

城轨地铁车辆辅助电源系统 研究与发展

赵清良, 刘 清, 曾明高

(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: 赵清良 (1965-), 男, 高级工程师, 现从事城轨牵引系统及辅助电源系统的研发工作。

摘 要: 介绍了城轨地铁车辆辅助电源系统的总体要求, 综合分析比较了电源系统的实现方案和电路形式, 阐述了系统形式的选择要点, 介绍了自主辅助电源系统的设计和应用情况及技术发展。

关键词: 地铁车辆; 辅助电源系统; 辅助电源; 充电机; 辅助逆变器

中图分类号: U239.5; U264.5*6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2012)01-0052-06

The Development and Research of Auxiliary Power Supply System of the Metro Vehicles

ZHAO Qing-liang, LIU Qing, ZENG Ming-gao

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

Abstract: General requirements of the auxiliary power supply system for urban rail trains were introduced. Scheme of the power system and circuits were described to analyze the system integration principle. Technic development and applications of the homemade auxiliary power system were presented.

Key words: metro vehicle; auxiliary power supply system; auxiliary power supply; charger; auxiliary inverter

0 引言

地铁车辆均以直流电网供电, 供电电压主要有 750 V 和 1 500 V 两种。辅助电源系统以辅助逆变器 (以下简称为 SIV)、充电机等为核心组成部件, 加上其他辅助设备构成。

辅助电源系统是车辆牵引控制系统的重要组成部分。SIV 为车辆客室空调机组及通风装置、空压机、电加热器、交流照明等交流负载提供三相与单相交流电源; 充电机为车载各系统控制电路、直流照明、电动车门及车载信号与通信设备提供直流电源并给蓄电池组充电。辅助电源系统工作的安全性、可靠性对车辆正常运营具有重要影响。在车辆设计的前期就需要对系统的构成、容量范围、功能与性能要求等进行计算、分析和对比, 选择合适的系统及设备、合适的参数来构成最优的辅助供电系统, 满足车辆运营要求、降低系统的全寿命周期成本。

1 系统总体要求

地铁车辆辅助电源系统通常需要满足如下基本要求。

1.1 输入供电

设置一条高压列车线为辅助电源系统专用, 通过辅助高压母线与所有车上的辅助电源输入端并行连接起来, 以避免输入接触网跳弓或通过第三轨断电区时辅助系统输入电压中断, 保证高可用性。同时, 用二极管与牵引供电线路隔开, 防止电流流向牵引设备。

辅助电源的直流输入电路应设置熔断器进行短路保护, 同时辅助高压母线也应设置母线熔断器进行短路保护。

辅助电源的输入供电能通过输入接触网或第三轨受流获得, 也可转换到车间电源取得。因此, 在每列车的头车需各设置一个车间电源插座。从安全上考虑, 车间电源电路与接触网或受流器电路应互锁, 两车间电源插座间也应相互联锁, 即当一个电源插座连接后, 其他插座失效。

收稿日期: 2011-11-24

1.2 辅助供电方式

每列车设2台或多台辅助逆变器、2组低压电源。辅助逆变器的输出为三相四线制, 低压电源包括DC 110 V充电机和DC 24 V电源。

辅助电源系统供电方式分为3种: 1个单元(一般2至3节车厢为1个单元)装载1台SIV的集中供电方式(见图1); 1列车装载多台SIV、输出交叉供电或扩展供电的分散供电方式(见图2); 多台SIV输出直接并联的并联供电方式(见图3)。

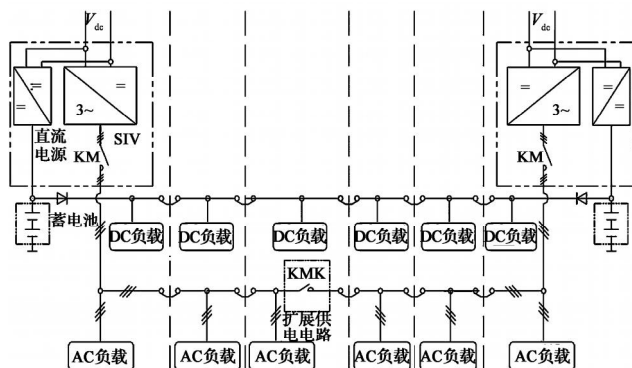


图1 集中供电方式

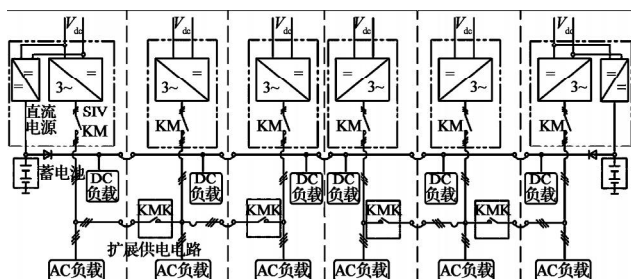


图2 分散供电方式

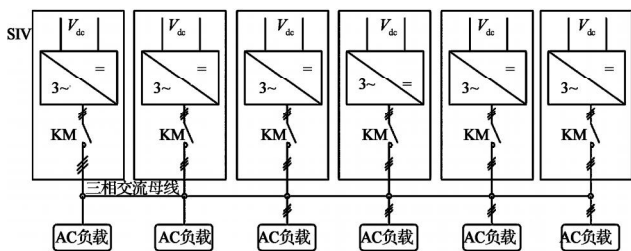


图3 并联供电方式

DC 110 V充电机仅给本单元蓄电池充电, 同时通过隔离二极管给列车DC 110 V母线供电。为满足蓄电池的限流充电要求, 充电机应具有二路输出, 一路到DC 110 V母线, 一路到蓄电池充电电路。

1.3 系统容量和输出能力

辅助电源系统容量应满足列车各种负载工况的辅助用电要求, 并应考虑有一定的冗余度。一般考虑设计容量不小于正常情况下总负载容量的140%左右的要求。

对采用集中供电方式或分散供电方式的辅助电源系统, SIV输出容量必须考虑在其中一台SIV故障的情况下, 正常SIV能够给全列车或该2台SIV所供负载的基本负载供电。基本负载是指车辆切除一半空调压缩机负载后的全部负载。

对采用并联供电方式的辅助电源系统, 必须考虑系统任1台SIV故障的情况下, SIV输出总容量能满足列车全部负载正常运行的要求, 系统任2台SIV故障的情况下, 仅需要切除部分负载。

1台直流电源(DC 110 V充电机和DC 24 V电源)的容量应满足全列车所有直流负载供电容量要求, 并能提供5%~10%的额外冗余。即在一台充电机或DC 24 V电源故障时, 由另一台正常工作的充电机或DC 24 V电源向全列车直流负载供电, 全部直流负载维持正常运行。

1.4 对输入电网和负载的适应性

辅助电源系统应适应宽范围输入工作电压, 输出电压和电流稳定, 不出现振荡。具体应满足以下基本要求:

①适应输入电压突变能力。辅助电源在输入电压突升或突降(DC 1 500 V电网为 ± 300 V/20 ms, DC 750 V电网为 ± 150 V/20 ms)时能正常工作, 以承受列车运行在电网分段区时或由牵引系统引起的输入电压突变。

②适应输入电压瞬时中断能力。辅助电源在列车因跳弓引起输入电压瞬时中断(10~20 ms)的情况下应能正常工作。

③额定输出能力。DC 1 500 V电网时, SIV能在DC 1 200~2 000 V间输出额定功率; DC 750 V电网时, SIV能在DC 600~900 V间输出额定功率。

④过载能力。系统应具有足够的过载能力, SIV能至少承受1.5倍并持续10 s时间的短时过载。

⑤负载突变能力。在正常条件下, 系统能无故障地承受负载的阶跃变化, 保护装置不动作。SIV应具备允许空压机、通风机、空调压缩机等负载直接启动和切除的能力, 其输出电压的瞬时值变化不超过+15%和-20%, 并且在300 ms时间内恢复稳定, 以满足SIV在带有部分负载的情况下, 空压机、空调压缩机等负载的频繁投切要求。

1.5 电磁兼容性

辅助电源系统本身能抵御外界电磁干扰。同时, 产生的电磁干扰应有效抑制, 不得对任何车载电子设备或轨旁设备产生干扰, 如信号系统、牵引和制动控制系统等, 也不应影响各种线路设施的正常工作。

1.6 安全环保

系统在高压输入端设置隔离接地开关。当辅助电源运行时, 隔离接地开关与输入进线相连, 当它检修时隔离接地开关与地相连。

辅助电源与高压输入断开后5 min之内, 电源内部滤波电容器两端电压应下降到DC 50 V以下。

系统输入与输出间应通过变压器隔离, 并且具有良好的接地, 以保证人身和负载设备的安全。

系统设备安装于车底, 应具备适应恶劣环境的工作能力, 其设备箱体必须具有IP54或以上的防护等级, 以满足列车在各种环境下正常运行的要求。

应尽可能降低辅助电源的运行噪声,以保证乘客乘车的舒适性。

1.7 应急启动

系统应具有应急启动功能,以便当车辆主蓄电池严重馈电(蓄电池电压低于正常要求值)时也能启动充电机。

应急启动功能有应急蓄电池和应急电源(DBPS)2种实现方式。

应急蓄电池方式:在辅助电源内备有应急110 V蓄电池(容量约5 A·h左右),充电机工作对应急蓄电池浮充电,当车辆主蓄电池严重馈电的情况下,只要向辅助电源提供高压输入电源,应急蓄电池向辅助电源内部控制电路和驱动电路提供约1~2 min的110 V控制电源,辅助电源启动,输出110 V向主蓄电池充电和向车辆110 V母线供电。

采用应急蓄电池方式时由于蓄电池一直处于浮充状态,蓄电池工作状态是否正常也没有监视,有可能在车辆真正需要应急蓄电池工作时蓄电池因故障或容量降低却不能正常启动辅助电源,因此对辅助电源进行维护保养时需要定期启动应急启动电路,增加了维护保养工作量。

DBPS方式:采用DC 1 500 V/DC 110 V或者DC 750 V/DC 110 V应急启动电源,应急启动电路如图4。DBPS主要技术参数如下:

输入电压	DC 1 500 V(DC 1 000~2 000 V) 或DC 750 V(DC 500~1 000 V)
输出电压	DC 100 (1±20%) V
容量	300~400 W

DBPS工作原理:向辅助电源提供高压输入电源后,DBPS先建立起DC 110 V输出给电源内部控制和驱动电路供电,辅助电源启动,输出DC 110 V给车辆110 V母线供电并给主蓄电池充电,母线电压正常后,断开K1,车辆控制电源由充电机供电。

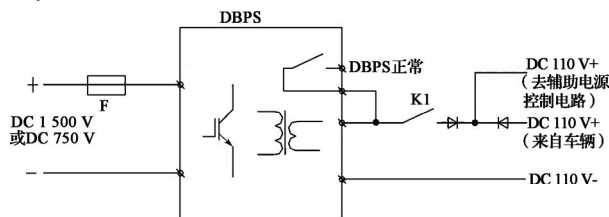


图4 DBPS 应急启动电路

与采用应急蓄电池方式相比,DBPS具有无需特别维护保养、工作状态有监视、使用寿命长的优势,因此建议系统设计时优先采用。

1.8 控制与保护

辅助电源应采用高性能微处理器进行控制和调节,以保证辅助电源良好的动态性能。

SIV采用输出闭环及高频控制,以保证输出电压谐波含量小、负载与输入电压突变时输出电压波动小,并降低系统噪声。充电机控制应符合蓄电池恒压、限

流充电要求的输出特性,具有温度补偿功能以有效延长蓄电池使用寿命。

辅助电源应具有完善的保护功能,并对保护进行分级,不论是在正常运行或是在启动时,均应能自动保护。大部分故障应能自动恢复,而无需人工干预,如果同类故障次数在一定时间内达到规定次数,电源被封锁,需要手动复位。故障有一个重复限制,为了避免故障扩大,控制单元将监视来自于司机室的复位信号,只允许从司机室进行3次手动复位。

辅助电源控制电路应具有自诊断及故障数据自动记录与储存功能。故障数据即储存的故障波形与故障代码识别数据,故障数据应通过符合国际标准的USB或以太网接口下载。用户使用安装在PC机上的地面故障处理软件(PTU)与辅助电源通信,进行在线状态监视和故障数据查询、统计、分析、打印、清除等操作,通过该标准接口还可更新控制软件。

辅助电源应具有网络控制和监视功能,以方便使用和维护。控制电路通过与车辆总线连接将故障信息及工作状态信息提交列车控制与诊断系统。

2 系统比较和选择

辅助电源系统设计的目标是在满足车辆辅助系统需要的前提下,提高系统的RAMS水平,达到更加人性化的设计、更优的可测试性以方便使用和维护,不断提高系统的自动化水平,并通过模块化、标准化、简统化设计来减少设备的初期采购成本和生命周期的维护维修,降低系统的全生命周期成本。对设备性能指标的选择应从辅助系统的角度来考虑。只有对辅助系统中包括SIV、直流电源、辅助设备在内的各部分的性能、功能、体积、重量、初期采购成本、后期维护成本等因素综合考虑、对比并加以选择,才能真正实现辅助电源系统的优化。

2.1 辅助供电方式

3种辅助供电方式的对比分析如表1。

表1 三种辅助供电方式的对比分析

比较项目	集中供电式	分散供电式	并联供电方式
容量(kVA) (根据列车编组及车型变化)	130~240	80~90	70~90
单台重量	重	轻	轻
单台尺寸	大	小	小
重量/列(按整列评价)	轻	重	重
布置尺寸/列(按整列评价)	小	大	大
每列安装作业量	小	大	大
每列检查作业量	小	大	大
每列维修保养费用	少	多	多
整列采购费用	低	高	高
整列供电冗余度	较差	较好	好
整列轴重均衡配置性	差	好	好
整列布置方便性	好	差	差
噪声	高	低	低

采用集中供电方式，集成了辅助逆变器和充电机，能减少列车布线及设备且易于布置。较分散式或并联式供电，全列车辅助电源设备总重量轻，有利于节能；全列车维修保养工作量及费用低，全寿命周期成本更低。因此集中供电方式辅助电源系统是现阶段地铁车辆的主流应用。

采用并联供电方式，逆变器的并联化运行，构成N+x 冗余辅助逆变电源供电系统，提高了辅助电源的可支配性、灵活性和冗余度，用户可以根据需要任意组合系统的功率，优化配置系统总容量；方便负载管理，因而系统具有高可用性。有利于逆变器产品标准化和规范化，这样可降低不同容量电源的设计成本和重复投资，并减少生产和维护费用。各逆变器输出并联于交流母线，相当于构成一个大容量的逆变电源，辅助电源系统抗负载突投冲击能力得到提高。因此，并联供电方式辅助逆变电源得到了越来越多地铁车辆用户的青睐。但是，并联供电方式辅助逆变电源供电系统也有缺点，如一次性采购成本增加(按整列评价)；增加维护保养工作量、检查作业量，从而带来维修保养费用的增加；全列车总重量增加；最重要的是母线短路、控制和保护的复杂性，完全受制于列车控制与诊断系统使得辅助供电系统存在崩溃的可能(此时列车需要救援)。因此，列车控制与诊断系统的可靠、控制与保护功能的完善是并联供电方式辅助逆变电源供电系统应用的关键。

采用分散供电方式，其中1 台逆变电源发生故障时，对负载的影响小，但全寿命周期成本、整列车总重量相对集中供电方式要高，所以优势不大。

2.2 蓄电池充电机

蓄电池充电机主电路形式主要有2种：DC/DC变换方式和AC/DC变换方式。DC/DC变换是将高压输入直接通过高频变换后输出DC 110 V电压；AC/DC变换方式再分为3种：第一种是将逆变器三相交流输出通过全波不可控整流后输出DC 110 V电压的不可控整流器，第二种是将逆变器三相交流输出通过可控整流后输出DC 110 V电压的相控整流器，第三种是将逆变器三相交流输出先经过整流再高频变换后输出DC 110 V电压的AC/DC高频变换器。以上几种电路形式的对比分析如表2。

从表2可以看出，AC/DC高频变换器方式具有输出性能好、体积小、重量轻、成本适中等优点，方便设计集成式辅助电源，因此对中小功率充电机是首选方案。而在需要大功率充电机的场合(如A型车或编组多的车辆)则建议选用DC/DC变换。

表2 蓄电池充电机主电路形式对比分析

对比项目	AC/DC 变换方式			DC/DC 变换方式
	不可控整流器	可控整流器	AC/DC 高频变换器	
冗余性	一台 SIV 故障时，AC/DC 的输入由另一台正常 SIV 的输出扩展供电得来。一台 AC/DC 故障时，另一台正常 AC/DC 供电全车直流负载			SIV 故障不影响 DC/DC 的正常工作。一台 DC/DC 故障时，另一台正常 DC/DC 供电全车直流负载
工作性能	输出不能自动调节，输出精度差，输出电压变化范围大，只能对蓄电池浮充电，整流变压器需要设置调节绕组来调整输出电压			输出性能好，充电参数可按蓄电池要求调节(如限流充电，温度补偿等)
功率元件	二极管	晶闸管	二极管 + IGBT	IGBT
隔离	工频变压器	工频变压器	高频变压器	高频变压器
适用容量范围	适用于小容量充电机	适用容量范围宽	适用于小容量到较大容量充电机	适用于大容量充电机
成本	低	较低	较低	由于有高压输入电路，成本高
对 SIV 输出谐波影响	小	大	较大	无
对 SIV 容量影响	由于输入为 SIV 输出，因此 SIV 输出容量必须加上 AC/DC 部分的容量			可降低 SIV 输出容量
体积	较小		小	有高压输入电路，体积大
重量	有工频整流变压器，较重		轻	重

3 系统设计、应用及发展

3.1 系统设计及应用

采用静止逆变器供电方式的辅助电源系统随国外进口地铁车辆于20世纪90年代进入国内。随着车辆向乘客服务项目的增多及为提高乘车舒适性而提高空调容量，车辆所要求的辅助电源系统容量也在增大，随着辅助电源产品的愈加成熟、可靠性的不断提高，车辆辅助电源系统的供电方式由最初普遍采用的分散供电到现在普遍采用的集中供电，因此所要求的辅助电源的容量由分散供电方式时的几十千伏安提高到集中供电方式时的一百多到二百多千伏安级。辅助电源的自主研究从与地铁用户合作进行备品备件的替换开发开始，到研制单一的辅助电源产品，再到辅助电源系统的系统设计、全系统产品、全系列产品研制，目前逐步形成了通用化、系列化产品，并实现了工程化、批量化(包括新造地铁车辆上)生产、试验、装车运行。下面以分散供电方式、集中供电方式电源系统为例对自主辅助电源系统的设计和应用进行介绍。

3.1.1 分散供电方式辅助电源系统介绍

对于6辆编组车辆(系统配置和负载分配见图2)系统全列车配置包括6台SIV,2台充电机和4台扩展供电装置。按照对A型地铁列车交流负载的粗略计算,辅助电源需向6辆编组的列车提供最大480~540 kVA的交流输出功率和25~30 kW的DC 110 V输出功率,因此每台SIV的容量80~90 kVA,每台充电机的容量30 kW。

1) SIV

SIV采用12脉冲IGBT变流技术,具有开关频率低(仅为150 Hz)、损耗低、电磁干扰低、噪声低、效率高、高质量AC输出电压等特点,其主电路原理电路如图5。SIV采用单边三分频控制方法,三相输出基波电压有效值闭环控制、恒频恒压控制。IGBT逆变器模块A1、A2的PWM控制信号错开一定角度及采用特殊连接方式的Dy和Dz型变压器以消除低次谐波,利用变压器漏感作为交流正弦滤波电感,简化了电路和设备布置。对该电路,将逆变器模块A1、A2改接成并联连接后则可用于输入电压DC 750 V系统的辅助逆变电源。

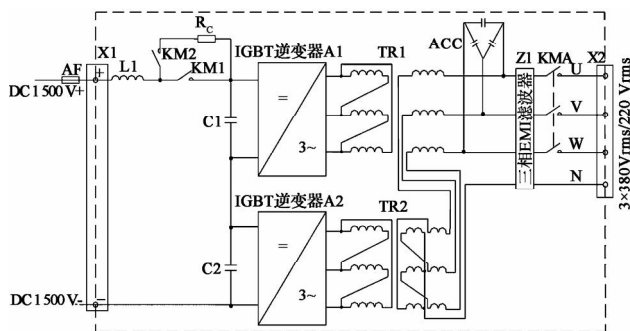


图5 SIV主电路原理图

SIV主要技术参数如下：

额定输入电压	DC 1 500 V
额定输出(三相)	380 (1±5%)或220 (1±5%)V, 80~90 kVA
总谐波畸变率(THD)	<5%
冷却方式	自然冷却
噪声	<70 dB(A)

此型SIV自2001年完成研制后,累计生产、装车超过650台,最长运行时间达9年,运行稳定可靠。该SIV也适用于早期采用辅助发电机作为AC辅助电源的地铁车辆上进行替换辅助发电机改造,如2002年开始向香港地铁供货469台,MTBF超过15万小时,2011年开始向澳大利亚墨尔本地铁进行辅助系统改造进行样机制造等。

2) 充电机

充电机采用DC/DC半桥式高频变换技术,其输出分2路分别连接到蓄电池组和DC 110 V母线,由2台充电机并联给列车DC 110 V负载供电,并对本车蓄电池组充电。充电机具有符合蓄电池恒压、限流充电要求的输出特性,并具有温度补偿功能;充电机内部提供DC 110 V应急电源,可应急启动充电机。充电机主电路

原理电路如图6。

充电机主要技术参数如下：

额定输入电压	DC 1 500 V
输出	DC 110 (1±1%) V, 25~30 kW
冷却方式	强迫通风冷却
噪声	<70 dB(A)

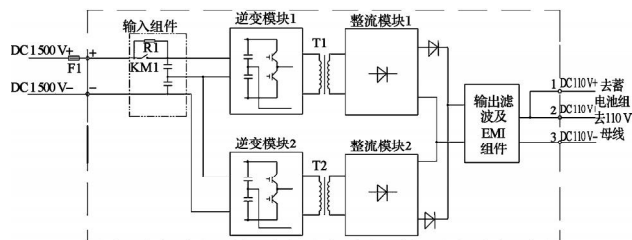


图6 充电机主电路原理图

3) 电源分配

电源分配通过扩展供电装置进行冗余,其扩展供电基本原则为：

扩展供电仅在单元车内进行,即在单元内的A、B、C 3节车辆之间进行。

扩展供电仅在两相邻车辆间进行。如单元内2台SIV同时故障,正常车辆与相邻故障车扩展供电,另一台故障车辆进行紧急通风。

扩展供电控制由网络实现,通过网络检测单元内各SIV的“故障”信号进行综合判断后向扩展供电装置发出扩展指令及空调减载指令,扩展供电装置反馈“扩展状态”到网络,故障SIV恢复后切除扩展指令及空调减载指令,系统恢复正常运行。

采用分散供电方式辅助电源系统已批量用于上海地铁1号线扩编改造、深圳地铁5号线及广州地铁1/2/8号线增购等项目上,其运行稳定可靠。

3.1.2 集中供电方式辅助电源系统介绍

对于6辆编组车辆(系统配置和负载分配见图1)系统全列车配置包括2台辅助电源(包括SIV、充电机和DC 24 V电源),1台扩展供电装置。按照对A型地铁列车交流负载的粗略计算,辅助电源需向6辆编组的列车提供最大480~540 kVA的总输出功率(其中包括25~30 kW的DC 110 V输出功率),因此每台SIV的总输出容量270 kVA(含30 kW的DC 110 V输出)。对B型车,辅助电源需向6辆编组的列车提供最大360~460 kVA的输出功率(其中包括18~25 kW的DC 110 V输出功率、1~2 kW的DC 24 V输出功率),因此每台SIV输出总容量180~230 kVA。

1) 辅助电源

集中供电方式辅助电源系统采用大功率辅助电源装置。该电源采用模块式设计,装置中集成了逆变器、DC 110 V充电机和24 V电源。

辅助电源主电路原理如图7,其中逆变电路采用二电平电压型IGBT逆变电路,具有电路简单、元件少、采用复合母排技术后省去吸收电路等特点。结合采用较

高频SPWM控制与快速、精确的32位DSP控制及输出闭环控制, 系统具有输出电压谐波含量小、负载与输入电压突变时, 输出电压波动小等优点。DC 110 V充电机电路采用三相整流和DC/DC半桥高频变换电路, 具有输出电压精度高, 可满足蓄电池组充电曲线所要求的恒压限流输出特性的特点, 即使逆变电路部分发生故障, 通过扩展电路将AC 380 V扩展后充电机电路也可正常工作。

大功率辅助电源采用了热管自然冷却和强迫通风冷却2种冷却方式, 其容量范围可覆盖现有6~8辆编组地铁车辆辅助系统供电的需要。由于自然冷却方式辅助电源没有冷却风机之类的旋转部件, 具有可靠性高、维护保养工作量小、噪声小、环保的优势, 但由于体积大、重量重、设备零散, 不利于车辆底部设备布置和车辆减重节能。现在部分用户和车辆制造厂越来越倾向于要求采用强迫通风冷却方式的辅助电源。

对于A型车或编组多的车辆所需要的辅助电源容量大, 一般采用强迫通风冷却方式的辅助电源。

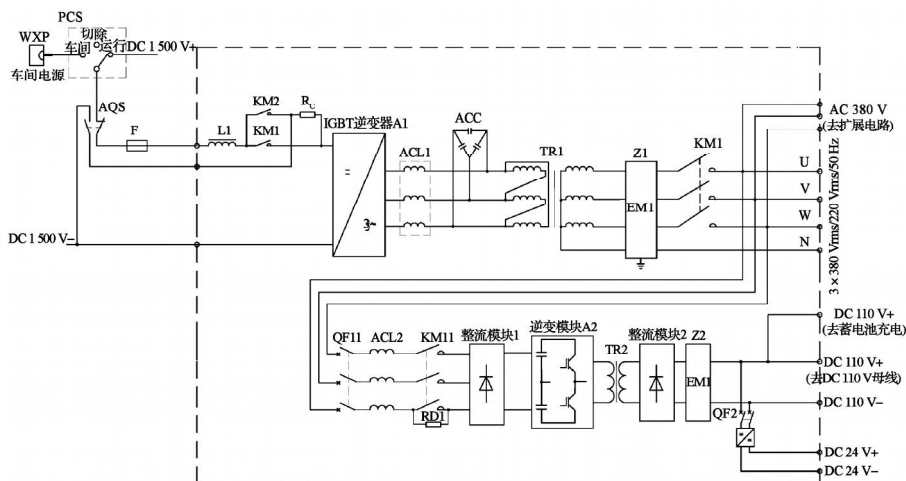


图7 辅助电源主电路原理图

DC 1 500 V辅助电源主要技术参数如下:

额定输入电压	DC 1 500 V或DC 750 V
AC输出(三相)	380(1±5%)V或220(1±5%)V, THD<5%
DC输出1	110(1±1%)V, 18~25 kW
DC输出2	24(1±3%)V, 1~2 kW
效率	>90%
总输出容量	180~270 kVA
噪声	<70 dB(A)(自冷) <75 dB(A)(强冷)

2) 电源分配

电源分配通过扩展供电装置进行冗余, 扩展供电在2台电源之间进行, 扩展供电控制由网络实现。

采用集中供电方式辅助电源系统已批量用于北京地铁房山线、重庆地铁6号线、沈阳地铁2号线、广州地铁5号线、昆明地铁等项目上, 运行稳定可靠。

3.2 技术发展

我国城轨地铁车辆牵引控制系统前十年均为国外几大公司产品, 近三年来自主研发系统才逐渐进入市场。辅助电源系统同样如此。自主辅助电源系统和产品从无到有, 几年中, 系统及产品保持了稳定运行状态, 满足商业运行的要求, 并不断得到了改进, 提高了可靠性, 也在新造地铁车辆上得到推广应用。

随着电力电子技术和控制技术的发展, 辅助电源系统的发展将以“高效、环保、节能”为目标。为了实现电源装置的高性能、低损耗、高效率, 减小体积和降低重量, 从而实现节能环保, 实现电源装置的高频化是其手段之一。电源装置的高频化不仅减小了功率变换器的体积, 增大了变换器的功率密度和性价比, 而且极大地提高了瞬时响应速度, 抑制了电源所产生的音频噪声, 从而成为新的发展趋势。软开关技术就是使功率变换器包括逆变器和直流电源装置得以高频化的重要技术之一, 它应用谐振的原理, 大幅减少开关功率器件开关损耗, 并降低由硬开关引起的EMI, 提高了系统的电磁兼容性。

逆变器的并联供电是近几年由工业电力系统向轨道交通包括城轨地铁延伸拓展的技术, 它提高了辅助电源的灵活性和冗余度及系统可用性、可靠性, 有利于降低整列车辅助电源系统的功率, 得到了较好的应用, 并有逐渐推广应用之势。而逆变器的并联控制技术, 则是交流电源系统从传统的集中供电方式向分布式供电发展过程中必须解决的关键技术, 包括集中控制、主从控制和无信号线独立控制都有应用, 但对城轨地铁, 无信号线独立控制方式则最合适、最优。目前, 自主研发采用无信号线独立控制方式的辅助并联供电系统已经过大量地面试验和验证, 各项技术指标和性能均达到预期目标。

4 结语

城轨地铁车辆自主辅助电源系统在我国经过多年的研究和考核应用, 技术模式与技术标准与国际接轨, 可靠性和性能不断提升, 已步入成熟应用阶段, 具有标准化、通用化的系列产品, 并实现了工程化、产业化。自主辅助电源系统的研究需要适应城轨地铁发展的需要, 不断提高其性能及可靠性, 为地铁用户提供更加高效、节能环保、高质的系统和产品。

参考文献:

- [1] 吴强. 机车辅助变流器的技术发展[J]. 机车电传动, 2002(3).
- [2] 郭晓燕. 铁道机车的辅助电源系统[J]. 机车电传动, 2008(4).