地铁低压配电系统中的谐波分析与补偿控制方法

郭婧娇

（中铁第一勘察设计院集团有限公司 陕西 西安 710043）

摘要：本文通过分析地铁低压配电系统，并针对有源滤波器的工作原理、拓扑结构、控制策略、数学模型等进行阐述，并通过 matlab / simulink 模拟平台,对有源滤波器的功能进行了相关的验证。结果表明，在地铁低压配电系统中,动力照明负荷中有大量非线性负载存在，从而引起谐波问题,因此需要对谐波进行补偿及控制。根据瞬时无功功率理论谐波电流检测法，导入平均电流控制器建立了模拟模型。地铁低压配电系统的 APF 具有良好的电流谐波补偿性能，能够实现谐波抑制，从而实现无功补偿和谐波抑制，效果较好。

关键词：有源滤波器；补偿；低压配电；地铁；仿真

中图分类号：TM933　**文献标志码：**A

Harmonic Analysis and Compensation Control Method of Active Power Filter in Low Voltage Distribution of Metro

Guo Jingjiao

CHINA RAILWAY FIRST SURVEY & Design Institute Group Co. , Ltd. Xi'an, Shaanxi 710043

Abstract: by analyzing the low-voltage distribution system of metro, this paper expounds the working principle, topological structure, control strategy, mathematical model and other key technologies of APF, and verifies the relevant functions of APF in Matlab / Simulink simulation platform. The results show that there are a lot of nonlinear loads in the low-voltage power lighting load of metro power supply system ， The sample will cause harmonic problems, so it is necessary to compensate and control the harmonic. Based on the harmonic current detection method of instantaneous reactive power theory, the average current controller will be introduced, and the simulation model will be established. The APF of metro power supply system has good current harmonic compensation performance, which can realize the dynamic suppression of harmonic, so as to realize the reactive compensation and harmonic suppression, with good effect.

Key words: active power filter; compensation; low voltage distribution; metro; simulation

1 引言

随着我国社会经济和现代化建设发展越来越快，地铁系统是现代城市交通系统的重要组成部分，其电力品质成为关注焦点[1]。在地铁中，为确保地铁车站运营舒适性、节能需求，车站内动力照明设备采用了大量非线性电力电子装置，其运行时会有大量谐波电流产生，而电力电子设备中产生的谐波会给地铁的设备安全运行带来很大的障碍[2]。因此，对谐波的精确分析可以有效地抑制谐波，保证地铁的正常运行[3]。在交流系统中安装谐波补偿装置可达到滤波作用，同时可对无功补偿需求进行兼顾。当前，在进行地铁谐波治理时，装设谐波补偿装置是主要方式。有学者研究了地铁供电系统中谐波及无功功率对系统造成的影响，对无源滤波器、有源滤波器优缺点进行了对比[4]。一些研究人员分析了无效电力补偿和滤波法，分析了关于节能和改善电力质量的动态无效电力补偿[5]。

基于此，本文通过分析地铁低压配电系统，对有源滤波器（APF）工作原理、拓扑结构、控制策略、数学模型等关键技术进行阐述，同时在 matlab/simulink 模拟平台对有源滤波器的相关功能进行了一一验证。

2 地铁低压配电系统方案和谐波特征

2.1 低压配电系统方案

图 1 示出地铁供电系统的 0.4 kV 低电压配电

作者简介：郭婧娇（1985-），女，本科，中级工程师，研究方向：轨道交通工程供配电系统。

方案，其中 ST1 和 ST2 为配电变压器，连接组别：D，ynll；QF1 为 0.4kV Ⅰ段母线进线开关，QF2 为 0.4kV Ⅱ段母线进线开关，QF3 为母联开关、QF4 和 QF5 两段母线的三级负荷总开关。在正常工况时，母联断路器 QF3 断开，三级负荷总开关 QF4 和 QF5 处于闭合状态，两路电源同时运行，向车站的所有负荷供电；当一路电源故障或变压器退出运行时，分断三级负荷总开关 QF4、QF5，母联断路器 QF3 闭合，由另一台变压器承担本站的全部一、二级负荷。

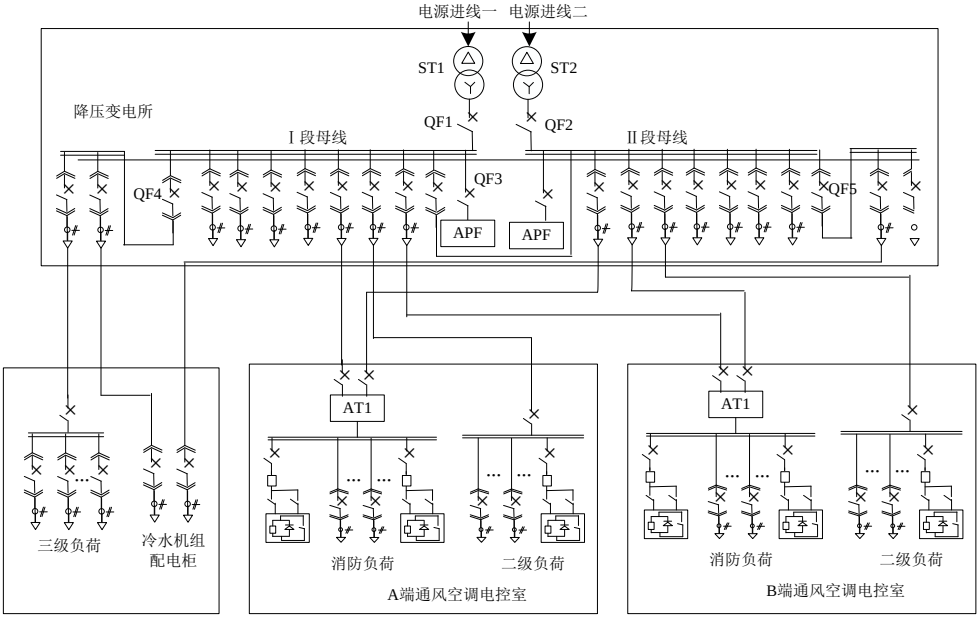


图 1 地铁供电系统低压配电方案

地铁车站低压配电系统主要用电负荷包括照明、通风空调、给排水、变电所交直流电源、通信、信号、自动售检票、综合监控、电扶梯、站台门等设备。照明光源多采用荧光灯或 LED 灯；通信（包括乘客信息系统 PIS）、信号、自动售检票、综合监控设备（包括 FAS、BAS、门禁）、变电所操作电源均采用备用电源(UPS)进行不间断供电；轨道排热风机、公共区大系统空调机组及回排风风机、冷水机组、冷冻水泵、电扶梯等多采用变频控制；区间隧道风机采用软启控制。

2.2 低压配电系统谐波和无功特征

地铁车站的低电压配电系统采用以放射式与树干式相结合的配电方式，由于其内部包含了各种各样的用电负荷系统，使得其内部接线复杂，很难对谐波进行具体的分析。图 2 和图 3 为某地铁站 II 段母线负载侧实测谐波电压、谐波电流数据。

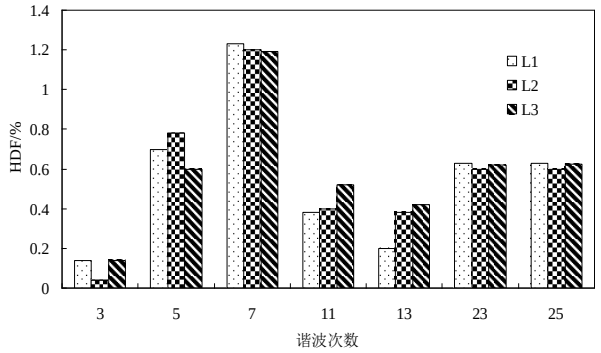


图 2 谐波电压统计

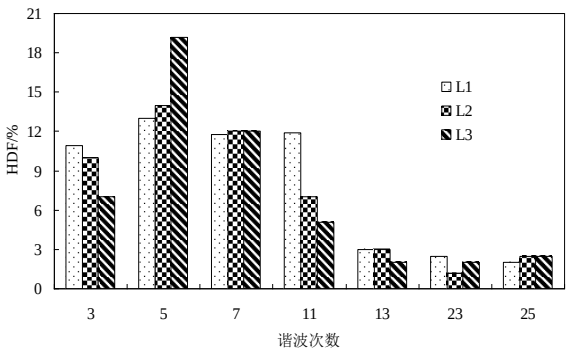


图 3 谐波电流统计

由图 2、图 3 知，0.4kV 侧电压谐波主要在 3 次、5 次、7 次、11 次、13 次、23 次和 25 次谐波集中分布，其中 23 和 25 次谐波来自 35kV 一侧（24 脉波整流变压器产生的谐波）。谐波电流主要在第 3 次、5 次、7 次、11 次、13 次分布，其中单相供电的电子计算机设备和照明光源产生 $2k\pm1$ 次谐波，主要为 3 次谐波；电机（水泵、风机、空调、扶梯等设备）的变频及软启动装置、变电所直流屏、弱电系统的 UPS 电源装置、应急照明电源装置等产生 $6k\pm1$ 次谐波，主要为 5 次、7 次、11 次、13 次谐波。谐波不仅会减少配电线路、变压器及用电设备的寿命，增加电能损耗，还可能引起保护装置误动或拒动，干扰信号、通信系统等。

表 1 功率统计

相序	L1	L2	L3	Σ
电压	230.2	229.5	230.4	/
电流	144.5	120.0	123.4	/
功率因数	0.93	0.91	0.92	0.92

表 1 为变压器 ST2 出线侧基波电压、基波电流、基波功率，由表 1 知，在正常工作中，车站低压电能质量状况在功率因数方面已经达到国家标准的要求，平均功率因数值已经达到 0.92，无需增加其它功率因数补偿设备。

3 有源滤波器工作原理及拓扑结构

3.1 拓扑结构

根据有源滤波器接入电网方式的不同，有源滤波器通常分为三种：即并联型、串联型、混合型[8]，地铁低压配电系统中多采用并联型有源滤波器。图 4 是低压配电系统中并联型有源滤波器的接线方式。在图 4 中，高压环网输入电源电压用 u_g 表示，变压器为 D，ynll 型 35/0.4kV 配电变压器；低压网电源侧输出电流用 i_s 表示,电压用 u_s 表示，R_s 表示等效电阻，L_s 表示等效电感；负荷侧输出电流用 i_L 表示；R_L 为等效电阻，L_L 为等效电感；有源滤波器的补偿电流用 i_C 表示；R_C 为有源滤波器交流侧等效电阻，L_C 为交流侧等效电感；有源滤波器阀侧电压为 e ；有源滤波器直流侧电容用 C_{dc} 表示；直流电压用 U_{dc} 表示。

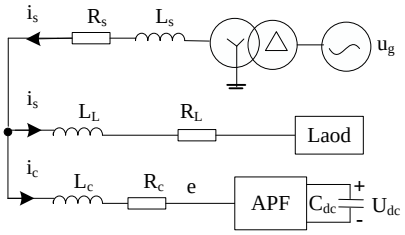


图 4 有源滤波器主接线

有源滤波器使用 PWM 逆变器，对负载侧动态谐波电流或不平衡电流进行补偿，具有良好谐波抑制效果。由于地铁低压配电系统采用 TN-S 接地方式，系统内用电负荷种类及工作方式繁多，系统经常处于三相负载不平衡状态。这种情况下中性线包含零序电流、部分谐波电流，三相三线制 APF 无法解决 N 线上的零序电流及谐波分量。本文以三相四桥臂型三相四线制 APF 进行分析。图 5 为三相四桥臂型三相四线制 APF 的拓扑结构。

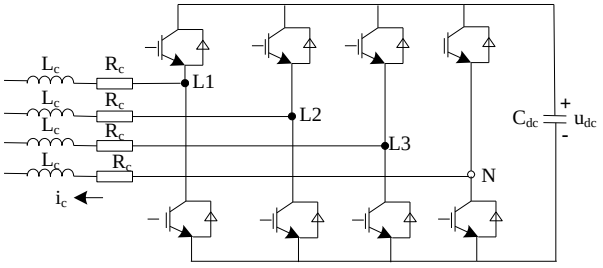


图 5 三相四线制 APF 拓扑结构

3.2 APF 工作原理

APF 属于一种新型电力电子装置，其能对谐波进行动态抑制及补偿无功，其特点是克服 LC 无源滤波器易造成振荡、易发生过载、补偿特性较为单一等缺点，系统阻抗不会影响谐波电流补偿效果[9]。通常，APF 由指令电流运算电路、电流跟踪控制电路、驱动电路和主电路 4 个部分构成，主电路采用电压型 PWM 逆变器。指令电流运算电路监测负载电流并分离出其电流中的谐波分量、基波无功电流、不平衡电流，通过运算得出发生补偿电流的指令信号。电流跟踪控制电路实时跟踪补偿电流指令值，将指令信号转换为 PWM 指令，通过驱动电路动态控制主电路各桥臂 IGBT 开关，从而输出大小相等、相位相反的补偿电流，使电网侧电流近似正弦波，实现动态谐波抑制，由此减少地铁电源系统谐波成分[10]。

由基尔霍夫定律可知，图 4 中负载侧电流、电源侧电流和补偿电流之间的关系由式(1)表示：

$$i_s = i_C + i_L \qquad (1)$$

控制 APF 输出电流 i_C 补偿负载侧产生的谐波、无功或不平衡电流，从而达到抑制电源侧谐波、无功或不平衡电流的作用。按照负载电流所含成分，将负载电流 i_L 进行分解，分别为基波有功电流 i_L^p、基波无功电流 i_L^q、谐波电流 i_L^h、基波不平衡电流 i_L^u，具体见式（2）所示：

$$i_L = i_L^p + i_L^q + i_L^u + i_L^h \qquad (2)$$

对于不同的补偿目标，APF 可对负载电流 i_L 中不同成分进行补偿，实现负载电流的无功、谐波和不平衡分量的补偿。根据需要可同时实现补偿无功、谐波和不平衡电流。

4 有源滤波器的数学模型和控制策略

4.1 地铁车站配电系统中的有源滤波器设置位置

地铁车站低压配电系统谐波处理包括消除谐波污染对信号、通信等重要用电负荷的影响，去除或减少由谐波引起的中性线过载可能引起的电气火灾，降低地铁低压配电系统对上级电网的污染三个方面。在变压器下的集中补偿能防止对上级电网污染，降低电气火灾危险性，但不能排除谐波对重要负荷的影响。在谐波源处局部就地补偿可将谐波源危害消除在源头，但该补偿方式具有较高的成本，且设计时选型复杂、安装及维护工程量大。从节约投资预算，合理设计滤波器的数量考虑，可采用重要负载集中及分类补偿方式相结合补偿方案。

4.2 有源滤波器的数学模型

本文分析三相四线制的有源滤波器控制策略和数学模型，式（3）为有源滤波器交流侧的计算方程。

$$e = u_s + L_C\left(di_C/dt\right) + R_C i_C \qquad (3)$$

对式（3）通过矩阵 $T_{abc-dq0}$ 式（4）进行变换，在 dq 旋转坐标系下重新表示为式（5）。

$$T_{abc-dq0} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos\omega t & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\omega t & -\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \qquad (4)$$

$$e_d = u_{sd} + L_C\frac{di_{Cd}}{dt} + R_C i_{Cd} - \omega L_C i_{Cq}，\quad e_q = u_{sq} + L_C\frac{di_{Cq}}{dt} + R_C i_{Cq} + \omega L_C i_{Cd} \qquad (5)$$

公式中，电源侧电压基波角频率用 ω 表示；有源滤波器阀侧电压、电源侧电压在 d 轴和 q 轴中分量分别为 e_d 和 e_q、u_{sd} 和 u_{sq}，补偿电流在 d 轴和 q 轴中分量分别为为为 i_{Cd} 和 i_{Cq}。假定电源侧三相平衡，将电源侧电压在 d 轴中分量方向设为电压向量方向即 $u_{sd} = u_s$，$u_{sq} = 0$。根据瞬时功率理论，

滤波器在 AC、DC 侧的瞬时功率平衡，得方程式(6)。

$$C_{dc}u_{dc}\left(du_{dc}/dt\right)=\frac{3}{2}u_{sd}i_{Cd} \qquad (6)$$

4.3 补偿控制方法

图 6 为有源滤波器控制策略，根据负载侧电流检测，将其谐波分量设为 APF 输出补偿电流谐波分量的参考值。通过式（6）设计相控器，可获得补偿电流基波电流参考值。根据谐波分量的参考值与基波电流参考值的和，电流跟踪控制电路生成 PWM 信号；取电流滞环控制策略对 APF 主电路中全控开关 IGBT 的开断进行控制,实现对负载电流谐波抑制。同理实现对负载电流无功分量、不平衡分量的补偿

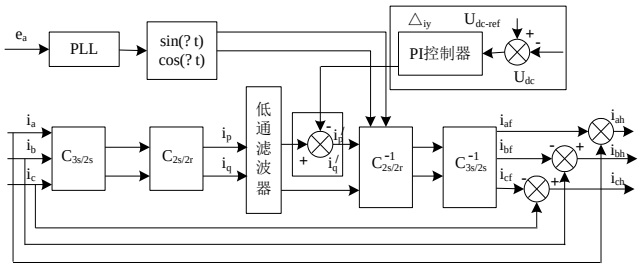
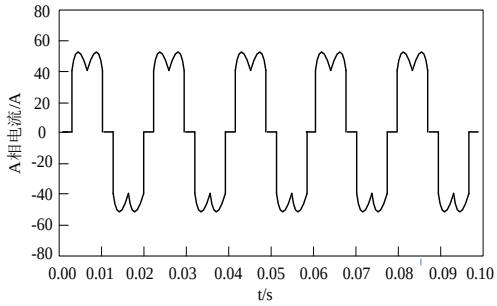


图 6 有源电力滤波器控制框图

5 仿真验证及分析

在 Matlab/Simulink 仿真平台构建基于 APF 的地铁低压配电系统谐波补偿模型。设置仿真参数为：三相工频为 50Hz，电压为 0.4kV；地铁的电源系统中，主要的谐波频率为 3、5 及 7 这类奇数次谐波，而非线性可用 6 脉波不可控的带阻感负载对其进行相应控制，分别设定两组负载，在 PWM 逆变器的电感为 L=6.8×10^{-3}mH、DC 侧电容器为 C=100×10^{-3}μF，模拟时间为 0.9s，负荷变化为 0.6 s，采样期间为 5×10^{-6}s 的情况下，进行相应结果观察。图 7 为系统谐波补偿仿真结果。



A：APF 未投入工作主电路 A 相电流波形

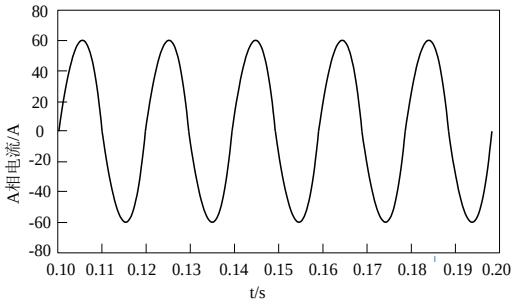
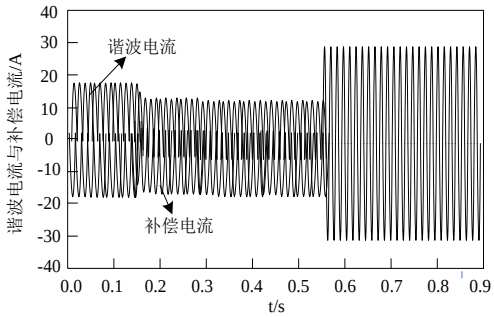
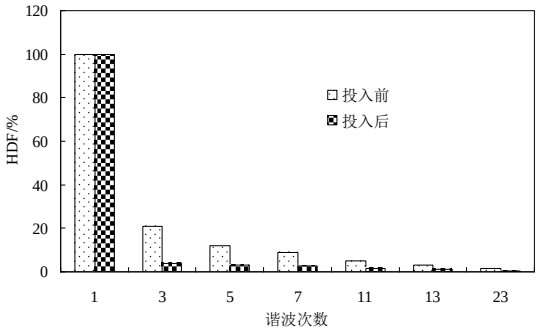


图 B：APF 投入工作主电路 A 相电流波形图



C：基于 APF 所检测的谐波电流与补偿电流



D：APF 投入后工作主电路 A 相电流频谱图

图 7 仿真结果及频谱图

图 7（A）是 APF 前主电路相位的电流波形。由于对非线性电阻负载的访问，电流失真，从而形成马鞍波形。图 7（B）为 0.1s 时刻投入基于 APF 的 A 相电流波形图，APF 在投入工作后有补偿电流产生，并和谐波电流相抵消，这样就大幅降低了电流谐波含量，电流波形近似为正弦波。图 7（C）为基于 APF 检测的谐波电流和补偿电流的比较图，其中谐波电流和补偿电流几乎一致，这表明 APF 检测的电流谐波检测方法的有效性。图 7（D）为 APF 投入后，工作主电路 A 相电流频谱图。基于 APF 的 A 相电流为 4.38%，根据谐波电流允许值计算公式，采用 APF 后，谐波电流允许值全部达到国家标准电网规定的谐波的极限值。

6 结语

本文通过分析地铁低压配电系统，并针对有源滤波器的工作原理、拓扑结构、控制策略、数学模型等进行阐述，并通过 matlab / simulink 模拟平台,对有源滤波器的功能进行了相关的验证，得出结论如下：

（1）在地铁低压配电电系统中，动力照明负荷中有大量非线性负载存在，从而造成谐波问题，需进行谐波治理。

（2）通过分析并联型有源滤波器工作原理、拓扑结构、控制方法、数学模型，在瞬时无功功率理论谐波电流检测方法基础上，引入平均电流控制器，确立了模拟模型。地铁供电系统的 APF 具有良好的电流谐波补偿性能，可实现动态谐波抑制，从而实现无功补偿和谐波抑制，效果较好。

参考文献

[1]桑福环,张海龙,王林,等.地铁能量回馈装置的无功补偿控制策略[J],城市轨道交通研究,2016,19(5):117-120.

[2]黄开,张栋梁,刘娟,等.地铁牵引供电系统中有源滤波器谐波控制研究[J],电测与仪表,2016,53(24):87-94.

[3]肖丽平,童朝南,高润泉.改进的有源电力滤波器滞环电流控制策略[J],电力系统自动化,2014,38(12):119-124.

[4]孟杰,李宝恩,李磊.城轨再生制动能量回馈装置的分析与设计[J],技术与市场,2016,23(7):39-41.

[5]吴旭升,胡风革,高键鑫.有源滤波器比例谐振重复控制策略[J],海军工程大学学报,2015,27(2):1-5.

[6]宋平岗,陈欢,章伟,等.地铁供电系统 APF 谐波抑制研究[J],华东交通大学学报,2016,33(4):122-130.

[7]Trinh Q N, Lee H H. An advanced current control strategy for three-phase shunt active power filters[J],IEEE Transactions on Industrial Electronics,2013,60(12):5400-5410.

[8]罗易东.有源电力滤波器及其在城市轨道交通中的应用研究[D],南京:东南大学,2016.

[9]俞益,李刚,许正平,等.有源电力滤波器在地铁行业的应用[J],现代建筑电气,2018(3):55-58.

[10]水恒华,张亮,赵永,等.地铁能量回馈及谐波补偿一体化系统研究[J],南京工程学院学报(自然科学版),2016,14(4):81-84.