DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.3.86 **中图分类号**：TM721 **文献标志码**：A

低压直流供电系统混合有源滤波技术研究

李建标[1]，罗永驹[2](中国电源学会学生会员)，陈 勇[1]，吴宏远[1]，
康方睿[2](中国电源学会学生会员)，卓 放[2](中国电源学会高级会员)
(1.广东电网有限责任公司直流配用电研究中心，珠海 519000；2.西安交通大学电气工程学院，
西安 710049)

摘要：随着“光储直柔”的推进建设，低压直流供电系统中的纹波问题受到了广泛关注。相较于交流系统，直流系统的特点是电源及负载分散性更强、电力电子设备占比更高及接口变换器引起的交直流耦合作用强，因此直流系统中纹波问题表现出低频和高频纹波峰峰值都可能较高的特征，进而不能完全适用交流系统中经典的谐波分析和治理方法。为此，进行低压直流供电系统的主要纹波来源分析，揭示了直流源荷引起直流母线电压纹波问题的机理和特征，并针对具有宽频纹波且纹波来源分散的直流系统提出1种混合有源滤波技术，实现对扰动位置不确定、高低频混合情况下的电压纹波问题治理，提升了低压直流供电系统的电能质量水平。仿真结果证明了所提方案的有效性。

关键词：低压直流供电系统；宽频纹波；混合有源滤波；直流母线电压

Research on Hybrid Active Power Filtering Technology for Low-voltage DC Power Supply System

LI Jianbiao[1], LUO Yongju[2], *Student Member*, *CPSS*, CHEN Yong[1], WU Hongyuan[1], KANG Fangrui[2], *Student Member*, *CPSS*, ZHUO Fang[2], *Senior Member*, *CPSS*
(1. DC Power Distribution Research Center, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhuhai 519000, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: With the advancement of the construction of photovoltaic, energy storage, DC and flexibility, the problem of harmonics in a low-voltage DC (LVDC) power supply system has received widespread attention. Compared with those of an AC system, the characteristics of a DC system are that the power supply and load are more decentralized, the proportion of power electronic equipment is higher, and the AC-DC coupling effect caused by interface converters is strong. Therefore, the problem of harmonics in the DC system indicates that both the low- and high-frequency harmonic peak-to-peak values may be high, and thus the classic harmonic analysis and control methods for the AC system are not completely applicable. To this end, the main harmonic sources for the LVDC power supply system are analyzed, and the mechanism and characteristics of the DC bus voltage harmonic problem caused by DC sources and load are revealed. Accordingly, a hybrid active power filtering harmonic voltage control technology is proposed for the harmonic sources of a broadband and decentralized DC system, which achieves the control of harmonics in the case of uncertain disturbance location and high- and low-frequency mixing, thus improving the power quality level of the LVDC power supply system. Finally, simulation results prove the effectiveness of the proposed scheme.

Keywords: Low-voltage DC (LVDC) power supply system; broadband harmonics; hybrid active power filtering; DC bus voltage

收稿日期：2024-12-08；**修回日期**：2025-02-09；**录用日期**：2025-02-28；**网络首发日期**：2025-03-14

基金项目：中国南方电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20222633)

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. under the grant GDKJXM 2022633

“光储直柔”是建筑实现零碳运行的重要途径，而低压直流供电系统是建筑“光储直柔”系统的核心部分。低压直流供电系统在有分布式电源接入和大量开关电源类负载接入的情况下具有电能变换环节少、能量损耗小等优势，在民用建筑中有较多的应用场景[1-3]。在民用建筑中常见的敏感电子负载、应急负载和数据负载都对直流母线电压质量有着较高的要求，因此低压直流供电系统中由纹波引起的电能质量问题引起了广泛的关注。现有的纹波治理方案分为无源滤波和有源滤波 2 种方式[4-5]。无源滤波器通过电感、电容和电阻的组合设计，实现对主要次纹波的低阻抗分流滤波，结构简单、成本低，但其只能对特定次纹波进行滤波，滤波效果受电网、负载特性的影响，且对于低频纹波，所需元件体积和重量较大。有源滤波器通过附加电力电子电路和相应的控制算法，可实现对不同频率和幅值纹波的动态补偿，滤波性能不受系统内其他阻抗的影响，但由于控制带宽限制，难以有效治理高频纹波。无论是单独采用无源滤波器还是有源滤波器，在低频段和高频段的纹波治理中都存在固有缺陷，这种频域特性的局限性使得单一滤波方案难以满足宽频域纹波治理的需求，因此单独使用任一种方案都无法实现理想的纹波抑制效果。

交流系统中的滤波方法主要通过有源电力滤波器补偿负载侧的谐波电流，确保网侧电流不失真，研究内容聚焦在负载侧谐波电流检测方法及电流跟踪控制方法的改进[6-7]。文献[8]对比分析了交流系统中有源滤波器的典型拓扑，包括串联型、并联型、基于双谐振注入支路型、LC 串/并联谐振注入式电路等拓扑形式，但是交流系统中的注入式电路拓扑及其相关衍生难以直接移植到直流系统中；文献[9]归纳总结了有源滤波器 APF(active power filter)的谐波检测方法和电流跟踪控制技术，对比了各种方法的优缺点，但是交流系统中所研究的问题大多针对负载侧单一谐波源的理想工况，在已知谐波源位置的情况下控制 APF 生成与负载产生的谐波电流幅值相同、方向相反的补偿电流，对包括交流电网畸变在内的多谐波源场景的关注不足。与交流系统相比，低压直流供电系统的电源及负载分散性强[10]，同时交流电网的畸变也会通过接口变换器将不同频次的纹波扰动传递到直流母线[11]。因此，低压直流供电系统中存在由交流电网和各类负载引发的宽频纹波，具有低频和高频纹波峰峰值都可能较高的特征，且纹波扰动来源的位置具有不确定性[12-13]。进而交流系统中基于谐波负载点对点的治理方案在低压直流供电系统中难以适用。

现有的直流系统滤波研究主要采用并联有源滤波器的方式滤除直流母线电压上的二倍频纹波[14-15]。文献[16-17]在不平衡负载和交流电网电压不平衡的情况下，通过检测谐波源的纹波电流或功率得到补偿电流的参考信号，对直流母线电压上的二倍频纹波进行补偿，但是当谐波源位置发生变化时，补偿装置也需要跟随其发生变化；文献[18]采样直流母线电压信号进行直流母线电压纹波抑制，这种控制方法不需要检测系统中谐波源的纹波电流或功率信号，但仅将储能电容作为恒压源处理，并未对储能电容的电压控制提出详细的解决方案；文献[19]在文献[18]的基础上考虑了直流有源滤波器低压侧补偿电容控制，分析和研究了多个 DC-APF 的并联运行和均流控制。但是以上文献的研究均仅针对直流母线上的二倍频纹波，没有对低压直流供电系统中的宽频纹波问题提出合适的解决方案。

基于此，本文进行低压直流供电系统的主要纹波来源分析，揭示了直流源荷引起直流母线电压纹波问题的机理和特征，并针对宽频、分散的直流系统纹波来源提出 1 种混合有源滤波型 DC-HAPF (DC-hybrid active power filtering)纹波电压治理技术，实现对扰动位置不确定、高低频混合情况下的纹波问题治理，提升了低压直流供电系统的电能质量。

1　低压直流供电系统直流母线电压纹波特征分析

典型的两线制低压直流供电系统拓扑如图 1 所示，包含交流电网、分布式光伏、直流负载、交

流负载等典型源荷。可以看出，相比较于交流系统，直流系统的接口变换器、DC-DC、单相/三相变换器占比更高，纹波产生和作用机理更加复杂。本文以其中的交流电网及典型单相、三相交流负载为例进行纹波特征分析。

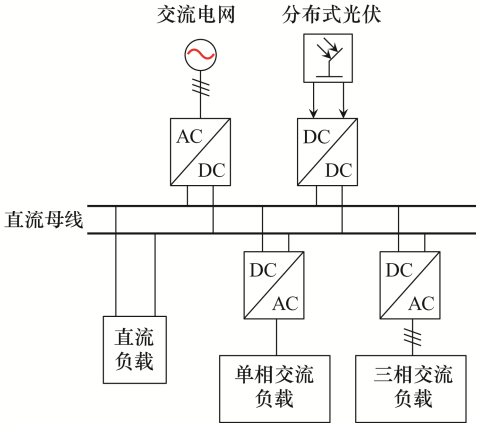


图 1 低压直流供电系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of low-voltage DC power supply system

1.1 交流电网畸变引起的直流母线电压纹波

交流电网经过整流变换为低压直流供电系统提供电压支撑，当交流电网出现电压电流不平衡或者交流电网电压本身含有谐波的时候，会通过接口变换器将不平衡功率或谐波功率传输到直流母线上，导致直流母线电压出现纹波。因此本节在交流电网电压电流不平衡及交流电网本身含有谐波的情况下，进行直流母线电压纹波特征分析。

在交流电网不平衡情况下，电网电压 U 和电流 I 可以分解为正序分量和负序分量之和，即

$$\begin{cases} U_{\alpha\beta}=U_{dq+}^{+}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}+U_{dq-}^{-}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega t} \\ I_{\alpha\beta}=I_{dq+}^{+}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}+I_{dq-}^{-}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega t} \end{cases} \tag{1}$$

式中：$U_{\alpha\beta}$、$I_{\alpha\beta}$ 分别为交流电网的电压、电流在两相静止坐标系下的表示；U_{dq+}^{+}、I_{dq+}^{+} 分别为正序电压、电流在正向旋转的 dq 坐标系中向 dq 轴投影的值；U_{dq-}^{-}、I_{dq-}^{-} 分别为负序电压、电流在负向旋转的 dq 坐标系中向 dq 轴投影的值；ω 为基频频率。

由式(1)可计算出在交流电网不平衡的情况下，接口变换器交流侧传输的功率 S，即

$$\begin{aligned} S=U_{\alpha\beta}\hat{I}_{\alpha\beta}=&U_{dq+}^{+}\hat{I}_{dq+}^{+}+U_{dq-}^{-}\hat{I}_{dq-}^{-}+U_{dq+}^{+}\hat{I}_{dq-}^{-}\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\omega t}+\\ &U_{dq-}^{-}\hat{I}_{dq+}^{+}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\omega t}=P+\mathrm{j}Q \end{aligned} \tag{2}$$

式中：上标“^”表示共轭复数；P、Q 分别为传输的有功功率、无功功率。

根据式(2)，可得到接口变换器传输的有功功率 P 为

$$P=P_0+P_{\mathrm{c}2}\cos(2\omega t)+P_{\mathrm{s}2}\sin(2\omega t) \tag{3}$$

式中：P_0 为接口变换器输出有功功率的平均值；$P_{\mathrm{c}2}$、$P_{\mathrm{s}2}$ 分别为二次有功功率的余弦峰值、正弦峰值。

式(3)表明在交流电网不平衡情况下，接口变换器会向直流侧注入含有二倍频分量的功率，从而引起直流母线电压的二倍频纹波，引起直流系统电能质量下降。

在交流电网电压含有 k 次正序谐波的情况下，交流电网电压、电流也可以分解为

$$\begin{cases} U_{\alpha\beta}=U_{dq+}^{+}+U_{kdq+}^{+}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(k-1)\omega t} \\ I_{\alpha\beta}=I_{dq+}^{+}+I_{kdq+}^{+}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(k-1)\omega t} \end{cases} \tag{4}$$

式中，U_{kdq+}^{+}、I_{kdq+}^{+} 分别为 k 次正序谐波电压、电流在以 $k\omega$ 的角速度正向旋转的 dq 坐标系中向 dq 轴投影的值。值得一提的是 k 次正序、负序谐波分量在以 ω 为角速度正向旋转的 dq 坐标系中分别表现为 k−1、k+1 次的交流分量。

同理可以得到接口变换器传输的有功功率 P_{k+} 的表达式为

$$\begin{aligned} P_{k+}=&P_0+P_{\mathrm{c}(k-1)}\cos((k-1)\omega t)+\\ &P_{\mathrm{s}(k-1)}\sin((k-1)\omega t) \end{aligned} \tag{5}$$

式中，$P_{\mathrm{c}(k-1)}$、$P_{\mathrm{s}(k-1)}$ 分别为 k−1 次有功功率的余弦峰值、正弦峰值。

式(5)表明交流电网电压含有 k 次正序谐波时将会生成 k−1 次的功率波动。同理可得，交流电网电压含有 k 次负序谐波时会生成 k+1 次的功率波动。功率波动通过接口变换器传递到直流母线电压中，引起直流系统的电能质量下降。

1.2 负载引起的直流母线电压纹波

低压直流供电系统中的交流负载会产生谐波功率，谐波功率会通过变流器耦合到直流电网上使得直流母线电压产生纹波。本节分析典型的单相交流负载和三相不平衡交流负载对直流母线电压造

成的纹波影响。

1.2.1　单相交流负载引起的二倍频纹波

对并入直流母线的单相交流负载，负载的电压 $u_L(t)$和电流 $i_L(t)$可表示为

$$\begin{cases} u_L(t) = U_L \sin(\omega t) \\ i_L(t) = I_L \sin(\omega t + \varphi) \end{cases} \tag{6}$$

式中：U_L、I_L 分别为交流电压、电流的幅值；φ 为交流电压和电流的相位差。

在单位功率因数运行的情况下，φ=0，此时可得到瞬时输出功率 P_o 的表达式为

$$P_o(t) = \frac{1}{2}U_L I_L + \frac{1}{2}U_L I_L \cos(2\omega t) \tag{7}$$

式(7)中的瞬时输出功率由 2 项组成：平均输出功率 $\frac{1}{2}U_L I_L$ 和二倍频脉动功率 $\frac{1}{2}U_L I_L \cos(2\omega t)$。二倍频脉动功率将会通过变流器传递到直流母线中引起母线电压的二倍频纹波，引起直流系统电能质量下降。

1.2.2　三相不平衡负载引起的二倍频纹波

对接入直流母线的三相不平衡负载，采用对称分量法，假设由各序分量构成的 A 相电流可表示为

$$i_a = \sum_{k=0,1,2} I_{mk} \cos(\omega t - \varphi_k) \tag{8}$$

式中：I_{mk} 和 φ_k (k=0, 1, 2)分别为电流零序、正序、负序分量的幅值和相位。

低频模型下，开关函数 S_i(i=a，b，c)可表示为

$$\begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ \cos(\omega t - 2\pi/3) \end{bmatrix} \tag{9}$$

式中，F 为幅度调制比。

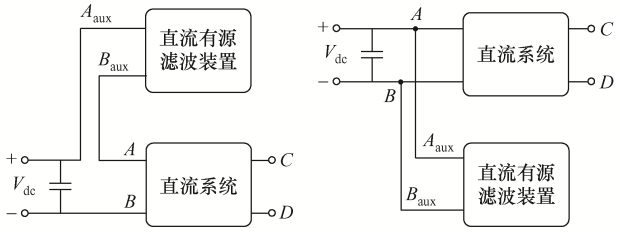
结合式(8)和式(9)可得直流侧电流 i_{dc} 的表达式为

$$i_{dc} = \frac{1}{2}\sum_{i=a,b,c} S_i i_i = \frac{3}{4}FI_{m1}\cos\varphi_1 + \frac{3}{4}FI_{m2}\cos(2\omega t - \varphi_2) \tag{10}$$

式(10)表明：三相负载不对称时电流的负序分量 I_{m2} 不为 0，会将二倍频波动引入直流侧，导致直流母线电压出现二倍频纹波，引起直流系统电能质量下降。

2　混合有源滤波拓扑方案设计

根据第 1 节的纹波特征分析可知，低压直流供电系统具有低频和高频纹波峰峰值都可能较高的特征。而有源滤波和无源滤波在高频和低频都有各自的缺陷，因此采用有源与无源结合的混合有源滤波装置是低压直流供电系统中纹波问题更为合理的解决方案。直流系统中最常见的 2 类有源滤波结构是直流侧串联型结构和直流侧并联型结构，如图 2 所示。



(a)直流侧串联型结构　　(b)直流侧并联型结构

图 2　最常见的 2 类直流有源滤波结构

Fig. 2 Two most common types of DC active power filtering structures

直流侧串联结构中，附加滤波电路串联进直流系统。通过控制附加电路的电压能直接影响直流母线电压，快速地消除电压纹波。但由于装置与系统串联，正常运行时流经装置的电流较大，这不仅需要装置有较高的电流承受能力，还会导致较大的功率损耗。此外，滤波电路一旦发生故障，将直接影响整个直流系统的稳定性，使系统的保护与维修更加复杂。相比之下，直流侧并联结构采用将附加滤波电路并联于直流母线的方案，其通过注入与系统中纹波电流幅值相等、相位相反的补偿电流来间接消除电压纹波。该方案具有结构简单、技术成熟的优势，但存在装置需承受母线电压带来的高电压应力这一不足。综合考虑，本文设计的直流有源滤波装置采用并联结构。

在进行直流有源滤波装置拓扑选型时，首先需确定储能介质类型。根据储能介质的不同，直流有

源滤波电路可分为电感式和电容式 2 种基本拓扑。电感式滤波电路采用电感作为储能元件，其储能容量取决于流经电感的电流大小，如图 3(a)所示。该拓扑的优势在于磁性元件可靠性高、故障率低，且可实现储能元件的能量完全利用；但其缺点是体积、重量较大，在稳态工作时存在直流环流，导致显著的传导损耗，同时当扰动电流超过储能电流时，变换器将无法有效抑制瞬态波动。电容式滤波电路则采用电容作为储能元件，其储能容量取决于电容两端电压，如图 3(b)所示。该拓扑的不足之处在于电解电容可能存在老化问题，且储能能量需要通过电压差释放，无法完全利用；但其优势在于电流承载能力强，成本与功耗相对较低。因此本文选择电容式滤波电路作为设计方案。

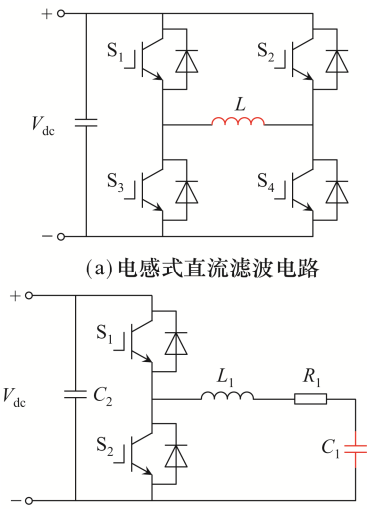


图 3 不同储能介质的直流滤波电路

Fig. 3 DC filtering circuits with different energy storage media

在电容式有源滤波电路拓扑中，常见的选择是以图 3(b)所示的两电平 Buck-Boost 为代表的双向 DC-DC 电路，能够实现直流系统的双向能量交换，将母线电压的波动传递至滤波电路。尽管两电平 Buck-Boost 拓扑在现有工程中应用广泛，但其与三电平双向 DC-DC 变换器相比，存在开关管电压应力大、输出纹波大、容量较小等方面的不足。为了克服两电平双向 DC-DC 的缺点，本文选择三电平双向 DC-DC 电路为有源滤波装置的拓扑。

需要特别指出的是，混合有源滤波系统在低压直流系统中的研究尚处于起步阶段，缺乏成熟的拓扑参考案例。虽然交流系统中已发展出多种混合有源滤波拓扑结构，如并联 APF+并联 PF、注入式混合 APF、APF 与 PF 串联并入电网等，但由于直流系统不存在基波分量(或基波为直流量)，注入式 APF 及其衍生拓扑难以直接适用。因此，本文选择以基础的并联 APF 和并联 PF 结构作为研究对象，这一选择既符合直流系统的特性，也为后续研究提供了可靠的验证基础。

在无源滤波部分的设计中，考虑到可靠性、成本及与有源部分的协同性，选用经典的 LC 滤波电路。该结构不仅能够有效滤除高频纹波，还可与有源部分形成互补：有源部分主要抑制低频纹波，无源部分负责高频纹波滤除，二者协同工作可实现宽频域纹波的有效治理。综上所述，本文设计的混合有源滤波拓扑如图 4 所示。图中，L_p、C_p 为无源部分，其余为有源部分，直流母线位于三电平 DC-DC 的高压侧，补偿电容 C_1 作为储能元件位于三电平 DC-DC 的低压侧。

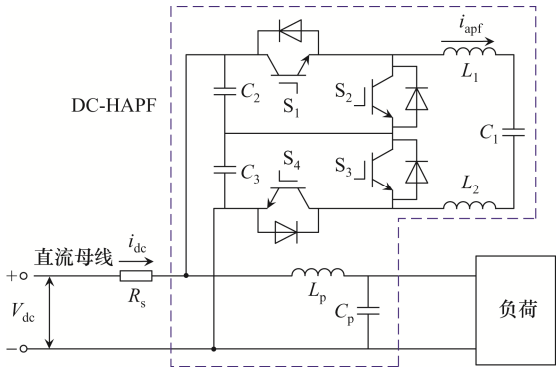


图 4 混合有源滤波装置拓扑

Fig. 4 Topology of hybrid active power filtering device

3 混合有源滤波控制方案设计

交流电网中常见的谐波(5、7、9、11 次)传递到直流母线时主要表现为13次以内的低频纹波，因此设计滤波方案中的有源滤波部分负责滤除 13 次以内的纹波，无源滤波部分则针对 13 次及以上的高频纹波进行治理。

在有源滤波部分的控制方案设计中，针对低压直流供电系统中谐波源位置具有不确定性的特点，传统通过检测系统中谐波源的纹波电流来抑制直流母线电压纹波的方法不再适用。若采样直流母线电压或者直流母线电流进行控制，则不需要检测系统中谐波源的纹波电流或功率信号，可以仅根据滤波装置本地的电压电流信号对直流母线电压纹波进行消除，由此得到 2 种控制方案如图 5 所示。

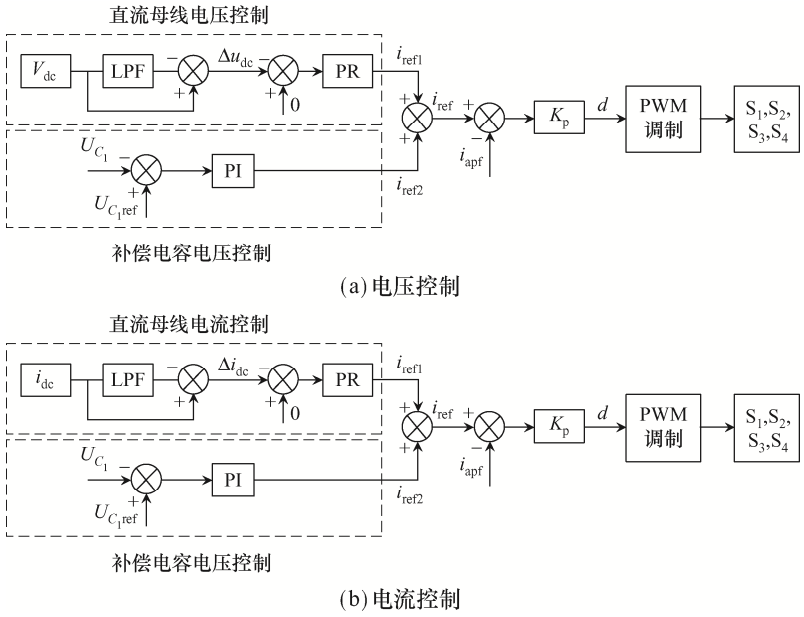


图 5　直流有源滤波控制的 2 种方案

Fig. 5 Two types of DC active power filtering control schemes

2 种控制方案的不同之处在于外环控制中一个采样母线电压、一个采样母线电流，母线电压和母线电流的采样位置如图 3 的 V_{dc} 和 i_{dc} 所示。2 种控制方案的结构类似，但思路有所区别。以母线电压控制为例进行介绍。

(1)直流母线电压控制部分。采样直流母线电压，采样值减去其经过低通滤波器得到的直流分量即为其纹波分量 Δu_{dc}。以 0 为参考值，将 Δu_{dc} 与 0 作差后经过比例谐振控制器生成参考电流 i_{refl}，可表示为

$$\begin{cases} i_{refl}=\{0-[V_{dc}\cdot(1-G_{LPF}(s))]\}\cdot G_{PR}(s) \\ G_{LPF}(s)=\dfrac{\omega_0}{s+\omega_0} \\ G_{PR}(s)=K_{PR}+\sum\limits_{n=2}^{12}\dfrac{K_r s}{s^2+\omega_n^2} \end{cases} \tag{11}$$

式中：$G_{LPF}(s)$为一阶 RC 低通滤波器的频域表达式；$G_{PR}(s)$为各次纹波理想比例谐振控制器的频域表达式；ω_0 为特征角频率；K_{PR} 为比例增益；K_r 为谐振器增益；ω_n 为 n 次纹波频率。低通滤波器可根据实际精度要求选择不同阶数和类型的滤波器。谐振控制器示意图如图 6 所示。

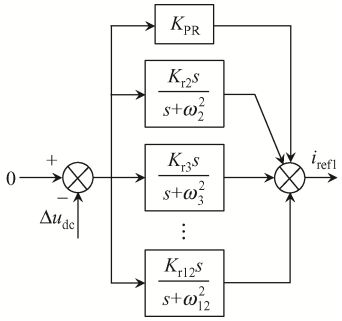


图 6　各次纹波比例谐振控制器示意图

Fig. 6 Schematic diagram of proportional resonance controller for each harmonic

在各次纹波的比例谐振控制器的参数设计中，为了使得对各次纹波的跟踪控制效果好，K_r 在不影响系统稳定性的情况下可设计的稍微大；为了不受其他频次的纹波影响，比例增益 K_{PR} 设计的应尽量小。

(2)补偿电容电压控制部分。通过 PI 控制将补偿电容电压 U_{C_1} 控制为参考值 U_{C_1ref}，得到参考电流

i_{ref2}，可表示为

$$\begin{cases} i_{ref2}=(U_{C_l ref}-U_{C_l})\cdot G_{PI}(s) \\ G_{PI}(s)=K_p+\dfrac{K_i}{s} \end{cases} \tag{12}$$

式中：$G_{PI}(s)$为比例积分控制器的频域表达式；K_p为比例系数；K_i为积分系数。

(3)电感电流参考值 $i_{ref}=i_{ref1}+i_{ref2}$。为了简化控制环路加快控制速度，采用比例控制使得电感电流 i_{apf}跟随参考值 i_{ref}变化，可表示为

$$\begin{cases} i_{ref}=i_{ref1}+i_{ref2} \\ d=(i_{ref}-i_{apf})\cdot K_p \end{cases} \tag{13}$$

式中，d 表示占空比。

电压控制策略通过直接采样直流母线电压信号，实现对母线电压纹波的直接补偿；电流控制策略则通过采样远离负载侧的母线电流信号，将 i_{dc}的纹波分量控制为 0，从而迫使负载侧的纹波电流全部流入 APF 中。相较于传统的控制方案，2 种控制方法的共同优势在于无需检测系统中谐波源的纹波电流，仅依靠本地采样的电压或电流信号即可有效抑制负载侧谐波源对直流母线电压的干扰。然而，电压控制相较于电流控制具有更广泛的适用性：不仅能够消除负载侧纹波的影响，还可以同时滤除交流电网侧引入的纹波干扰。而电流控制仅能针对负载侧纹波进行治理。因此，电压控制在更适合扰动位置不确定情况下的低压直流系统，能够提供更全面的纹波抑制效果。

4 仿真验证

为了验证本文所提控制方法的有效性，在 MATLAB/Simulink 仿真环境搭建了如图 4 所示的低压直流供电系统模型。仿真模型中，直流母线电压由交流电网整流而来，负载侧有直流负载和谐波电流源。仿真系统关键参数见表 1。

为验证混合有源滤波装置 2 种控制方式抑制负载产生纹波的效果，1.0 s 时令负载侧谐波电流源产生峰峰值均为 20 A 的 2、4 和 50 次纹波电流，2.0 s 加入混合有源滤波装置，2 种控制方案治理效果如图 7 所示。负载侧谐波源在直流母线上引起了峰峰值接近 16 V 的宽频纹波，电压控制经过 2.0 s 将纹波峰峰值降低到 1 V 以内，电流控制经过 0.5 s 将纹波峰峰值降低到 0.5 V 以内。可以看出，当负载侧产生宽频纹波时，2 种控制方案均能较好的抑制直流母线电压的纹波，并且电流控制的响应速度要优于电压控制。

表 1 低压直流供电系统关键仿真参数

Tab. 1 Key simulation parameters of low-voltage DC power supply system

参数	数值
直流母线电压 V_{dc}/V	750
补偿电容电压 U_{C_l} /V	450
补偿电容 C_l/mF	2
APF 电感 L_l/mH	2
无源电感 L_p/mH	6.519
无源电容 C_p/μF	16.65

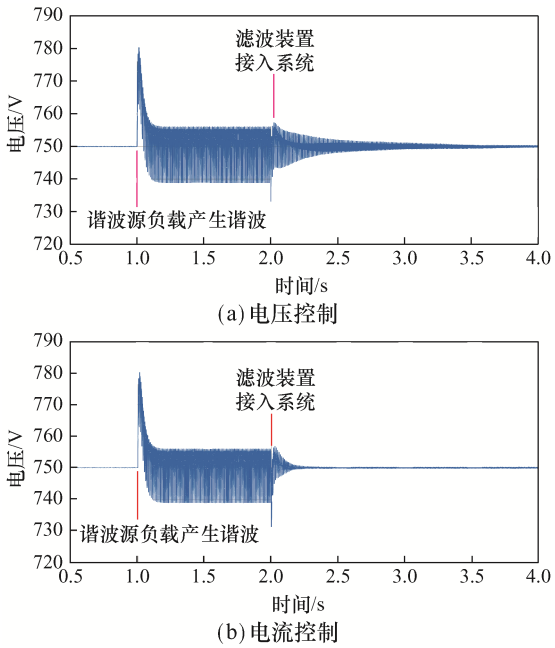
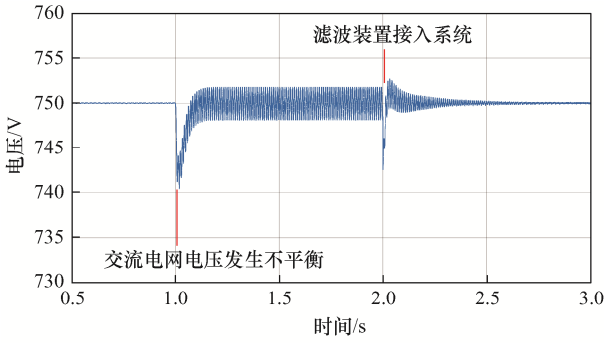


图 7 当负载产生宽频纹波时 2 种控制方法对直流母线电压纹波的抑制效果

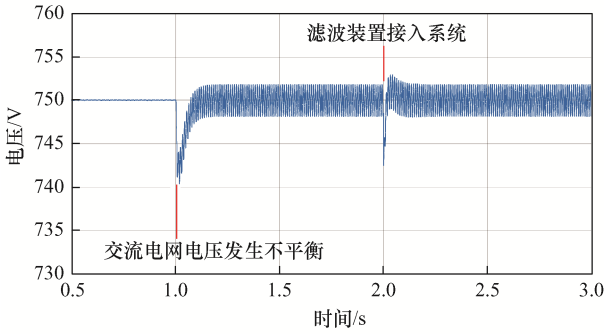
Fig. 7 The suppression effects of two control methods on DC bus voltage harmonics when the load generates broadband harmonics

为验证混合有源滤波装置2种控制方式抑制交流电网畸变产生纹波的效果，1.0 s 时令交流电网的 A 相电压有效值由额定的 220 V 降低到 100 V，形成了交

流电网电压不平衡的工况，2.0 s 时加入混合有源滤波装置，2 种控制方案治理效果如图 8 所示。可以看出，交流电网不平衡在直流母线电压上引入了峰峰值接近 4 V 的二倍频纹波，电压控制经过 1.0 s 将纹波峰峰值降低到 0.2 V 以内，电流控制则没有滤波效果。



(a) 电压控制

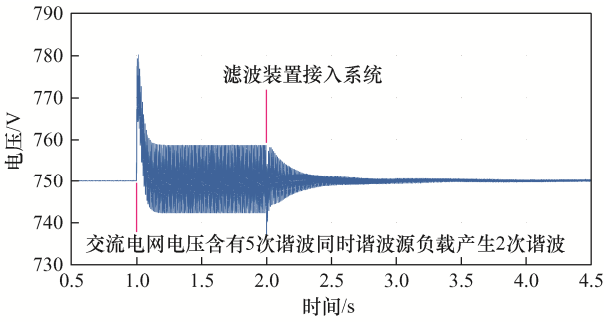


(b) 电流控制

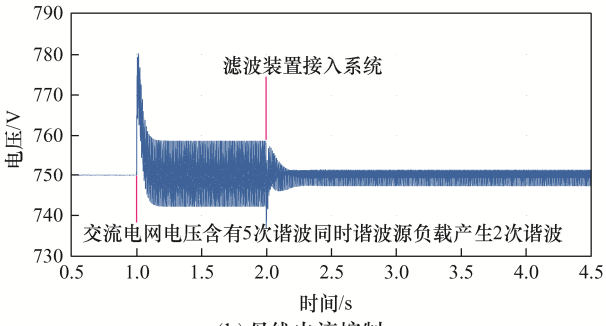
图 8　当交流电网电压不平衡时 2 种控制方法对直流母线电压纹波的抑制效果

Fig. 8 The suppression effects of two control methods on DC bus voltage harmonics when the AC grid voltage is unbalanced

在交流电网电压含有 5 次正负序谐波同时负载侧谐波源产生 2 次纹波的情况下，2 种控制方案治理效果如图 9 所示。在 1.0 s 时，令交流电网电压 A、B、C 各相都加入幅值为 100 V 的 5 次正负序谐波电压，同时负载侧谐波源产生峰峰值为 20 A 的 2 次纹波。这种情况下，直流母线电压上存在峰峰值接近 17 V 的纹波，电压控制经过 2.5 s 将纹波峰峰值降低到 0.6 V 以内，基本滤除掉了所有纹波，电流控制经过 0.5 s 将纹波峰峰值降低到 4 V 左右，只滤除了一部分纹波。进一步对图 9(b)进行频谱分析如图 10 所示，电流控制只滤除了大部分负载侧产生的 2 次纹波，不能滤除掉交流电网电压畸变在直流母线上引入的 4、6 次纹波。



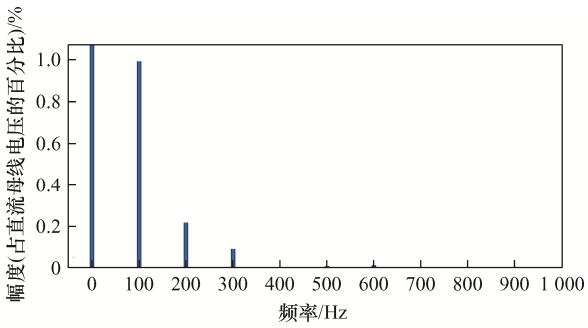
(a) 母线电压控制



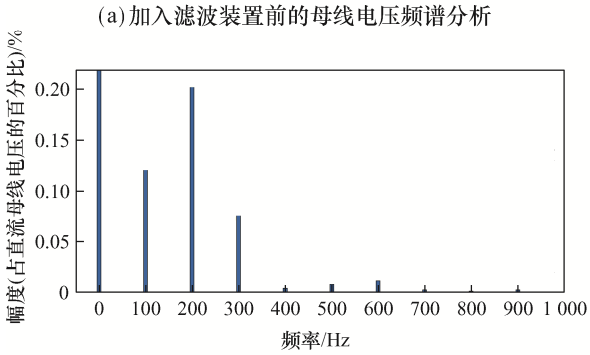
(b) 母线电流控制

图 9　交流电网电压含有谐波同时负载侧谐波源也产生纹波时 2 种控制方法的治理效果

Fig. 9 Control effects of two control methods when AC grid voltage contains harmonics and load-side harmonic source also generates harmonics



(a) 加入滤波装置前的母线电压频谱分析



(b) 加入滤波装置后的母线电压频谱分析

图 10　电流控制的频谱分析

Fig. 10 Spectrum analysis of bus current control

通过上述仿真分析可以得出，采样母线电压控制和采样母线电流控制都能较好地滤除负载引起的母线电压纹波并且母线电流控制更加快速，但是交流电网畸变在直流母线电压上引起的纹波只能通过母线电压控制进行滤除。因此母线电压控制是更适合低压直流供电系统混合有源滤波装置的滤波方案。

5 结语

本文针对低压直流供电系统的纹波问题展开研究，通过理论分析揭示了系统内主要纹波来源及其传播机理：交流电网电压畸变、单相交流负载以及三相不平衡负载产生的谐波功率会经由接口变换器和变流器耦合至直流母线，从而引发直流母线电压的宽频纹波干扰。基于此，本文针对宽频、分散的直流系统纹波来源，提出了 1 种采用本地电压电流采样的混合有源滤波治理技术，该方案采用三电平 DC-DC 变换器作为有源滤波单元、LC 电路作为无源滤波单元，实现对扰动位置不确定、高低频混合情况下的纹波问题治理。仿真结果表明，采样母线电压控制是更适合直流混合有源滤波装置的控制方案，能同时滤除交流电网畸变和谐波源负载引起的直流母线电压宽频纹波，提升低压直流供电系统的电能质量水平。

参考文献：

[1] 雍静, 徐欣, 曾礼强, 等. 低压直流供电系统研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 42-52, 20.
Yong Jing, Xu Xin, Zeng Liqiang, et al. A review of low voltage DC power distribution system [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 42-52, 20. (in Chinese)

[2] 张永明, 丁宝, 傅卫东, 等. 基于直流配电与直流微网的电气节能研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(S1): 389-397.
Zhang Yongming, Ding Bao, Fu Weidong, et al. Electrical energy conservation based on DC distribution and DC microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 389-397. (in Chinese)

[3] 王盼, 徐虎, 袁雷, 等. 具有软启动功能的 EMI 直流滤波器设计[J]. 电源学报, 2024, 22(3): 182-189.
Wang Pan, Xu Hu, Yuan Lei, et al. Design of EMI DC filter with soft starting function [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(3): 182-189. (in Chinese)

[4] 卓放, 杨泽斌, 易皓, 等. 综合配网谐波及三相不平衡评价指标的治理设备优化配置策略[J]. 中国电力, 2020, 53(11): 40-49.
Zhuo Fang, Yang Zebin, Yi Hao, et al. Optimal allocation strategy for power quality control devices based on harmonic and three-phase unbalance comprehensive evaluation indices for distribution network [J]. Electric Power, 2020, 53(11): 40-49. (in Chinese)

[5] 阴晓晴, 易皓, 杨泽斌, 等. 基于 SAPF 的电网多节点电压谐波优化补偿方法[J]. 中国电力, 2021, 54(8): 2-10.
Yin Xiaoqing, Yi Hao, Yang Zebin, et al. Optimal compensation method for multi-node voltage harmonics based on SAPF [J]. Electric Power, 2021, 54(8): 2-10. (in Chinese)

[6] Yi Hao, Zhuo Fang, Zhang Yanjun, et al. A source-current-detected shunt active power filter control scheme based on vector resonant controller [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(3): 1953-1965.

[7] 易皓, 卓放, 翟灏. 基于矢量谐振调节器的有源电力滤波器网侧电流检测控制方法研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 72-79.
Yi Hao, Zhuo Fang, Zhai Hao. Research on source current detection type APF control scheme based on vector resonant regulator [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 72-79. (in Chinese)

[8] 邓佳, 李泽文. 有源电力滤波器研究现状综述[J]. 电工材料, 2023(5): 35-39.
Deng Jia, Li Zewen. A review of the research status of active power filters [J]. Electrical Engineering Materials, 2023(5): 35-39. (in Chinese)

[9] 王雪, 高云广, 吝伶艳, 等. 有源电力滤波器的研究现状与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 177-186.
Wang Xue, Gao Yunguang, Lin Lingyan, et al. Research status and prospect of active power filter [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 177-186. (in Chinese)

[10] 曾嘉思, 徐习东, 赵宇明. 交直流配电网可靠性对比[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2582-2589.

Zeng Jiasi, Xu Xidong, Zhao Yuming. Reliability comparison of AC and DC distribution network [J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2582-2589. (in Chinese)

[11] 焦晋荣, 贾清泉, 王宁, 等. 柔性直流配电网纹波形成机理与叠加特性[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1726-1733.
Jiao Jinrong, Jia Qingquan, Wang Ning, et al. Ripple formation mechanism and superimposition characteristics for flexible DC distribution network [J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1726-1733. (in Chinese)

[12] 汪清, 于德硕, 易皓, 等. 三电平 NPC 型有源阻尼器直流侧主动均压方法研究[J/OL]. 电源学报, 1-15. (2024-04-26)[2025-02-08]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20240425.1641.004.html.
Wang Qing, Yu Deshuo, Yi Hao, et al. Research on DC side active voltage equalization method of three-level NPC active damper [J/OL]. Journal of Power Supply, 1-15. (2024-04-26)[2025-02-08]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20240425.1641.004.html. (in Chinese)

[13] Pei Xuejun, Zhou Wu, Kang Yong. Analysis and calculation of DC-link current and voltage ripples for three-phase inverter with unbalanced load [C]// IEEE Transactions on Power Electronics. 2015: 5401-5412.

[14] Chen Zhong, Chen Miao, Luo Yingpeng, et al. Low frequency ripple current compensation with DC active filter for the single-phase aeronautic static inverter [C]// 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Phoenix, AZ, USA, 2011: 1468-1475.

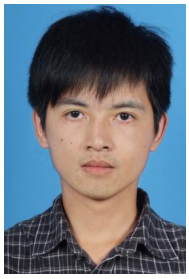
[15] 于越, 李蔚, 张泽, 等. 基于 SiC MOSFET 三电平 Buck 变换器电压尖峰抑制研究[J]. 电源学报, 2023, 21(2): 1-11.
Yu Yue, Li Wei, Zhang Ze, et al. Research on voltage spike suppression of three-level buck converter based on SiC MOSFET [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(2): 1-11. (in Chinese)

[16] 朱晓荣, 张雨濛, 荆树志. 一种不平衡负载下直流微电网电压脉动抑制方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(15): 3437-3449.
Zhu Xiaorong, Zhang Yumeng, Jing Shuzhi. A voltage ripple suppression method of DC microgrid under unbalanced load [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(15): 3437-3449. (in Chinese)

[17] 朱晓荣, 陈朝迁, 张雨濛. 不平衡电网电压下直流微电网电压/并网电流综合控制策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2562-2570.
Zhu Xiaorong, Chen Chaoqian, Zhang Yumeng. Comprehensive control strategy of grid-connected current and DC microgrid voltage under unbalanced grid voltage [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2562-2570. (in Chinese)

[18] Li Sinan, Lee A T L, Siew-Chong-Tan, et al. A plug-and-play ripple mitigation approach for DC-links in hybrid systems [C]// 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Long Beach, CA, USA, 2016: 169-176.

[19] 郭振, 乐全明, 郭力, 等. 交直流混合微电网中直流母线电压纹波抑制方法[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2896-2904.
Guo Zhen, Yue Quanming, Guo Li, et al. Control method of DC bus voltage ripple mitigation in hybrid AC/DC microgrids [J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2896-2904. (in Chinese)



李建标

作者简介：

李建标(1984—　)，男，博士，高级工程师。研究方向：直流配用电。E-mail：zhlijianbiao@126.com。

罗永驹(2002—　)，男，中国电源学会学生会员，通信作者，硕士研究生。研究方向：电能质量控制。E-mail：666666@stu.xjtu.edu.cn。

陈勇(1982—　)，男，硕士，高级工程师。研究方向：直流配用电。E-mail：chenyong@gdzh.csg.cn。

吴宏远(1995—　)，男，硕士，工程师。研究方向：直流配用电。E-mail：wuhongyuan@gdzh.cgs.cn。

康方睿(2001—　)，女，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：电能质量控制。E-mail：frkang@stu.xjtu.edu.cn。

卓放(1962—　)，男，中国电源学会高级会员，博士，教授。研究方向：电力电子，电能质量，有源滤波，无功补偿，分布式发电逆变器。E-mail：zffz@mail.xjtu.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)