

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2019.04.004

牵引机车制动再生馈电系统的滤波器性能评估

刘武斌^{1, 2}, 彭华夏^{1, 2}, 曾进辉^{1, 2}, 刘继传¹, 邓佳康¹, 阳鹏飞¹

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007;

2. 电传动控制与智能装备湖南省重点实验室, 湖南 株洲 412007)

摘要: 为了得到更好的电能质量环境, 比较了LLCL型滤波器、LCCL型滤波器以及混合型滤波器在模拟制动再生馈电系统中的性能, 从所观测参数当中的并网三相电压、滤波前后电流及谐波分析(FFT分析), 得出最优组合滤波器(LCL滤波器+LLCL型滤波器), 可实现制动再生馈电系统的良好谐波抑制效果及获得较低的THD值。

关键词: 制动再生馈电系统; LCL型滤波器; LLCL型滤波器; LCCL型滤波器; 混合型滤波器

中图分类号: TM922.7; TM5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2019)04-0019-06

引文格式: 刘武斌, 彭华夏, 曾进辉, 等. 牵引机车制动再生馈电系统的滤波器性能评估[J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(4): 19-24.

Performance Evaluation of Filters for the Regenerative Feeding System of Traction Locomotive Brakes

LIU Wubin^{1, 2}, PENG Huaxia^{1, 2}, ZENG Jinhui^{1, 2}, LIU Jichuan¹, DENG Jiakang¹, YANG Pengfei¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Key Laboratory for Electric Drive Control and Intelligent Equipment of Hunan Province, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In order to get a better power quality environment, a comparison has been made between the performance of LLCL filters, LCCL filters, and hybrid filters in an analog brake regenerative power feed system. Based on the analysis of three-phase voltage, current before and after filtering and harmonic (FFT) among the observed parameters, the optimal combination filter (LCL filter + LLCL filter) can achieve a good harmonic suppression effect of the brake regenerative feeding system with a lower THD value.

Keywords: brake regenerative feeding system; LCL filter; LLCL filter; LCCL filter; hybrid filter

0 引言

牵引负荷是非线性的, 电流谐波的突出产生源一般来自于整流电路、逆变电路的持续工作, 其可能会

污染牵引电力系统。负载在短时间内变化很大, 将使电压产生较大偏差, 即电压过高或过低, 导致电压调节不良。当电压和/或电流波形失真时, 感性负载(电机)会导致低功率因数(0.7~0.8)。这些电压

收稿日期: 2018-05-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51607064), 湖南省自然科学基金资助项目(2016JJ5038), 湖南省教育厅优秀青年基金资助项目(17B072), 地方高校国家级大学生创新创业训练计划基金资助项目(14776, 14765)

作者简介: 刘武斌(1992-), 男, 广东惠州人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电网信息物理系统,

E-mail: 1542242474@qq.com

通信作者: 彭华夏(1974-), 女, 湖南双峰人, 湖南工业大学教授, 硕士生导师, 主要从事智能电网方面的教学和研究,

E-mail: duluping@qq.com

变量和谐波可能造成电力系统中的异常运行状况,如电压谐波可以在感应式同步电动机/发电机中引起额外的热量;具有高峰值的电压谐波可能会削弱电缆、绕组和电容器的绝缘性能;电压谐波引起的电压波形畸变将使各种进行同步或定时的电子元件和电路发生故障;电机绕组中的电流谐波可以产生电磁干扰(electromagnetic interference, EMI);电缆、变压器和其他设备的电流谐波,可以引起比基本部件产生的热量更高的热量;流经断路器和开关装置的电流谐波,可能会增加其发热损耗;由于电流波形中的谐波含量高,可能会发生继电保护装置的虚假跳闸,这种继电器的不正常操作或不操作,可能更深一层地造成电力系统的大扰动,发生大规模的级联式系统崩溃^[1]。

1 牵引制动再生馈电系统

牵引制动再生馈电系统中广泛应用 LCL 滤波器作为谐波抑制器件,如图 1 所示,其关键部件是直流牵引变电站中以 IGBT 为变流器件的 VSI (voltage source inverter) 并联电路, VSI 的主要功能是保证在必要时将牵引力状态下的电力质量提高和将制动能量回收。为了确保电源的拥有良好质量的电流,必须保证 VSI 的直流和交流电压之间的正确关联,从而通过合适的恢复变压器(recovery transformer, RT)解决 VSI 在牵引变压器(traction transformer, TT)的一次侧连接问题^[2]。

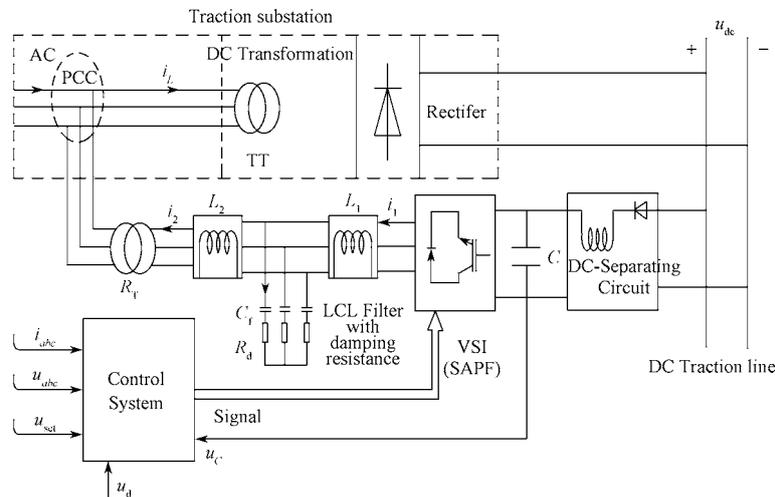


图 1 牵引制动再生馈电系统

Fig. 1 Traction brake regenerative feed system

再生馈电系统与直流牵引线的连接通过隔离电路实现。因此,在牵引模式下,DC 侧补偿电容器的 VSI 将作为 SAPF (shunt active power filter),通过与 RT 串联的 LCL 滤波器,把适当的补偿电流注入 PCC (the point of common coupling)。在再生模式下,当直流线路电压超过补偿电容器两端的电压并且整流二极管被阻塞时, VSI 必须在单位功率因数条件下在 PCC 中注入正弦电流。控制模式可以采用直流电容器两端的电压控制,在 PCC 中, VSI 在直接和间接模式下提供线路电流^[3-4]。

系统主要参数如表 1^[5-6] 所示。

表 1 系统主要参数

Table 1 Main parameters of the system

参 数	取 值	参 数	取 值
直流电压 /V	1 800	IGBT 电压 /V	2 000
开关频率 /kHz	5	IGBT 电流 /A	600
直流电容 /mF	100	隔离电感 /mH	0.04
电网电压 /kV	35	隔离电阻 /Ω	0.01

2 LCL 型滤波器谐波抑制性能

1) 计算滤波电感。电感电流波纹的大小决定了电感的最小值,通常取电流的 15%~20%。令能量回馈输出功率为 P_0 , 输出相电压有效值为 U_0 , 输出额定电流为 i_0 , 电感电流波纹为 Δi_{Lmax} , 能量回馈直流母线电压为 u_{dc} , 开关频率为 f_k , 基波频率为 f_s , 则有

$$i_0 = \frac{P_0}{3U_0}, \quad (1)$$

$$\Delta i_{Lmax} = (15\% \sim 20\%) \frac{u_{dc}}{L_1 f_k} = (15\% \sim 20\%) i_0, \quad (2)$$

$$L_1 = \frac{u_{dc}}{\Delta i_{Lmax} f_k}。 \quad (3)$$

逆变侧和网侧电感的总和不能太大,一般两者要配合取值,这里取电感 $L_1 = kL_2$, k 为系数,取值在 0~1 之间。

2) 计算滤波电容。滤波电容在滤波过程中吸收一定量的基波无功功率,为避免系统输出功率因数过

低, 规定电容吸收的基波无功功率不大于额定功率的5%。假设系统额定功率为 P_r , 电容吸收的基波无功功率为 Q_c , 且占额定功率的比例为 λ , 则有

$$Q_c = \lambda P_r = \frac{3E_{mp}^2}{2X_c} \quad (4)$$

式中: $X_c = \frac{1}{\omega C}$ 为电容容抗, Ω ; E_{mp} 为并网电网相电压峰值, V。

则滤波电容满足的关系式为

$$C_f = \frac{2\lambda P_r}{3\omega E_{mp}^2} \quad (5)$$

3) 计算阻尼电阻。LCL 型滤波器的谐振频率为

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C_f}} \quad (6)$$

为了避免谐振频率出现在谐波含量较大的频段附近, 谐振频率需满足

$$10f_s < f_{res} < 0.5f_k \quad (7)$$

通常阻尼电阻取系统谐振下电容阻抗的 1/3, 即

$$R_d = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2\pi f_{res} C_f}$$

4) 计算 THD (total Harmonic distortion)。根据傅里叶级数得周期性电流波形函数方程为

$$i(t) = I_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (8)$$

式中: n 为谐波次数; I_{dc} 为直流分量; a_n 、 b_n 为 n 次谐波幅值。

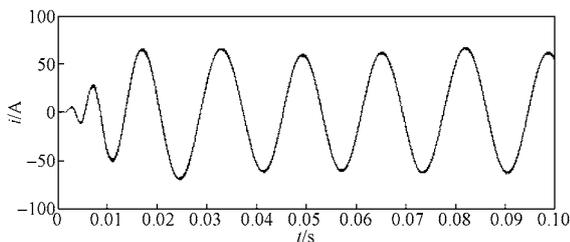
电流、电压总谐波失真率 THD_i 、 THD_v 为

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (i_n / \sqrt{2})^2}}{i_n / \sqrt{2}} \quad (9)$$

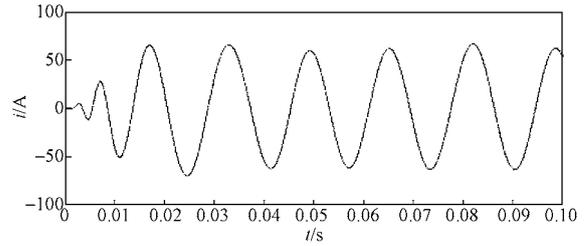
$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (u_n / \sqrt{2})^2}}{u_n / \sqrt{2}} \quad (10)$$

式 (9) (10) 中 i_n 、 u_n 为第 n 次谐波电流、电压。

通过上述计算并综合各因素, 最终取 $L_1=21.5 \mu\text{H}$, $L_2=0.21 \text{ mH}$, $C_f=29 \mu\text{F}$, $R_d=4.3 \Omega$ 。LCL 型滤波器实验评估结果如图 2~4 所示。



a) 滤波前电流



b) 滤波后电流

图2 LCL 滤波器滤波前后 A 相逆变电流
Fig. 2 Current of A-phase inverter before and after LCL filtering

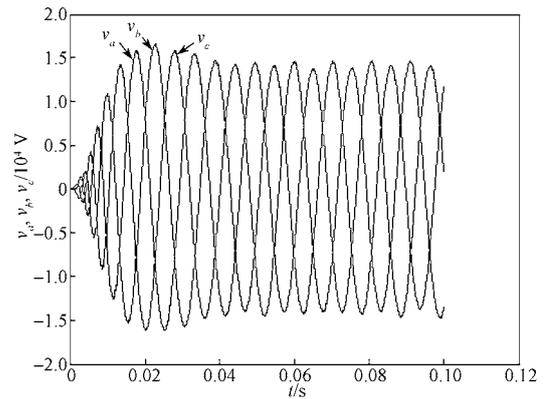


图3 LCL 型滤波器并网三相电压

Fig. 3 Grid-connected three-phase voltage of LCL filter

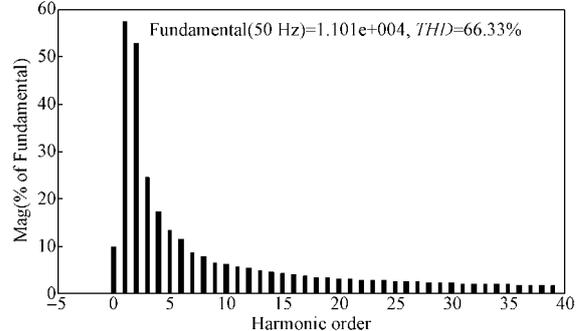


图4 LCL 型滤波器 FFT 分析结果

Fig. 4 Results of FFT analysis of LCL filter

由图 2 可知 LCL 滤波效果明显, 在电流通过 LCL 型滤波器之前, 波形存在大量毛刺, 这是谐波分量导致的, 而在通过滤波器之后, 波形质量明显改善。但由图 3 发现, 并网电压波形参差不齐, 畸变较严重, 三相电压存在不平衡现象, 如果将此再生电压并入牵引电网中, 将严重影响牵引电网电压质量。图 4 显示 THD 达 66.33%, 出现大量 3 次、5 次谐波。

3 LCL 型 +LLCL 型滤波器谐波抑制性能

基于 LCL 型滤波器, 在 PCC 侧前端 (并网前) 装设如图 5 所示 LLCL 型滤波器 [7-12]。

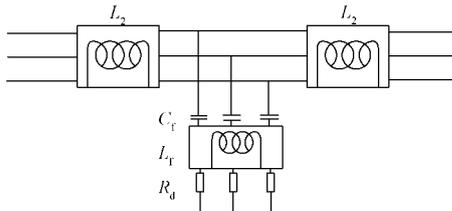


图5 LLCL型滤波器

Fig. 5 LLCL filter

由图5可知, LLCL型滤波器是在LCL型滤波器拓扑基础上, 在并联RC电路中添加了一组电感以产生二次谐振, 则只需利用式(11)计算 L_f 值, 其他参数按照上述公式计算。

$$L_f = \frac{1}{2\pi f_k C_f} \quad (11)$$

且满足

$$10f_s < f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C_f + (L_1 + L_2) L_f C_f}} < 0.5f_k \quad (12)$$

通过上述计算并综合各因素, 最终取: $L_1=21.5 \mu\text{H}$, $L_2=31 \text{ mH}$, $C_f=19 \mu\text{F}$, $R_d=4.3 \Omega$, $L_f=29 \mu\text{H}$ 。LLCL型滤波器实验评估结果如图6~8所示。

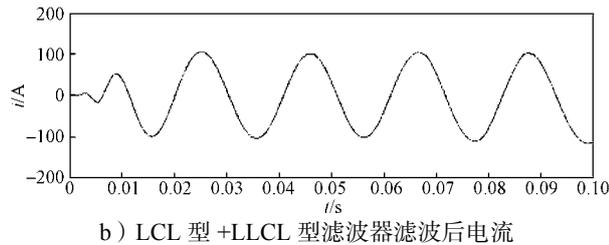
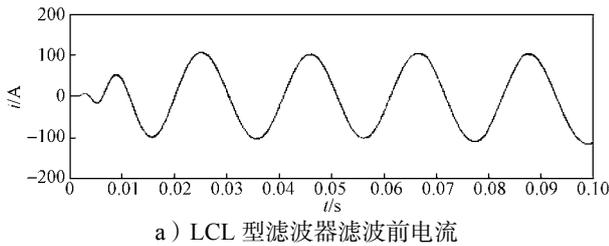


图6 LCL型+LLCL型滤波器的A相逆变电流

Fig. 6 Current of A-phase inverter of LCL and LLCL filter

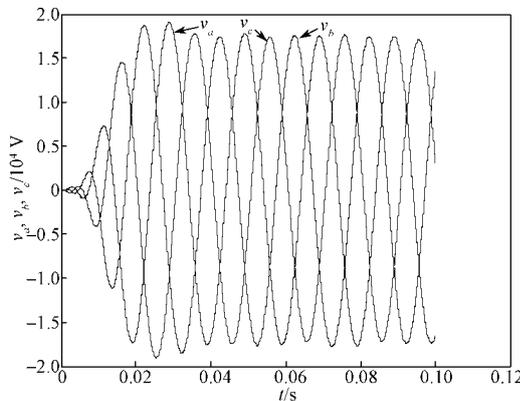


图7 LCL型+LLCL型滤波器的并网三相电压

Fig. 7 Grid-connected three-phase voltage of LCL and LLCL filter

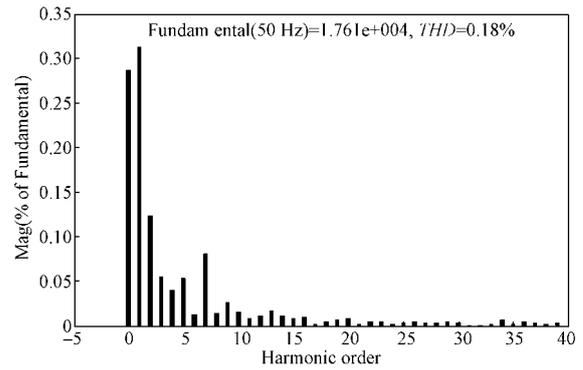


图8 LCL型+LLCL型滤波器的FFT分析结果

Fig. 8 Results of FFT analysis of LCL and LLCL filter

由图6可知, LCL型+LLCL型滤波器的谐波抑制效果较明显: 电流通过LCL型滤波器前, 波形存在毛刺, 但是没有单独使用LCL型滤波器时的数量多, 整体上改善了再生供电系统的电流质量, 而通过LCL型+LLCL型组合滤波器的谐波抑制之后, 波形质量得到进一步改善。通过图7同单独使用LCL型滤波器时的并网三相电压比较发现, 在PCC侧前端再次装设滤波器后, 波形畸变率大幅度下降, 实现了三相电压平衡。图8则显示THD达到了0.18%, 相对于单独使用LCL型滤波器时实现了骤降, 奇偶次谐波都大幅度减少。

4 LCCL型+LLCL型滤波器谐波抑制性能

如图9所示LCCL型滤波器^[13-15], 其实质是在LCL型拓扑的基础上在 L_2 端并联电容 C_g 。LLCL型利用串联谐振的原理抑制开关频率附件的纹波电流, 而LCCL型滤波器则利用并联谐振原理, 使网侧电感支路在开关频率处阻抗无穷大^[16]。

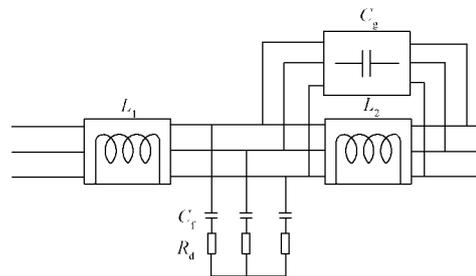


图9 LCCL型滤波器

Fig. 9 LCCL filter

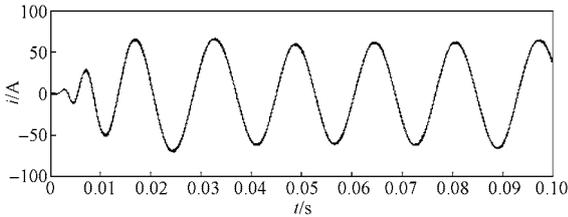
LCCL型滤波器的参数设计过程, 除 C_g 以外与LCL滤波器相似。按照文献[17]中提出的设计程序, 附加的 C_g 表示为

$$C_g = \frac{1}{L_2 (2\pi f_k)^2} \quad (13)$$

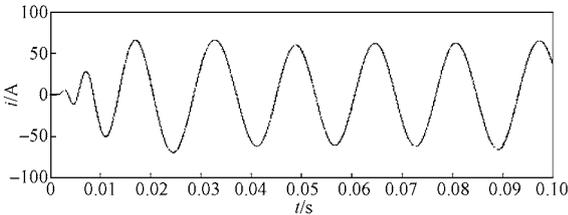
且满足

$$10f_s < f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{(L_1 L_2 C_f) + L_2 C_g}} < 0.5f_k \quad (14)$$

通过上述计算并综合各因素, 最终取 $L_1=21.5 \mu\text{H}$, $L_2=0.21 \text{ mH}$, $C_f=0.74 \mu\text{F}$, $R_d=4.3 \Omega$, $C_g=0.54 \mu\text{F}$ 。替换 LCL 型滤波器与 LLCL 型滤波器组成混合型滤波器, LCCL 型滤波器+LLCL 型滤波器实验评估结果如图 10~12 所示。



a) LCCL 型滤波器滤波前电流



b) LCCL 型+LLCL 型滤波器滤波后电流

图 10 LCCL 型+LLCL 型滤波器的 A 相逆变电流

Fig. 10 A-phase inverter current of LCCL and LLCL filter

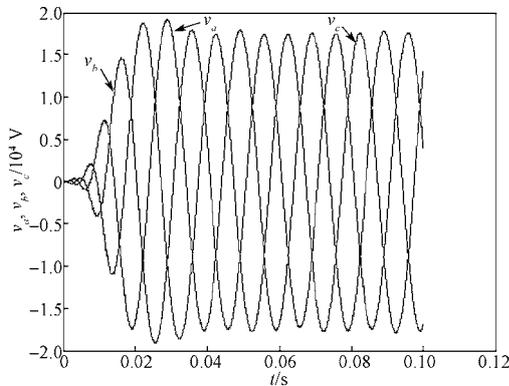


图 11 LCCL 型+LLCL 型滤波器的并网三相电压

Fig. 11 Grid-connected three-phase voltage of LCCL and LLCL filter

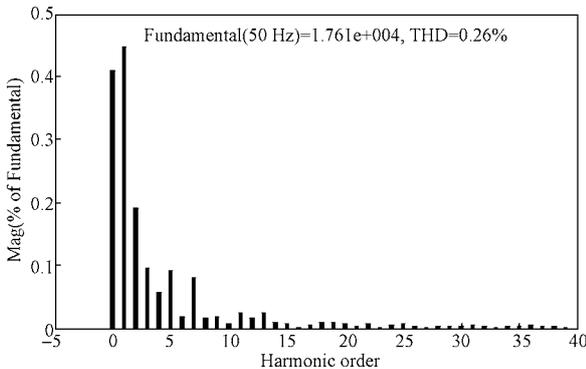


图 12 LCCL 型+LLCL 型滤波器的 FFT 分析结果

Fig. 12 Results of FFT analysis of LCCL and LLCL filter

由图 10 可知, A 相电流在经过 LCCL 型滤波器前, 由于 LLCL 型滤波器的加入而使波形质量有些许改善, 但较 LCL 型滤波器+LLCL 型滤波器组合的滤波系统改善不够明显, 而在通过 LCCL 型+LLCL 型滤波器后, 电流纹波无明显变化且波形无畸变, 谐波抑制效果良好。图 11、图 12 显示, 其 LCCL 型滤波器的滤波效果比单独使用 LCL 型滤波器时的滤波系统要好许多, 而与 LCL 型滤波器和 LLCL 型滤波器相组合的滤波器系统性能相比较则相差无几, 并网电压波形无畸变, 电压保持平衡, THD 值可达 0.26%。

5 结语

LCL 型滤波器已被广泛应用于牵引机车制动再生系统中, 和逆变系统组成有源电力滤波器 (active power filter, APF)。根据文章在建立的牵引机车制动再生系统模型中对 LCL 型、LLCL 型、LCCL 型滤波器的性能比较可以得知, 仅使用 LCL 型滤波器进行谐波的抑制是不够的, 而将 LCL 型改造成 LCCL 型滤波器, 与 LLCL 型组成混合滤波器组得出来的实验结果虽然性能良好, 但是增设的电容器组也同时增加了成本、功耗和体积。因此, 最优的滤波策略为在 PCC 侧前端添加 LLCL 型滤波器。

参考文献:

- [1] VASANTHI V, ASHOK S. Harmonic Issues in Electric Traction System[C]//2011 International Conference on Energy, Automation and Signal. Bhubaneswar: IEEE, 2011: 1-5.
- [2] POPESCU M, BITOLEANU A, SURU V, et al. System for Converting the DC Traction Substations into Active Substations[C]//2015 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). Bucharest: IEEE, 2015: 632-637.
- [3] POPESCU M, BITOLEANU A. Simulink Library for Reference Current Generation in Active DC Traction Substations[J]. International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, 2015, 9(8), 711-718.
- [4] POPESCU M, BITOLEANU A, SURU V. Indirect Current Control in Active DC Railway Traction Substations[C]//2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP). Side: IEEE, 2015: 192-197.
- [5] 易振林. 地铁再生制动能量吸收系统研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016. YI Zhenlin. Research on Regenerative Braking Energy

- Absorbing System for Urban Railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [6] 赵孔仓. 带有 LCL 滤波器的谐波抑制型能量回馈器的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
ZHAO Kongcang. Research on the Harmonic-Restraint Energy Feedback with LCL-Filter[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [7] BAE C J, ALEMI P, LEE D C. Resonance Elimination of LLCL Filters Based on Virtual Resistor for Single-Phase PWM Inverters[C]//2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia). Seoul: IEEE, 2015: 2875–2880.
- [8] WU W M, HE Y B, TANG T H, et al. A New Design Method for the Passive Damped LCL and LLCL Filter-Based Single-Phase Grid-Tied Inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(10): 4339–4350.
- [9] SANATKAR-CHAYJANI M, MONFARED M. Design of LCL and LLCL Filters for Single-Phase Grid Connected Converters[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(9): 1971–1978.
- [10] PIASECKI S. High Order Line Filters for Grid Connected AC-DC Converter-Parameters Selection and Optimization[C]//2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Istanbul: IEEE, 2014: 2691–2696.
- [11] BUYUK M, INCI M, TUMAY M. Performance Evaluation of LLCL Filter for Active Power Filter[C]//2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). Florence: IEEE, 2016: 1–4.
- [12] HUANG M, WANG X F, LOH P C, et al. Resonant-Inductor-Voltage-Feedback Active Damping Based Control for Grid-Connected Inverters with LLCL-Filters[C]//2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Pittsburgh: IEEE, 2014: 1194–1201.
- [13] FANG J Y, XIAO G C, ZHANG Y. An LCCL Filter and Its Application to a Half-Bridge APF[C]//2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia). Seoul: IEEE, 2015: 2566–2573.
- [14] KUNDU U, SIKDER S, SENSARMA P. Phase Modulated LCCL Resonant DC-DC Converter for Boost Applications[C]//2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Montreal: IEEE, 2015: 1497–1504.
- [15] SANATKAR-CHAYJANI M, MONFARED M. High-Order Filter Design for High-Power Voltage-Source Converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(1): 49–58.
- [16] 方旌扬, 肖国春, 郑力夫, 等. 一种 LCCL 滤波器及其在半桥电力有源滤波器中的应用[J]. 电工技术学报, 2016, 31(22): 125–136.
FANG Jingyang, XIAO Guochun, ZHENG Lifu, et al. An LCCL Filter for a Half-Bridge Active Power Filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(22): 125–136.
- [17] TANG Y, LOH P C, WANG P, et al. Generalized Design of High Performance Shunt Active Power Filter with Output LCL Filter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(3): 1443–1452.

(责任编辑: 申 剑)