

# 一种应用于轨道交通车辆变频空调的全频段谐波滤波器研究设计

李宾<sup>1</sup> 李思皓<sup>2</sup>

1 上海兆启新能源科技有限公司, 上海, 201313;

2 上海第二工业大学, 上海, 200120;

**摘要:** 变频空调相对于定频空调有着效率高、省电及体感舒适等优点, 在轨道交通车辆中得到大量应用, 但变频空调采用的六脉整流电路, 对电网(即前端的辅助变流器)产生较大谐波电压电流, 进而造成电网(即前端的辅助变流器)的误保护、损耗大及温升高等问题, 所以需要在电路中增加滤波器, 本文就一款新型谐波滤波器做设计及验证, 解决了目前部分线路对于电网质量高的要求。

**关键词:** 轨道交通; 变频空调; 滤波器

**DOI:**10. 69979/3041-0673. 25. 02. 036

## 引言

六脉冲整流电路是轨道交通车辆变频空调中的常用电路, 电源则来自前端的辅助逆变器。辅助逆变器输出电压是交流正弦电压, 进入变频空调的六脉冲整流电路后会产生谐波电压及电流并反馈到辅助逆变器输出, 造成辅助逆变器输出电压电流波形畸变, 电源质量下降, 其中谐波电流占比 60%及以上, 以 5/7 次谐波电流含量最大。标准 TB/T3411-2015 中规定输出电压谐波含量 $\leq 10\%$ , GB 17625.1-2022 中规定谐波电流含量 $\leq 15\%$ , 所以变频空调在电源输入端都需要加谐波滤波器才能满足标准要求, 但这两个指标都是基于变频空调工作在额定或大负载工况下(即变频空调工作频率在 50Hz 时左右)的参数, 在轻载及小负载工况时(即变频空调工作频率在 30Hz 时左右)的谐波电流含量还是不满足, 这就需要对谐波滤波器进行重新优化设计以满足变频空调全频段运行工况。

## 1 变频空调谐波产生的原因

轨道交通车辆变频空调是由轨道交通车辆辅助逆变器提供 AC380/50Hz 电源(见图 1), 实时检测车厢内外温度, 对比设定值及时调节压缩机的运转频率, 进而调整空调机组制冷量的输出。当车厢内部温度与设定值较大时, 则提高压缩机的运转频率, 使得空调机组制冷量的输出增大, 当车厢内部温度接近于设定温度时, 则降低压缩机的运转频率, 使得空调机组制冷量的输出减少, 这样相对于定频空调压缩机的启停次数要减少 50%

及以上, 压缩机的能耗也就降低 20%及以上。变频空调内部电气框图是交-直-交过程, 具体由三相六脉整流电路(输入交流)、直流滤波电路(直流)、变频控制电路(逆变输出交流)和压缩机(负载)4 个部分组成, 在整流电路中是利用整流二极管的开关特性来控制电压导通与关闭, 当开关元件切换时, 由于其非线性特性, 会产生电压和电流的快速变化, 这种快速变化会导致电压和电流波形出现不连续的尖峰和陡峭的边缘, 这些尖峰和陡峭的边缘包含了高频成分, 即谐波, 实测谐波含量如表 1:

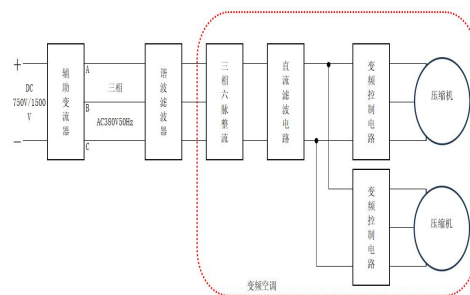


图 1: 轨道交通车辆变频空调电气原理框图

表 1 轨交变频空调谐波电流实测值

Table 1: Measured Harmonic Currents of Variable Frequency Air Conditioners for Rail Transit Applications

Or.	I1/[A]	hdf/[%]	Or.	I1/[A]	hdf/[%]
Tot.	20.249	-----	dc	-----	-----
1	16.117	100.000	2	0.115	0.715
3	0.050	0.309	4	0.094	0.581
5	9.885	61.334	6	0.038	0.238
7	6.938	43.050	8	0.071	0.439
9	0.031	0.195	10	0.060	0.375
11	1.907	11.835	12	0.030	0.184

13	0.733	4.545	14	0.014	0.086
15	0.040	0.250	16	0.006	0.038
17	0.302	1.874	18	0.011	0.068
19	0.232	1.437	20	0.012	0.075
21	0.009	0.056	22	0.010	0.061
23	0.074	0.461	24	0.006	0.037
25	0.043	0.270	26	0.005	0.031
27	0.008	0.048	28	0.005	0.030
29	0.048	0.300	30	0.005	0.031
31	0.031	0.194	32	0.004	0.022
33	0.003	0.020	34	0.001	0.009
35	0.012	0.072	36	0.002	0.012
37	0.010	0.061	38	0.003	0.018
39	0.003	0.021	40	0.003	0.002

从表格中可以看出，谐波主要是奇次谐波，以 5、7 次为主，这样我们就根据实测数据及相关标准以及相关客户要求得到了所需滤波器的主要参数如下：额定输入功率 10KVA，额定频率 50Hz，额定输入电压 380V，额定输入电流 20A，满足谐波电压 $\leq 3\%$ 、谐波电流 $\leq 15\%$ 、功率因素 $\geq 99\%$ ，环境温度-25+40 度，最高温升 70K。

## 2 谐波滤波器参数设计

### 2.1 选择合适的滤波电路

谐波滤波器的组成一般为 LC/LLC/LLLC (L 为电感，C 为电容) 三种电路，电气原理如图 1/2/3 所示：

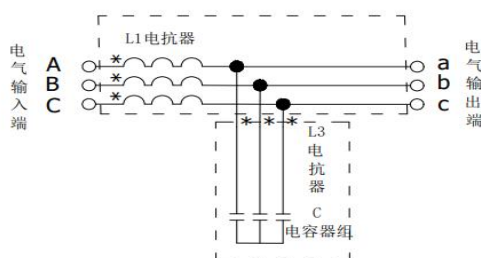


图 2 LC 电气原理图

Figure 2: LC Electrical Circuit Schematic

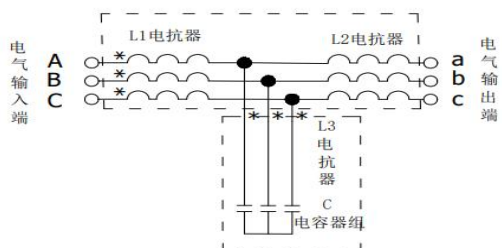


图 3 LLC 电气原理图

Figure 3: LLC Electrical Circuit Schematic

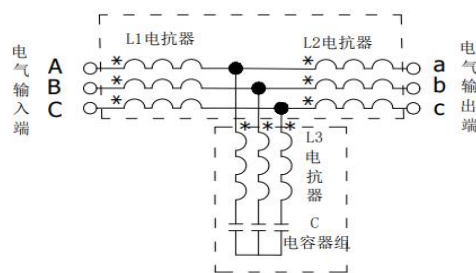


图 4 LLLC 电气原理图

Figure 4: LLLC Electrical Circuit Schematic

从现有理论及实际测试滤波效果来看，图 2/图 3 方案的滤波效果目前只能做到谐波电流 $\leq 25\%$ ，图 4 方案的滤波效果可以做到 $\leq 15\%$ ，所以选择图 4 电气原理方案来优化实施此方案。

### 2.2 电气参数设计

因目前的六脉冲整流电路谐波含量主要是 5 次为主，即谐波主频率在 250Hz，L3+C 组成的谐振电路就是给谐波以通路。这个谐振电路是并联在输入侧的电路中，谐振频率点与空调负载大小无关，谐振频率点计算公式如下：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

式中： $f_0$ -----谐振频率，单位赫芝 (Hz)

L-----电感量，单位亨利 (H)

C-----电容量，单位法拉 (F)

根据公式 (1)，当  $f_0$  确认后，那 LC 也就确认。C 取值大则 L 就小，整体成本低。但充放电电流大即无功电流大，反之 C 取值小则 L 就大，无功电流小但成本高，如下表 2：

表 2 不同滤波方案效果对比

Table 2: Effectiveness Comparison of Different Filter Designs

电容量/ ( $\mu$ F)	电感量/ (mH)	电流/ (A)	无功功率	成本
10	40	0.72	低	高
20	20	1.44	较低	较高
30	13.5	2.16	中	中
40	10	2.88	较高	低
50	8	3.60	高	较低

表中计算公式：

$$\text{电感量 } L (\text{mH}) = \frac{1}{(2 * 3.14 * 250\text{Hz})^2 * (C * 10^{-9})} \quad (2)$$

$$\text{电流 } I (\text{A}) = U/Z$$

$$(3)$$

$$\text{阻抗 } Z(\Omega) = \sqrt{(x_L - x_C)^2} \quad (4)$$

$$\text{感抗 } x_L(\Omega) = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (5)$$

$$\text{容抗 } x_C(\Omega) = 1 / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot C) \quad (6)$$

根据上表（1）选择性能与成本兼顾的方案，即电容容量为 30uF。则按公式 2 计算  $L_3=13.5\text{mH}$ ，充放电电流  $I=2.16\text{A}$ 。 $L_1+L_2$  是串联在电路中，电感量越大滤波效果越好，但感量大的同时压降也大，对后端的压缩机工作有影响，一般额定负载下压降不大于 10%，这次取 9%来试验。

则电感  $L_1$  与电感  $L_2$  串联后的总电感量计算如下：

$$\text{总电感量} = (380\text{V} / 1.732) \cdot 0.09 / (2 \cdot 3.14 \cdot 50\text{Hz} \cdot 15\text{A} \cdot 0.001) \approx 3.15\text{mH}$$

一般工程上电感  $L_1$  感量与电感  $L_2$  感量之比为 9:1，所以取  $L_1 \approx 2.84\text{mH}$ ， $L_3 \approx 0.32\text{mH}$ 。磁芯一般选择用硅钢，硅钢的特点是在不饱和的情况下感量呈一条直线，即轻载及额定负载下的感量不变，滤波效果随着负载的减少而降低，所以需要改变，而铁硅磁粉芯的性能是轻载时感量高、额定负载下感量低，如果用纯铁硅金属磁粉芯则额定下感量低，滤波效果将不满足要求，综合考虑，磁路由单纯的硅钢改变为在磁路中加入铁硅金属粉芯的混合磁路，即上下轭用硅钢，中柱用铁硅金属粉芯，产品整体温升最高理论计算值为 65K。实际成品图片如下图 5：

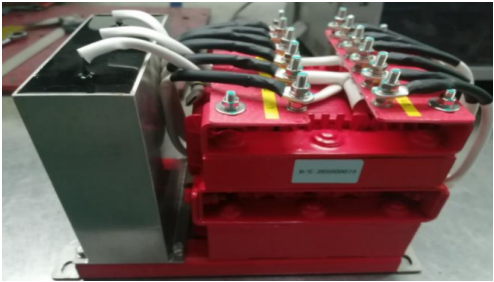


图 5 谐波滤波器成品图片

Figure 5: Harmonic Filter Product Image

3 谐波滤波器测试与验证

3.1 三种磁路的 LI 曲线对比如下

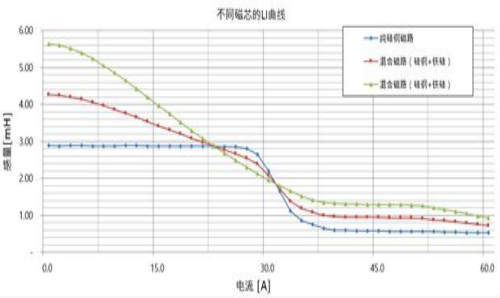


图 6 三种磁路的 LI 曲线对比

Figure 6: Comparison of LI Curves for Three Magnetic Circuit Configurations

从上图可以看出，用混合磁路兼顾了硅钢和金属粉芯的优点，即在小电流（低负载）下感量高，大电流（额定或过载）下不容易饱和。

3.2 两种磁路的产品测试数据对比

产品经过上机测试，实测最高温升在 58K，其它数据如下表 3：

表 3 两种磁路的产品测试数据

Table 3: Actual Test Data of Products with Two Magnetic Circuit Configurations

测试项目 数据 磁路	频率	总电流	调谐回路	谐波电流			谐波电压	功率因素	直流母线电压
	Hz	A	A	A 相 %	B 相%	C 相%	V %	cosφ	V
纯硅钢磁路	30	12	3.5	16.3	17.7	16.7	2.6	0.94	530
混合磁路	30	12	2.7	14.7	14.9	14.6	2.2	0.99	525
纯硅钢磁路	35	14	3.5	16.2	16.8	17.4	2.5	0.96	529
混合磁路	35	14	2.8	13.4	14.2	12.5	2.3	0.99	523
纯硅钢磁路	40	16	3.5	15.1	16.3	15.1	2.6	0.97	526
混合磁路	40	16	2.8	12.4	12.4	11.4	2.2	0.99	521
纯硅钢磁路	45	18	3.5	14.1	14.1	14.7	2.5	0.98	524
混合磁路	45	18	2.9	11.9	12.3	10.7	2.2	1.00	518
纯硅钢磁路	50	20	3.5	12	12.4	12	2.4	0.98	522
混合磁路	50	20	3	12.8	12.7	11.4	2.2	1.00	520
纯硅钢磁路	55	21	3.5	12.8	13.2	12.3	2.3	0.99	518

混合磁路	55	21	3.1	12.6	12.3	11.7	2.2	0.99	518
纯硅钢磁路	60	22	3.6	13	13.7	13.1	2.2	1.00	514
混合磁路	60	22	3.4	12.5	13.3	11.9	2.2	0.99	515
纯硅钢磁路	65	23	3.6	11.9	12	11.5	2.3	1.00	512
混合磁路	65	23	3.6	12.1	12.2	11.1	2.3	0.99	514

## 4 结论

从数据中可以看出，混合磁路的方案在低频测试的谐波电流数据为 14.7%，满足设计要求值（ $\leq 15\%$ ），在低频测试的功率因素数据为 99%，同样满足设计要求值（ $\geq 99\%$ ），混合磁路的方案在低频测试的滤波效果比纯硅钢磁路要好 2-4%，进而可以得出，硅钢加金属磁粉芯组成的混合磁路，是可以在部分电路系统中代替纯硅钢电感器，优点在于轻载下感量高，滤波效果好，过载下不容易饱和，提高了电路系统耐短路及抗冲击能力，缺点是感量随着负载的变化而变化，增加了电路系统的控制难度。

## 参考文献

[1] 赵修科主编. 开关电源中磁性元件. 南京航空航天大学自动化学院. 2004 年 8 月.

[2] 王全保主编. 新编电子变压器手册. 辽宁科学技术出版社. 2007 年 6 月.

[3] 王兆安. 杨君. 刘进军等. 谐波抑制和无功功率补偿 [M]. 2 版. 北京化学工业出版社. 2016.

[4] 傅亚. 辅助变流器供电系统 LLCL 滤波器谐波抑制研究 [J]. 电力机车与城规车辆, 2023-02.

[5] 魏伟. 单相并网逆变器 LCL 型滤波器优化集成设计 [J]. 哈尔滨工业大学, 2022-11.

作者简介：李宾 (1977—)，男，汉族，江西南昌，本科，上海兆启新能源科技有限公司磁件工程师，研究方向为新能源及轨道交通电力电子磁技术

作者简介：李思皓 (2004—)，男，汉族，上海，本科，上海第二工业大学，研究方向为智能制造及电力电子技术