Vol.40 No.6 Jun. 2020

# 基于MMC拓扑的混合型滤波器设计及其 在LCC-HVDC中的应用

李双健1,贾秀芳1,季一鸣2,赵成勇1

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206;2. 国网北京经济技术研究院,北京 102209)

摘要:针对传统无源滤波器占地面积大、易与交流电网阻抗引发串并联谐振等固有问题,提出一种适用于基于电网换相换流器的高压直流输电(LCC-HVDC)系统交流侧滤波的混合型滤波器。该混合型滤波器的无源 滤波部分与有源滤波部分串联后与电网并联,其中无源滤波部分为传统的双调谐滤波器,有源滤波部分基于 模块化多电平换流器(MMC)拓扑结构。分析了有源滤波部分的输出电压控制增益、交流电网等效阻抗对混 合型滤波器滤波性能的影响,利用根轨迹法确定了增益的取值范围。最后在Cigre模型的整流侧完成仿真验 证。结果表明,该混合型滤波器能够减少传统无源滤波器的占地面积,具有良好的滤波效果及较强的鲁棒 性,能实现换流站无功功率的全补偿。

关键词:LCC-HVDC;混合型滤波器;MMC;滤波;抑制谐振;无功补偿 中图分类号:TM 743;TM 721.1 文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202006013

# 0 引言

目前几乎所有的基于电网换相换流器的高压直流输电(LCC-HVDC)工程均在换流母线处装设无源滤波器用于滤除谐波,降低直流系统对交流系统和通信系统的影响<sup>[1-2]</sup>。无源滤波器虽然能够滤除大部分谐波,但是有其固有缺陷:滤波设备及无功补偿装置约占换流站占地面积的1/3,是换流站中最主要的占地成本之一<sup>[2]</sup>;无源滤波器的滤波效果与交流电网的阻抗特性关系紧密,在某些频率下交流系统阻抗与无源滤波器的阻抗可能会引发串并联谐振,加重交流系统的谐波污染<sup>[2-5]</sup>;无源滤波器滤波效果受电网频率和元件参数变化的影响,容易引起失谐<sup>[3-5]</sup>。

随着电力电子装置的高速发展,设备性能的不断提升,滤波性能更优、占地面积更小的有源滤波器在LCC-HVDC系统中的应用具备了可能。文献[6-7] 提出一种基于模块化多电平换流器(MMC)拓扑结构的并联型有源滤波器,将有源滤波器控制成谐波 电流源,使其产生和负载谐波电流大小相等、相位相反的补偿电流,从而达到滤波的目的。但若将该滤 波装置直接应用于LCC-HVDC系统,每相需串联上 百个子模块,成本高。文献[8]研制了一种大功率并 联混合型滤波器,有源滤波器基于两电平电压源换 流器,为减小其容量,将有源滤波器通过变压器耦合 到无源滤波器2次滤波支路的电感和电容两端。该 滤波装置拓扑较复杂,并且具有耦合变压器容量不

### 收稿日期:2019-12-03;修回日期:2020-04-07

基金项目:国家电网有限公司科技项目(SGTYHT/18-JS-206) Project supported by the Science and Technology Project of SGCC(SGTYHT/18-JS-206) 足、高频谐波无法通过的问题。文献[9]提出一种高 电压等级的新型混合型滤波器,有源滤波器通过耦 合变压器与单调谐滤波器的部分电感并联。该滤波 器除具有文献[8]中的问题以外,仅在35kV的电压 等级下进行了仿真分析,能否应用于LCC-HVDC系 统有待验证。总体而言,目前关于大容量高电压等 级的混合型滤波器的研究越来越多,但是有源部分 的研究集中在两电平电压源型逆变器,而且由于电 力电子器件本身的电压、电流等级限制,此类混合型 滤波器的容量有限,很少应用于高压直流输电系统 中。为解决这一问题,采用MMC拓扑结构代替两电 平电压源型逆变器,从而在器件容量的允许范围内 实现有源滤波器补偿容量的提升。

本文提出一种适用于LCC-HVDC系统交流侧滤 波的混合型滤波器,该混合型滤波器为无源滤波与 有源滤波直接串联后与电网并联,其中无源滤波为 传统的双调谐滤波器,有源滤波基于MMC全桥子模 块级联结构。全桥MMC能够通过低压器件实现高 压大功率输出,无需变压器,输出电压波形理想,适 用于高压直流输电系统。以Cigre模型的整流侧为 应用对象,对混合型滤波器中无源滤波部分的参数 进行了计算,结合混合型滤波器的单相谐波等效电 路定义了谐波电流抑制函数、谐波电压抑制函数,并 利用二者分析了增益、交流电网阻抗对混合型滤波 器滤波性能的影响。在PSCAD/EMTDC 仿真平台 中搭建了仿真电路,从滤波、动态跟踪、无功补偿等 方面进行了仿真分析。

# 1 混合型滤波器拓扑结构及工作模式

### 1.1 混合型滤波器的拓扑结构

混合型滤波器的拓扑结构如图1所示。图中,

 $U_{s}$ 、 $Z_{s}$ 分别为交流电网电压和阻抗; $i_{s}$ 、 $i_{L}$ 分别为交流 电网、负载电流; $i_{r}$ 为滤波支路电流。在低压小容量 场合,对于无源滤波器和有源滤波器直接串联的混 合型滤波器,无源滤波部分常采用多组单调谐滤波 器并联的结构<sup>[5]</sup>。考虑到在LCC-HVDC工程中,双 调谐滤波器与完成同样功能的2个单调谐滤波器相 比,投资更少,经济性更好<sup>[10-12]</sup>,因此无源滤波部分 采用11/13次双调谐滤波器,由电容 $C_{1}$ 、 $C_{2}$ 和电感  $L_{1}$ 、 $L_{2}$ 组成。无源滤波器还并有无功补偿电容器 $C_{3}$ , 用以对换流站进行无功补偿。有源滤波部分基于 MMC拓扑结构,可通过增加级联子模块数来实现高 压大功率输出,其中L为有源滤波器的桥臂电感, SM<sub>1</sub>、SM<sub>2</sub>、…、SM<sub>2</sub>为子模块。



# 图1 混合型滤波器的拓扑结构

# Fig.1 Topology structure of hybrid filter

该混合型滤波器可通过改造现有的无源滤波器 实现。无源滤波部分在基波频率处呈现容性,可承 受大部分交流电网的基波电压,因而能够有效降低 有源滤波部分的输出电压,减少子模块的级联数,在 一定程度上保证经济性。

另外,该混合型滤波器在占地面积上具有一定 优势,其原因主要有以下2点。

(1)传统无源滤波器常采用调谐滤波器、高通滤 波器以及带高通的调谐滤波器等多种滤波器<sup>[2]</sup>。该 混合型滤波器只采用了11/13次双调谐滤波器,无 源滤波器的种类减少;并且有源滤波部分能够消除 或抑制所有次谐波,因此11/13次双调谐滤波器还 可以省略阻尼电阻,减小体积<sup>[13-14]</sup>。

(2)传统无源滤波器及无功补偿电容器每组容量不能太大,否则投切时会带来较大的无功突变和电压波动,因此传统无源滤波器及无功补偿电容器通常会分成很多组,这也是影响占地面积的重要因素。有源滤波器能够通过控制动态无功输出<sup>[15]</sup>,对

电容器的投切波动进行补偿,即可增加并联电容器 每组的无功容量,减少组数,从而减少占地面积。

### 1.2 混合型滤波器的工作模式

为简化分析,以单相为基础,混合系统的谐波等效电路如图2所示。图中,Z<sub>sh</sub>、Z<sub>Fh</sub>分别为交流电网、 无源滤波器的等效谐波阻抗;I<sub>Lh</sub>、I<sub>sh</sub>分别为负载、交 流电网谐波电流;I<sub>Fh</sub>为滤波支路谐波电流;U<sub>sh</sub>为交 流电网谐波电压;有源滤波部分采用交流电网谐波 电流反馈控制,即有源滤波器输出电压U<sub>c</sub>=KI<sub>sh</sub>,K为 增益<sup>[34]</sup>。



图2 混合系统的谐波等效电路

Fig.2 Harmonic equivalent circuits of hybrid filter 根据基尔霍夫定律和叠加定理,由图2可得:

$$I_{\rm Sh} = \frac{Z_{\rm Fh}}{Z_{\rm Sh} + Z_{\rm Fh} + K} I_{\rm Lh} + \frac{U_{\rm Sh}}{Z_{\rm Sh} + Z_{\rm Fh} + K}$$
(1)

当仅考虑对负载谐波电流 *I*<sub>Lh</sub>进行补偿时,等效 电路如图 2(b)所示,有源滤波部分相当于在交流电 网侧串联了阻值为*K*的大电阻,增大了交流电网阻 抗,大部分的负载谐波电流 *I*<sub>Lh</sub>流入滤波器,从而改 善了无源滤波器的滤波效果,抑制了电网与无源滤 波器引发的并联谐振。

当仅考虑对电网谐波电压U<sub>sh</sub>进行补偿时,等效 电路如图2(c)所示,有源滤波部分相当于在电网和 无源滤波器回路上串联了阻值为K的大电阻,不仅 能够抑制电网谐波电压产生的谐波电流,还能够抑 制Z<sub>th</sub>和Z<sub>sh</sub>产生的串联谐振。

### 2 无源滤波部分参数计算

为设计适用于 Cigre 模型整流侧的混合型滤波器,需对无源滤波部分的参数进行计算。Cigre 模型整流侧的拓扑结构见附录中图 A1<sup>[16]</sup>,参考图 A1 中 无源滤波器参数,对图 1 中 11 / 13 次双调谐滤波器 及无功补偿电容器进行参数计算。

对于高压直流输电系统,换流站消耗的无功功 率主要是由并联在交流母线上的无功补偿电容器和 无源滤波器中的高压电容进行就地补偿<sup>[17]</sup>,其补偿 的无功功率为基频下的无功功率<sup>[3]</sup>:

$$Q_c = U^2 \omega C = U^2 C \times 2\pi f \tag{2}$$

其中,U为交流母线的基波电压;ω为基波角频率;C 为无功补偿电容器与无源滤波器中的高压电容之 和;f为基波频率。 Cigre 模型整流侧 C 型阻尼滤波器、高通滤波器 以及无功补偿电容器的无功补偿电容值和对应的无 功功率分别为 6.685、6.685、3.342  $\mu$ F 和 250、250、 125 Mvar,则电容所补偿的无功功率为 625 Mvar。 由此对图 1 中 11 / 13次双调谐滤波器的高压电容  $C_1$ 和无功补偿电容器  $C_3$ 进行计算,在权衡其滤波能力、 无功补偿能力和体积成本各方面后,决定 250 Mvar 的无功功率由 11 / 13次双调谐滤波器补偿,375 Mvar 的无功功率由无功补偿电容器进行补偿,所以电容 值  $C_1$ 和 $C_3$ 分别为 6.685、10.029  $\mu$ F。

11 / 13 次双调谐滤波器中参数 $L_1, L_2, C_2$ 的计 算过程参考文献[18-19],分别为 $L_1$ =10.599 mH, $L_2$ = 0.297 mH, $C_2$ =238.75  $\mu$ F。

# 3 混合型滤波器的滤波特性

为了分析滤波特性,参考文献[9],定义谐波电流抑制函数 $\eta_1$ 为在不考虑电网谐波电压 $U_{sh}$ 的条件下,电网谐波电流 $I_{sh}$ 与负载谐波电流 $I_{th}$ 的比值,即:

$$\eta_{1} = \frac{I_{\rm Sh}}{I_{\rm Lh}} = \frac{Z_{\rm Fh}}{Z_{\rm Sh} + Z_{\rm Fh} + K}$$
(3)

定义谐波电压抑制函数 $\eta_2$ 为在不考虑负载谐波 电流 $I_{Lh}$ 的条件下,电网谐波电流 $I_{Sh}$ 与电网谐波电压  $U_{Sh}$ 的比值,即:

$$\eta_2 = \frac{I_{\rm Sh}}{U_{\rm Sh}} = \frac{1}{Z_{\rm Sh} + Z_{\rm Fh} + K}$$
(4)

由式(3)和式(4)可以看出,增益K、交流电网谐 波阻抗Z<sub>sh</sub>均对混合型滤波器的滤波特性产生影响。

### 3.1 增益 K 对 $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 的影响

Cigre模型整流侧的交流电网阻抗采用了R-R//L等效电路,如图A1所示,代表了发电占主导地位的地区<sup>[16]</sup>,但是阻抗幅值太大,在不加滤波器的情况下,电网电流谐波畸变率仅为1.35%。为了更好地验证混合型滤波器的滤波性能,将Cigre模型整流侧的交流电网阻抗调整为采用R-L小阻抗电路,即 $R_s$ =0.5495 $\Omega$ , $L_s$ =6.52 mH,调整后的交流电网阻抗幅值将减小为近原来的一半,电网电流谐波畸变率上升至7.44%。

保持交流电网侧电阻 $R_{\rm s}$ =0.5495  $\Omega_{\Lambda}L_{\rm s}$ =6.52 mH 不变。选取不同增益K,谐波电流抑制函数 $\eta_1$ 和谐 波电压抑制函数 $\eta_2$ 的幅频特性如图 3 所示。

由图 3(a)可知,当仅考虑对负载谐波电流进行 补偿时,若只投入无源滤波器,即K=0时,滤波器只 对 11、13次谐波有抑制作用。由于无源滤波器主要 是针对负载谐波电流而设计,无源滤波器为11/13 次双调谐滤波器,即对负载谐波电流中的11、13次 谐波有较大的抑制作用。

由图3(b)可知,当仅考虑对电网谐波电压进行补偿时,若只投入无源滤波器,即K=0时,滤波器只对12次谐波有抑制作用。由于有源滤波器的存在,



### 图3 增益K对 $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 的影响

Fig.3 Effect of gain K on  $\eta_1$  and  $\eta_2$ 

11/13次双调谐滤波器中未加阻尼电阻,因此会在 12次谐波附近处产生并联谐振,在并联谐振处11/13 次双调谐滤波器的阻抗值最大,对12次谐波附近的 电流产生抑制作用。

投入混合型滤波器后,所有频率段的幅频特性 均被下压,说明有源滤波部分的加入使无源滤波器 的滤波效果得到改善,并且增益K值越大,滤波效果 越好。从图3中还可看出,混合型滤波器投入后,系 统不存在谐振点,说明有源滤波部分对谐振起到抑 制作用。

应当注意,增大增益*K*以提高滤波效果并不是 无限制的,*K*值的大小可能会影响系统的稳定性<sup>[20]</sup>。 由图2(a)可以得到电网谐波电流为:

$$I_{\rm Sh} = \frac{U_{\rm Sh}}{Z_{\rm Sh} + Z_{\rm Fh}} + \frac{Z_{\rm Fh}I_{\rm Lh}}{Z_{\rm Sh} + Z_{\rm Fh}} - \frac{U_{\rm C}}{Z_{\rm Sh} + Z_{\rm Fh}}$$
(5)

根据式(5),整个系统的传递函数形式的结构框 图如图4所示。



#### 图4 系统的结构框图

Fig.4 Block diagram of system

图中虚线框内是闭环控制系统,由此得到开环 传递函数为:

$$G(s) = \frac{K}{Z_{\rm Sh}(s) + Z_{\rm Fh}(s)} \tag{6}$$

由开环传递函数可以得到闭环控制系统的根轨 迹,如图5所示。图中,点虚线为等阻尼比线,线上 数值为阻尼比。

由图5可知,当增益*K*由0→∞时,根轨迹不会越 过虚轴进入*S*平面右半边,即根轨迹全部位于*S*平面 左半边,故闭环系统对*K*>0都是稳定的。

在工程上,一般的控制系统大多设计成欠阻尼 系统,阻尼比ζ一般取0.5~0.8,当阻尼比ζ=0.707时, 称为最佳阻尼比<sup>[21]</sup>,由此根据图5确定增益*K*=70。



图5 闭环控制系统的根轨迹

Fig.5 Root locus of closed-loop control system

### 3.2 交流电网阻抗 $Z_s$ 对 $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 的影响

交流电网阻抗通常是变化的,这使得系统发生 串并联谐振的频率值也是变化的。保持交流电网侧 电阻 $R_s$ =0.5495  $\Omega$ 不变,电感 $L_s$ 分别取2、5、9 mH,增 益K=70。只投入无源滤波器,即K=0时,在不同的 系统等效电感 $L_s$ 下,谐波电流抑制函数 $\eta_1$ 和谐波电 压抑制函数 $\eta_2$ 的幅频特性曲线如图6所示。投入混 合型滤波器,在不同的 $L_s$ 下, $\eta_1$ 和 $\eta_2$ 的幅频特性曲线 如图7所示。







由图6可知,仅投入无源滤波器时,谐振点是无 源滤波器与系统电感L<sub>s</sub>分别发生并联谐振、串联谐 振。随着L<sub>s</sub>的增大,其谐振点向低频偏移。但是L<sub>s</sub> 越大,滤波效果越好,因此无源滤波器的谐波补偿特 性受交流电网阻抗的影响较大。

由图7可知,混合型滤波器投入后,无源滤波器

与 $L_s$ 产生的串并联谐振得到有效抑制,并且随着 $L_s$ 的增大,滤波效果基本一致,说明 $K \gg |Z_s|$ 时,混合型滤波器能够消除 $Z_s$ 对谐波抑制的影响,其谐波补偿特性基本不受交流电网阻抗变化的影响。

# 4 仿真分析

利用 PSCAD / EMTDC 仿真平台,在 Cigre 模型 的整流侧进行仿真验证。有源滤波部分的控制电路 主要包括指令电流运算电路及载波移相调制电路 2 个部分。指令电流运算电路是利用基于瞬时无功功 率理论的谐波检测方法检测电网谐波电流 *I*<sub>sh</sub>,输出 电压的指令信号为 *U*<sub>c</sub>=*KI*<sub>sh</sub>。A 相输出电压波形图 见附录中图 A2,设功率子模块额定电压为 2.25 kV, 则有源滤波部分每相级联 2 个全桥子模块即可满足 要求。

### 4.1 滤波效果分析

混合型滤波器投入前、后交流电网三相电流如图8所示,A相电流 $i_{sa}$ 频谱图如图9所示,滤波器输出的补偿电流 $i_{r}$ 如图10所示,电网电流各次谐波的畸变率如表1所示。

由图 8—10 及表1 可知,混合型滤波器投入前, 交流电网电流畸变严重,主要包含11、13、23、25 等





Fig.9 Spectrum diagram of phase-A current of AC grid with and without hybrid filter





### 表1 混合型滤波器投入前、后交流电网谐波畸变情况

Table 1 Harmonic distortion of AC grid with and without hybrid filter

谐波	谐波畸变率/%		谐波	谐波畸变率/%	
次数	投入前	投入后	次数	投入前	投入后
11	6.02	0.16	23	0.38	0.09
13	4.33	0.13	25	0.36	0.05

12k±1(k=1,2,3,…)次特征谐波,总谐波畸变率为 7.44%;混合型滤波器投入后,电网电流接近正弦 波,各次谐波含量均大幅降低,总谐波畸变率降低至 0.34%,说明谐波得到有效抑制。

为验证系统对负载突变的动态性能,在2s时设 置交流电网电阻值突增100Ω。电网三相电流的动 态响应图见附录中图A3。2s负载突变后,由于定电 流控制的调节作用及控制回路的延时,电网电流约 经过2个工频周期后恢复稳定,具有较好的动态跟 踪性能,谐波抑制效果也很理想。

# 4.2 无功补偿效果分析

混合型滤波器投入前后,整流侧交流电网发出 的有功功率、无功功率的变化情况见附录中图A4, 功率因数的变化情况见附录中图A5。混合型滤波 器在2s投入后,电网侧发出的有功功率基本不受影 响,仍为1000 MW,发出的无功功率明显降低,其减 少的无功量由滤波设备进行补偿。交流电网的功率 因数由原来的0.78上升到1,说明混合型滤波器在 滤波的同时能够对换流站的无功功率实现全补偿。

# 5 结论

通过分析混合型滤波器工作模式、滤波特性,并在PSCAD/EMTDC仿真平台进行仿真验证,可得如下结论:

(1)LCC-HVDC系统采用混合型滤波器后,由于 无源滤波器的种类减少,并联电容器每组的无功容 量增加,组数减少,因此能够大幅减少换流站的占地 面积;

(2)有源滤波部分采用电网谐波电流反馈控制, 控制成谐波电压源,相当于在LCC-HVDC系统的交 流侧串联了阻值为K的大电阻,使其具有良好的滤 波效果;

(3)该混合型滤波器具有较强的鲁棒性,不会产 生与交流电网串并联谐振的问题,并且只要增益值 足够大,就能够有效降低交流电网阻抗对滤波效果 的影响;

(4)该混合型滤波器的动态跟踪性能较好,并且 在滤波的同时能够对换流站消耗的无功功率实现全 补偿。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

### 参考文献:

- [1] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 2版. 北京:中国电力出版社,2011:184-197.
- [2] 韩民晓,文俊,徐永海. 高压直流输电原理与运行[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,2012:43-52.
- [3] 王兆安. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版 社,2016:113-125.
- [4]范瑞祥,罗安,周柯,等.并联混合型有源电力滤波器的建模和 控制策略分析[J].中国电机工程学报,2006,26(12):55-61.
   FAN Ruixiang,LUO An,ZHOU Ke, et al. The modeling and the control strategy analysis of shunt hybrid active power filters[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(12):55-61.
- [5] 王玲玲. 并联混合型有源电力滤波技术研究[D]. 杭州:浙江 大学,2015.

WANG Lingling. Research on techniques of shunt hybrid active power filter[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2015.

- [6] GHETTI F, FERREIRA A, BRAGA H, et al. A study of shunt active power filter based on Modular Multilevel Converter (MMC) [C]//IEEE / IAS International Conference on Industry Applications. Fortaleza, Brazil; IEEE, 2012; 1-6.
- [7]武健,刘瑜超,徐殿国.基于模块多电平变换器的并联有源滤 波器控制策略研究[J].电工技术学报,2013,28(12):52-59.
   WU Jian,LIU Yuchao,XU Dianguo. Control strategy of shunt active power filter based on modular multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013,28(12): 52-59.
- [8] 谭甜源,罗安,唐欣,等.大功率并联混合型有源电力滤波器的研制[J].中国电机工程学报,2004,24(3):46-50.
   TAN Tianyuan,LUO An,TANG Xin, et al. Development of high capacity hybrid power filter[J]. Proceedings of the CSEE,2004, 24(3):46-50.
- [9] 黎燕,罗安,方璐,等. 高电压等级新型混合型有源滤波器[J]. 电工技术学报,2013,28(6):147-157.
   LI Yan,LUO An,FANG Lu, et al. A novel hybrid active power filter at high-voltage rank[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(6):147-157.
- [10] 张志文,曾令雄,谢斌,等. 基于能量模型的混合感应滤波系统 控制方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(10):101-107.
  ZHANG Zhiwen,ZENG Lingxiong,XIE Bin, et al. Control method of hybrid inductive filtering system based on energy model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 101-107.
- [11] 辛清明,黄莹,邱伟,等. 高压直流输电系统阻尼型双调谐交流滤波器的优化设计[J]. 电力自动化设备,2017,37(10):218-223.
  XIN Qingming, HUANG Ying, QIU Wei, et al. Optimal design of damping type double tuned AC filter in HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,
- 37(10):218-223.
  [12] ZAMANI M, MOHSENI M. Damped-type double tuned filters design for HVDC systems[C] //The 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation. Barcelona, Spain; IEEE, 2017;912-917.
- [13] 薛英林,徐政,李普明,等. 高压直流输电双调谐滤波器阻尼电阻的选取原则[J]. 电力系统自动化,2011,35(13):92-97.
   XUE Yinglin, XU Zheng, LI Puming, et al. Principles for selecting damping resistors of double-tuned filters for HVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(13):92-97.
- [14] 吕志鹏,吴鸣,宋振浩,等. 高阶无源滤波器对比分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(6):54-60.
   LÜ Zhipeng,WU Ming,SONG Zhenhao, et al. Comparative ana-

lysis of high-order passive filters[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(6):54-60.

- [15] 刘益青,高伟聪,魏欣,等.考虑群延迟和暂态时延的短窗低通 滤波器设计[J].电力自动化设备,2018,38(11):21-27.
  LIU Yiqing,GAO Weicong,WEI Xin,et al. Design of short-window low-pass filter considering group delay and transient delay[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 21-27.
- [16] SZECHTMAN M, WESS T, THIO C. A benchmark model for HVDC system studies[C]//International Conference on AC and DC Power Transmission. London, UK: IET, 1991: 374-378.
- [17] LÜ Wentao, XU Zeyu, WANG Chaoliang, et al. Calculation method for equivalent model of AC filters in HVDC transmission system[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(16):2301-2305.
- [18] 李普明,徐政,黄莹,等.高压直流输电交流滤波器参数的计算
  [J].中国电机工程学报,2008,28(16):115-121.
  LI Puming,XU Zheng,HUANG Ying, et al. Algorithm for the parameters of AC filters in HVDC transmission system[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(16):115-121.
- [19] 王刘拴. ±800 kV特高压直流输电谐波特性的研究[D]. 广州: 广东工业大学,2014.

WANG Liushuan. Harmonic characteristics research on ±800 kV UHVDC transmission system[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2014.

- [20] 黄海宏,魏阳超,王海欣,等.特定次谐波滤除锁相在有源电力 滤波器中的应用[J].电力自动化设备,2019,39(12):36-40.
   HUANG Haihong,WEI Yangchao,WANG Haixin, et al. Application of specific harmonic filtering phase lock in APF[J].
   Electric Power Automation Equipment,2019,39(12):36-40.
- [21] 夏德钤,翁贻方.自动控制理论[M].2版.北京:机械工业出版社,2004:117-159.

#### 作者简介:



李双健(1995—),男,河北沧州人,硕 士研究生,主要研究方向为高压直流输电 (**E-mail**;shuangjian\_li@126.com);

贾秀芳(1966—), 女, 黑龙江大庆人, 副教授, 主要研究方向为电能质量分析与评 估(**E-mail**:xiufangjia@163.com);

季一鸣(1989—),女,浙江丽水人,高 级工程师,硕士,主要研究方向为高电压技 术(**E-mail**:iyiming@chinasperi.sgcc.com.cn);

赵成勇(1964—),男,浙江丽水人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为柔性直流输电与高压直流输电、电能质量分析与控制等(E-mail:chengyongzhao2@163.com)。

(编辑 王欣竹)

# Design of hybrid filter based on MMC topology and its application in LCC-HVDC

LI Shuangjian<sup>1</sup>, JIA Xiufang<sup>1</sup>, JI Yiming<sup>2</sup>, ZHAO Chengyong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Grid Economic and Technology Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: Aiming at the inherent defects of traditional passive filter, such as big ground occupation and series-parallel resonance easily caused with AC grid impedance, a hybrid filter that is suitable for AC side filtering of LCC-HVDC (Line Commutated Converter based High Voltage Direction Current) system is proposed. The passive filtering part of the hybrid filter is connected in series with the active filtering part, and then connected in parallel with the grid. The passive filtering part is the traditional double tuned filter. The active filtering part is based on MMC (Modular Multilevel Converter) topology. The influence of the output voltage control gain of the active filter part and the equivalent impedance of the AC grid on the filtering performance of the hybrid filter is analyzed. The value of the gain is determined by the root locus method. Finally, the simulation verification is completed on the rectification side of the Cigre model. The results show that the hybrid filter can reduce the ground occupation, has good filtering effect and strong robustness, and can fully compensate the reactive power of the converter station.

Key words: LCC-HVDC; hybrid filter; MMC; filtering; resonance suppression; reactive power compensation





电力自动化设备







Fig.A2 Phase-A output voltage of active filter











