

# 地铁供电系统新型可控无源滤波装置的研究

周玉双

陕西铁路工程职业技术学院

**摘要:**针对地铁供电系统中现有LC无源滤波器因温度等环境变化引起的失谐问题,提出一种新型可控无源滤波装置。利用Matlab/Simulink软件,对TCR型滤波器进行仿真研究,通过分析其结构和工作原理,成功将其中的电抗器替换为具有可调性的变压器型电抗器。仿真结果表明,该可调滤波器在失谐工作时表现出较好的调谐能力,不受环境变化影响,克服了传统LC无源滤波器的局限。此外,与TCR型滤波器相比,该滤波器有效地抑制了附加谐波问题。取得了预期设计的效果,满足了地铁供电系统功率因数要求。

**关键词:**地铁供电系统;谐波;无源滤波器

**【DOI】** 10.12254/j.issn.2096-6539.2023.11.073

近年来,随着城市地铁的迅速发展,地铁供电系统对电能的需求逐年上升,同时对电能质量的要求也越来越高<sup>[1]</sup>。由于地铁采用直流供电,通常需要使用各种电力电子设备,这些设备通常具有非线性负载特性,会产生谐波和无功功率<sup>[2]</sup>。这些问题会影响公用电网的电能质量,甚至对周围的电力设备和用户造成潜在危害。针对地铁供电系统存在电能质量问题,常常采用了在车站降压变电所低压侧设置电力电容器和电感器的固定式无功补偿装置来处理<sup>[3]</sup>。文献[4]和文献[5]表明这种滤波器的优点包括易于设计、结构简单、价格低廉、技术成熟以及易于维护,但是其主要缺陷在于电容电感参数容易受到外界环境的干扰,因此会导致滤波器的谐振状态偏离谐振点,进而降低滤波器的谐波滤除能力,对滤波性能造成严重影响。因此,解决现有LC无源滤波器因环境变化引起的失谐问题提高地铁供电系统电能质量的关键。

目前,国内许多学者从不同角度提出了多种改善地铁供电系统电能质量的方法。例如,为了达到经济性与最优性,文献[6]-[8]提出了多种优化算法。但是,由于LC无源滤波器存在不确定因素,参数设计方法存在缺陷,而且非常复杂。为了解决传统无源滤波器的失谐问题,文献[9]使用了晶闸管可控滤波器(TCR)代替固定电抗器。作为可变电感,晶闸管可控电抗器具有许多优点,如结构简单,控制方便,精度好,响应速度快,且响应速度可达10~12ms等。但文献[10]指出,由于晶闸管的导通角是可控的,当晶闸管为导通状态时,被控电抗器的电感将充电,直到电压极大值降到零;当晶闸管为封锁状态时,被控电抗器的电感将放电,直到电流降到零。这种等电位运动是一种快速变化的非正弦波形,会产生很多次谐波。此外,TCR本身也有一些电路元件(如滤波电容器、额外电感等)会引入附加的谐波电流,从而使谐波电压更大。因此,在电力系统中TCR会产生一些特定的、无法避免的附加谐波,成为电力系统中的一个重要非线性谐波源,对其他设备和电网产生负面影响。

针对地铁供电系统中现有LC无源滤波器因温度等环境变化引起的失谐问题和晶闸管可控滤波器(TCR)因电流和电压均为非正弦波形引起的附加谐波问题,提出了一种具体的解决方法:将TCR型滤波器中的电抗器替换为变压器型可调电抗器。该方法不仅解决了上述问题,而且具有一定的实用价值。

## 一、地铁供电系统谐波的产生

地铁供电系统谐波的产生与电力电子设备、非线性负载以及网络特性等因素有关。地铁牵引供电系统采用的是DC1500V架空接触网和DC750V第三轨供电制式,由牵引变电所的整流机组降压整流后提供。整流机组采用12脉波整流和等效24脉波整流两种方式运行,会在过程中产生奇次谐波,这些谐波电流会通过电网和负载传递,导致电网电压失真,进而影响到其他用户设备。因此,对地铁供电系统中的谐波进行监测和管理,采取适当的措施来消除或减小谐波非常重要。

此外,地铁供电系统中的非线性负载(如照明、列车牵引系统等)也会导致谐波电流的产生,进一步增加了谐波电压的含量。随着国家对节能降耗的要求不断提高,越来越多的低压用电设备采用变频装置,导致低压配电系统发生严重的谐波畸变。不同设备产生的谐波频率不同,比如照明系统和荧光灯主要产生三次谐波,而EPS电源屏、通风空调、电梯和扶梯等设备则主要产生5、7次谐波。这些谐波会在地铁供电系统中相互叠加和放大,对地铁供电系统的可靠性造成影响,同时也会通过主变电站进入电力系统,对城市电力系统造成严重的谐波污染。通常,治理应从0.4kV侧开始,该侧是地铁变电站的低压侧。表1是西安地铁1号线典型运行日降压变电所0.4kV侧的实测数据。

表1 西安地铁1号线某0.4kV母线谐波电流表

谐波次数	谐波电流		平均值/A
	最大值/A	95%概率最大值/A	
3	27.2	21.1	15.9
5	40.7	30.7	23.6
7	30.9	26.7	18.2
11	25.6	24.1	15.1
13	15.8	14.3	8.4

最后,地铁供电系统网络特性(如线路长度、电容、电感等)也会对谐波电压的产生影响。综上所述,以上因素的相互作用导致地铁供电系统中谐波的产生。这些谐波会对电网系统的稳定性、电力质量以及其他用户设备产生不良影响,因此需要进行谐波控制和滤波处理。

## 二、地铁供电系统谐波的传统治理方式

### (一) LC滤波装置治理谐波

为了处理我国地铁供电系统的谐波问题,车站降压变电所0.4kV侧采用固定式滤波装置,该装置有效地提

高了低压侧动力照明负荷功率因数，使其达到了0.9，并且还能吸收部分奇次谐波，如图1所示。

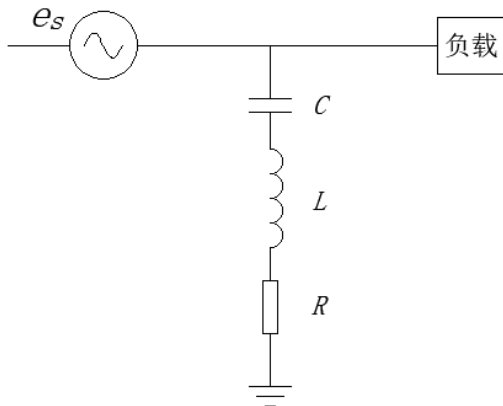


图1 0.4kV侧LC滤波装置接线示意图

LC滤波器是一种常用的电子滤波器，由电感与电容组成。它利用电感和电容的反相作用，将电路中一定频率范围内的信号滤除，使之只有某一特定频率信号通过，抑制其他频率信号。LC滤波器能够实现对高频信号的滤波，常用于无线电通信、音频信号处理、电源滤波、变频器输出端滤波等场合中。该滤波器是利用串联L、C谐振原理构成，它对n次谐波的阻抗值为：

$$Z_n = R_n + j(n\omega_s L - \frac{1}{n\omega_s C}) \quad (1)$$

式中：n为谐振次数， $\omega_s$ 为基波角频率。

当交流电信号经过LC滤波器的电路时，信号首先进入电路的电感元件，电感元件将信号的高频部分通过，低频部分被阻滞。随后，高频信号通过电容元件，而低频信号被容抗电容阻塞。此时，所有的非理想情况下的频率信号均按其频率特性被阻塞或透过，实现了对特定频率信号的滤除作用。因此，只需设置滤波器的谐振频率与目标谐波频率相同即可使大部分该谐波电流通过滤波器中转，从而实现滤波该谐波的目的。

在实际应用中，滤波器存在一些问题。首先，滤波器周围的环境温度会发生变化，使得电容和电感的参数也会随之变化，可能导致绝缘老化等问题。在滤波器的安装和调试过程中，由于无法完全避免误差，实际参数和谐振频率会产生偏差，导致失谐现象的发生。特别是在电容器额定电压不变的情况下，随着环境或温度变化，电容器的容量会逐渐降低，从而导致电容值下降。不过，一旦滤波器设计完成，电感值将保持不变。因此，利用滤波频率公式：

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

显然，若电容值发生变化，而电感值保持不变，那么滤波器的谐振频率也会相应地发生改变，导致谐振点偏移，从而降低了滤波器的调谐性能。这可能引起谐波放大，导致并联谐振的发生甚至损坏电容<sup>[11]</sup>。

### (二) TCR滤波装置治理谐波

TCR型可控无源滤波器也是一种用于处理地铁供电系统中谐波的滤波器。它通过在无源LC滤波器中引入可控电抗（如晶闸管可控电抗器，即TCR）来实现滤波效果，其基本结构如图2所示。

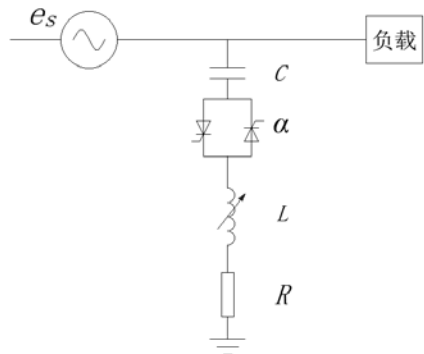


图2 0.4kV侧TCR滤波装置接线示意图

TCR由两个反并联晶闸管和一个电抗器串联构成。当晶闸管处于导通状态时，被控电感L将充电，从而增加了无源LC滤波器的总电感值，使得滤波器的谐振频率降低，从而得到更好的谐波滤波。当晶闸管处于封锁状态时，被控电感L会短路，自动消耗之前充电的电能，并释放储存在自身的电能，直到电流降为零。整个TCR型可控无源滤波器的控制信号由特定的控制电路产生，并通过控制电路中的控制器件来控制晶闸管的导通与封锁状态。由于控制器件的响应速度很快，所以该滤波器能够实现快速且精确的谐波滤波控制。

晶闸管可控电抗器（TCR），对电源造成的谐波污染小，可以给负载以适当的有功电流，降低了电网对负载的谐波污染，同时具有可靠性高、寿命长、故障率低、无须经常维护等优点，适应范围广，可以满足不同需求，具有广泛适应性，可快速调节谐振点，实现精确电能调节。然而，由于可控硅电抗器采用了斩波形式的工作电路，会引入额外的谐波，进而对其他设备和电网造成不良的影响<sup>[12]</sup>。

### 三、新型可控无源滤波装置的结构

新型可控无源滤波器结构如图3所示，其由晶闸管控制的变压器型电抗器、电容器、电阻和电力电子功率变换器组成，其中变压器的原边作为工作绕组，在正常滤波时连接到电网；副边作为控制绕组，通过双向三极晶闸管进行短路。在装置工作时，双向三极晶闸管的触发角可以在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 的范围内进行调节，以控制电抗器控制绕组的电流。此时，变压器内部的磁通大小发生变化，使得变压器的等效电感在此过程中发生变化，从而实现阻抗连续变化的目的。通过调节触发角度，可控无源滤波装置可实现对电网中的谐波和噪声进行有效滤波，并保持电网对负载的正常供电，同时避免对电网和其他设备产生不良影响。

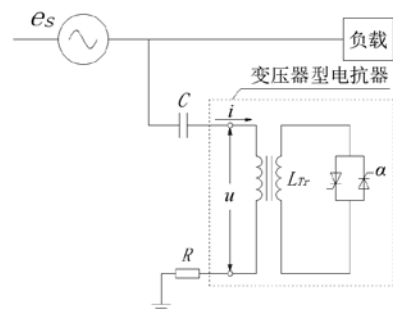


图3 变压器型滤波器的基本结构

#### 四、仿真结果与分析

根据新型可控无源滤波装置的工作原理,在MATLAB仿真环境中搭建整个系统仿真模型,选取负载电流50A,对前面的理论推导系统结构以及结论进行仿真验证。为了更好地观察此系统的工作效率,在系统中投一组实验负载用来模拟地铁供电系统中的冲击性负荷,得到负载电流的波形及滤波装置的波形如图4、图5所示。

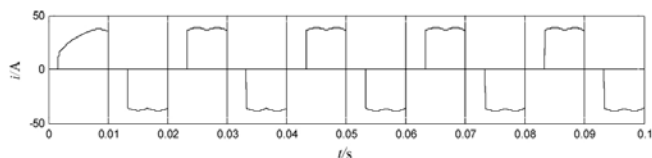


图4 滤波前负载侧A相电流仿真波形图

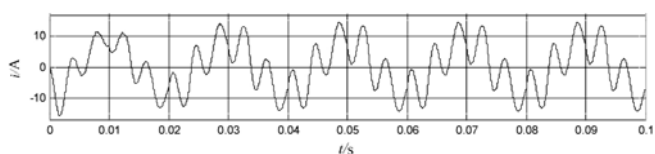


图5 滤波支路电流波形图

为了验证新型可控无源滤波装置的性能,模拟环境温度变化引起的电容值变化,将其电容值下调 $\Delta C=10\%C$ ,得到当触发控制角 $\phi \approx 0^\circ$ 时的负载侧电流仿真波形如图6所示。设晶闸管触发角为 $\alpha$ ,触发控制角为 $\phi = \alpha - \frac{\pi}{2}$  ( $\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi$ ),求得晶闸管的触发控制角 $\phi \approx 15^\circ$ 。通过调节新型可控无源滤波装置晶闸管的触发控制角 $\phi$ ,得到 $\phi = 15^\circ$ 的负载侧电流仿真波形图如图7所示,

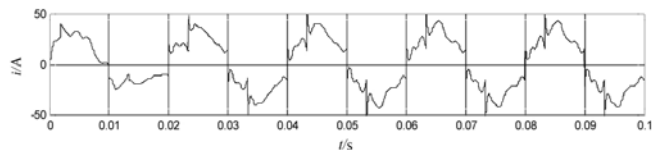


图6  $\phi = 0^\circ$ 时负载侧电流仿真波形图

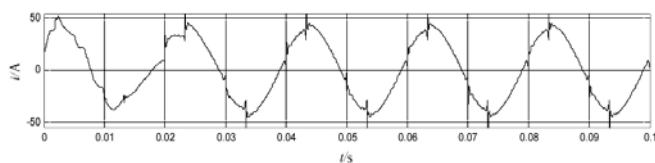


图7  $\phi = 15^\circ$ 时负载侧电流仿真波形图

通过对比图6和图7,可以看出当电容值发生变化时,调节新型可控无源滤波装置的触发控制角,可以明显改善其电流波形由于电容参数变化时而发生的波形畸变情况,即通过增大反并联晶闸管的触发控制角 $\phi$ ,负载侧电流波形几乎接近于正弦波,由此说明系统中的谐波因控制角的变化,重新使滤波器工作在了谐振状态,表明新型可控无源滤波器的调谐能力显著。

#### 五、结语

目前,地铁供电系统滤波方案主要是单一的在主变电所采用电抗器作为补偿装置,不仅可以进行适当的无功补偿,还可以治理谐波污染。但是电抗器的容量固

定,当外界环境变化较大或者地铁供电系统负荷波动较大时,可能出现滤波器失谐,加重供电系统负担,从而引起功率因数降低。仿真结果表明:该滤波器比传统无源滤波器和TCR滤波器更具优势,因为即使处于失谐状态下,它也可以重新调谐,并有效地抑制晶闸管所带来的3次等其他零序谐波。因此,这种新型滤波器非常适合用于电能质量控制和谐波治理等方面,并具有极高的实用价值。建议各地铁公司应考虑进行实测分析报告,以从经济、技术和环保节能的角度论证方案的可行性。

#### 参考文献

[1] 连康康. 地铁变电所中电能质量管理系统的應用探析[J]. 汽车周刊, 2023 (2): 2.

[2] 罗桂安. 谐波抑制和无功功率补偿技术的相关分析[J]. 大科技, 2018.

[3] 杨丰萍, 杨扬, 龚正. 地铁供电系统有源滤波协同无功补偿装置的研究[C]//2013年江西省电机工程学会年会. 2013: 3733-3737.

[4] Luo H, Huang Y, Jiang G, et al. Online identification method of detuning element of single-tuned filter[J]. Power System Protection & Control, 2015, 43 (1): 34-39.

[5] 程江平, 周全. 直流滤波器保护的研究和改进[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (4): 105-109.

[6] Ren M, Sun Y, Rao X. A study on optimization of passive filter design[C]// Control Conference. IEEE, 2010: 4981-4985.

[7] Sindhu M R. Multi-objective Optimal Design and Control of Auto-tuned Passive filter using Bacterial Foraging Algorithm to improve Power quality and to minimise Power losses[J]. International Journal of Control Theory & Applications, 2016, Vol.8 (Issue 5): 2013-2020.

[8] Singh S, Singh B. Optimized Passive Filter Design Using Modified Particle Swarm Optimization Algorithm for a 12-Pulse Converter-Fed LCI-Synchronous Motor Drive[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50 (4): 2681-2689.

[9] 金一平, 刘志珍. 自动调谐无源滤波器的仿真研究[J]. 电气应用, 2003 (12): 60-62.

[10] 孙媛媛, 尹志明, 郑伟杰, 等. 晶闸管可控电抗器的谐波产生特性研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27 (7): 267-273.

[11] Wu J C, Jou H L, Wu K D, et al. An active method for suppressing harmonic current of power capacitor[C]// Power Electronics and Motion Control Conference, 2004. Ipecm 2004. the, International. IEEE, 2005: 237-241 Vol.1.

[12] Liu W, Luo L, Dong S, et al. Overview of Power Controllable Reactor Technology[J]. Energy Procedia, 2012, 17 (Part A): 483-491.

作者简介: 周玉双(1991—),女,甘肃白银人,硕士,主要研究方向为电能质量检测与控制。

基金项目: 陕西铁路工程职业技术学院科研基金项目(KY2021-21)