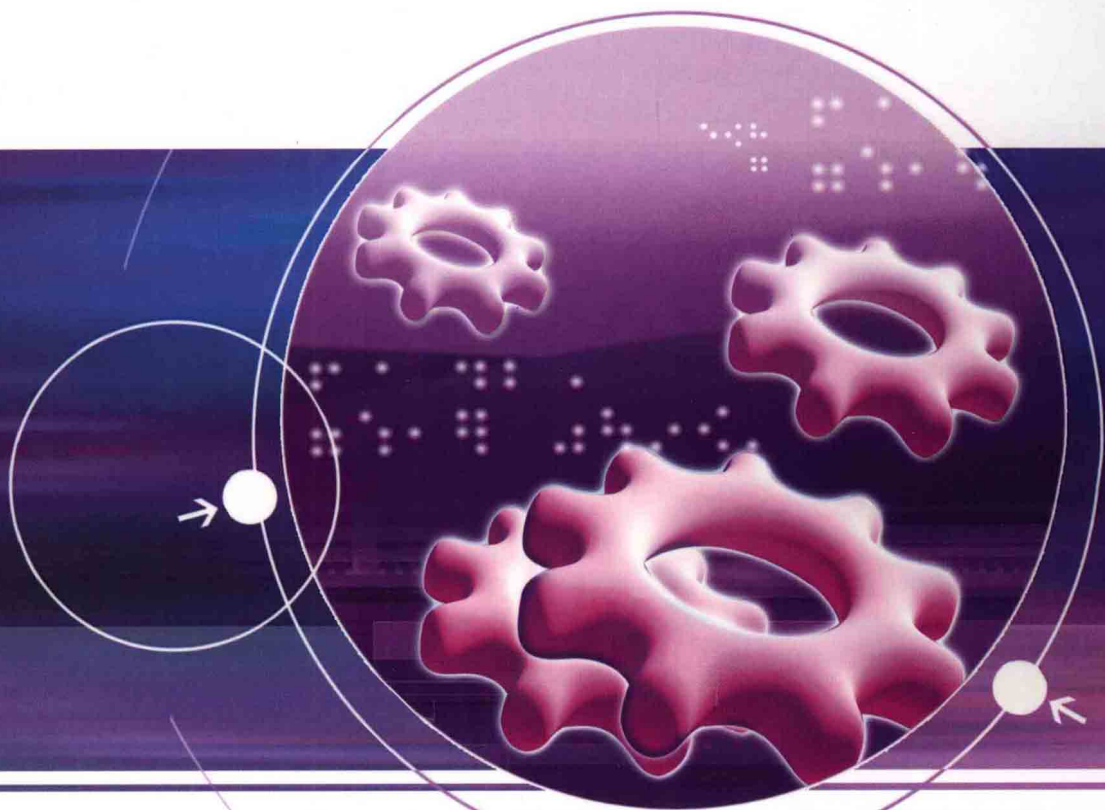


电源系列

电力电子

滤波技术及其应用



◎ 曲学基 曲敬铠 于明扬 等编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

电源系列

电力电子滤波技术及其应用

曲学基 曲敬铠 于明扬 等编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

随着工业化和信息化进程的快速发展和电力电子技术的广泛应用,谐波抑制和无功功率补偿越来越受到关注。本书从谐波和无功功率的基本概念讲起,指出了谐波的危害和无功功率的影响,并着重介绍了各种电力电子滤波器的工作原理和控制方式,对无功功率补偿的原理和几种补偿装置也作了简单的介绍,最后给出了几个实例说明电力电子滤波器的应用。本书力求简洁易懂、注重实用。

本书的对象为电力电子技术、自动化技术以及从事电力电子设备制造和电力系统领域的工程技术人员,也可作为大专院校有关专业师生的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子滤波技术及其应用/曲学基等编著. —北京:电子工业出版社,2008.10
(电源系列)

ISBN 978-7-121-07440-0

I. 电… II. 曲… III. 电力系统—电子电路—滤波器 IV. TN713

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 150274 号

责任编辑:魏永昌 特约编辑:李云霞

印 刷:北京东光印刷厂

装 订:三河市万和装订厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:20.5 字数:525 千字

印 次:2008 年 10 月第 1 次印刷

印 数:5 000 册 定价:39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

随着工业化和信息化进程的快速发展和电力电子技术的广泛应用,谐波抑制和无功功率补偿越来越受到关注。在大量电力电子装置中,采用了晶闸管(SCR)、功率场效应晶体管(MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管 IGBT 等大功率开关器件,使电力电子装置实现了高频化和小型化,电气性能大大提高,但随之而来的是产生高次谐波,对电网造成严重的污染。电力电子装置已成为电网的最主要的谐波源。特别是可控整流器和半可控整流器在绝大多数电力电子装置中被用于交流电能到直流电能的转换,所以减少整流器及其电磁元件对电网的谐波污染,已成为最炙手的研发课题。

为了保证电网不受或少受谐波的污染,以便对接入电网中的电气设备提供高质量的电能,国内外纷纷制定标准把电网的谐波电流和电压限制在允许范围内。对于治理电力电子装置对电网的谐波污染,除研发网侧高功率因数整流器以外,利用滤波装置吸收谐波源发出的谐波,是一种抑制谐波的有效的技术途径。

在电子电路中,滤波器早已得到广泛的应用。但对于电力系统中谐波的危害,在 20 世纪 70 年代以后,随着电力电子技术的快速发展,才引起世界各国的重视。但是,我国对谐波的研究比国外要晚二三十年。对于如何提高电网的供电质量和有源电力滤波器的研发,还是一个新课题。我国的有关专家已认识到谐波的危害,并在谐波抑制方面作了大量的工作,但有关这方面的著作却很少。期望本书的出版能起到抛砖引玉的作用。

无功功率补偿和谐波抑制是两个相对独立的课题,但两者之间又有联系。无功功率补偿包括对基波的无功功率补偿和对谐波的无功功率补偿两个方面。对谐波的无功功率补偿实质上就是谐波补偿。所以,本书将谐波抑制和无功功率补偿综合在一起讲述。

本书共分 10 章。第 1 章为谐波和无功功率。该章主要讲述谐波和无功功率的基本概念,介绍了谐波的危害和无功功率的影响,并提出了谐波抑制和无功功率补偿的方法,为下面的详细介绍做铺垫。第 2 章为无源滤波器。主要讲述 RC 滤波器和 LC 滤波器的结构和工作原理以及设计方法。第 3 章介绍了有源滤波器的分类,我们将其分为有源电子滤波器和有源电力滤波器,尽管这种分类方法不是非常严格,但是叙述起来比较方便。第 4 章~第 7 章介绍了各类有源电力滤波器的工作原理和控制方式,其中包括并联型有源电力滤波器、串联型有源电力滤波器、串并联型有源电力滤波器、混合型有源电力滤波器。第 8 章介绍电力电子滤波器的应用实例。第 9 章介绍无功功率补偿。本章重点介绍了无功功率补偿电容器和几种静止无功功率补偿装置的工作原理,其中包括晶闸管控制电抗器、晶闸管投切电容器和静止无功功率发生器,并对它们的性能作了对比。第 10 章介绍输入电流的整形技术。该章给出的电路为具有有源滤波功能的整流器电路。市电电网输入的非正弦电流会使整流电路的功率因数大大降低,反过来,整流器件的开关过程也会对电网造成污染。解决该问题的办法是滤波。本章介绍的整流电路具有输入电流的无源整形或有源整形功能,主电路和控制电路都比较简单。

本书由曲学基、曲敬锐、于明扬等编著,在编写过程中得到众多同事和朋友的帮助,在此一并表示感谢。由于编者能力有限,难免出现错误,请给予指正。

目 录

第 1 章 谐波和无功功率	(1)
1.1 谐波的基本概念	(1)
1.1.1 谐波分析	(2)
1.1.2 谐波的危害	(4)
1.1.3 谐波的抑制	(7)
1.2 无功功率的基本概念	(9)
1.2.1 功率因数	(9)
1.2.2 无功功率的影响	(10)
1.2.3 无功功率的补偿	(10)
第 2 章 无源滤波器	(12)
2.1 RC 滤波器	(12)
2.1.1 RC 滤波器的结构和工作原理	(12)
2.1.2 RC 滤波器的设计	(13)
2.2 LC 滤波器	(15)
2.2.1 LC 滤波器的结构和工作原理	(16)
2.2.2 LC 滤波器的设计	(18)
第 3 章 有源滤波器	(25)
3.1 有源电子滤波器	(25)
3.1.1 有源电子低通滤波器	(25)
3.1.2 有源电子高通滤波器	(28)
3.1.3 有源电子带通滤波器	(30)
3.1.4 有源电子带阻滤波器	(33)
3.1.5 状态可调的有源电子滤波器	(34)
3.2 有源电力滤波器	(37)
3.2.1 有源电力滤波器的工作原理	(37)
3.2.2 有源电力滤波器的主电路	(38)
3.2.3 有源电力滤波器的控制方式	(42)
第 4 章 并联型有源电力滤波器	(118)
4.1 并联型有源电力滤波器的工作原理	(118)
4.2 并联型有源电力滤波器的控制方式	(121)
第 5 章 串联型有源电力滤波器	(151)
5.1 串联型有源电力滤波器的工作原理	(151)
5.2 串联型有源电力滤波器的控制方式	(158)
第 6 章 串并联型有源电力滤波器	(164)
6.1 串联型有源电力滤波器与并联型有源电力滤波器的比较	(164)

6.2	串并联型有源电力滤波器的工作原理	(165)
6.3	串并联型有源电力滤波器的控制方式	(166)
第7章	混合型有源电力滤波器	(171)
7.1	混合型有源电力滤波器的工作原理	(171)
7.1.1	并联混合型有源电力滤波器的工作原理	(171)
7.1.2	串联混合型有源电力滤波器的工作原理	(199)
7.2	混合型有源电力滤波器的控制方式	(203)
7.2.1	并联混合型有源电力滤波器的控制方式	(203)
7.2.2	串联混合型有源电力滤波器的控制方式	(214)
第8章	电力电子滤波器的应用实例	(217)
8.1	电子滤波器在锁相放大器中的应用	(217)
8.2	并联型有源电力滤波器的应用实例	(219)
8.3	串联型有源电力滤波器的应用实例	(222)
8.4	串并联型有源电力滤波器的应用实例	(226)
8.5	混合型有源电力滤波器的应用实例	(231)
第9章	无功功率补偿	(234)
9.1	无功功率补偿电容器	(235)
9.1.1	无功功率补偿电容器的工作原理和补偿方式	(235)
9.1.2	无功功率补偿电容器的补偿容量和自动投切	(236)
9.1.3	无功功率补偿电容器和谐波的相互影响	(238)
9.2	静止无功功率补偿	(241)
9.2.1	静止无功功率补偿装置的分类	(241)
9.2.2	晶闸管控制电抗器(TCR)	(242)
9.2.3	晶闸管投切电容器(TSC)	(249)
9.2.4	静止无功发生器(SVG)	(252)
9.2.5	各种无功功率补偿器性能的比较 ^[3]	(260)
第10章	输入电流的整形技术	(261)
10.1	输入电流的无源整形技术	(262)
10.1.1	单相 LC 滤波器	(262)
10.1.2	三相 LC 滤波器	(264)
10.2	单相输入电流的有源整形技术	(265)
10.2.1	升压式(Boost)APFC 整流电路	(266)
10.2.2	降压式(Buck)APFC 整流电路	(268)
10.2.3	单端反激型(Flyback)APFC 整流电路	(269)
10.2.4	Boost 隔离型 APFC 整流电路	(271)
10.2.5	有无源钳位的 Boost 反激隔离型 APFC 整流电路	(273)
10.2.6	具有有源钳位和软开关的 Boost 反激隔离型 APFC 整流电路	(273)
10.2.7	ZVS 全桥式 APFC 整流电路	(273)
10.2.8	并联式单级 APFC 整流电路	(274)

10.3	三相输入电流的有源整形技术	(275)
10.3.1	三相 APFC 整流电路的基本电路	(275)
10.3.2	不解耦三相 APFC 整流电路	(276)
10.3.3	部分解耦三相 APFC 整流电路	(277)
10.3.4	全解耦三相 APFC 整流电路	(279)
10.4	APFC 的控制方法	(279)
10.4.1	电流峰值控制法	(279)
10.4.2	电流迟滞环控制法	(280)
10.4.3	平均电流控制法	(282)
10.5	APFC 集成控制电路	(283)
参考资料		(320)

第 1 章 谐波和无功功率

谐波抑制和无功功率补偿与电力电子装置有密切的关系。这是因为随着电力电子技术的快速发展,特别是大功率开关器件相继研发成功,并用于电力电子装置中,使电力电子装置成为最重要的谐波源,对电网造成严重的污染,降低了电网的供电质量,对同一电网上的其他用电设备造成不利的影响。这种影响的一个主要方面是网侧的功率因数大大降低,消耗大量的无功功率。所以,补偿谐波的装置同时也是无功功率补偿装置。通常,谐波补偿是通过滤波技术来实现的。虽然谐波抑制和无功功率补偿是两个相对独立的课题,但由于它们有着密切的关系,我们把两者都归入电力电子滤波技术之中,综合加以讲述。

1.1 谐波的基本概念

在电力系统中,理想的交流电压和交流电流的波形应该是标准的正弦波,即正弦波电压可表示为

$$u(t) = \sqrt{2}U\sin(\omega t + \theta) \quad (1-1)$$

式中 U ——正弦波电压 $u(t)$ 的有效值;

ω —— $u(t)$ 的角频率;

θ —— $u(t)$ 的初始相位角。

当式(1-1)表示的正弦波电压加到无源线性元件电阻、电感和电容上时,所产生的电流与电压的关系分别为比例、积分和微分关系,但其波形仍然是与电压同频率的正弦波。若正弦波电压加到非线性负载上时,由此产生的电流为非正弦波,该非正弦波电流在电网阻抗上产生非正弦波的电压降。对于周期为 $T=2\pi/\omega$ 的非正弦波电压 $u(\omega t)$,在满足狄里赫利条件时,可分解为如下形式的傅里叶级数:

$$u(\omega t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (1-2)$$

式中

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) d(\omega t) \\ a_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) \cos n\omega t d(\omega t) \\ b_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) \sin n\omega t d(\omega t) \\ &(n = 1, 2, 3, \dots) \end{aligned}$$

如果取

$$\begin{aligned} a_n &= c_n \sin \varphi_n \\ b_n &= c_n \cos \varphi_n \end{aligned}$$

则

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$\varphi_n = \arctan\left(\frac{a_n}{b_n}\right)$$

此时,式(1-2)可写成

$$u(\omega t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (1-3)$$

在式(1-2)和式(1-3)中,频率为 $f(=\omega/2\pi)$ 的分量称为基波,频率为 nf (n 为大于 1 的整数)的分量称为谐波, n 称为谐波次数。

通常,用谐波的含有率来表示谐波分量的比重。第 n 次谐波电压的含有率 HRU_n 定义为

$$\text{HRU}_n = \frac{U_n}{U_1} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 U_n ——第 n 次谐波电压的有效值;

U_1 ——基波电压的有效值。

另外,还可用谐波总畸变率来表示谐波分量对波形的影响。电压谐波的总畸变率 THD_u 定义为

$$\text{THD}_u = \frac{U_H}{U_1} \times 100\% \quad (1-5)$$

上式中的 U_H 称为谐波电压含有量,定义为

$$U_H = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} \quad (1-6)$$

同理,可以定义第 n 次谐波电流的含有率 HRI_n 、谐波电流的含有量 I_H 和电流谐波的总畸变率 THD_i 为

$$\text{HRI}_n = \frac{I_n}{I_1} \times 100\%$$

$$I_H = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}$$

$$\text{THD}_i = \frac{I_H}{I_1} \times 100\%$$

1.1.1 谐波分析

在谐波分析中,我们仅给出各种非正弦电压波形的第 n 次谐波分量的表达式。对于电流谐波来说,其结论是相同的。

1. 电压 $u(\omega t)$ 为奇函数

电压 $u(\omega t)$ 的波形相对于坐标原点对称的,满足 $u(-\omega t) = -u(\omega t)$,称为奇函数。从式(1-2)中可以看出,直流分量 a_0 和余弦项系数 a_n 均为零,在式(1-2)中只有正弦项,即

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} u(\omega t) \sin n\omega t d(\omega t)$$

$$(n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1-7)$$

$$u(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega t \quad (1-8)$$

2. 电压 $u(\omega t)$ 为偶函数

电压 $u(\omega t)$ 的波形相对于纵坐标是对称的, 满足 $u(-\omega t) = u(\omega t)$, 称为偶函数。从式(1-2)中可以看出, 正弦项系数 b_n 为零, 在式(1-2)中只包含直流分量和余弦项, 即

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u(\omega t) d(\omega t) \\ a_n &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} u(\omega t) \cos n\omega t d(\omega t) \\ &(n = 1, 2, 3, \dots) \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

$$u(\omega t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega t \quad (1-10)$$

3. 电压 $u(\omega t)$ 为对称函数

电压 $u(\omega t)$ 波形的正半波向右平移半个周期后, 正半波与负半波相对于横坐标对称, 满足 $u(\omega t + \pi) = -u(\omega t)$, 称为对称函数。从式(1-2)中可以看出, 直流分量 a_0 为零, 在式(1-2)中只包含基波分量和奇次谐波分量, 即

$$\left. \begin{aligned} a_n &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} u(\omega t) \cos n\omega t d(\omega t) \\ b_n &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} u(\omega t) \sin n\omega t d(\omega t) \\ &(n = 1, 3, 5, \dots) \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

$$u(\omega t) = \sum_0^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (1-12)$$

4. 电压 $u(\omega t)$ 为 1/4 周期对称函数

电压 $u(\omega t)$ 在正半周内, $\pi/2$ 处前后的波形相对于 $\pi/2$ 轴线对称, 满足 $u(\omega t + \pi) = -u(\omega t)$, 称为 1/4 周期对称函数。若选择不同的原点, 该函数可演变成奇函数或者偶函数。若按对称的奇函数来考虑, 则从式(1-2)可以看出, 直流分量和余弦项的谐波分量均为零, 在式(1-2)中只含有基波分量和奇次谐波中的正弦项, 即

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} u(\omega t) \cos \omega t d\omega t \\ b_n &= \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} u(\omega t) \sin n\omega t d\omega t \\ &(n = 1, 3, 5, \dots) \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

$$u(\omega t) = a_1 \cos \omega t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega t \quad (1-14)$$

上面的谐波分析适合于单相电路。对于三相电路来说, 分析方法基本相同, 可按每相单独进行分析。在对称三相电路中, 各相电压、电流依次相差 $2\pi/3$, 若以 A 相相电压 u_a 的初始相位角为零, 则三相相电压可表示为

$$\left. \begin{aligned} u_a &= u(\omega t) \\ u_b &= u\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ u_c &= u\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

那么,各相相电压所含的谐波为

$$\left. \begin{aligned} u_{an} &= \sqrt{2}U_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \\ u_{bn} &= \sqrt{2}U_n \sin\left(n\omega t - \frac{2n\pi}{3} + \varphi_n\right) \\ u_{cn} &= \sqrt{2}U_n \sin\left(n\omega t + \frac{2n\pi}{3} + \varphi_n\right) \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

对上述各相相电压谐波进行独立分析后,可以发现:

- 1) 当 $n=3k(k=1,2,3,\dots, \text{下同})$, 即 $n=3,6,9,\dots$ 时,三相相电压同次谐波的大小和相位均相同,为零序谐波;
- 2) 当 $n=3k+1$, 即 $n=4,7,10,\dots$ 时,B相电压谐波比A相电压谐波滞后 $2n\pi/3$,C相电压谐波比A相电压谐波超前 $2n\pi/3$,各个次数的谐波均为正序谐波;
- 3) $n=3k-1$, 即 $n=2,5,8,\dots$ 时,B相电压谐波比A相电压谐波超前 $2n\pi/3$,C相电压谐波比A相电压谐波滞后 $2n\pi/3$,各个次数的谐波均为负序谐波。

对于相电压来说,在三相三线制或三相四线制的电路中,相电压中含有零序谐波,即含有 $3,6,9,\dots$ 次谐波。而对于线电压来说却不含有零序谐波。

利用同样的方法来分析三相电流谐波时,可以得出:在三相三线制电路中,因为没有零序谐波电流的通路,所以不含有零序谐波电流。而在三相四线制电路中,这些零序谐波电流是从中线流过的。

以上分析仅适合于对称的三相电路。对于不对称三相电路来说,由于各相谐波之间是不对称的,其谐波的分析更为复杂。

1.1.2 谐波的危害

在20世纪70年代以前,由于电力电子设备还未得到广泛的应用,谐波所造成的危害未受到足够的重视。随着电力电子技术的高速发展和电力电子设备的普及,使谐波对电网的污染日趋严重,从而引起人们对谐波危害的高度关注。

谐波所造成的危害可以具体地归纳为以下几个方面。

1. 谐波对电网的污染

理想的电网所提供的电压应该是频率单一固定、电压幅值在允许的范围内。谐波对电网波形的污染使电网供电质量恶化,使同一电网上的用电设备受到严重影响,甚至危及用电设备的正常运行。谐波对电网的污染是谐波危害中相当重要的一个方面,下面所讲到的谐波造成的危害,有相当部分是由于电网供电质量恶化造成的。

2. 谐波引发各种电力电子设备出现故障

1) 谐波使系统中的元件产生附加的谐波损耗,除降低了发电、输配电和其他用电设备的效率以外,在三相四线制的电路中,由于大量的零序谐波电流,特别是3次谐波电流流过中线,

会引起中线过热,有引发火灾的危险。另外,异常的、过大的中线电流的增加,会导致电网中线对地线的电压突增,将危及数据处理系统的安全。

2) 谐波对于旋转电动机来说,除了增加损耗和引起发热以外,还会产生机械振动、噪声和谐波过电压,这对电动机的寿命造成严重的影响。

3) 谐波电流流入变压器,会增加变压器的铜损和铁损,引起变压器发热。谐波还会使变压器的噪声增大。

4) 谐波电流流经电力电缆,令电缆发生过热,长期的过热运行将导致电缆的绝缘老化,甚至产生漏电和短路现象。

3. 谐波引起谐振

为了补偿无功功率和滤除谐波,常常需要并联电容器,或者设置电容器和电感器组成的滤波器。由于谐波频率高于工频频率,会使系统的感抗增加而容抗减小,有可能产生 LC 谐振。谐振放大了谐波电流,使电容器或电感器烧毁。日本的资料表明,由于谐波引起谐振造成损坏的电气设备中,电容器损坏的占 40%,电感器损坏的占 30%。

4. 谐波造成继电器误动作,并影响电力测量

电力系统中的谐波将会使某些继电器和漏电保护开关产生误动作。

谐波对电压表、电流表和功率表等计量仪表的测量结果带来直接影响,特别是与收费有关的计量仪表的计量误差与人民生活有着密切关系。

5. 谐波对 IT 设备的危害

在计算机机房中,大量使用 PC、服务器、交换机等整流滤波型非线性负载,它们向电网注入零序电流,使电网受到污染。反过来,电网的低功率因数会影响 IT 设备的正常运行。

6. 谐波干扰通信系统

电力系统传输功率可达 MW 级,而通信系统的功率小到 mW 级,两者如此大的功率级差,导致电力系统中相对小的不平衡音频谐波分量,一旦耦合到通信线路上,可能在通信系统中产生很大的噪声。若在同一电网中存在多个中点接地,当有较大的零序谐波电流流过时,会严重干扰同一电网中的通信系统。噪声将降低通话的清晰度,甚至引起信号的丢失。统计资料表明,25 次以上的谐波分量达到一定的幅值时,就会对通信系统产生干扰,特别是与电力系统耦合紧密和对谐波干扰敏感的通信系统,在谐波的干扰下,极易产生工作失常。

为了减小谐波的危害,对谐波电压和谐波电流的允许值提出了要求。表 1-1 为公用电网谐波电压(相电压)限值。表 1-2 为注入公共连接点的谐波电流允许值。

表 1-1 公用电网谐波电压(相电压)限值

电网标称电压 (kV)	电压总谐波畸变率 (%)	各次谐波电压含有率(%)	
		奇次谐波	偶次谐波
0.38	5.0	4.0	2.0
6	4.0	3.2	1.6
10			

续表

电网标称电压 (kV)	电压总谐波畸变率 (%)	各次谐波电压含有率(%)	
		奇次谐波	偶次谐波
35	3.0	2.4	1.2
66			
110	2.0	1.6	0.8

表 1-2 注入公共连接点的谐波电流允许值

标称电压 (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
0.38	10	78	62	39	62	26	44	19	21	16	28	13	24
6	100	43	34	21	34	14	24	11	11	8.5	16	7.1	13
10	100	26	20	13	20	8.5	15	6.4	6.8	5.1	9.3	4.3	7.9
35	250	15	12	7.7	12	5.1	8.8	3.8	4.1	3.1	5.6	2.6	4.7
66	500	16	13	8.1	13	5.4	9.3	4.1	4.3	3.3	5.9	2.7	5.0
110	750	12	9.6	6.0	9.6	4.0	6.8	3.0	3.0	2.4	4.3	2.0	3.7

标称电压 (kV)	基准短路容量 (MVA)	谐波次数及谐波电流允许值(A)											
		14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
0.38	10	11	12	9.7	18	8.6	16	7.8	8.9	7.1	14	6.5	12
6	100	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	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	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	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	1.7	1.9	1.5	2.8	1.3	2.5	1.2	1.4	1.1	2.1	1.0	1.9

当公共连接点的最小短路容量与表 1-2 中的基准短路容量不同时,可按下式修正谐波电流允许值:

$$I_n = \frac{S_{k1}}{S_{k2}} I_{np} \quad (1-17)$$

式中 S_{k1} ——公共连接点的最小短路容量(MVA);

S_{k2} ——表 1-2 中的基准短路容量(MVA);

I_n ——短路容量为 S_{k1} 时的第 n 次谐波电流允许值(A);

I_{np} ——表 1-2 中的第 n 次谐波电流允许值(A)。

当第 n 次谐波电流分量 I_n (A) 和系统的第 n 次谐波阻抗 Z_n (Ω) 已知时,可用下式计算第 n 次谐波电压含有率 HRU_n :

$$HRU_n = \frac{\sqrt{3}Z_n I_n}{10U_N} \quad (\%) \quad (1-18)$$

式中 U_N ——电网的标称电压(kV)。

若 Z_n 未知,可用下式估算 HRU_n :

$$HRU_n = \frac{\sqrt{3}nU_N I_n}{10S_k} \quad (\%) \quad (1-19)$$

式中 S_k ——公共连接点的三相短路容量(MVA)。

当两个谐波源的谐波电流在同一条线路上流过时,若两个同次谐波电流之间的相位角已知,那么,这两个同次谐波电流在同一相上叠加后的总谐波电流可按下式计算:

$$I_n = \sqrt{I_{n1}^2 + I_{n2}^2 + 2I_{n1}I_{n2}\cos\theta_n} \quad (1-20)$$

式中 I_{n1} ——谐波源 1 的第 n 次谐波电流(A);

I_{n2} ——谐波源 2 的第 n 次谐波电流(A);

I_n —— I_{n1} 和 I_{n2} 叠加后的总谐波电流(A);

θ_n —— I_{n1} 和 I_{n2} 之间的相位角。

当相位角 θ_n 未知时,总谐波电流可按下式近似计算:

$$I_n = \sqrt{I_{n1}^2 + I_{n2}^2 + K_n I_{n1} I_{n2}} \quad (1-21)$$

式中的 K_n 可从表 1-3 中查找。

表 1-3 系数 K_n 的取值

n	3	5	7	11	13	9, >13, 偶次
K_n	1.62	1.28	0.72	0.18	0.08	0

若同次谐波电流叠加时,谐波源的数目大于 2 时,可将其中两个谐波电流按式(1-20)或式(1-21)叠加,再与第 3 个谐波电流叠加,以此类推。

多个同次谐波电压的叠加的计算公式与式(1-20)和式(1-21)类似。

若电网的同一个公共连接点上接有多个用电设备时,每个用电设备向电网注入的谐波电流允许值可按下式计算:

$$I_{ni} = I_n \left(\frac{S_i}{S_t} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (1-22)$$

式中 I_{ni} ——第 i 个用电设备的第 n 次谐波电流的允许值(A);

I_n ——表 1-2 给出或式(1-17)计算出的第 n 次谐波电流的允许值(A);

S_i ——第 i 个用电设备的容量(MVA);

S_t ——公共连接点的供电容量(MVA);

α ——相位叠加系数,见表 1-4。

表 1-4 相位叠加系数 α

n	3	5	7	11	13	9, >13, 偶次
α	1.1	1.2	1.4	1.8	1.9	2

1.1.3 谐波的抑制

谐波的抑制为专家和工程技术人员提出了一个重要的课题。一般来说,抑制谐波可从两个方面入手:一是减少谐波的产生,二是安装谐波补偿装置。

1. 减少谐波

电力电子装置是电力系统中最重要谐波源,而在电力电子装置中,整流器又占有最大的比例。所以,可将整流器视为主要的谐波源。减少谐波就是要使整流器不产生谐波,并且功率因数达到 1。这种整流器称为高功率因数整流器。

目前,高功率因数整流器多半采用 PWM 整流技术,有关 PWM 整流器的内容请参见本人编著的《电力电子整流技术及应用》一书的第 4 章。

2. 安装谐波补偿装置

1) LC 调谐滤波器

LC 调谐滤波器结构简单,它既可补偿谐波,又可补偿无功功率,是一种应用广泛的谐波补偿装置。LC 滤波器的作用是滤除高次谐波。一般情况下,单调谐滤波器用于滤除某个奇次谐波,若要滤除几个奇次谐波,则要相应地用几个单调谐滤波器并联;如果要滤除偶次谐波,则要采用偶次谐波滤波器;对于幅值较小的高次谐波,可以采用高通滤波器将其一并滤除。其缺点是只能对某一个固定频率的谐波进行补偿,若要对多次谐波进行补偿时,必须采用多个 LC 调谐滤波器,其结构变得相当复杂。另外,LC 调谐滤波器的补偿特性受电网阻抗的影响很大,极易与系统发生谐振,导致谐波电流放大,造成 LC 调谐滤波器被烧毁。

LC 调谐滤波器通常被称为无源滤波器。

2) 有源电力滤波器

有源电力滤波器是由 VMOS、IGBT 等开关器件组成的,采取 PWM 控制方式的谐波电流发生器,它可以产生幅值、相位和频率均可变的谐波电流,用以抵消电网中相应的谐波电流。另外,还可以用来补偿电网的无功功率。有源电力滤波器的优点是补偿特性不受电网阻抗的影响,并且能对谐波分量实现跟踪补偿,在电力系统中被广泛采用。

本书将对谐波补偿装置作重点介绍。

3. 提高短路容量比 R_{sc}

短路容量比 R_{sc} 的定义为交流电网的短路容量 S_c 与电网一侧基波分量视在功率 S_{1L} 之比,即

$$R_{sc} = S_c / S_{1L} \quad (1-23)$$

在整流器的设计和实际应用中,应尽量选取较高的 R_{sc} 值。

表 1-5 给出了推荐的最小短路容量比 R_{scmin} 值。

表 1-5 推荐的最小短路容量比 R_{scmin} 值

R_{scmin} THD _L (%)	$p=6$	$p=12$	$p=18$	$p=24$
1.0	231	150	106	99
1.5	154	100	71	66
3.0	77	50	35	33
5.0	46	30	21	20
8.0	29	19	13	12
10.0	23	15	10	9

表中列出的 R_{scmin} 适用于低压系统;对于中压系统, R_{scmin} 为本表数值的 3 倍;对于高压系统, R_{scmin} 为本表数值的 2 倍。

p ——整流器脉波数。THD_L 为总电压谐波系数

1.2 无功功率的基本概念

1.2.1 功率因数

在正弦电路中,有功功率 P 、无功功率 Q 和视在功率 S 可分别表示为:

$$\left. \begin{aligned} P &= UI \cos \varphi \\ Q &= UI \sin \varphi \\ S &= UI = \sqrt{P^2 + Q^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-24)$$

式中 U ——电压的有效值;

I ——电流的有效值;

φ ——电流滞后电压的相位角。

而在非正弦电路中,可以得到类似的表达式:

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \cos \varphi_n \quad (1-25)$$

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \sin \varphi_n \quad (1-26)$$

$$S = UI = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} \times \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (1-27)$$

在式(1-25)~式(1-27)中, n 为谐波次数。

在非正弦电路中, $S^2 \neq P^2 + Q^2$,引入畸变功率 D 后,得到

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (1-28)$$

在公用电网中,电压波形的畸变一般比较小,而电流波形的畸变比较大。为了讨论方便起见,可以认为电压波形为正弦波,电流波形为非正弦波,即电流为畸变电流,可以得到

$$\left. \begin{aligned} P &= UI_1 \cos \varphi_1 \\ Q &= UI_1 \sin \varphi_1 \\ P^2 + Q^2 &= U^2 I_1^2 \\ S^2 &= P^2 + Q^2 + D^2 = U^2 I_1^2 + U^2 \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \\ D^2 &= U^2 \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \end{aligned} \right\} \quad (1-29)$$

式中 U ——正弦波电压的有效值;

I_1 ——基波电流的有效值;

I_n ——第 n 次谐波电流的有效值;

φ_1 ——基波电流与电压的相位角差。

式(1-29)中, P 为基波电流产生的有功功率, Q 为基波电流产生的无功功率, D 为谐波电流产生的无功功率。此时,非正弦电路的功率因数可表示为:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{UI_1 \cos \varphi_1}{UI} = \frac{I_1}{I} \cos \varphi_1 = \gamma \cos \varphi_1 \quad (1-30)$$

式中的 $\gamma = I_1/I$ 为畸变因数,是基波电流有效值与总电流有效值之比, I 包括基波有功电流、

基波无功电流和畸变电流之和。 $\cos\varphi_1$ 为基波位移因数,它表明了基波电流相对于电压的相位移,也称为基波功率因数。可以看出,功率因数为畸变因数与位移因数的乘积。

若把基波无功电流和畸变电流视为谐波电流,式(1-30)可写成

$$\lambda = \frac{I_1^2}{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}} \cos\varphi_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + (\text{THD})^2}} \cos\varphi_1 \quad (1-31)$$

式中, $\text{THD} = \sqrt{\frac{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}{I_1^2}}$, 称为总畸变率。从式(1-31)可以看出,抑制谐波可以达到减小 THD 和提高 λ 的目的。

上面讲述的功率因数是对单相电路而言,对三相电路来说,除了畸变因数和位移因数外,还应考虑三相不对称对功率因数的影响。由于三相不对称,使三相电路的功率因数始终小于 1。

1.2.2 无功功率的影响

在 1.1.2 节中,我们已讨论过谐波的危害,其中包括谐波引起的无功功率的影响。下面仅就基波无功功率的影响加以阐述。

无功功率对供电电网的影响:

(1) 从式(1-24)可以看出,基波无功功率 Q 的增加,必将引起电网电流 I 和视在功率 S 的增加,也就是基波无功功率越大,要求电网的容量越高。

(2) 从式(1-30)和式(1-31)可以看出,无功功率的增加,必将引起网侧功率因数 λ 的降低,从而使畸变率 THD 增高。

(3) 无功功率是由非线性负载产生的,非线性负载的波动,将引起无功功率的波动,从而使电网电压产生波动。例如,工业用电弧炉除要消耗大量的无功功率外,由于电弧的不稳定,无功功率的波动很大,会产生频繁的无功功率冲击,使电网电压剧烈波动,可能使接在同一电网上的用电设备无法正常工作。

无功功率对电力电子装置的影响:

(1) 无功电流(无功功率)的增加,使总电流 I 增加, $I = \sqrt{I_p^2 + I_q^2}$, 式中 I_p 和 I_q 分别为有功电流和无功电流。若线路电阻为 R , 在 R 上消耗的无功功率为 $I_q^2 R$ 。也就是说,无功电流将引起电力电子装置的损耗增加。

(2) 总电流的增加要求装置和线路导线截面积增加,特别是对电动机和变压器之类的电气设备,绕组导线截面积的增加,会增加体积和重量,同时也增加了成本。

(3) 总电流的增加要求与之相配套的启动装置、控制设备和测量仪器仪表等,随之成本也相应增加。

1.2.3 无功功率的补偿

无功功率的补偿包括对基波无功功率的补偿和对谐波无功功率的补偿。对谐波无功功率的补偿已在 1.1.3 节中做过了简单的介绍,这里仅对基波无功功率的补偿作扼要的说明。当然,对谐波无功功率进行补偿的装置也能对基波无功功率进行补偿,如后面几章介绍的无源滤波器和有源滤波器等。