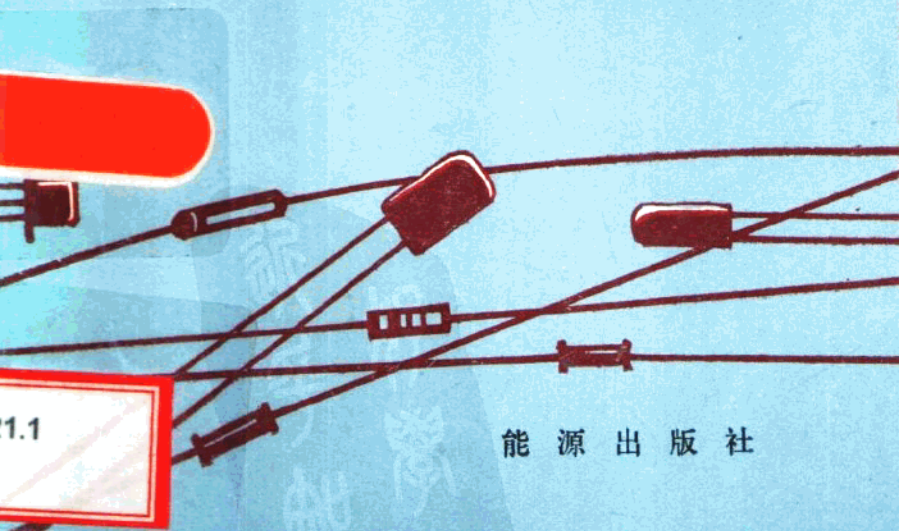


35

直流输电系统中的 谐波、滤波器和无功功率的补偿

王铭诚 编著



能源出版社

前 言

直流输电是近年来发展起来的一种新的输电方式。自70年代初开始，由于大容量、高参数晶闸管的问世和应用，在世界许多发达国家中投运了许多直流输电工程，取得了较好的输电效益。在我国，数个直流输电工程正在加紧建设和即将投入运行。

直流输电系统在换流过程中将产生大量的有害谐波，并将消耗大量的无功功率。抑制谐波和解决无功功率的需求，重要的技术措施是在换流站中装设滤波器。

本书是作者最近几年来，为攻读直流输电研究方向的硕士研究生讲授直流输电课程的部分内容。书中介绍直流输电换流器各侧电压、电流波形的谐波定量分析方法，谐波滤波器的构成、工作原理和设计的基本步骤以及换流站的无功功率补偿方式。本书可供从事电力系统谐波管理工作和关心直流输电技术发展的工程技术人员参考。

由于作者学术水平和实践经验都很有限，书中难免存在缺点和错误，敬请读者批评指正。

ABD91/09

目 录

一、概述	(1)
1. 谐波的产生及其危害和措施	(1)
2. 特征谐波分析的假定条件	(5)
3. 谐波分析的方法——傅立叶级数分解的简要回顾	(6)
4. HVDC系统中的无功功率补偿	(7)
二、换流装置交流侧的特征谐波	(8)
1. 不计换相角时的交流电流谐波	(9)
2. 计及换相角时的交流电流谐波	(17)
3. 基波功率因数角 $\varphi_{(1)}$	(28)
三、换流装置直流侧的特征谐波	(32)
1. 不计触发角及换相角时直流侧的特征谐波	(32)
2. $\alpha > 0, \gamma = 0$ 的情况	(37)
3. $\alpha > 0, \gamma > 0$ 的情况	(40)
四、换流装置的非特征谐波	(46)
1. 换流器交流侧的非特征谐波与触发角误差之间的关系	(47)
2. 换流器直流侧的非特征谐波	(51)
五、换流装置中的滤波器	(55)
1. 概述	(55)

2. 单调谐低通滤波器·····	(56)
3. 高通滤波器·····	(70)
4. 交流侧滤波器参数选择举例·····	(72)
六、换流装置的无功功率特性和补偿方法·····	(76)
1. 换流装置的无功功率特性·····	(76)
2. 换流装置所需无功功率的补偿·····	(80)
3. 无功补偿设备之间的容量分配·····	(85)
参考文献·····	(87)
[附录]电力系统谐波管理暂行规定SD126—84·····	(88)

一、概 述

1. 谐波的产生及其危害和措施

图 1 为HVDC①系统示意图。

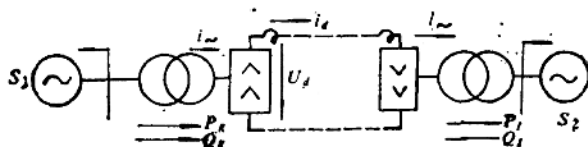


图 1 HVDC系统示意图

如图 2 所示，换流桥直流侧整流电压 u_d 不是一个纯直流电压波形，而交流侧电流 $i_{\sim}$ 为一非正弦波形。

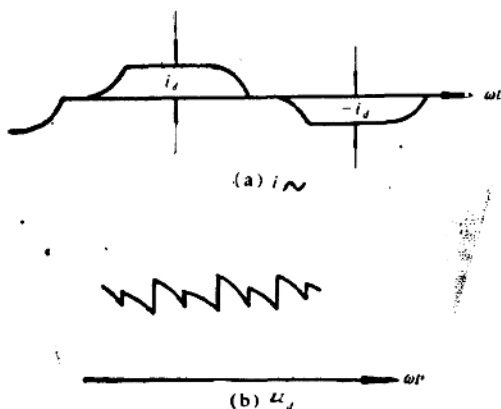


图 2 $i_{\sim}$ 及 u_d 波形图

注①高压直流输电的英文缩写。

若对图 2 $i_{\sim}$ 和 u_d 波形进行傅里叶级数分解, 我们将发现: 在 $i_{\sim}$ 波形中除含有正弦 50 赫的基波分量, 在 u_d 波形中除含有零赫的纯直流分量外, 它们都尚含有大量的倍频于基波频率的高次谐波分量 $\sum_{n=2}^{\infty} i_n$ 和 $\sum_{n=2}^{\infty} u_{dn}$ 。 n 为谐波次数, 且

$$n = \frac{f_n}{f_1}。$$

换流器交流侧高次谐波电流 i_n 和整流侧电压 u_{dn} 作用下, 电流 i_{dn} 在电力系统网络和直流线路中的扩散和传播将产生十分严重的后果。谐波的影响和危害表现如下:

1) 谐波对交流系统设备的影响

某些设备对电压波形的畸变比较敏感, 例如与系统电压同步的电子设备和一些可控硅元件控制或供电的电动机等。直流输电中换流器本身的运行, 也会受到交流系统电压畸变的影响。

有些设备对一个或几个特定的谐波比较敏感, 例如某些测量表计、续电保护装置和脉冲控制接受器等。

在旋转电机和电容器中的谐波电流将产生附加损耗, 因而使电机和电容器过热。这种影响主要是由有效值较大的低次谐波所造成的。

对同步电机虽然低电阻的阻尼绕组可以使转子铁芯对谐波磁通起屏蔽作用, 但只有在凸极同步机上才用阻尼绕组。因此实心转子的同步机中仍会由于谐波磁通而使转子铁芯过热, 这将使发电机的出力受到限制。高次谐波除了会使发电机局部发热外, 还会使发电机产生振动。

异步电动机中较大的谐波电流将减小它在额定转速下的有效转矩，并在较低转速下引起寄生转矩，这种寄生转矩可能使异步电动机在起动的以后无法达到它的额定转速。

电容器由于谐波电压所增加的损耗等于：

$$\sum_{n=2}^{\infty} C(\operatorname{tg} \delta) \omega(n) V_{(n)}^2 \times 10^{-3} \text{ 千瓦}$$

式中：C——电容，微法；

$\operatorname{tg} \delta$ ——介质损耗系数，一般假定对各次谐波电压相同；

ω_n —— n 次谐波的角频率，弧度/秒；

$V_{(n)}$ —— n 次谐波电压的有效值，千伏。

为了不使电容器因谐波附加损耗而过热，必须选择电容器的额定容量，不小于电容器的基波无功容量和谐波无功容量的总和。此外，由于谐波电压的存在可能使直流电压值或交流电压的峰值增高或降低，因此将影响电容器介质所承受的应力。

交流系统中一组大容量的并联电容器和系统的其他部分之间，可能在某一谐波频率下产生谐振。例如当系统在连接电容器处的短路容量 Q_s 为电容器额定容量 Q_c 的9倍左右时，则可能发生三次谐波的谐振；当 Q_s 为 Q_c 的80倍左右时，将发生接近9次谐波的谐振。这种谐振可以使电容器上出现过电压，使电容器过热，也会使直流输电系统换流器的电流调节器工作不稳定，即所谓谐波不稳定。

2) 谐波对电话线路的干扰影响

通常音频通道的工作频率范围是200~3500赫，而直流输电系统中的许多谐波就是在这个频带以内。不论是直流输

电线路中的谐波电压和谐波电流，或是交流网络线路中的谐波电压和谐波电流，都会对它们邻近的电话线路产生静电感应和电磁感应的影响。由于交流和直流的电力线路中所传输的功率水平和电话线路中所传送的功率水平差别很大，所以直流输电系统中的谐波往往会引起可以察觉的、有时甚至达到不能允许的电话杂音。影响或干扰的程度与电力线路的不平衡程度及电力线路和电话线路之间的耦合程度有关。

电力线路因不平衡而产生的基波电流和谐波电流的零序分量，都将通过与大地形成的回路流动。由于电力线路和每对电话线路之间存在电磁耦合，这些零序电流在电话线路中感应一个纵向电势。如果一对电话线路的两根导线对地是不平衡的，则会产生一个横向电压，这就可能产生电话干扰。

电力线路与电话线路之间的电磁耦合程度，主要取决于下列四个参数：

a. 两种线路平行路径的长度。耦合的大小与这个平行的长度成正比；

b. 两种线路之间的间隔距离。耦合随距离的增加而减小；

c. 大地中电流路径的等值深度。这一深度取决于土壤的电阻率与谐波频率，土壤电阻率愈小，谐波的频率愈大，等值深度就愈小，耦合就愈小；

d. 干扰电流的频率。由于耦合可以用互感抗来表示，所谓互感抗就是电力线路中每安培电流在电话线路上所感应的电压。互感抗或耦合随频率的增高而增大。但回流电流（零序电流）在大地中的深度随频率的增高而减小，因而耦合的增大并不与频率的增高成正比。

要减小对电话线路的干扰影响，首先应该设法减小电力系统中的谐波。其次是减小电力线路和电话线路之间的耦合，即加大两种线路之间的间隔距离；用换位方法改善电力线路和电话线路的平衡度；把架空线路改成地下电缆，把以大地为回路的电话线路改成用金属导线为回路等等。

在大多数情况下，由高压直流输电换流器所引起的电话干扰，电力部门应该从电力系统本身运行的要求出发，采取必要的措施，使谐波减小到满足要求的水平，如增加换流器的脉动数、装设滤波装置等；如果这时对电话的干扰杂音仍超过电信部门可以接受的水平，则电信部门再在电话系统中采取必要的附加措施，因为通常在电话系统中采取有效的附加措施比在电力系统中采取措施以解决干扰问题要便宜些，但这必须通过双方协调来取得一致的意见。

2. 特征谐波分析的假定条件

对于一个换流器，在理想的假定条件下，所产生的诸谐波谓之特征谐波。若换流器的脉动数（相数）为 p ，则其特征谐波次数 n 为：

$$\text{交流侧} \quad n = kp \pm 1 \text{ (次)}$$

$$\text{直流侧} \quad n = kp \text{ (次)}$$

其中， $k=1, 2, 3, \dots$ 正整数数列。

若系统出现非理想条件，则换流器除产生特征谐波外，还要产生异于特征谐波次数的非特征谐波，它们的谐波次数为 $n \neq kp \pm 1$ 次和 $n \neq kp$ 次。

分析HVDC系统特征谐波的理想假定条件为：

a. 交流电压三相是对称、平衡的正弦电压，除了基波以外，没有任何谐波分量；

b. 换流器的直流侧接有无限大电感的平波电抗器，直流电流是没有谐波分量的恒定电流；

c. 换流阀的控制是以等间距触发的，即每间隔 $1/6$ 基波周期发出一个触发脉冲；

d. 三相中的换相电感相等，每一次换相的时间（换相角）相等。

根据这些假定条件，得出有关特征谐波的结论。然后，对某些假定条件加以修正，使分析计算接近于直流输电系统实际的运行和控制情况。

3. 谐波分析的方法——傅里叶级数分解的简要回顾

对一个周期性非正弦函数 $f(t)$ 或 $f(\omega t)$ ，若它满足于狄利赫利条件，则可分解为傅里叶级数形式

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\omega_1 t + B_n \cdot \sin n\omega_1 t) \quad (1)$$

则常数项的 A_0 为

$$A_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \quad \text{或} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\vartheta) d\vartheta \quad (2)$$

余弦项系数 A_n 为

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega_1 t dt \quad \text{或} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\vartheta) \cos n\vartheta d\vartheta \quad (3)$$

正弦项系数 B_n 为

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\vartheta dt \quad \text{或} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\vartheta) \sin n\vartheta d\vartheta \quad (4)$$

其中 $\vartheta = \omega_1 t$

式(1)可化为如下形式

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \cos(n\vartheta - \phi_n) \quad (5)$$

上式中 C_n 为谐波幅值, 且有

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (6)$$

谐波初相角 ϕ_n

$$\phi_n = \arctg \frac{B_n}{A_n} \quad (7)$$

则有关系

$$\begin{aligned} A_n &= C_n \cdot \cos \phi_n \\ B_n &= C_n \cdot \sin \phi_n \end{aligned} \quad (8)$$

A_n 和 B_n 是 n 次谐波矢量的两个直角坐标分量 (余弦分量和正弦分量), 它们对应的谐波矢量是:

$$A_n + jB_n = C_n \angle \phi_n \quad (9)$$

4. HVDC系统中的无功功率补偿

HVDC系统中换流器, 一般装有控制调节装置, 工作于滞后的触发角 α , 又因其换相回路具有电感性质, 故往往换流器交流电流的基波分量滞后于相应的电压。因此, 换流器在换相中需要吸收一定量的基波无功功率 (Q_n 或 Q_i)。它可由交流系统来供给或另装无功功率补偿设备。

二、换流装置交流侧的特征谐波

直流输电换流装置往往采用如图 3 所示的接线形式。图 4 示出了六脉动单桥换流器阀侧交流电压和电流波形。电流

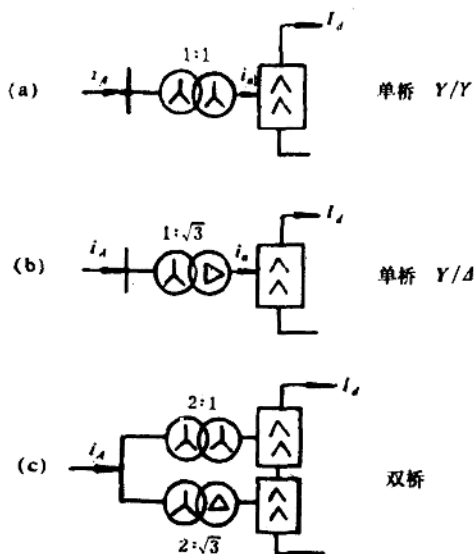


图 3 换流装置单、双桥接线形式

波形中实线表示触发角 $\alpha > 0$ 、不计换相角时的情形，而用虚线绘成的电流波形，定性地表示了计及换相角时电流脉冲的波前和波尾改变的大致情形。

1. 不计换相角时的交流电流谐波

1—1 换流变压器为 Y/Y 连接，匝比为1:1，如图3(a)所示。

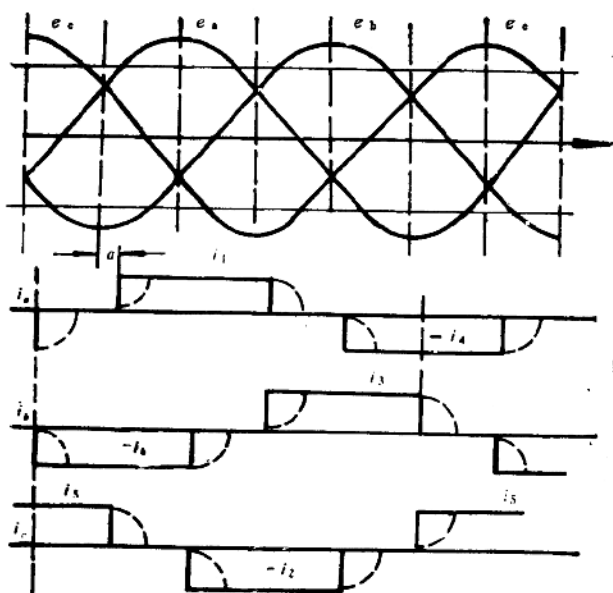


图4 六脉动换流桥中的交流电压和电流波形图

当换流变压器为 Y/Y 接法时，变压器电网侧的电流和阀侧相同。取A相电流波形展开成傅里叶级数形式[式(1)]。

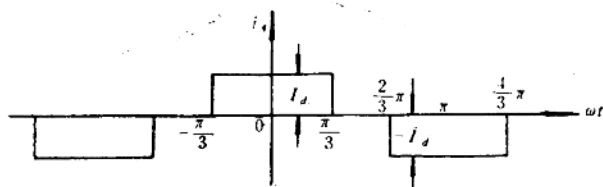


图5 A相电流 i_A 波形

若计时原点取在 i_A 波形正半波中央处, 波形的傅里叶级数分解中将不含有直流分量和正弦项系数分量, 即 $A_0=0$ 及 $B_n=0$ 。傅里叶级数形式将变为

$$i_A(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos n\omega_1 t \quad (10)$$

余弦项系数 A_n 按式(3)为

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_A(\omega t) \cos n\omega_1 t d\omega_1 t$$

$$= \frac{1}{\pi} \left[\int_{-\pi/3}^{\pi/3} I_d \cos n\omega_1 t d\omega_1 t \right.$$

$$\left. + \int_{\pi/3}^{5\pi/3} (-I_d) \cos n\omega_1 t d\omega_1 t \right]$$

$$= \frac{2I_d}{n\pi} \cdot \sin n \frac{\pi}{3} \cdot (1 - \cos n\pi)$$

由于 $B_n=0$, 故

$$C_n = A_n = \frac{2I_d}{n\pi} \cdot \sin n \frac{\pi}{3} (1 - \cos n\pi) \quad (11)$$

分析式(11)的系数项 $\sin n \frac{\pi}{3} \cdot (1 - \cos n\pi)$ 得知

n	1	2	3	4	5	6	7	
$\sin n \frac{\pi}{3} (1 - \cos n\pi) + \sqrt{3}$	0	0	0	0	$-\sqrt{3}$	0	$+\sqrt{3}$	

傅里叶级数分解式中:

1° 不含有 $n=3$ 及3的倍数次谐波分量;

2° 不含有 $n=2, 4, 6, \dots$ 偶次谐波分量;

3° 只含有 $n=pk \pm 1$ 次谐波分量。

p ——脉动数, $k=1, 2, 3, \dots$ 正整数。

此时傅里叶级数展开形式为

$$i_A = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos\theta - \frac{1}{5}\cos 5\theta + \frac{1}{7}\cos 7\theta - \frac{1}{11}\cos 11\theta \right. \\ \left. + \frac{1}{13}\cos 13\theta - \frac{1}{17}\cos 17\theta + \frac{1}{19}\cos 19\theta \dots \right) \quad (12)$$

式中: $\theta = \omega_1 t$

谐波电流的初相角 ϕ_n

$$\phi_n = \arctg \frac{B_n}{A_n} = \arctg \frac{0}{A_n} = \arctg 0 = 0$$

电流的有效值:

1° 基波电流

$$I_{1.0} = \frac{C_1}{\sqrt{2}} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi \cdot \sqrt{2}} \cdot I_d = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d = 0.78 I_d \quad (13)$$

2° 谐波电流

$$I_{n.0} = \frac{C_n}{\sqrt{2}} = \frac{1}{n} \cdot \frac{C_1}{\sqrt{2}} = \frac{I_{1.0}}{n} \quad (14)$$

3° 电流的均方根值

$$I_{I=0} = \sqrt{I_{1.0}^2 + I_{5.0}^2 + I_{7.0}^2 + I_{11.0}^2 + I_{13.0}^2 + \dots}$$

$$\text{或} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_A^2(\theta) dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_A^2(\theta) d\theta}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i^2(\theta) d\theta} = 0.816 I_d \quad (15)$$

1—2 换流变压器为Y/△连接，匝比为 $1:\sqrt{3}$ ，如图3(b)所示，而此种单桥换流器的三相接线如图6所示。

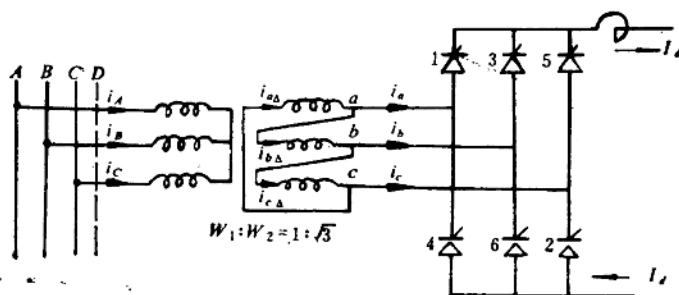


图6 Y/△连接的换流装置

已知换流器阀侧电流 i_a 、 i_b 、 i_c 波形如图7(a)、(b)、(c)所示，对结点a、b、c可列写如下电流方程

$$\left. \begin{aligned} i_{a\Delta} - i_{b\Delta} &= i_a \\ i_{b\Delta} - i_{c\Delta} &= i_b \\ i_{a\Delta} + i_{b\Delta} + i_{c\Delta} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

解得：

$$\left. \begin{aligned} i_{a\Delta} &= \frac{1}{3}(i_a - i_c) \\ i_{b\Delta} &= \frac{1}{3}(i_b - i_a) \\ i_{c\Delta} &= \frac{1}{3}(i_c - i_b) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

则可求得如图 7 (d) $i_{a\Delta}$ 、 $i_{b\Delta}$ 、 $i_{c\Delta}$ 波形及相对应的换流变压器一次侧，即网侧电流波形 i_A 、 i_B 、 i_C (图 7 (e))。

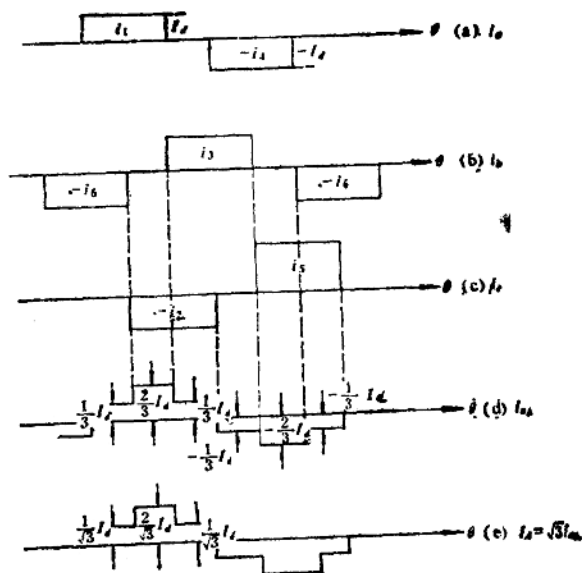


图 7 网侧及网侧电流波形

若对 $i_{a\Delta}$ 波形进行傅里叶级数分解，取参考轴，即计时