

城市轨道交通牵引供电系统的 技术发展展望

张志学, 何多昌, 张铁军, 陈 涛

(株洲南车时代电气股份有限公司 技术中心, 湖南 株洲 412001)



作者简介: 张志学 (1973-), 男, 博士, 现从事轨道交通、网侧变流器控制、电力电子故障诊断等方面的研发工作。

摘 要: 24脉波二极管整流器等传统直流牵引供电系统成熟可靠, 但由于其能量无法双向流动、谐波特性欠佳、直流电压不可控等缺陷, 与高效节能环保的发展理念不符。通过将 PWM 整流技术应用到直流牵引供电系统, 提出了多种新型电路拓扑, 分析了各自的优缺点及应用场所, 为直流牵引供电系统的发展提供新思路。

关键词: 牵引供电系统; 能量回馈; 谐波特性; PWM 整流器

中图分类号: U239.5; U223.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2012)01-0043-04

Technical Development Prospect in Traction Power System of Urban Rail Transit

ZHANG Zhi-xue, HE Duo-chang, ZHANG Tie-jun, CHEN Tao

(Technology Center, Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: The traditional 24-pulses rectifier for traction power system of urban rail transit was not agree with environment friendly idea as a result of unidirectional power flow, faulty harmonics characteristic and uncontrolled output voltage. In this paper, several original traction power system were proposed by applying PWM technology, advantages and disadvantages of which were pointed, as well as the respective application situation was analyzed. All the results showed the new direction for traction power system of urban mass transit.

Key words: traction power system; feedback energy; harmonic characteristic; PWM rectifier

0 引言

随着我国国民经济的持续发展, 城市轨道交通已成为解决大中型城市公共交通的首选交通工具^[1], 由此直流牵引供电系统市场也获得了迅猛发展, 但伴随着高效率、低碳等绿色环保理念深入人心, 既有的直流牵引供电系统需要进行升级来适应这些要求。本文简要分析了既有牵引供电系统的主要缺陷, 并针对这些缺陷提出了一些新的发展思路。

1 既有直流牵引供电系统的主要缺陷

我国目前的城市轨道交通直流牵引供电系统普遍采用多脉波(12脉波或24脉波)二极管整流技术。该技术具有简单可靠、成本低廉的优点, 但随着该技术的大规模应用, 其固有的一些缺陷也逐渐暴露出来, 主要体现在3个方面。

①多脉波整流器在交流电网侧和直流牵引侧均产生不可忽略的谐波污染^[2], 且注入大量无功到交流电网, 这对电网而言是谐波负载, 对轨道车辆而言是谐波源。

②多脉波整流器的直流输出电压不可控, 随负载的波动而波动, 严重情况下甚至导致过压和欠压的发生。

③多脉波整流器由于二极管单向特性导致功率只能单向流动, 车辆制动能量无法回馈, 只能利用车载电阻或地面电阻将制动能量消耗, 一方面导致能源浪费, 与节能减排理念不符, 另一方面也导致环境温度上升, 由此又衍生出降温、通风等其他问题, 并由此导致系统总成本的增加。

2 直流牵引供电系统新方案

PWM整流器具有网侧电流为正弦波、网侧功率因数在-1~+1范围内可控、输出电压在一定范围内恒定、动态响应好、能量可双向传输等优良性能^[3], 正好契合

既有直流牵引供电系统的升级需要。PWM 整流器应用于城市轨道交通牵引供电系统,有以下几方面的优势。

①车体轻量化,降低系统成本:取消了车载制动电阻和其散热设备;减少了车载装置重量和体积;取消了地面回馈能量吸收装置。

②节省电能:列车制动时产生的再生电能可回馈至电网或其他动力照明设备。

③绿色环保:采用 PWM 控制技术,使得网侧功率因数 ± 1 ,且电流谐波畸变率较低,有效抑制装置对电网的谐波干扰。

由上可知,与既有二极管整流方案相比,PWM 整流技术在经济性能上也具有较大优势:二极管整流方案虽然一次性成本要低,但为了改善电网质量,必须增加滤波及无功补偿装置;且列车再生制动能量无法利用,大量电能被浪费。PWM 整流牵引供电系统尽管一次性投入成本较高,但由其控制和运行方式的特点决定了它是一种高性价比的供电方式,符合实现电网绿色无污染的要求,同时随着大功率全控器件的成熟应用,装置本身的价格也正逐渐降低。

因此结合 PWM 整流拓扑和二二极管整流拓扑,提出了多种城市轨道交通直流牵引供电系统新方案。

2.1 PWM 低压回馈方案

地面斩波电阻能量消耗装置固然可以提供制动能量一个泄放通道,但能量被消耗掉意味着不节能。将低压回馈思路和地面电阻能量消耗装置组合起来,就构成了 PWM 低压回馈牵引供电方案,如图 1 所示。

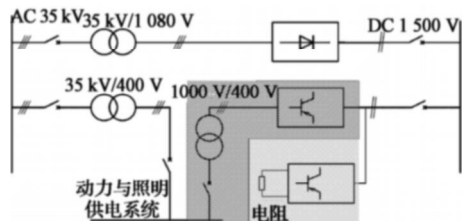


图 1 PWM 低压回馈原理示意图

由图 1 可见,该方案保留多脉波二极管整流电路作为牵引供电回路,制动能量则由 PWM 整流器回馈到低压动力与照明供电系统,供低压负载使用。

该方案可以在一定容量范围内充分利用制动回馈能量,比起传统的地面斩波电阻方案而言能量利用率有所提高。但由于回馈能量呈尖峰时序特性,本方案的回馈能量注入点是低压动力照明系统,其额定容量远小于回馈能量的尖峰潮流,这将抬高低压系统电压至非正常值,甚至使得低压系统停止工作。因此回馈装置控制系统必须添加低压动力照明系统的电压控制功能,在低压系统电压被抬高到一定程度后,就必须启动地面电阻消耗多余能量。因此低压回馈系统中地面电阻装置仍是必不可少的,只是较传统地面电阻装置的容量要小一些而已。

为了确保二极管牵引供电系统和 380 V 低压系统之间互不影响,本方案必须在回馈装置与低压系统之间

增加隔离变压器,由于电压仅为 380 V,在瞬时回馈功率较大的条件下,该变压器的体积也比较大。

该方案的另一问题是低压系统对谐波电流更为敏感,谐波要求也更严格,为满足要求就必须采用多重化或多电平技术,系统成本将增加。

2.2 PWM 高压回馈方案

考虑到低压回馈方案受限于低压系统容量而使得地面电阻装置不能省略,可以将回馈能量直接接入高压电网当中。由于高压电网容量远大于回馈能量功率,回馈能量的冲击不会对高压电网产生重大影响,并通过高压电网自动分配给该网上的其余负载。该方案原理示意图如图 2 所示。

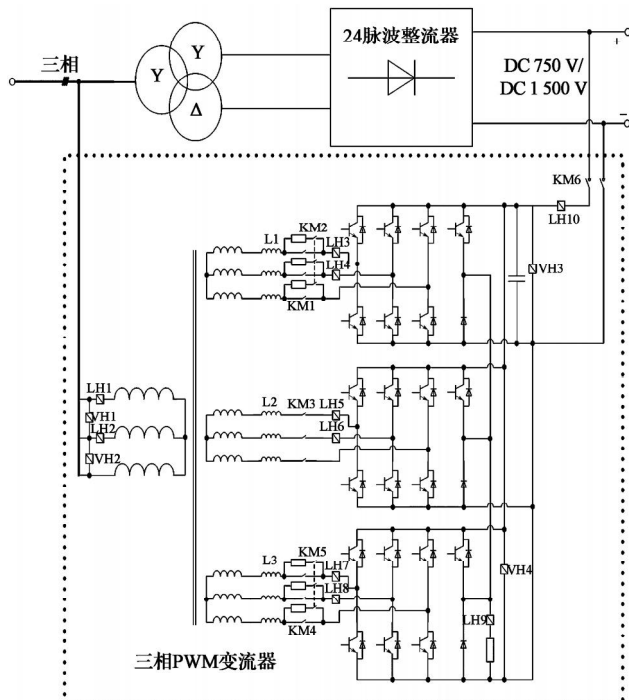


图 2 PWM 高压回馈原理示意图

从图 2 可见,高压回馈方案保留多脉波二极管整流器作为牵引供电电源,但回馈回路中地面电阻装置已省去。此外高压系统对电流谐波的要求相对于低压系统要低一些,但装置仍采用多重化技术来优化谐波特性。

高压回馈是将回馈电能注入高压系统进行重新分配。由于高压系统容量远大于回馈功率,系统扰动很小。但该方案需要增加高压隔离变压器及相应的继电保护装置,系统投资将有所增加。

2.3 PWM 中压回馈方案

与低压回馈及高压回馈不同,制动能量还可以接入中压系统。图 3 是西门子公司提出的一种牵引供电方案。由图 3 可见,制动能量通过晶闸管和自耦变压器回馈到原来的牵引变压器二次侧(1 180 V/590 V 侧),再由牵引变压器送入高压电网。该方案无需增加昂贵的变压器,回馈整流器也采用便宜的晶闸管器件,整个方案成本低廉。但也正是采用了晶闸管和自耦变压器,装置的谐波特性较差,制约了该方案的推广应用。

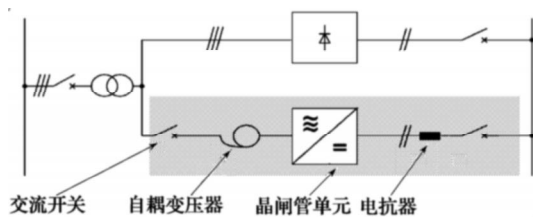


图3 晶闸管中压回馈原理示意图

将图3中晶闸管整流器改为PWM整流器得到如图4所示的PWM中压回馈方案。由于PWM整流器的开关频率远高于晶闸管频率，从而大大改善了回馈电路的谐波特性。PWM中压回馈方案的另一个重要优势在于利用了原有系统中的牵引变压器，降低了系统成本和装置的体积；此外PWM整流器还可在一定功率范围之内作为牵引供电电源来控制。

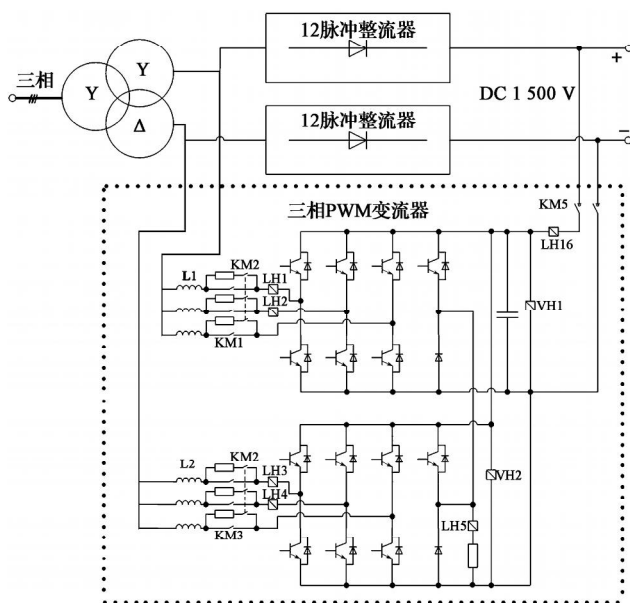


图4 PWM中压回馈原理示意图

PWM中压回馈方案的主要问题是二二极管整流器与PWM整流器之间存在一定的环流，降低了PWM中压回馈装置的整体效率；且PWM整流器工作在过调制区，谐波特性不能实现最优，或者需要采用非常规的PWM控制策略，增加了控制难度。

PWM中压回馈方案的另一个变化拓扑是在PWM整流器与既有整流变压器之间增加一个隔离变压器，该拓扑可以有效消除二极管整流和PWM整流器之间的环流，且PWM整流器可工作在线性调制区，谐波特性优于无隔离变压器方案。但变压器的增加导致系统整体体积和成本的增加。

2.4 全PWM方案

PWM高压回馈方案中保留了多脉波二极管整流器作为牵引供电回路，PWM整流器仅作为制动能量的回馈通道。但PWM整流器实际具备能量双向流动的功能，完全可将多脉波整流器省去而直接用PWM整流器作为牵引供电和制动回馈的双向能量处理器，从而得到如图5所示的全PWM方案。

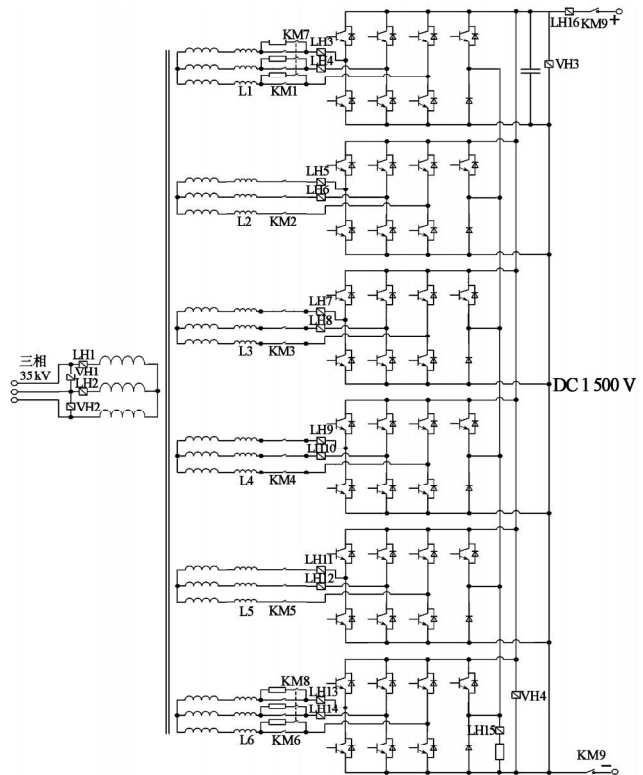


图5 全PWM方案原理示意图

采用全PWM整流器方案优点很多，主要有：①整流器的输入端网侧电流为正弦波，且功率因数为 ± 1 ，主动实现了谐波特性的优化；②能量可以双向传输，从而省去了二极管整流电路，制动能量也可以全功率范围内充分利用；③整流器的直流侧输出电压波动很小且可以不随负载变化而恒定在某个给定值范围之内，相比于传统的多脉波整流器供电系统，车辆的控制特性更优，保护整定更为方便。

全PWM整流器方案的主要制约在于经济成本。根据“GB-T 10411—2005 城市轨道交通直流牵引供电系统”的要求，整流器必须具备300%额定功率输出1 min的过载能力。目前的IGBT等全控器件的过载能力均不佳，因此要满足这一要求就只能按照300%过载容量作为额定容量来进行设计，从而导致设计容量严重偏大，必须采用6重化甚至更多重数的整流器拓扑，成本急剧上升。

2.5 PWM整流器+超级电容方案

全PWM整流器方案的各项功能指标已趋于最优，但仍有系统成本过高的缺点；此外能量回馈时需经整流器和变压器两级处理，能量损耗不容忽视。考虑到回馈能量具有持续时间短、幅值高的尖峰特性，虽然利用高压电网的大容量可以将其影响降低，但电力系统其实很不欢迎此类波动严重的负载。为了减少回馈能量的波动性，在全PWM方案的基础上进一步提出PWM整流器+超级电容器的改进方案，如图6所示。利用超级电容的大容量以及短时大电流充放电特性，可以将具有尖峰特性的制动回馈能量的尖峰削平，其中平缓部分的能量由PWM整流器回馈到高压电网，而尖

峰部分则由超级电容器吸收。利用超级电容削除尖峰后, PWM 整流器的容量就可以大大缩小, 对高压系统的功率注入相对要平缓, 并降低系统整体成本。

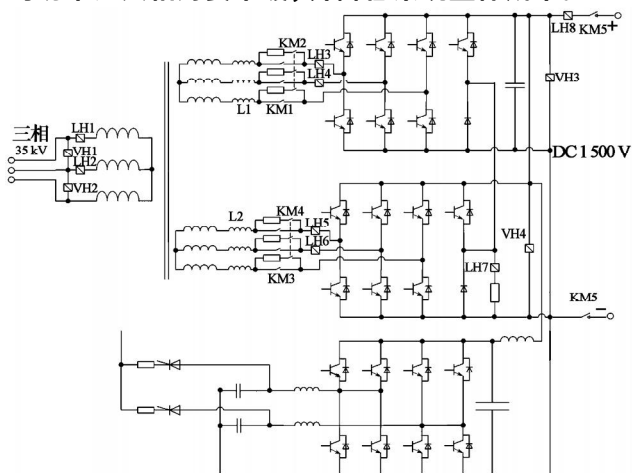


图6 PWM 整流器+超级电容原理示意图

该方案的缺陷主要集中在超级电容器这一核心部件上。一方面超级电容的容量虽然可达120 000 F, 但直流电压仅为1.5 V或2.7 V, 这意味着实用时需要大量的超级电容进行串并联, 而目前的技术水平尚无法保证超级电容串并联使用的高可靠性; 另一方面超级电容的成本虽然已急剧下降, 但仍旧比较昂贵。这两方面的制约都有待于超级电容技术水平的发展, 当超级电容技术更趋成熟后, PWM 整流器+超级电容方案方有可能成为最佳牵引供电方案。

3 新型直流牵引供电方案的可靠性分析

上文中提出了几种新方案, 其核心内容就是方案中添加了PWM整流器, 而PWM整流器也决定各种方案的性能指标以及系统可靠性。鉴于轨道交通直流牵引供电系统的高可靠性要求, 有必要分析PWM整流器的可靠性以及为了提高可靠性所采取的各种措施。

首先PWM整流器技术本身发展到现在, 不仅在理论上, 在实际应用上也已经是一项广泛应用的成熟技术。在风力发电、柔性输电、干线机车、高速动车组等领域已获广泛而成功的应用, 即使在城市轨道交通领域, 日本东京筑波快捷线、香港地铁等也已经有PWM变流装置挂网运行, 其性能指标和经济指标均表现优良^[4]。

此外新方案还可采用一系列的措施来提高系统的可靠性, 具体包括: ①充电电路、整流器等关键电路的多电路热冗余设计; ②直流母线电压等关键信号的多传感器信号检测; ③设置熔断器短路保护、脉冲封锁、接触器隔离等关键故障的监视与保护; ④采取不同功率等级的系列化设计, 使得器件的互换、工艺可靠性等更有保障。新方案的可靠性能得到充分保证。

不同方案的成本各不相同, 应用场合和推广时机也有所差异。PWM低压回馈方案成本较高, 最好应用于已有地面电阻装置且低压动力与照明系统容量较大的既有牵引变电所; PWM中压回馈方案成本最低, 性能尚可, 无需新增变压器, 可有效解决制动能量回馈的难题, 现阶段可以推广; PWM高压回馈方案成本适中, 可应用于既有牵引变电所或新造变电所等各种场合, 现阶段可考虑推广; 全PWM方案成本昂贵, 适用于新造变电所, 特别是全线新开通的场所, 可考虑做试点考核; PWM整流器+超级电容方案成本昂贵, 可用于新造变电所, 最好暂待超级电容本身的技术提升与成熟。

4 结语

①PWM整流器可以有效地抑制二极管整流器在能量双向流动、输入输出谐波特性、直流电压稳定性等方面的缺陷, 构建绿色环保的新型直流牵引供电系统。

②将二极管整流与PWM整流相结合, 可以得到低压回馈、中压回馈、高压回馈、全PWM回馈及PWM回馈+超级电容等多种新型直流牵引供电电路拓扑, 在不同场合可有针对性地采用不同电路拓扑, 实现牵引供电系统的最优应用。

参考文献:

- [1] 杨 颖. 城市轨道交通低碳技术应用研究[J]. 机车电传动, 2010(6): 1-6.
- [2] 李建明, 尹传贵. 城市轨道交通牵引供电系统谐波分析[J]. 城市轨道交通研究, 2004(6): 46-49.
- [3] 张崇巍, 张 兴. PWM整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [4] 张志学, 王晓保. 轨道交通直流牵引供电系统中AC/DC变流器的技术性能评估[J]. 变流技术与电力牵引, 2008(5): 16-20.

动态消息

更高速试验列车在青岛四方正式下线

2011年12月23日上午, 更高速试验列车在青岛四方正式下线。这将是继2010年底创造486.1 km/h的世界铁路运营试验最高时速纪录的中国南车新一代动车组CRH380A之后, 国内设计时速最高的高速试验列车。

该试验列车是中国南车以CRH380A创新成果为基础, 以更高速条件下安全、可靠运行为首要目标, 围绕提升临界速度、牵引能力, 降低阻力等要求, 对系统集成、头型、车体、转向架、

牵引、制动等系统进行全面创新的最新科研成果, 取得了100余项科研创新成果。列车下线后将作为中国高速列车前瞻性技术研究的移动试验平台长期使用。作为更高速条件下车、线、网运行状态的综合检测试验平台, 该列车将进行轨道、接触网、轮轨动力学、车辆动态响应、转向架载荷等实时检测, 为高速铁路运营的安全性、平稳性、舒适性提供可靠保障。

列车最关键的牵引传动系统采用了中国南车株洲电力机车研究所有限公司完全自主知识产权的牵引变流器、网络控制系统、DC 110 V电源装置等核心部件。借助全新开发的大功率牵引变流器, 列车牵引总功率可达到22 800 kW, 是目前国内牵引功率最大的高速试验列车。(郗档兵)