

地铁车辆辅助逆变器并联 供电模式分析

江 伟¹, 张薇琳¹, 王伟陈²

(1. 广东交通职业技术学院, 广东 广州 510650;
2. 广州市地下铁道总公司, 广东 广州 510310)



作者简介: 江 伟(1981-), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为交通信息工程及控制。

摘 要: 分析了辅助逆变器的中压供电模式、并联供电模式及各自的技术特点, 重点介绍了分散并联和集中并联 2 种并联供电方式的原理、并联过程及故障检测方法。综合来看, 并联供电控制难度大些, 而生产和维护难度则大大降低。

关键词: 地铁车辆; 辅助逆变器; 并联供电; 辅助系统

中图分类号: U231; U264.3⁺72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2015)06-0063-04

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2015.06.017

Analysis of Parallel Operation Power Supply for Metro Vehicle Auxiliary Inverter

JIANG Wei¹, ZHANG Weilin¹, WANG Weichen²

(1. Guangdong Communication Polytechnic, Guangzhou, Guangdong 510650, China;

2. Guangzhou Metro Corporation, Guangzhou, Guangdong 510310, China)

Abstract: Medium voltage power supply mode, paralalled operation power supply mode and their technical characteristics of auxiliary inverter were analyzed, focusing on the operation principle, parallel operation process and fault detection of concentrated and decentralized parallel operation power supply modes. On the whole, the control difficulty of parallel operation power supply is increased, but the operation and maintenance difficulty is reduced greatly.

Keywords: metro vehicle; auxiliary inverter; parallel operation power supply; auxiliary system

0 引言

辅助系统是地铁或轻轨车辆上的一个必不可少的电气部分, 可为列车空调、设备通风冷却、客室照明、电器电子装置、蓄电池充电等辅助设备提供供电电源^[1-2]。辅助系统包括辅助逆变器(SIV)、蓄电池(BAT)和低压电源(LVPS), 其中低压电源(LVPS)兼作蓄电池充电器^[3]。辅助逆变器(SIV)是地铁车辆辅助系统的核心设备。

辅助系统供电网络主要有中压供电和并联供电这 2 种模式。前者主要有交叉供电和分段供电 2 种方式, 后者主要有集中供电和分散供电 2 种方式。文献[3]对集中式供电和并联供电优缺点进行了综合分析, 指出集中式供电和并联供电尽管存在系统控制复杂、设备较多等不足, 但系统的总体可靠性、故障冗余能力和抗负载电流冲击能力依然值得肯定。文献[4]介绍了上海轨道交通 11 号线北段工程车辆辅助电源系统, 对该项目采用的中压

并联技术进行了分析, 由于供电母线贯通全列车, 当母线上某点出现短路, 则整个输出中断, 存在一定的隐患。文献[5]对辅助逆变器(SIV)的 3 种供电方式进行了描述分析, 重点对并联供电方式下的 SIV 控制方法进行了研究, 并进行了仿真验证, 通过下垂控制策略可以使多台 SIV 并联运行且有效达到功率均分。

并联供电方式是一种硬件结构简单的供电方式, 系统冗余性好, 是目前国内外的研究热点和发展方向之一。本文首先介绍中压供电和并联供电这 2 种模式的技术特点, 分析了目前主流的 SIV 并联供电技术, 给出了相应的并联过程控制策略及故障检测办法。

1 中压供电模式

1.1 交叉供电

交叉供电网络是中压供电系统中一种常用供电模式, 该模式一般由 2 台辅助逆变器和 2 条中压母线组成, 每台辅助逆变器独立连接在 1 条中压母线上, 即该中压母线上的负载供电全部依赖于该辅助逆变器, 如图 1 所示。

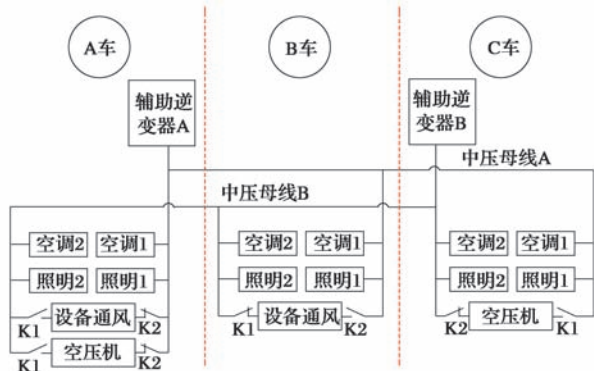


图1 交叉供电模式

这种供电模式单从连接和控制方式来看，都非常简便，无需列车控制系统（TCMS）配合便可独立完成各自区段的供电任务。然而这种供电模式在原有列车中的应用已不能完全满足现有的要求，当辅助逆变器出现故障时，相关供电区域的负载设备都将无法工作。尤其是空气压缩机的损失会对列车的可靠运行产生严重影响，空调系统的损失比率较高，乘坐舒适度也会下降。

1.2 分段供电

分段供电网络是中压供电系统中另一种常用供电模式。该模式一般由2台辅助逆变器、2条中压母线和1个中压母线接触器组成。每台辅助逆变器都连接在各自中压母线上。在正常模式下，中压母线接触器处于分断位，即2台辅助逆变器独立在各自供电区段中对负载进行供电。当任何一台辅助逆变器故障时，TCMS系统会驱动中压母线接触器闭合，使2条中压母线连通，同时配合TCMS系统对负载进行分配，剩余的辅助逆变器可对全列车范围内关键系统的负载进行供电，如图2所示。

这种供电模式其实是并联供电模式的反逻辑，平时各自独立供电，无需并联过程，控制简便。然而该供电模式在辅助逆变器发生故障时，负载受到的冲击较大，会经历一个非常规的启停过程，设备比较容易损坏。

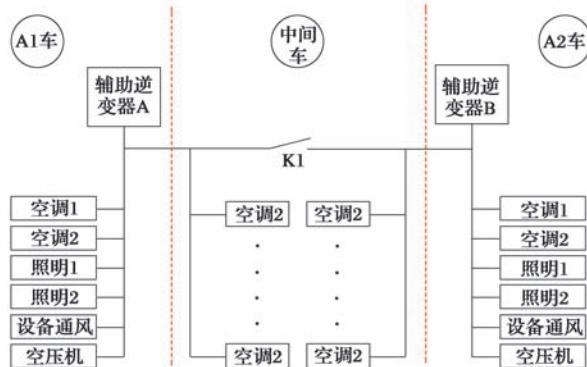


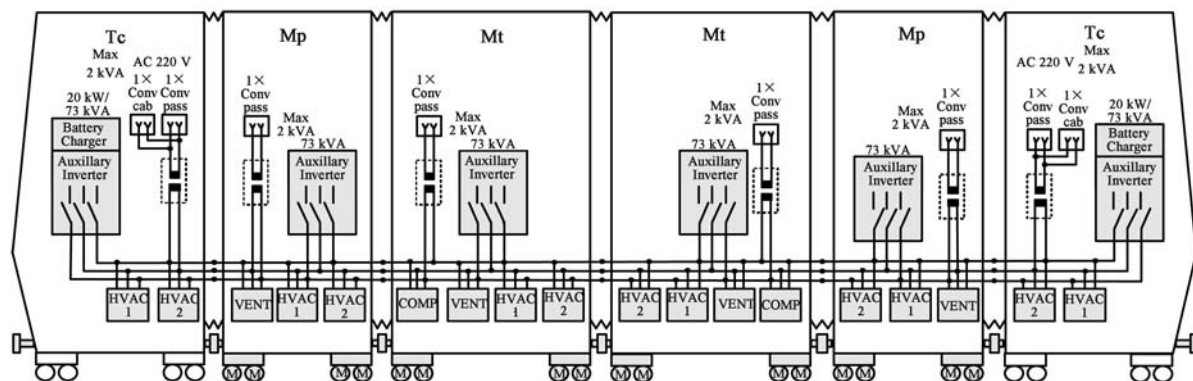
图2 分段供电模式

2 并联供电模式

与中压供电模式相比，并联供电技术的最大优势在于多台辅助逆变器采用 $N+1$ 冗余模式，当单个辅助逆变器故障时，仍可通过其余辅助逆变器的容量确保空调系统的完好运行，使乘坐舒适性得到进一步保证，提高了可用性。

2.1 分散并联供电

所有车配备1台辅助逆变器并连接在1条贯穿全车的中压母线上并列运行，以6节编组列车为例，共配备6台辅助逆变器。所有辅助逆变器的硬件配置及控制方式一致，启动顺序为“随机”，所有逆变器不分主从。出于多种考虑中压母线上没有配备接触器，即各个供电区间不能分开，永远并联在中压网络上。如图3所示。



Battery Charger—蓄电池充电机；Auxiliary Inverter—辅助逆变器；HVAC—空调系统；VENT—通风冷却（设备通风风机）；COMP—空气压缩机
Conv cab—司机室插座；Conv pass—客室插座；Tc—拖车（带司机室）；Mp—动车（带受电弓）；Mt—动车（不带受电弓）；M—牵引电机

图3 分散并联供电模式

德国西门子采用此种方案。在该方案中，所有辅助逆变器均为电压控制型，即通过输出电压传感器采集并联中压网络上的电压进行并联同步及反馈闭环控制，并且各个逆变器相互独立，不分主从。

2.1.1 并联过程

一旦满足启动条件，所有逆变器开始自检，自检通过后开始并联过程。如图4所示。

并联过程简单分为2种情况，逆变器检测中压母线是否存在电压，如无电压，则该逆变器立即合上输出接触器，决定中压网络电压情况；如有电压，则该逆变器立即通过检测母线情况进行内部同步，一旦达到并联条件立即合上输出接触器。逆变器的控制，包括同步控制、输出控制等都是独立由本机的控制单元SIBMON完成，各逆变器单元不需要进行信息交换。在这种控制方案下，

单一或多个逆变器故障脱离网络响应极快, 几乎不被察觉, 负载的限制由列车控制系统自动完成。

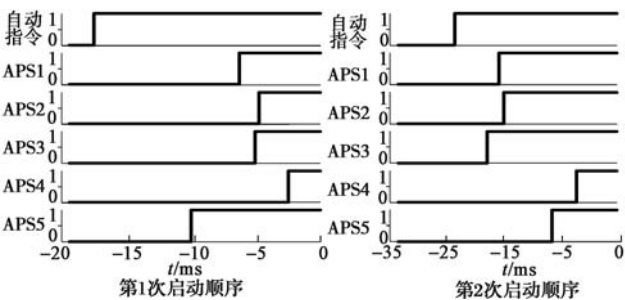
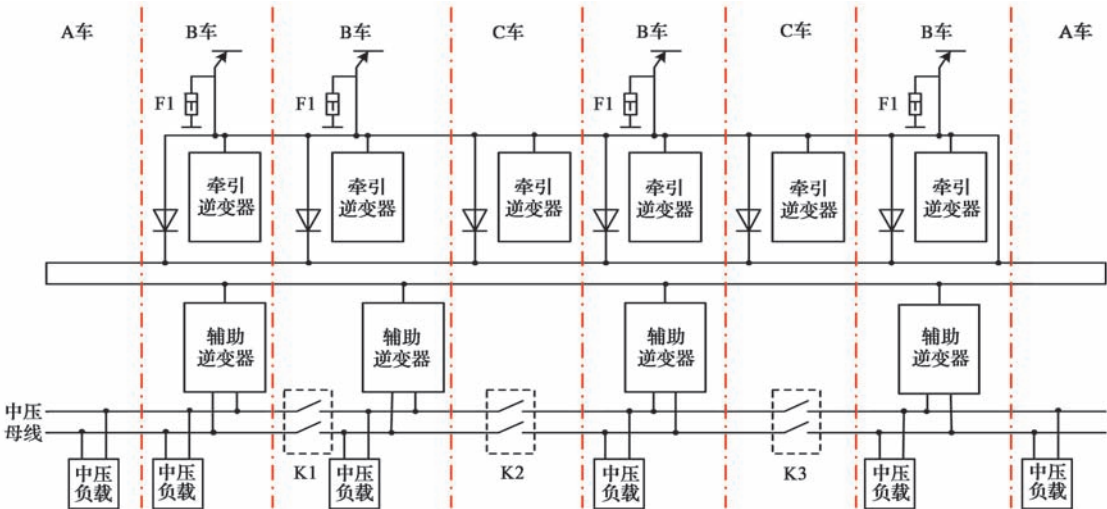


图 4 分散并联供电并联过程

从图 4 中可以看出辅助逆变器的启动顺序是随机的, 2 次启动的顺序不同。一旦启动指令给出后, 逆变器将随机启动。一般情况下, 第一个逆变器启动到所有启动完成的时间小于 10 s。

2.1.2 故障检测

辅助逆变器中包括了单相接地故障的检测, 在此情



F1—避雷器; K1, K2, K3—中压母线接触器

图 5 集中并联供电电模式

法国阿尔斯通采用此方案。在该方案中, 所有辅助逆变器均为电压控制型, 即通过输出电压传感器采集中压母线上的电压, 进行并联同步及反馈闭环控制。在最初启动阶段, 所有中压母线接触器都处于打开状态。每台辅助逆变器进行自检并启动, 同时三相输出接触器短暂闭合以检测自身供电区段是否存在短路情况, 但此时 TCMS 仍控制负载不启动。当辅助逆变器自检完成后将开始同步过程。

2.2.1 并联过程

所有逆变器自检通过后, 第 1 台辅助逆变器自动成为“主机”, 它的输出状况决定了中压母线网络的电压、相位与频率, 其余的 3 台辅助逆变器将进行同步跟随。

母线接触器的闭合过程遵循“从左至右”原则。主机 CVS1 三相输出后, 闭合母线接触器 1; CVS2 同步后三相输出, 闭合母线接触器 2; CVS3 同步后三相输出, 闭合母线接触器 3; CVS4 同步后三相输出, 实

况下故障信息将送到司机显示器; 如果系统中某个用电部件发生相间短路, 保护器件(微型断路器, 或熔断器, 或电机保护接触器)将切除该短路部件; 如果辅逆控制检测到一个辅助逆变器发生相间短路, 该受影响的辅助逆变器将通过其输出接触器从中压母线上被切除。

不过该方案有一个比较致命的缺陷, 就是缺乏中压母线接触器, 一旦中压母线发生短路故障, 整个中压供电系统就将瘫痪。这是现有“6 改 8”列车在设计阶段所忽略考虑的问题, 需在今后的项目中予以改进。

2.2 集中并联供电

多台辅助逆变器连接在一条贯穿全车的中压母线上并列运行, 所有辅助逆变器的硬件配置及控制方式基本一致, 仅在启动顺序上有所区别。正常状况下, 第 1 台辅助逆变器称为“主机”。以 8 节编组为例, 中压母线根据辅助逆变器的数量分成 4 个供电区间, 每 2 节车组成 1 个供电单元, 2 个供电区间之间使用中压母线接触器连接, 如图 5 所示。

现并联。整个并联过程历时约 8 s。并联实现后, 整个中压网络中的辅助逆变器地位同等, 如图 6 所示。

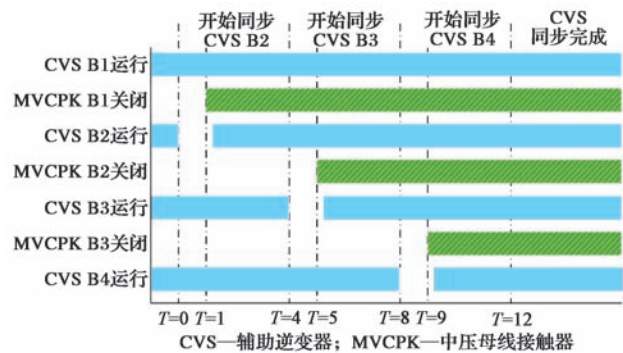


图 6 集中并联供电并联过程

2.2.2 故障检测

1) 辅助逆变器故障(并联前)

并联控制启动前, 每台辅助逆变器均有自检过程, 若在该阶段, 有辅助逆变器因故无法正常输出, 临近的辅助逆变器将自动接管故障辅助逆变器的供电区段,

TCMS 系统将自动闭合临近的中压母线接触器。

2) 辅助逆变器故障（并联完成后）

完成并联控制之后，每台辅助逆变器的电压传感器时时比较自身输出变量与中压母线网络中的相关参数，若在规定时间内检测到某个辅助逆变器的输出与中压母线的波形存在偏差，且超出允许范围，该辅助逆变器将自动关断三相输出接触器，使其从中压母线网络隔离。

原有的中压同步并不被打断，此时 TCMS 将根据剩余的辅助逆变器容量，启动允许的负载数量。由于中压负载中空调是头号耗电系统，所以当单个辅助逆变器发生故障时，TCMS 系统仅临时关断所有空调的压缩机，而空压机、照明、设备通风等仍可维持正常工作。以 8 节编组为例，当单个辅助逆变器故障时，仅关闭 1 台空调机组的压缩机；2 个故障时，全车进入半制冷状态；3 个故障时，全车进入正常通风状态。在任意情况下，只要有单个辅助逆变器保持正常工作，空压机、照明、设备通风等均可维持正常工作。

3) 中压母线短路（并联完成后）

若列车在运行过程中，中压母线发生局部短路，所有辅助逆变器将自动断开三相输出接触器，关断负载，同时 TCMS 也将接收来自辅助逆变器的过流反馈信号，断开中压母线接触器。之后，每个辅助逆变器独立对自身的供电区段进行自检，若在检测过程中，发现某个供电区段确实存在短路过流现象，则相应供电区段相邻的中压母线接触器将由 TCMS 保持断开状态，使短路区段从供电网络中隔离。其余供电网络仍可实现局部并联或分段供电。

3 3 种供电模式对比分析

3.1 交叉供电

交叉供电模式在 2 台辅助逆变器故障时，损失半组列车的所有中压负载，其中主要包括空调、空气压缩机和设备通风等，降级模式下工况相对比较恶劣，如表 1 所示。

表 1 交叉供电负载情况

负载	功耗/ kVA	数量			数量		
		A 车	B 车	C 车	C 车	B 车	A 车
照明	0.05	0	0	0	20	20	20
客室空调压缩机	21.50	0	0	0	2	2	2
客室空调风机	6.00	0	0	0	2	2	2
空气压缩机	9.60	0	0	0	1	0	0
设备通风	4.50	0	0	0	1	1	0
其他(插座等)	2.00	0	0	0	1	1	1
功耗汇总/kVA		0	0	0	72.1	62.5	58
总功耗/kVA		0			192.6		
辅助逆变器容量/kVA		0		0	130		130
辅助逆变器总容量/kVA		0			260		
辅助逆变器余量/kVA		0			67.4		

3.2 分段供电

分段供电模式在 2 台辅助逆变器故障时，损失 9

台空调机组，其他设备完好，降级模式下工况较之交叉供电有很大改善，如表 2 所示。

表 2 分段供电负载情况

负载	功耗/ kVA	数量			数量		
		A 车	B 车	C 车	C 车	B 车	A 车
照明	0.05	20	20	20	20	20	20
客室空调压缩机	21.50	0	0	0	0	1	2
客室空调风机	6.00	2	2	2	2	2	2
空气压缩机	9.60	0	0	1	1	0	0
设备通风	4.50	0	1	1	1	1	0
其他(插座等)	2.00	1	1	1	1	1	1
功耗汇总/kVA		15	19.5	29.1	29.1	41	58
总功耗/kVA		31.8		31.8	64.05		64.05
辅助逆变器容量/kVA		0		0	130		130
辅助逆变器总容量/kVA		130			130		
辅助逆变器余量/kVA		2.35			65.95		

3.3 并联供电

并联供电模式在 2 台辅助逆变器故障时，损失一半（6 台）的空调机组，其他设备完好，降级模式下工况较之分段供电有明显改善，如表 3 所示。

表 3 并联供电负载情况

负载	功耗/ kVA	数量			数量		
		A 车	B 车	C 车	C 车	B 车	A 车
照明	0.05	20	20	20	20	20	20
客室空调压缩机	21.50	1	1	1	1	1	1
客室空调风机	6.00	2	2	2	2	2	2
空气压缩机	9.60	0	0	1	1	0	0
设备通风	4.50	0	1	1	1	1	0
其他(插座等)	2.00	1	1	1	1	1	1
功耗汇总/kVA		36.5	41	50.6	50.6	41	36.5
总功耗/kVA		256.2					
辅助逆变器容量/kVA		0		0	130		130
辅助逆变器总容量/kVA		260					
辅助逆变器余量/kVA		3.8					

4 结语

并联供电由于引入了 TCMS 系统共同参与并联过程，从控制难度来讲，相对交叉供电和分段供电有不小的提升；在故障处理能力方面，由于并联供电和分段供电是组反逻辑关系，难度相当；而在生产和维护方面，并联供电模式的优势又有所体现，尤其和交叉供电相比，整整少了一根列车线，生产和维护难度大大降低。

参考文献:

[1]张立常,康鹏.城市轨道交通车辆电路分析与电气故障处理[M].北京:机械工业出版社,2012.

[2]王艳荣.城市轨道交通车辆电气检修[M].上海:上海科学技术出版社,2010.

[3]程永谊.城轨车辆辅助电源系统供电方式与电路拓扑结构分析[J].机车电传动,2012(2): 49-52.

[4]李耘芾.上海轨道交通 11 号线北段工程车辆辅助电源系统[J].机车电传动,2010(5): 57-61.

[5]朱恺.地铁辅助系统关键技术研究[D].北京:北京交通大学,2012.