

# 一种改进型感应滤波高压直流输电系统及其谐波传递特性分析

王 灿<sup>1</sup>, 罗隆福<sup>1</sup>, 陈跃辉<sup>2</sup>, 周冠东<sup>2</sup>, 李晓芳<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 国网湖南省电力公司, 湖南 长沙 410007)

**摘要:** 提出了一种具有特殊接线方案的改进型感应滤波高压直流输电系统, 其 2 个换流变压器的公共绕组并联后接 1 套全调谐感应滤波器组, 且滤波器组中不含有 5、7 次滤波器, 仅为 11、13 次双调谐滤波器, 大幅减少了滤波器和开关等设备的投入。分析了改进型感应滤波高压直流输电系统的谐波传递特性, 分析结果表明此系统同样能够有效地将谐波电流屏蔽于换流变压器的阀侧绕组, 减小网侧绕组的谐波电流。最后对一背靠背的 12 脉波改进型感应滤波直流输电系统试验平台进行试验测试, 测试结果验证了理论分析的正确性, 说明了改进型感应滤波直流输电系统的可行性。

**关键词:** 高压直流输电; 换流变压器; 谐波分析; 感应滤波

**中图分类号:** TM 721.1

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.10.019

## 0 引言

高压直流输电系统 HVDC (High Voltage Direct Current transmission system) 广泛应用于远距离大容量输电、区域电力联网和新能源并网等领域<sup>[1]</sup>。由于晶闸管换流器的非线性特性, HVDC 在运行过程中会产生大量谐波及无功<sup>[2]</sup>。为解决这些电能质量问题, 传统的治理方案为在换流变压器的网侧母线上装设无源滤波器, 但该方法并不完善。首先, 谐波和无功全部流经换流变压器的一次和二次绕组, 换流变压器的铁芯和结构件中通过较强的谐波磁通, 使得变压器绝缘难度加大, 损耗和发热增加, 振动和噪声变大, 从而影响系统的运行效率及稳定性<sup>[3-4]</sup>; 其次, 为避免与系统阻抗发生并联谐振, 无源滤波器常常进行偏调谐设计, 从而影响滤波器的滤波效果<sup>[5]</sup>。

文献[6-8]提出了一种基于感应滤波技术的高压直流输电系统 HVDC-IF (HVDC based on Inductive Filtering), HVDC-IF 的换流变压器阀侧绕组采用延边三角形接线方式, 且在公共绕组的抽头处接入全调谐感应滤波器。HVDC-IF 不但能更加有效地抑制谐波电流流入网侧绕组, 改善电网的电能质量, 而且能减小谐波和无功功率给换流变压器带来的不良影响。

一些文献对 HVDC-IF 做了相关研究, 验证了其所有的优势。文献[9]的研究结果表明投入感应滤波器后, 能有效地减少换流变压器的谐波损耗及其铁芯谐波磁通。文献[10]的研究结果表明新型换流

变压器能够有效地抑制绕组的电磁振动。文献[11-13]的研究结果表明 HVDC-IF 能够改善换相特性, 防止换相失败。文献[14-16]的研究结果表明 HVDC-IF 有助于提高故障恢复特性及其稳定性。HVDC-IF 虽然有众多的优点, 但仍然存在的一些不足之处, 严重制约着其工程化应用。目前, HVDC 主要以 12 脉波系统为基本单元, 其需要 2 台换流变压器。针对 12 脉波系统, 传统 HVDC 只需在网侧母线上装设 1 套滤波器组, 且滤波器组中不需要含有 5、7 次滤波器; 而 HVDC-IF 的每个换流变压器都要配置 1 套滤波器组 (共 2 套滤波器组), 且为消除网侧绕组和铁芯的 5、7 次谐波, 每套滤波器组必须配置 5、7 次滤波器<sup>[6-8]</sup>。由此可见, 相比传统 HVDC, HVDC-IF 的滤波器及其相应的开关等设备的投入将大幅增加。

本文提出了一种改进型感应滤波高压直流输电系统 IHVDC-IF (Improved HVDC-IF)。和传统 HVDC 相同, IHVDC-IF 也只需要 1 套滤波器组且不含有 5、7 次滤波器。IHVDC-IF 不但保持了 HVDC-IF 所具有的良好特性, 同时大幅减少了滤波器等设备的投入, 有助于实现感应滤波技术在直流输电系统中的应用。本文首先给出了 IHVDC-IF 的接线方案; 其次对这种新型接线方案的谐波传递特性进行了分析, 验证了 IHVDC-IF 能够有效地将谐波屏蔽于阀侧绕组, 减少网侧绕组的谐波电流; 最后通过 IHVDC-IF 试验平台验证了理论分析的正确性。

## 1 接线方案

HVDC-IF 的拓扑结构如图 1 所示。IHVDC-IF 的拓扑结构和具体接线方案分别如图 2 和图 3 所示。IHVDC-IF 和 HVDC-IF 的相同之处有以下几点: 换

收稿日期: 2014-12-07; 修回日期: 2015-08-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51077045, 51007020, 51077044); 国家电网公司科技项目 ([2008]1360)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51077045, 51007020, 51077044) and the State Grid Science Project ([2008]1360)

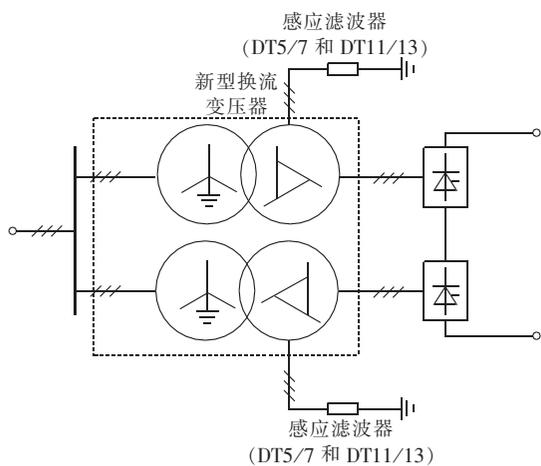


图 1 HVDC-IF 的拓扑结构图

Fig.1 Topology of HVDC-IF

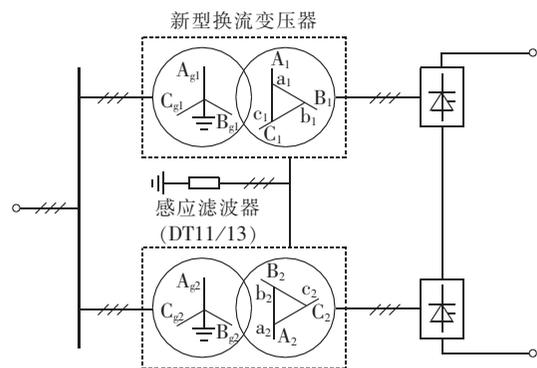


图 2 IHVDC-IF 的拓扑结构图

Fig.2 Topology of IHVDC-IF

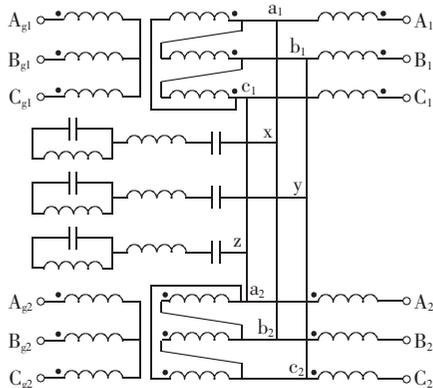


图 3 IHVDC-IF 的接线方案

Fig.3 Wiring pattern of IHVDC-IF

流变压器的阀侧绕组都采用延边三角形移相；换流变压器的绕组都是按照延边绕组靠近铁芯、网侧绕组离铁芯最远、公共绕组在中间进行布置，且通过调整绕组的结构和布局实现公共绕组的等值阻抗为零；为实现 12 脉波系统，2 个换流变压器阀侧绕组电压必须有 30° 的移相，则延边绕组和公共绕组的匝数比应为  $1:\sqrt{3}$  [6-8]。相比图 1 中的 HVDC-IF，图 2 中的 IHVDC-IF 的改进有如下几点：IHVDC-IF 换流变压器阀侧绕组的具体移相方法不同，其 2 个换流变压器公共绕组的电压矢量对应相等，即  $U_{a1c1} = U_{b2a2}$ 、

$U_{b1a1} = U_{c2b2}$ 、 $U_{c1b1} = U_{a2c2}$ ，所以 2 个换流变压器的公共绕组可进行对应并联连接；2 个换流变压器的公共绕组并联后接 1 套全调谐感应滤波器组，且滤波器组中不含 5、7 次滤波器，仅为 11、13 次双调谐滤波器。

根据图 3 中 IHVDC-IF 的具体接线方案可以得到 2 个换流变压器阀侧绕组线电压的矢量图，如图 4 所示。由图中可以看出阀侧绕组的线电压相位也同样彼此相差 30°，它们共同组成了 12 脉波换流器所需的换相线电压，可见本文移相方案的正确性。

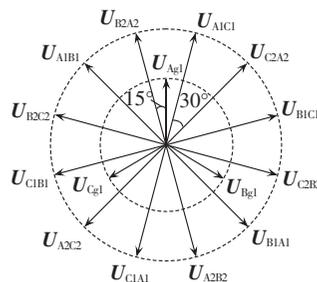


图 4 阀侧绕组电压矢量图

Fig.4 Phasor diagram of valve-side winding voltage

## 2 谐波传递特性

由图 2 和图 3 可以得到 IHVDC-IF 的等效电路模型，如图 5 所示。其中三相晶闸管整流桥用谐波电流源进行等效代替， $h$  为谐波次数，则  $h=6k \pm 1$  ( $k=1, 2, \dots$ )。

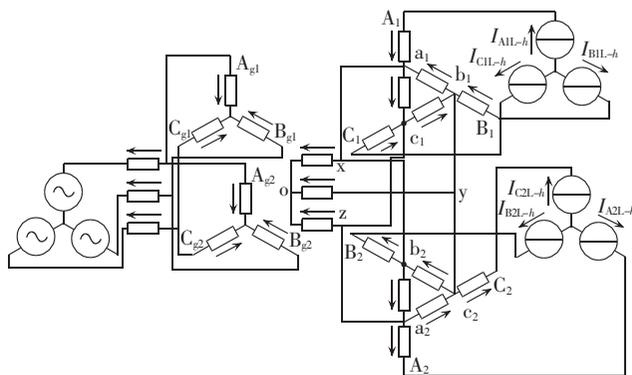


图 5 IHVDC-IF 的等效电路模型

Fig.5 Equivalent circuit model of IHVDC-IF

由多绕组变压器理论 [17]，可以得到如下等式：

$$\begin{cases}
 U_{Ag1-h} - \frac{N_1}{N_3} U_{a1-c1-h} = I_{Ag1-h} Z_{h13} - \frac{N_1 N_2}{N_3^2} I_{A1-a1-h} Z_{3h} \\
 U_{Bg1-h} - \frac{N_1}{N_3} U_{b1-a1-h} = I_{Bg1-h} Z_{h13} - \frac{N_1 N_2}{N_3^2} I_{B1-b1-h} Z_{3h} \\
 U_{Cg1-h} - \frac{N_1}{N_3} U_{c1-b1-h} = I_{Cg1-h} Z_{h13} - \frac{N_1 N_2}{N_3^2} I_{C1-c1-h} Z_{3h} \\
 U_{Ag2-h} - \frac{N_1}{N_3} U_{b2-a2-h} = I_{Ag2-h} Z_{h13} - \frac{N_1 N_2}{N_3^2} I_{a2-A2-h} Z_{3h} \\
 U_{Bg2-h} - \frac{N_1}{N_3} U_{c2-b2-h} = I_{Bg2-h} Z_{h13} - \frac{N_1 N_2}{N_3^2} I_{b2-B2-h} Z_{3h} \\
 U_{Cg2-h} - \frac{N_1}{N_3} U_{a2-c2-h} = I_{Cg2-h} Z_{h13} - \frac{N_1 N_2}{N_3^2} I_{c2-C2-h} Z_{3h}
 \end{cases} \quad (1)$$

$$Z_{h3} = \frac{(Z_{h13}/N_1^2 + Z_{h23}/N_2^2 - Z_{h12}/N_1^2)N_3^2}{2} = 0 \quad (2)$$

其中,  $N_1, N_2, N_3$  分别为网侧绕组、延边绕组和公共绕组的匝数;  $Z_{h12}$  为网侧绕组和延边绕组之间的短路阻抗;  $Z_{h13}$  为网侧绕组和公共绕组之间的短路阻抗;  $Z_{h23}$  为延边绕组和公共绕组之间的短路阻抗;  $Z_{h3}$  为公共绕组的等值阻抗, 其值设计为零。

忽略励磁电流, 可以得到换流变压器的磁势平衡方程:

$$\begin{cases} N_1 I_{Ag1-h} + N_2 I_{A1-a1-h} + N_3 I_{a1-c1-h} = 0 \\ N_1 I_{Bg1-h} + N_2 I_{B1-b1-h} + N_3 I_{b1-a1-h} = 0 \\ N_1 I_{Cg1-h} + N_2 I_{C1-c1-h} + N_3 I_{c1-b1-h} = 0 \\ N_1 I_{Ag2-h} + N_2 I_{a2-A2-h} + N_3 I_{b2-a2-h} = 0 \\ N_1 I_{Bg2-h} + N_2 I_{b2-B2-h} + N_3 I_{c2-b2-h} = 0 \\ N_1 I_{Cg2-h} + N_2 I_{c2-C2-h} + N_3 I_{a2-c2-h} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

由基尔霍夫电压定律可以得到如下等式:

$$\begin{cases} U_{a1-c1-h} = U_{b2-a2-h} = U_{x-o-h} - U_{z-o-h} \\ U_{c1-b1-h} = U_{a2-c2-h} = U_{z-o-h} - U_{y-o-h} \\ U_{b1-a1-h} = U_{c2-b2-h} = U_{y-o-h} - U_{x-o-h} \\ U_{x-o-h} = (I_{a1-x-h} + I_{b2-x-h}) Z_{fh} \\ U_{y-o-h} = (I_{b1-y-h} + I_{c2-y-h}) Z_{fh} \\ U_{z-o-h} = (I_{c1-z-h} + I_{a2-z-h}) Z_{fh} \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $Z_{fh}$  为滤波器的阻抗。

由基尔霍夫电流定律可以得到如下等式:

$$\begin{cases} I_{A1-a1-h} = I_{A1L-h} \\ I_{B1-b1-h} = I_{B1L-h} \\ I_{C1-c1-h} = I_{C1L-h} \\ I_{a1-x-h} = I_{A1-a1-h} + I_{b1-a1-h} - I_{a1-c1-h} \\ I_{b1-y-h} = I_{B1-b1-h} + I_{c1-b1-h} - I_{b1-a1-h} \\ I_{c1-z-h} = I_{C1-c1-h} + I_{a1-c1-h} - I_{c1-b1-h} \\ I_{a1-c1-h} + I_{c1-b1-h} + I_{b1-a1-h} = 0 \\ I_{a2-A2-h} = -I_{A2L-h} \\ I_{b2-B2-h} = -I_{B2L-h} \\ I_{c2-C2-h} = -I_{C2L-h} \\ I_{a2-z-h} = I_{b2-a2-h} - I_{a2-A2-h} - I_{a2-c2-h} \\ I_{b2-x-h} = I_{c2-b2-h} - I_{b2-B2-h} - I_{b2-a2-h} \\ I_{c2-y-h} = I_{a2-c2-h} - I_{c2-C2-h} - I_{c2-b2-h} \\ I_{a2-c2-h} + I_{c2-b2-h} + I_{a2-c2-h} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

联合式(1)~(5)可以得到换流变压器的网侧绕组及滤波器的电流表达式, 分别如下:

$$\begin{cases} I_{Ag1-h} = I_{Ag2-h} = \frac{N_1 N_3 (I_{C1L-h} - I_{B2L-h}) Z_{fh}}{N_3^2 Z_{h13} + 6 N_1^2 Z_{fh}} - \frac{N_1 (3 N_2 + N_3) (I_{A1L-h} - I_{A2L-h}) Z_{fh}}{N_3^2 Z_{h13} + 6 N_1^2 Z_{fh}} \\ I_{Bg1-h} = I_{Bg2-h} = \frac{N_1 N_3 (I_{A1L-h} - I_{C2L-h}) Z_{fh}}{N_3^2 Z_{h13} + 6 N_1^2 Z_{fh}} - \frac{N_1 (3 N_2 + N_3) (I_{B1L-h} - I_{B2L-h}) Z_{fh}}{N_3^2 Z_{h13} + 6 N_1^2 Z_{fh}} \\ I_{Cg1-h} = I_{Cg2-h} = \frac{N_1 N_3 (I_{B1L-h} - I_{A2L-h}) Z_{fh}}{N_3^2 Z_{h13} + 6 N_1^2 Z_{fh}} - \frac{N_1 (3 N_2 + N_3) (I_{C1L-h} - I_{C2L-h}) Z_{fh}}{N_3^2 Z_{h13} + 6 N_1^2 Z_{fh}} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} I_{x-o-h} = \frac{(N_2 + N_3) (I_{A1L-h} + I_{B2L-h})}{N_3} - \frac{N_2 (I_{B1L-h} + I_{A2L-h}) - 2 N_1 (I_{Ag1-h} - I_{Bg1-h})}{N_3} \\ I_{y-o-h} = \frac{(N_2 + N_3) (I_{B1L-h} + I_{C2L-h})}{N_3} - \frac{N_2 (I_{C1L-h} + I_{B2L-h}) - 2 N_1 (I_{Bg1-h} - I_{Cg1-h})}{N_3} \\ I_{z-o-h} = \frac{(N_2 + N_3) (I_{C1L-h} + I_{A2L-h})}{N_3} - \frac{N_2 (I_{A1L-h} + I_{C2L-h}) - 2 N_1 (I_{Cg1-h} - I_{Ag1-h})}{N_3} \end{cases} \quad (7)$$

(1) 当不投入感应滤波器时, 此时相当于滤波器的阻抗为无穷大, 即:

$$Z_{fh} = \infty \quad (8)$$

此时, 网侧绕组的电流表达式可以表示为:

$$\begin{cases} I_{Ag1-h} = I_{Ag2-h} = \frac{N_3 (I_{C1L-h} - I_{B2L-h})}{6 N_1} - \frac{(3 N_2 + N_3) (I_{A1L-h} - I_{A2L-h})}{6 N_1} \\ I_{Bg1-h} = I_{Bg2-h} = \frac{N_3 (I_{A1L-h} - I_{C2L-h})}{6 N_1} - \frac{(3 N_2 + N_3) (I_{B1L-h} - I_{B2L-h})}{6 N_1} \\ I_{Cg1-h} = I_{Cg2-h} = \frac{N_3 (I_{B1L-h} - I_{A2L-h})}{6 N_1} - \frac{(3 N_2 + N_3) (I_{C1L-h} - I_{C2L-h})}{6 N_1} \end{cases} \quad (9)$$

又由图 4 中的阀侧绕组电压矢量图可以得知阀侧绕组线电流具有如下关系:

$$\begin{cases} I_{A1L-h} = I_{B1L-h} e^{j2h\pi/3} = I_{C1L-h} e^{-j2h\pi/3} \\ I_{A2L-h} = I_{B2L-h} e^{j2h\pi/3} = I_{C2L-h} e^{-j2h\pi/3} \\ I_{A2L-h} = I_{A1L-h} e^{j5h\pi/6} \end{cases} \quad (10)$$

联合式(8)~(10), 且  $N_3 = \sqrt{3} N_2$ , 可以得到, 当  $h = 12k - 5, 12k - 7 (k = 1, 2, \dots)$  时下面等式成立:

$$\begin{cases} I_{Ag1-h} = I_{Ag2-h} = 0 \\ I_{Bg1-h} = I_{Bg2-h} = 0 \\ I_{Cg1-h} = I_{Cg2-h} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

即不投入滤波器时, IHVDC-IF 换流变压器网侧绕组也不含有  $12k - 5$  和  $12k - 7$  次谐波, 这是 HVDC-IF 所不具备的优势。

(2) 当投入感应滤波器时, 由于滤波器为 11、13 次双调谐滤波器, 所以  $Z_{fh} = 0 (h = 11, 13)$ , 结合式(6)、(7)、(10), 可以得出当  $h = 11, 13$  或者  $12k - 5, 12k - 7 (k = 1, 2, \dots)$  时下面等式成立:

$$\begin{cases} I_{Ag1-h} = I_{Ag2-h} = 0 \\ I_{Bg1-h} = I_{Bg2-h} = 0 \\ I_{Cg1-h} = I_{Cg2-h} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

当  $h = 12k - 5, 12k - 7 (k = 1, 2, \dots)$  时下面等式成立:

$$\begin{cases} I_{x-o-h} = 0 \\ I_{y-o-h} = 0 \\ I_{z-o-h} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

即投入滤波器后, IHVDC-IF 网侧绕组不但没有  $12k-5$  和  $12k-7$  次谐波, 含量较大的 11、13 次谐波也被滤除。同时, 滤波器中也不含有  $12k-5$  和  $12k-7$  次谐波。

综上所述可见, IHVDC-IF 虽然只配备了 1 套 11、13 次双调谐感应滤波器, 但是同样实现了 HVDC-IF (配备了 2 套滤波器组, 且每套滤波器组由 1 个 5、7 次双调谐滤波器和 1 个 11、13 次双调谐滤波器并联组成) 所具备的功能, 即消除换流变压器的网侧绕组的谐波电流, 减小谐波对换流变压器的不良影响。不投入和投入滤波器时 IHVDC-IF 的谐波传递路径示意图如图 6 所示。

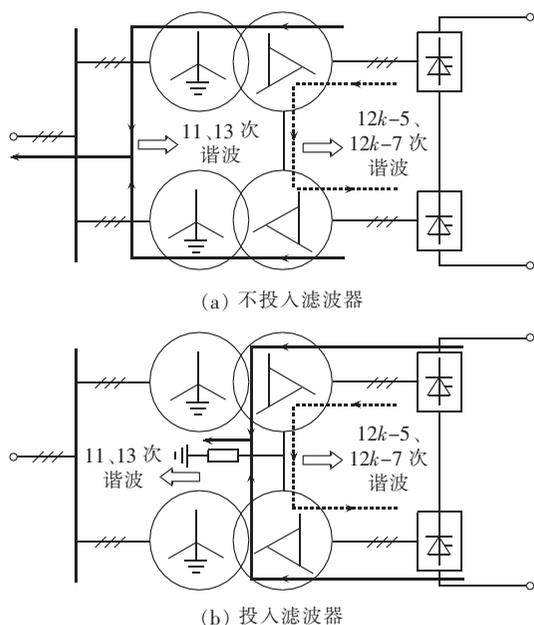


图 6 IHVDC-IF 的谐波传递路径

Fig.6 Harmonic transfer path in IHVDC-IF

### 3 单极运行及线路故障运行特性

由第 1 节中的接线方案可以看出, 本文所提出的 IHVDC-IF 只是对 HVDC-IF 的谐波治理的不足之处进行了有效的改进, IHVDC-IF 和 HVDC-IF 的区别主要在于谐波的传递路径的不同, 由于都是采用了感应滤波技术, 其他工况下的有关运行特性, 如无功补偿、换相失败、线路故障特性、单极运行等两者并没有本质上的区别, 所以文献[11-16]中有关 HVDC-IF 的相关运行特性的结论同样适用本文所提出的 IHVDC-IF 系统。文献[11-16]已经对 HVDC-IF 的各种工况下的运行特性进行了分析, 由文献的研究结果可以看出实施感应滤波技术后, 当线路故障和单极运行时, 不但不会对直流系统造成明显的不良影响, 还由于感应滤波技术本身无功功率的就进补偿作用, 会在一定程度上改善直流系统的换相特性及故障恢复特性等。

需要说明的是, 与传统直流输电和 HVDC-IF 相比, IHVDC-IF 的 2 个换流变压器的公共绕组并联工作, 其谐波流通过程不同, 当单极运行时也是如此, 此时 IHVDC-IF 中的 2 个换流变压器的网侧绕组都会有谐波电流流过, 谐波传递示意图如图 7(a) 所示, 这和 HVDC-IF 的谐波流通过程不同。可采用断开停运极换流变压器的并联开关, 这时停运极换流变压器不会有电流流过, 谐波传递示意图如图 7(b) 所示, 这时和 HVDC-IF 的谐波流通过程一致。

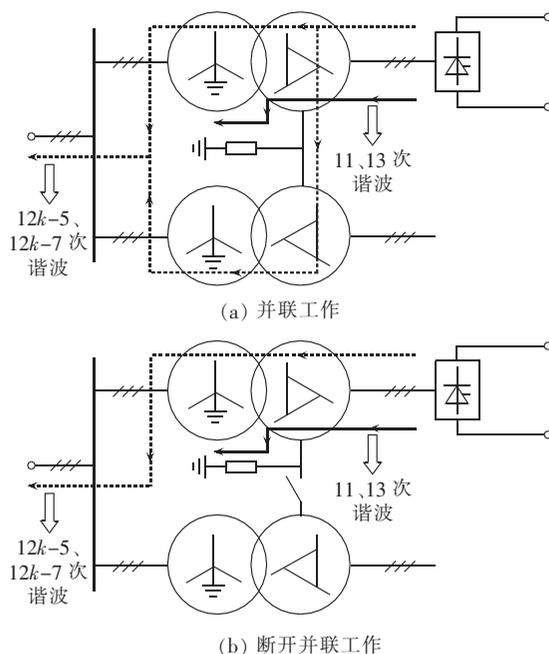


图 7 单极运行时 IHVDC-IF 的谐波传递路径

Fig.7 Harmonic transfer path in IHVDC-IF in monopole operation mode

### 4 仿真及试验验证

建立了背靠背的 12 脉波 IHVDC-IF 试验平台。IHVDC-IF 系统直流侧额定电压为 1000 V, 直流额定功率为 100 kW, 换流变压器由 3 台单相三绕组变压器构成, 单台变压器的额定容量为  $17.9 \text{ kV} \cdot \text{A}$ , 额定电压为 220 V/196.7 V/113.6 V, 公共绕组的等值阻抗为 0.005%, 基本为零阻抗设计。基于 IHVDC-IF 试验平台对换流变压器的网侧绕组电流进行了测试。另外根据文献[9]中换流器的谐波模型及其本文第 2 节中的相关公式, 可以得到换流变压器网侧绕组电流的理论计算波形图。换流变压器网侧绕组电流的计算及测试波形如图 8 所示。由图 8 可以看出理论计算波形与测试波形基本一致, 验证了文中谐波传递特性分析的正确性。

换流变压器网侧绕组具体谐波电流含量如表 1 所示。由表 1 可以看出, IHVDC-IF 在不投入感应滤波器时, 网侧绕组也不含有 5、7 次谐波, 这是 HVDC-IF 所不具有的特性; 投入 11、13 次双调谐感应滤波器后,

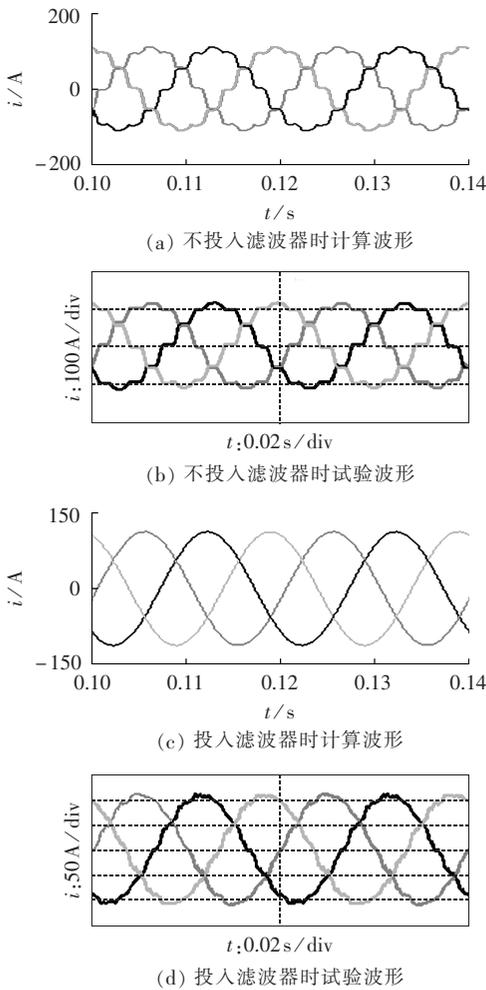


图 8 网侧绕组计算与实测电流波形

Fig.8 Calculative and experimental waveforms of grid-side winding current

表 1 网侧绕组谐波电流实测数据

Table 1 Experimental data of grid-side winding harmonic current

谐波次数	不投入滤波器		投入滤波器	
	计算值/A	测试值/A	计算值/A	测试值/A
1	75.17	76.21	74.87	75.64
5	0	0.71	0	0.38
7	0	0.49	0	0.27
11	5.82	5.36	0	0.74
13	3.51	3.89	0	0.37
THD	9.58%	9.42%	0.24%	1.73%

网侧绕组 5、7、11、13 次等主要谐波被滤除。滤波器的谐波电流数据如表 2 所示,可见滤波器中基本不含有 5、7 次谐波。试验结果和上文中理论分析相符合,说明本文所提出的 IHVDC-IF 的可行性。

表 2 滤波器谐波电流实测数据

Table 2 Experimental data of filter harmonic current

谐波次数	电流/A	谐波次数	电流/A
1	51.95	11	21.35
3	1.72	13	14.31
5	1.04		

## 5 结论

本文提出了一种 IHVDC-IF,其采用新型的接线方案,2 个公共绕组并联后接一套 11、13 次双调谐感应滤波器。推理了 IHVDC-IF 的谐波传统特性,分析结果表明即使不投入感应滤波器,网侧绕组也不含有 12k-5、12k-7 次谐波,投入感应滤波器后,11、13 次谐波也被滤除。试验验证了文中的理论分析。相比传统的 HVDC-IF,IHVDC-IF 投入的滤波器、开关等设备较少,但是同样能够实现改善电能质量、减少谐波对换流变压器的不良影响等效果。

## 参考文献:

- [1] 余瑜,刘开培,陈俊,等. 基于调制理论的高压直流输电系统混合谐振型谐波不稳定判据[J]. 高电压技术,2014,40(5):1582-1589. YU Yu,LIU Kaipei,CHEN Jun,et al. Modulation theory based criterion on composite resonant harmonic instability in HVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering,2014,40(5): 1582-1589.
- [2] 袁阳,卫志农,雷霄,等. 直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):140-147. YUAN Yang,WEI Zhinong,LEI Xiao,et al. Survey of communication failures in DC transmission systems[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):140-147.
- [3] 张占龙,王科,李德文,等. 变压器谐波损耗计算及影响因素分析[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(4):68-72. ZHANG Zhanlong,WANG Ke,LI Dewen,et al. Transformer harmonic loss calculation and influence factor analysis[J]. Power System Protection and Control,2011,39(4):68-72.
- [4] 张燕乘,郑劲,汪德华,等. 特高压直流换流变压器的研制[J]. 高电压技术,2010,36(1):255-264. ZHANG Yanbin,ZHENG Jin,WANG Dehua,et al. Development of UHVDC converter transformer[J]. High Voltage Engineering, 2010,36(1):255-264.
- [5] 刘文业,罗隆福,张志文,等. 基于多目标 Pareto 粒子算法的感应滤波装置优化设计[J]. 电力自动化设备,2014,34(7):81-87,98. LIU Wenyue,LUO Longfu,ZHANG Zhiwen,et al. Optimized inductive filter design based on multi-objective Pareto particle algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(7): 81-87,98.
- [6] 许加柱,罗隆福,李季,等. 自耦补偿与谐波屏蔽换流变压器的接线方案和原理研究[J]. 电工技术学报,2006,21(9):44-50. XU Jiazhu,LUO Longfu,LI Ji,et al. Principle and connection scheme of self-coupled compensating and suppressing harmonic converter transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2006,21(9):44-50.
- [7] 李季,罗隆福,许加柱,等. 一种滤波换相换流器工作机理与问题模型[J]. 电工技术学报,2008,23(8):53-59. LI Ji,LUO Longfu,XU Jiazhu,et al. Operation mechanism and steady state model of filter commutated converter in HVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2008,23 (8):53-59.
- [8] LUO Longfu,LI Yong,XU Jiazhu,et al. A new converter transformer and a corresponding inductive filtering method for HVDC transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,

- 2008, 23(3):1426-1431.
- [9] LI Yong, LUO Longfu, CHRISTIAN R, et al. Simulation of the electromagnetic response characteristic of an inductively filtered HVDC converter transformer using field-circuit coupling[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(11):4020-4031.
- [10] SHAO Pengfei, LUO Longfu, LI Yong, et al. Electromagnetic vibration analysis of the winding of a new HVDC converter transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1):123-130.
- [11] 罗隆福, 尚荣艳, 许加柱, 等. 基于新型换流变压器的直流输电系统改善换相的机理[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(9):50-56.
- LUO Longfu, SHANG Rongyan, XU Jiazhu, et al. Commutation-improving mechanism of DC transmission system based on a novel converter transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(9):50-56.
- [12] LI Yong, LIU Fang, LUO Longfu, et al. Enhancement of commutation reliability of an HVDC inverter by means of an inductive filtering method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(11):4917-4929.
- [13] 向博, 罗隆福, 许加柱, 等. 采用滤波换相换流器的多馈入直流输电系统中换相失败问题的研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(9):117-121.
- XIANG Bo, LUO Longfu, XU Jiazhu, et al. Commutation failure of multi-infeed HVDC transmission system with FCC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9):117-121.
- [14] 曾进辉, 罗隆福, 罗伟原, 等. 系统故障和参数变化对感应滤波型直流输电系统换相失败的影响[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1):14-20.
- ZENG Jinhui, LUO Longfu, LUO Weiyan, et al. Impact of system faults and parameter variation on commutation failure of inductive filtering HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1):14-20.
- [15] 许加柱, 罗隆福, 李季, 等. 交流系统故障对滤波换相换流器的影响分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1):144-150.
- XU Jiazhu, LUO Longfu, LI Ji, et al. Analysis of the impact of AC system faults on filter commutated converter in HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1):144-150.
- [16] LI Yong, ZHANG Zhiwen, CHRISTIAN R, et al. Study on steady and transient state characteristics of a new HVDC transmission system based on an inductive filtering method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 27(26):1976-1986.
- [17] 尹克宁. 变压器设计原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003: 203-208.

#### 作者简介:



王 灿

王 灿(1986—), 男, 山东滕州人, 博士研究生, 主要从事电能质量分析与控制、高压直流输电、交直流电能变换理论与新技术等方面的研究 (E-mail: wangcan0330@126.com);

罗隆福(1962—), 男, 湖南常德人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事现代电气设备优化设计、电能质量分析与控制、交直流

电能变换理论与新技术等方面的研究;

陈跃辉(1965—), 男, 湖南长沙人, 高级工程师, 硕士, 主要从事 HVDC 和 FACTS 技术、电能质量分析与控制方面的研究;

周冠东(1965—), 男, 湖南长沙人, 高级工程师, 硕士, 主要从事 HVDC 和 FACTS 技术、电能质量分析与控制方面的研究;

李晓芳(1985—), 女, 湖南常德人, 硕士, 主要从事现代电气设备自动化与新技术、新型变压器等方面的研究。

## Improved HVDC system based on inductive filtering and its harmonic transfer characteristics

WANG Can<sup>1</sup>, LUO Longfu<sup>1</sup>, CHEN Yuehui<sup>2</sup>, ZHOU Guandong<sup>2</sup>, LI Xiaofang<sup>2</sup>

(1. College of Electrical & Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. State Grid Hunan Electric Power Company, Changsha 410007, China)

**Abstract:** An IHVDC-IF (Improved High Voltage Direct Current transmission system based on Inductive Filtering) with special wiring pattern is presented, which connects a set of fully-tuned inductive filters, containing only the 11/13 double-tuned filter and without the 5/7 double-tuned filter, to the common winding of two parallel converter transformers to greatly reduce the investment of equipments, such as filter, switchgear, etc. The harmonic transfer characteristics of IHVDC-IF are analyzed and the analytic results show that, the presented IHVDC-IF is also able to effectively shield the harmonic currents in the valve-side windings of converter transformer and reduce the harmonic currents of grid-side windings. A test platform of back-to-back 12-pluse IHVDC-IF is used to verify the correctness of theoretical analysis and the test results illustrate its feasibility.

**Key words:** HVDC power transmission; converter transformer; harmonic analysis; inductive filtering