

HVDC 换流站直流侧 ADF 接线方式的研究

唐卓尧

任 震

(重庆大学电气工程系 400044 重庆) (华南理工大学电力学院 510641 广州)

陆治国 王官洁 代英钧

(重庆大学电气工程系 400044 重庆)

摘 要 以葛上 HVDC 直流侧滤波系统为例,采用频率分析法,分析了原滤波器结构存在的问题。为合理选择 ADF 的接线方式,提出了新的滤波器结构模型,并在频域分析的基础上证明了新的 HPA 结构模型是合理的。该模型不仅克服了原滤波器的缺陷,而且为葛上 HVDC 滤波器加装 ADF 的改造提供了理论指导,具有工程应用价值。

关键词 HVDC 有源直流滤波器 混合型无源-有源滤波器

0 引言

HVDC 系统换流站在整流和逆变过程中产生大量的谐波,这些谐波对线路沿线的音频通信系统产生干扰。随着对谐波抑制要求的提高,只靠加装传统的无源滤波器难以解决问题。

由于电力电子器件的发展及控制技术的提高,采用低成本、高性能的有源直流滤波器(ADF)无疑是解决 HVDC 换流站直流侧通信干扰的一种十分有效的技术^[1]。然而,对超高压大电流的 HVDC 直流线路,如何实现高压线路与 ADF 的联接确是一项值得研究的技术。本文在分析葛洲坝-南桥 HVDC 输电工程葛洲坝直流侧滤波器性能及存在问题的基础上,提出了一种新的滤波器结构模型,该模型不仅克服了原滤波器存在的问题,而且选取了加装 ADF 的理想位置,实现了混合型无源-有源滤波器和抑制谐波的方式。同时,将滤波器的设计方法由数据分析法改为传递函数描述,通过对对象的输入-输出分析、比较,阐述了文中提出的滤波器结构模型及加装 ADF 接线方式的合理性。

1 换流站直流侧 ADF 的接线方式

ADF 与直流线路的联接主要有并联和串联两种基本接线方式。并联是指 ADF 接在电力线与地之间,如图1中1,2和3。在这种方式下,ADF 与电力线之间需经无源耦合元件,如耦合变压器、无源滤波器等。串联是指 ADF 经耦合变压器等将 ADF 串接入电力线路,如图1中4,5和6。

在文献[1~4]中,对 ADF 的接线方式2~6作

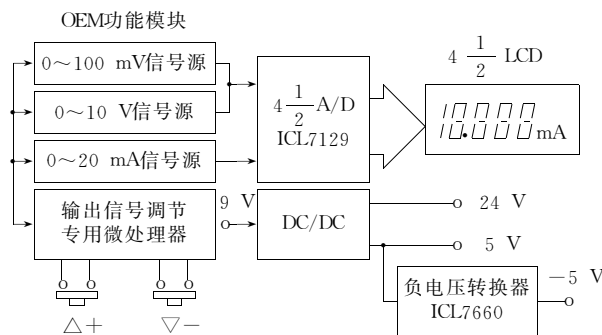


图1 XPTX-100原理图

Fig. 1 Schematic diagram of XPTX-100

了讨论。由于这些接线方式存在种种缺陷,因此,方式1是较合理的一种接线。在该方式中,将 ADF 串接在 PF 底端,由于 ADF 及耦合变压器接地,所以,对超高压、大电流的直流线路,耦合变压器体积不需增加,ADF 的绝缘也不须特殊考虑。本文采用方式1这种混合型的无源-有源滤波方式。

2 葛洲坝换流站直流侧 PF 性能分析

葛洲坝换流站直流侧无源滤波器(PF)结构简图如图2所示。图中 BD12, BD13都是双谐振滤波器,谐振点分别为12和24次,12和36次。仿真计算中,直流线路采用5段 π 型电路模拟,同时考虑南桥侧的 PF 及负载阻抗(以 Z_{li} 表示)。

2.1 谐振现象

葛洲坝直流侧现场实测发现,等效干扰电流严重超标,12脉动换流器18次非特征谐波出现放大现象,即直流线路入端阻抗在900 Hz 附近出现谐振点。通过分析发现,该谐振点是由于换流变压器杂散电容不平衡, BD12与线路阻抗发生谐振所致。然而,

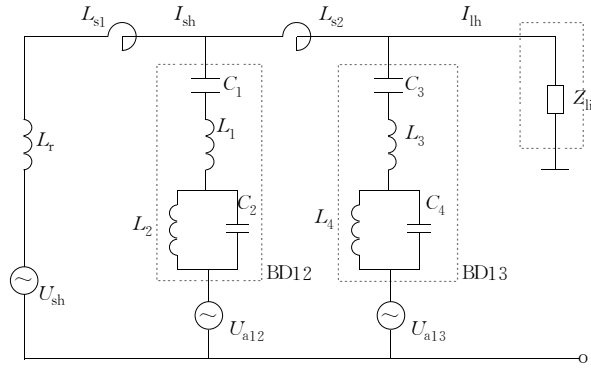


图2 葛洲坝换流站直流侧PF结构简图

Fig. 2 Simplified PF circuit of Gezhouba station DC-side

通过下面的分析发现,出现谐振点不只在900 Hz,在1 650 Hz附近也存在谐振点。现分析如下:

由图2可求得该线路关于谐波电流的传递函数:

$$G_{sl}(s) = \frac{I_{lh}(s)}{I_{sh}(s)} = \frac{1}{1 + \frac{Z_{s2}}{Z_{12}} + \left[\frac{1}{Z_{12}} + \frac{1}{Z_{13}} + \frac{Z_{s2}}{Z_{12}Z_{13}} \right] Z_{li}} \quad (1)$$

式中 $Z_{s2} = s L_{s2} = Z_{s1} = Z_s$ (2)

$$Z_{12} = s L_1 + \frac{1}{s C_1} + \frac{s L_2}{1 + s^2 L_2 C_2} \quad (3)$$

$$Z_{13} = s L_3 + \frac{1}{s C_3} + \frac{s L_4}{1 + s^2 L_4 C_4} \quad (4)$$

式中 Z_{li} 为线路及南桥侧等效阻抗。

令式(1)中的拉氏算子 $s = j\omega$, 即获得幅频特性曲线,如图3所示。从图中可清楚地看出,不仅在900 Hz处出现谐振,而且在1 650 Hz左右也出现一个谐振点。

2.2 BD13与BD12负荷分担

现场运行中,多次出现BD12过载损坏事故,现场实测数据证实BD12的负荷比BD13大10多倍,这一现象从其传递特性也可以清楚地看出。

由图2可求得:

$$G_{s12}(s) = \frac{I_{12}(s)}{I_{sh}(s)} = \frac{Z_s + Z_{13} // Z_{li}}{Z_s + Z_{12} + Z_{13} // Z_{li}} \quad (5)$$

$$G_{al12}(s) = \frac{I_{lh}(s)}{U_{a12}(s)} = \frac{Z_{13} Z_{sr}}{(Z_{13} + Z_{li}) [Z_{12} (Z_{sr} + Z_s + Z_{13} // Z_{li}) + Z_{sr} (Z_s + Z_{13} // Z_{li})]} \quad (7)$$

在BD13下方串联ADF时的传递函数:

$$G_{al13}(s) = \frac{I_{lh}(s)}{U_{a13}(s)} = \frac{Z_{12} Z_{sr} + Z_s (Z_{sr} + Z_{12})}{Z_{13} [Z_{li} (Z_{12} + Z_{sr}) + Z_{sr} Z_{12} + Z_s (Z_{sr} + Z_{12})] + Z_{li} [Z_{sr} Z_{12} + Z_s (Z_{sr} + Z_{12})]} \quad (8)$$

式中 $Z_{sr} = Z_r + Z_s$ 。

$$G_{s13}(s) = \frac{I_{13}(s)}{I_{sh}(s)} = \frac{Z_{12} (Z_{li} + Z_{13})}{(Z_s + Z_{12}) (Z_{13} + Z_{li}) + Z_{13} Z_{li}} \quad (6)$$

将式(2)~(4)代入式(5)~(6),求得相应的幅频特性 $G_{s12}(j\omega)$ 和 $G_{s13}(j\omega)$,如图4所示。

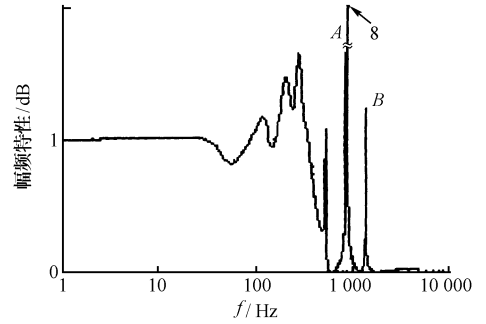


图3 带BD12和BD13线路的幅频特性
Fig. 3 Amplitude frequency response (AFR) of the line with BD12 and BD13

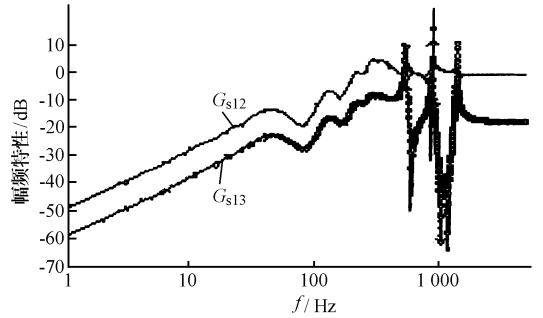


图4 G_{s12} 和 G_{s13} 的幅频特性
Fig. 4 AFR of G_{s12} and G_{s13}

从图4可看出,BD12承担的负荷比BD13大得多,说明现有PF结构是引起BD12负荷分配不均的主要原因之一。

2.3 ADF的加装位置

下面讨论在现有PF结构下如何通过加装ADF来解决线路谐波超量及BD12,BD13负荷分配不均的问题。目前可选择加装ADF的位置只有两种可能,即BD12或BD13下串联ADF。现通过分析其传递特性,研究加装ADF的合理位置。由图2可求得在BD12下方串联ADF时的传递函数:

将式(2)~(4)代入式(7)~(8),可求得传递函数 $G_{al12}(s)$ 和 $G_{al13}(s)$ 的幅频特性,如图5所示。由图5可看出,在感兴趣的频段范围内,难以确定 ADF 加在何处为最好,而且由于谐振点的存在及 BD12, BD13 负荷分配不均等问题,加上 ADF 后很难消除谐振,且可能使谐振加剧。在 BD12 下加 ADF 虽可减少 BD12 负荷,但从技术及经济的角度考虑,工程上不是一种理想的解决问题的方法。

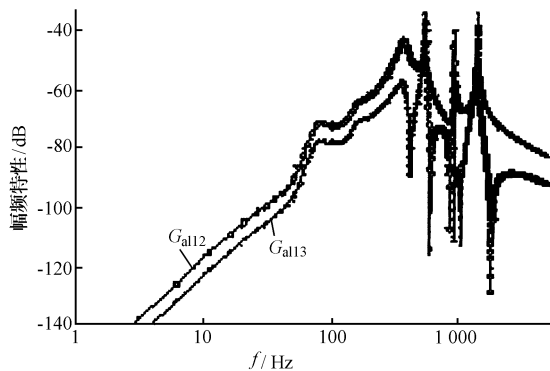


图5 BD12, BD13 下串联 ADF 的幅频特性
Fig. 5 AFR of BD12 and BD13 series ADF

3 PF 的合理结构及 ADF 加装位置的选择

3.1 消除18次谐波谐振点

为消除18次谐波在直流线路的放大,解决 BD12 超负荷问题,并选取加装 ADF 的合理位置,需对葛洲坝直流侧原 PF 的结构进行改造。文献[5]针对消除18次谐波提出了改进方案,图6给出了其中的两种方案。文献[5]采用 EMTP 程序分析得出应优选图6(a)所示接线方式。该方案是在 BD12 中的 $L_2(C_2)$ 上并联一电阻 $R_2(500\ \Omega)$,重新列写式(1)的传递函数表达式,并绘制其幅频特性,如图7所示。

比较图7与图3,可见图7中 A 点的峰值大大降低,从而减少了直流线路900 Hz 的谐振电流。

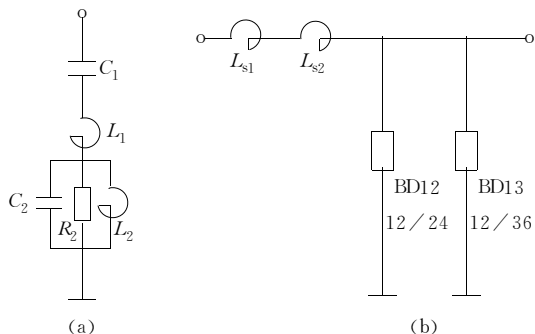


图6 文献[5]提出的PF结构
Fig. 6 PF construction mentioned in [5]

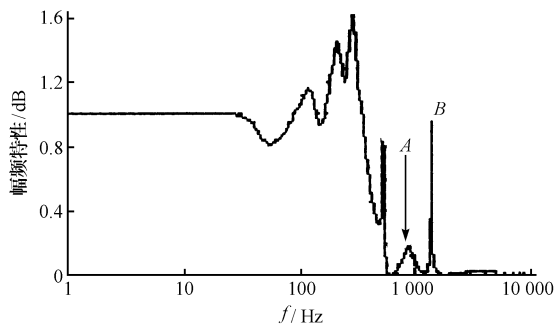


图7 以 R_2 和 BD12 的 L_2 并联时的幅频特性
Fig. 7 AFR of BD12 when R_2 parallel with L_2

3.2 建议的 PF 结构

为克服现有 PF 结构存在的缺陷,将原 PF 结构(图2)改为采用图6(b)的接线方式。然而,简单地将 L_{s2} 与 BD12 换位,线路谐波干扰电流比原 PF 结构时增大近一倍[5],且谐振放大现象仍然存在,如图8 曲线1所示。因此,为降低谐振放大点,需增加 BD12 的阻尼电阻,同时,在 BD13 的 $L_4(C_4)$ 上并联一电阻 R_4 ,还可降低第二个谐振放大点,即 B 点。参照式(1)可推导出 L_{s2} 与 BD12 换位后的输入、输出传递特性:

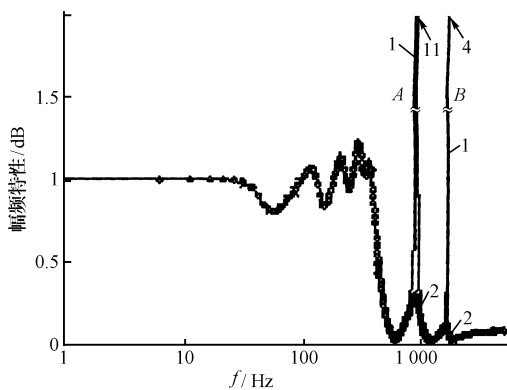


图8 两种情况下, $G_{sl}(j\omega)$ 幅频特性
Fig. 8 AFRs of G_{sl} in two ways

$$G_{sl}(s) = \frac{I_{sl}(s)}{I_{sh}(s)}$$

图8绘制了两种情况下谐波源 I_{sl} 到直流线路上的幅频特性曲线。曲线1为图6(b)的方式,曲线2为加大 BD12 中的阻尼电阻并在 BD13 的 L_4 上并联电阻的方式。可见,曲线2 具有较理想的传递特性,也正是本文提出的 PF 结构模型。

图3或图8放大点 A, B 的出现是由于 BD12, BD13 与线路谐振所致。通过增加电阻 R_2, R_4 , 即增大 BD12 和 BD13 的阻尼,降低 A, B 两谐振放大点,这一现象通过分析 BD12, BD13 的阻抗频率特性就十分清楚。BD12, BD13 加不同值电阻 R 的阻频特性绘于图9。对于 BD12, R_2 的阻值(500[5], 2 500 Ω) 对谐振点处阻抗值影响不大,但 R_2 小, 900 Hz 处就低,

即图 3 或图 8 曲线中 A 点就低;对于 BD13, R_4 太小 (如 500Ω), $12/36$ 次谐振点 Z_{13} 增大, 影响滤波效果, 但 R_4 又不能太大, 否则图 3 或图 8 的 B 点没有明显降低。对 HVDC 高压直流线路, 综合考虑取 $R_2 = 500 \Omega$, $R_4 = 2\,500 \Omega$, 既可降低图 3(图 8)A、B 谐振放大, 又可使 R 上的功耗不至于太大, 如图 8 中线 2 所示。

L_{s2} 和 BD12 换位后, 在新的 PF 结构模型下, 由于 L_{s2} 的作用, 减少了 BD12 的负荷, 改善了 BD12 和 BD13 间的负荷均衡。由图 6(b) 可重新推得谐波源 $I_{sh}(s)$ 到 BD12、BD13 的传递函数。求解过程与式 (5)、(6) 相同, 图 10 示出原 PF 结构与新 PF 结构下 BD12、BD13 负荷特性的比较曲线。由图 10(a) 看出, BD12 负荷大大减少, 而 BD13 负荷却有所增加。

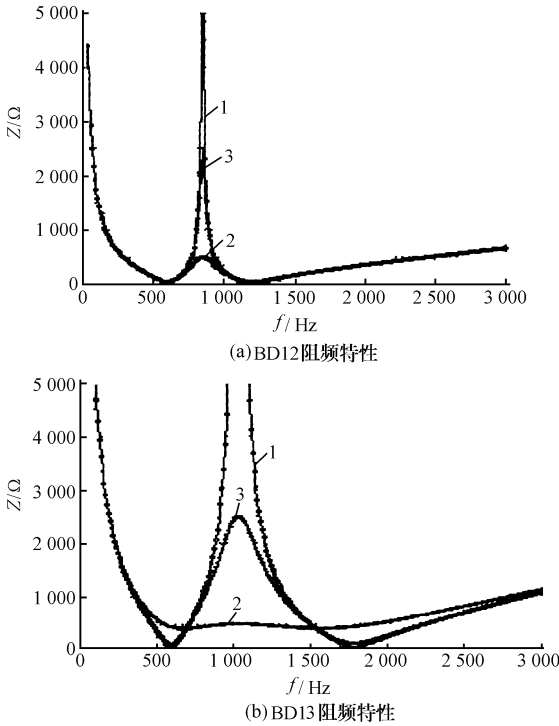


图9 BD12、BD13的阻频特性
1. $R=0$ 2. $R=500 \Omega$ 3. $R=2\,500 \Omega$
Fig. 9 Impedance frequency characteristics of BD12 and BD13

3.3 选择加装 ADF 的位置

在建议的 PF 结构模式下(图6(b)), 可选择加装 ADF 的位置是 BD12 或 BD13 下, 这可从两方面分析选择加装 ADF 位置的合理性。一方面, ADF 产生的谐波电流要经 BD12 或 BD13 流到线路上, 所以 BD12 或 BD13 的阻抗对 ADF 的容量和谐波抑制效果起很大作用, 图 11 示出了 BD12、BD13 的阻抗频率比较曲线, 由图看出, 在感兴趣的频段内, BD12 的阻抗低于 BD13, 故在 BD12 下加装 ADF, 其容量要低于 BD13 下加装的 ADF。

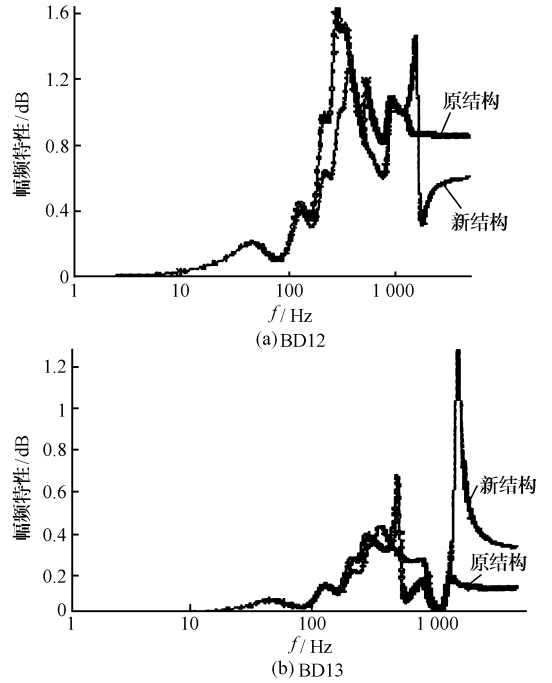


图10 BD12、BD13的负荷特性曲线
Fig. 10 AFRs of BD12 and BD13 under load

另一方面, 求取 ADF 到线路的传递特性, 即:

$$G_{a12}(s) = \frac{I_{lh}(s)}{U_{a12}(s)} = \frac{Z_{sr}' // Z_{13} // Z_{li}}{Z_{li}(Z_{12} + Z_{sr}' // Z_{13} // Z_{li})} \quad (9)$$

$$G_{a13}(s) = \frac{I_{lh}(s)}{U_{a13}(s)} = \frac{Z_{sr}' // Z_{12} // Z_{li}}{Z_{li}(Z_{13} + Z_{sr}' // Z_{12} // Z_{li})} \quad (10)$$

式中 $Z_{sr}' = Z_{sr} + Z_s$ 。

由式(9)、(10)可绘制幅频特性, 如图12所示。由图看出, 曲线1的增益远大于曲线2, 故在 BD12 下加装 ADF 是较合理的位置。

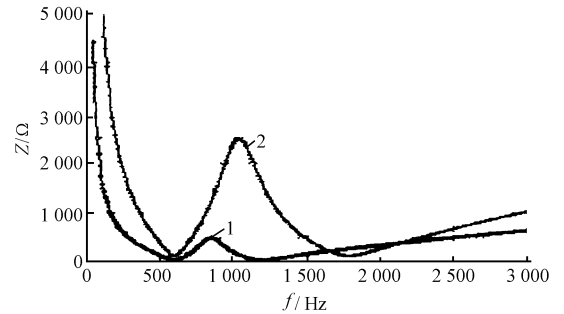


图11 BD12、BD13的阻频特性
1. BD12, $R=500$ 2. BD13, $R=2\,500$
Fig. 11 Comparing impedance frequency responds of BD12 and BD13

4 结论

在 HVDC 直流侧采用混合型无源-有源滤波器
(下转第38页)

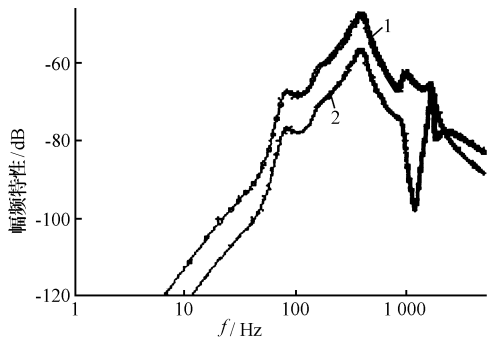


图12 新PF结构下,ADF到线路的幅频特性
Fig. 12 AFR of ADF and line in new PF model

抑制电网谐波是一种十分有效的技术。文中以葛洲坝换流站直流侧滤波系统为例,分析了原PF存在的问题,提出了新的无源-有源滤波器结构模型,由此得到以下结论:

(1) 通过BD12与 L_{s2} 换位,大大减轻了BD12的负荷,使BD12,BD13承担的负荷趋于平衡。

(2) 分析了900 Hz谐振产生的根源,发现了另一谐振点;通过加电阻减少BD12,BD13的阻尼,从而消除出现的两谐振点。

(3) 新的结构模型下获得的传递特性,给加装

ADF提供了有利的条件,是实现ADF抑制电网谐波的理想接线方式。

5 参考文献

- 1 Wong C. Feasibility Study of AC and DC Side Active Filter for HVDC Converter Terminals, IEEE Trans Power Delivery, 1989,4(4):2067~2075
- 2 Watanabe E H. Series Active Filter for the DC Side of HVDC Transmission System. Tokyo: Proc IPEC, 1990
- 3 Peng F Z. A New Approach to Harmonic Compensation in Power System——A Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters. IEEE Trans,1990, 26 (6):983~990
- 4 唐卓尧,任震,等. HVDC换流站直流侧谐波补偿的一种新方法. 成都:Proceeding Cus——EPSA, 1995
- 5 郑劲. 葛上直流谐波超标原因分析和处理措施研究. 中国电机工程学会. 直流输电专委会论文集,1994

唐卓尧,男,1962年生,副教授,博士研究生,研究方向为高压直流输电,有源滤波器。

任震,男,1938年生,教授,博士生导师,研究方向为高压直流输电、可靠性工程、小波理论及应用、现代滤波技术。

STUDY ON CONNECTING ADF TO DC-SIDE OF HVDC STATION

Tang Zhuoyao (Chongqing University, 630044, Chongqing, China)

Ren Zhen (South China University of Technology, 510641, Guangzhou, China)

Lu Zhiguo, Wang Guanjie, Dai Yingjun (Chongqing University, 630044, Chongqing, China)

Abstract Applying a hybrid passive-active filter (HPA) to suppressing harmonic current on dc-side of HVDC station is feasible from technique and economy points of view. This paper analyzes GZB-NQ filtering characteristic of passive filters on dc-side of GZB HVDC station using frequency analysis method and points out its drawbacks in construction. In order to reasonably design connecting ways of ADF, the paper proposes new constuction model for HPA filters and proves its reasonableness. The new model not only overcomes those defects existing in original filters, but also puts forward reasonable location connecting ADF to HVDC system.

Keywords HVDC active DC filter (ADF) hybrid passive-active filter (HPA)