	4.0	3.2	1.6
10			
35	3.0	2.4	1.2
66			
110	2.0	1.6	0.8

3 电力系统谐波的危害

谐波对电力系统的危害主要体现在以下几方面。

1) 对部分电缆线路的影响。由于表面效应和近距离效应，线路电阻随着频率的增加而增加，导致电能的损耗和浪费；高频谐波可能导致集肤输电电流效应，降低电缆的能力；此外，谐波电流可能导致线路过载和过热，损坏导体绝缘。

2) 谐波影响电力电容器的正常工作。基波电压和谐波电压叠加时，将增加每个周期的局部放电，每个周期的局部放电的功率也相应增加。此外，谐波频率敏感的电力电容器，由于其自身的

特性，电容阻抗以及频率和成反比的谐波电流的电容特性，通过吸收热量导致电力电容器和电容器过载。

3) 谐波影响各种电动机的正常工作。谐波电流的存在会使电力变压器产生额外的损耗，造成过载和过热，加速绝缘介质的老化，造成绝缘损坏。正序和负序谐波电流在旋转电动机定子中形成正、反向旋转磁场，导致效率低、发热高。

4) 谐波影响各种电子通信设备的正常工作。谐波电流和谐波电压影响通信和通信设备，一般通过磁感应、电容耦合、电感应和电传导等途径，会对低频信号产生较大的影响。例如，高压脉冲在换相器和其他电气设备注入含有较高的谐波频率，这些谐波会影响通信设备和通信线路的正常运行，甚至造成通信系统的瘫痪^[6]。

5) 谐波影响变压器的正常工作。在高次谐波电压的作用下，变压器将产生集肤效应和近距离效应，在绕组中增加铜消耗，增加铁耗。此外，在多个零序电流中，有3的倍数的谐波将会产生一个在连接绕组上的循环电流，这可能会导致绕组电流超过额定值^[7]。对于非对称负载的变压器，如果负载

电流包含直流分量，则会导致变压器磁路的饱和，从而大大增加交流励磁电流的谐波分量^[8-9]。

4 谐波的治理措施

合理选择配电系统应遵循以下原则：有效隔离线性负荷和非线性负荷供电。尽量在供电侧设置非线性负荷。

1) 谐波源合理分配，同一段母线上宜与互补谐波源设备相连接，达到互调的目的。

2) 对于系统中重要的电气设备，谐波含量较高的（MRI机器、CT机、X加速器、整流器、逆变器和大型计算机系统等）应设计专路供电。

3) 单相负荷、两相负荷和其他不对称负荷分散到不同的供电点，或均匀分布到各阶段，以提高三相不平衡，达到抑制和控制谐波的目的。三相不平衡导致电压不平衡，不平衡电压将导致半导体变换器的额外谐波电流（非特性谐波），因此三相平衡具有一定的抑制谐波效应。Dyn11型三相变压器具有抑制高谐波的特点，而Dyn11可以作为电力变压器选型的首选。

当谐波电压超过连接点的限制，出现更高的谐波源自然功率因数（如核磁共振机、变频调速器等电器设备），谐波治理按照以下原则。

1) 使用专用变压器或专用配电线路供电。

2) 配电变压器仅为少数重要的非线性设备供电时，必须在适当的位置安装电源滤波器，或选择具有谐波抑制功能的设备来约束和控制产生谐波源的电气设备。

3) 当非线性负荷容量在总容量中占比较大时，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安装有源电力滤波器。

对于频谱特性大、复杂、自然功率因数低、负载稳定、谐波含量高的3次、5次和7次倍数的谐波源，抑制谐波源可采用有源和无源滤波器共同完成。有源电力滤波器可以跟踪谐波的幅值和频率，补偿特性不受电网阻抗和运行状态的影响，不存在谐波放大的危险。无源电力滤波器由滤波电容、电阻和电抗器组成，其包括三种基本形式：并行滤波、串联滤波和低通滤波。并联滤波

器与谐波源并联，不仅具有滤波效果，还具有无功补偿功能，串联滤波器主要适用于3次谐波，低通滤波主要适用于高次谐波。该方法的主要缺点是：补偿特性受电网阻抗和运行状态影响，可以补偿谐波的固定频率，容易并联谐振系统，导致谐波放大，造成无源滤波器过载甚至烧毁。

电力设备投运前应设置谐波隔离抑制装置。配电线路上的变频设备应安装在受控设备附近。在靠近干扰源（如不间断电源、家用影音设备、气体放电灯、逆变器、配电变压器和逆变器等）附近放置敏感信息技术设备是不合适的。

电力系统谐波干扰包括系统外部谐波干扰和系统内部谐波干扰。系统内部谐波干扰属于电力内部，应主要抑制和过滤。系统外部谐波干扰属于电力系统的外部，因此有必要避免发生串联谐振；5次、7次谐波干扰应避免串联谐振。

5 谐波抑制治理的设计

5.1 谐波电流的估算

由于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以下公式，即

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

式中， U_s 为变压器低压侧额定电压，kV； S_R 为变压器额定容量，kV·A； 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 的取值如表3所示。

表3 电流总谐波畸变率表

建筑类型	典型THD(%)	主要谐波源
办公	15	计算机、电梯、空调器、节能灯和办公类用电设备
通信	35	大功率UPS、开关电源
金融	20	电梯、UPS、电子设备和空调
医疗	20	CT、X光机、UPS、重要医疗设备、核磁共振设备和加速器等
公共建筑	25	空调、可控硅调光系统和UPS
工业	20	直流调速驱动、变频驱动
水处理	25	变频器、软起动器

5.2 谐波补偿装置的容量估算和选型

设备可根据估计的谐波电流值选择，也可根据常用连接点（PPC）或内部连接点（IPC）进行技术和经济上的合理选择。

1) 无源滤波器结构简单, 成本低, 但滤波性能不好, 有源滤波器正好相反。因此, 一个无源和有源滤波器可以组合用来完成谐波治理。无源滤波器补偿吸收更多的固定无功功率和高频谐波成分, 和补偿的快速低谐波无功功率和频率影响有源滤波器。在这种模式下, 有源滤波器仍然起到谐波补偿的作用, 无源滤波器滤除大部分谐波, 有源滤波器的容量很小。

2) 采用无源滤波电子器件, 根据每kvar, 按0.2~0.3系数, 计算谐波电流和无功功率容量转换(当非线性负荷较大时, 取0.25)。例如, 300 kvar的无功功率, 其谐波消除无功补偿电流约为432 A, 按系数0.25折算, 然后108 A的谐波电流可抑制。

3) 可根据谐波电流的估计值设计和选择有源滤波器电子器件。

4) 计算实例如下: 某市医疗建筑, 配电变压器容量为1 250 kV·A时, 总谐波失真率为20%, 配电变压器负载比为0.8, 配电变压器比为10/0.4 kV, 按照上述公式, 谐波电流值为283 A。根据配电变压器的容量计算谐波消除无功补偿能力。当谐波消除无功补偿装置取400 kvar时, 补偿电流为576 A, 谐波电流按系数0.3计算, 即173 A。然而, 谐波消除无功补偿只能在一定范围内抑制谐波的一部分, 因此必须满足系统的谐波要求。选择谐波消除无功补偿是不够的, 需要三相有源滤波器来满足系统标准。考虑到谐波消除无功补偿对部分谐波电流进行了滤波, 并根据计算得到的110 A计算了未滤波的谐波电流。根据要求选择

的三相有源滤波器的容量为100~150 A，谐波可以被抑制。

6 结束语

由于使用电气、电子设备，人们的生活更加方便和高效。但是大量的电气、电子设备的使用也增加了谐波的危害。简而言之，谐波治理是一个长期综合性的过程，只有各方面严格按照颁布标准执行，才能有效减少谐波带来的危害。特别是在设计阶段，应该采用有效的设计方法，配置合理的补偿设备和容量，积极进行谐波治理控制，以降低功耗，确保电气设备的安全稳定运行。

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] DBJ/T 11—626—2007 建筑物供配电系统谐波抑制设计规程[S].
- [5] 刘伟. 谐波抑制对无功补偿的分析[J]. 电器与能效管理技术, 2016(24): 76-80.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 熊杰锋, 李群, 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.

(收稿日期: 2017-06-29) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告