

城市轨道交通车辆

上海地铁AC01型列车辅助电源的
IPM模块故障分析

刘耀东

(上海申通地铁集团有限公司 维护保障中心, 上海 200070)

摘 要: 论述了 IPM 模块及其驱动电路与故障监控的原理。基于 AC01 型地铁列车 IPM 及其驱动电路故障不断现象, 对其进行了统计与分析, 并采取了对策, 取得了相应的效果, 最后提出了几点建议。

关键词: 地铁车辆; 辅助电源; 智能 IPM 模块; 驱动电路; 故障监控

中图分类号: U231; U264.5*6

文献标识码: B

文章编号: 1000-128X(2011)01-0059-03

上海地铁 AC01/02 型列车从上线至今已运营 11 年, 采用 DC 1 500 V 供电制式, 受电弓受流, 其辅助电源系统采用 Adtranz 公司的 IPM 辅助逆变器和蓄电池充电器, 分散式供电, 每辆车配置 1 台。辅助电源是地铁列车上的关键电气部件, 其故障会直接影响空调、空压机、照明及直流负载的正常工作, 严重影响列车的正常运行。

1 辅助电源的工作原理

地铁列车拖车 (A 车) 上的辅助电源包含 1 个容量为 45 kVA 的辅助逆变器和 1 个容量为 22 kW 的蓄电池充电器, 其主电路原理如图 1、图 2 所示。而动车 (B 车/C 车) 上的辅助电源仅包含 1 个容量为 90 kVA 的辅助逆变器。

辅助电源主电路为模块化结构, 由不同功能的 A11~A15 模块构成:

A11、A12——高压半桥变换模块 (A12 带有预充电电路)。A11、A12 输入串联连接, 而输出并联连接。由电网输入的 DC 1 500 V 电压通过 A11、A12 变换得到 DC 300~540 V 电压。

A13 (A 车辅助电源)——降压斩波+全桥变换模块。A11、A12 输出的 DC 300~540 V 电压经降压斩波电路输出 DC 300 V, 再经全桥变换电路得到 DC 130 V 输出电压 (可根据需要调整), 给蓄电池充电和提供车辆控制电源。

A14 (B/C 车辅助电源)——升压斩波模块。将 A11、A12 输出的 DC 300~540 V 电压升压到稳定的 DC 650 V 电压。

A14 (A 车辅助电源)——升压斩波+三相四桥臂 PWM 逆变器模块。升压斩波电路将 A11、A12 模块输出的 DC 300~540 V 电压升压到稳定的 DC 650 V 电压, 三相四桥臂 PWM 逆变器将 DC 650 V 电压逆变为三相四线 380 V/220 V/50 Hz 交流电压。

A14 (B/C 车辅助电源)——三相 PWM 逆变器模块。将 A13 模块输出的 DC 650 V 电压逆变为三相四线 380 V/50 Hz 交流电压。

A15——电容滤波器模块。A14 模块输出的三相 380 V PWM 电压经由 A14 模块中的滤波电抗器与 A15 模块的滤波电容组成的 LC 滤波电路滤波得到接近正弦的低谐波含量三相交流输出。A 车辅助电源输出为三相四线 380 V/220 V/50 Hz 交流电压, 而 B/C 车辅助电源输出为三相 380 V/50 Hz 交流电压。

辅助电源的功率元件采用智能功率模块 IPM, 如 A 车辅助电源中的 A13.1、A14.1 2 种 IPM 模块, B/C 车辅助电源中的 A13.2 和 A14.2 2 种 IPM 模块。所使用的 IPM 规格有 300 A/1 200 V、600 A/1 200 V、75 A/1 200 V 及 400 A/600 V 等。

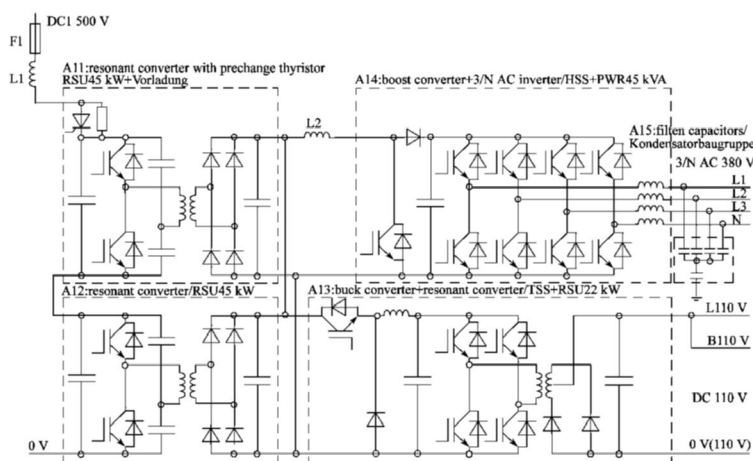


图 1 A 车辅助电源主电路图

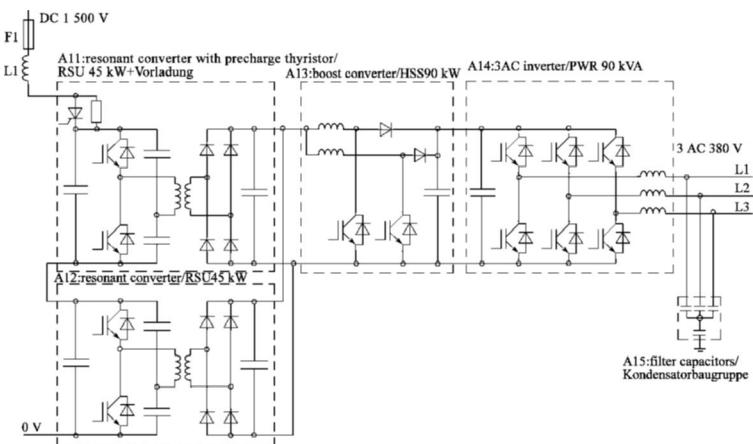


图 2 B/C 车辅助电源主电路图

自 AC01/02 型地铁列车投入运用以来, 辅助电源的 A14 模块中 IPM 故障比重较大。据统计 2004 年 6 月前占总故障的 48%, 2004 年 6 月-2006 年 1 月 (出质保期后) 为 70%, 2006 年 1 月-2007 年 7 月又升至 73%, 甚至在 2008 年

7月期间由于75A IPM故障导致A14.1模块无一备件。由于这些IPM驱动接口特别,与通用型IGBT模块不能兼容,其中有些规格型号已停产,导致辅助电源的IPM备件不能保证,严重影响列车的正常运行。

2 智能功率模块 IPM 及其驱动电路分析

2.1 智能功率模块 IPM

智能功率模块IPM是一种在IGBT器件基础上再集成了栅极驱动电路、故障检测电路和保护电路的电力电子模块,其有4种电路封装形式:一单元、二单元、六单元(三相)和七单元(三相+斩波环节)等,其中AC01/02型地铁列车的辅助电源上应用的是一单元和二单元形式的元件。

一单元IPM的基本结构如图3所示。由图3可见,在1个基本的IGBT器件上,其内部还集成了驱动(Drive)、欠电压(UV)、过流(OC)、短路(SC)和过热(OT)等故障检测保护电路以及1个对外输出信号为F0的故障输出电路。IPM电源为+15 V (V1),由于与门极靠得很近,就不需要负偏置电压;其驱动的控制信号为5 V的控制脉冲信号。IPM内部的故障保护电路环节都由相应的检测单元或传感器来实现多种保护功能,只要有1个故障保护环节检测到故障,对外输出1个故障保护信号(F0),通过封锁驱动信号关闭IPM。

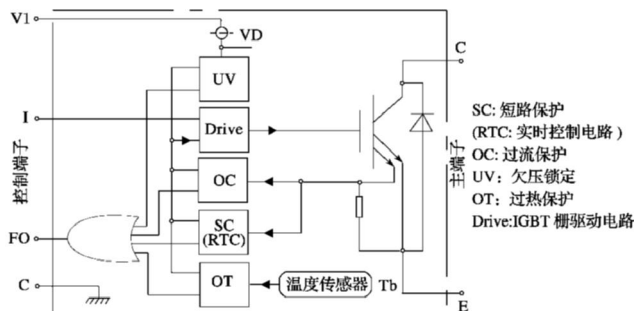


图3 一单元智能IPM基本结构框图

2.2 IPM 驱动电路

AC01/02型地铁列车的辅助电源中IPM外部驱动电路原理框图如图4所示(图4中为二单元IPM驱动电路),主要由3部分电路环节组成:

①+15 V控制电源V1通过由N1、V2及高频变压器T1构成的DC/DC变换器产生2路隔离的+15 V驱动电源。

②2路驱动信号分别通过光纤接收器U2、U4接收,将6 kHz的光脉冲转换为+5 V的6 kHz电脉冲信号,用来驱动IPM,低电位0为导通,高电位5 V为关断。

③2路故障输出信号F01、F02由电路中555集成芯片构成的多谐振荡器N21、N51产生占空比约0.7的(110±20) kHz脉冲电压,再通过光纤发射器U1、U3输出隔离的占空比约为0.3的脉冲信号。

2.3 IPM故障的故障代码

IPM正常工作时,检测故障环节通过光纤输出连

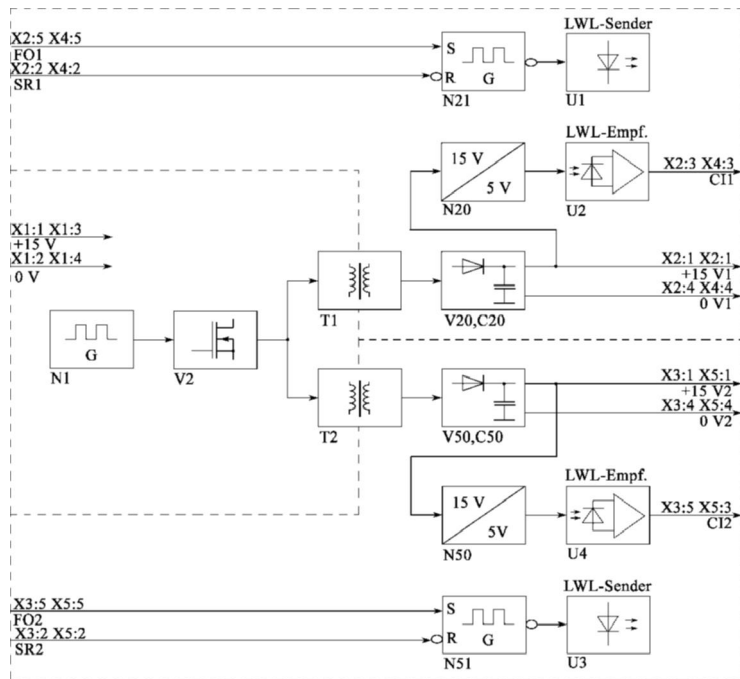


图4 IPM的外部驱动电路原理框图

续脉冲电压信号。IPM故障时,光纤发射器在故障期间不发光;若无IPM器件或无驱动电路板,光纤发射器常亮。

IPM驱动电路反馈输出的故障信号通过光纤传输到辅助电源的控制单元来处理,通过监控环节来给出其不同故障的相应的故障代码。对于IPM器件,所设计对应的故障代码有3类:①无IPM或无驱动电路(或无驱动信号,栅极驱动环节坏);②产生过流并发生了 n 次;③过热或欠压。如对A14.1逆变模块桥臂L1的V3管,对应的3类故障代码分别为E168、E169和E170,对辅助电源电路中的每一个IPM都对应有此3类故障代码。

IPM过流及短路保护的时序图如图5所示。如果流过IPM的电流超出过流保护限值(I_{OC})的时间大于 $t_{off(OC)}$ (典型值为10 μs),则IPM关断;如只是超过 I_{OC} 的时间小于 $t_{off(OC)}$ 的短脉冲电流,过流保护电路不会动作。当检测到过流时,IPM软关断,同时过流保护环节(OC)将输出1个故障信号,并在输出此故障信号后,控制电路就给出1个约1.8 ms的锁定时间(t_{hold})。在此时间内即使驱动信号输入,驱动环节(Drive)也不起作用,即IGBT

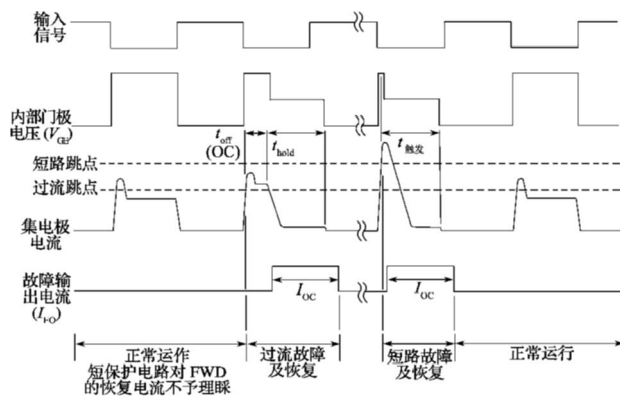


图5 过流及短路保护时序图

不会被触发，仍然关断。因此，过流监控的反馈信号中断时间设定为 $1\text{ ms} < t < 2\text{ ms}$ 。如果IPM发生短路故障，则短路保护(SC)环节起作用，在很短的时间($t < 1\text{ }\mu\text{s}$)内立刻响应，IPM软关断，输出1个短路故障保护信号；在此信号后同样存在约 1.8 ms 的锁定时间，如在 1.8 ms 后短路故障消失，IPM仍可恢复工作。

对于元件过热故障或者电源欠压故障，故障反馈信号中断时间定为 $t > 2\text{ ms}$ 。如过热保护，当温度超出规定限值，保护动作；当温度下降到恢复的下限值时又可恢复工作。

3 IPM故障分析及措施

对于AC01/02型地铁列车的辅助电源，每个IPM都有故障监控，并给出相应的故障代码。自列车投入运行以来，IPM的故障比率一直占有较大的比重，而且，在供应商提供的维修资料中，凡涉及IPM的故障，都要将IPM及其驱动电路板一起更换。2007年统计已更换200多个IPM及相应的驱动电路板，致使运营维护成本很高。

通过对实际故障的分析，提出采取以下相应的措施。

①电感器发热厉害与温升大，使IPM环境温度升高，逆变器也常报出IPM过热故障。通过对逆变器的散热通风分析后，根据冷却机理在电感器的风道中适当添置挡板，以增加紊流来改善冷却，经实测温升下降约 15°C 。

②在放置IPM的逆变器箱体内存加了小风机以冷却IPM及驱动与保护电路板，使其环境温度下降，在IPM元件周围贴温度测试纸显示不超过 60°C ，这些冷却措施很有效。

③当辅助逆变器的输出接有滤波器时，如A14.1的三相滤波器参数为电感 0.25 mH 、电容 $76\text{ }\mu\text{F}$ ，谐振频率约 1.15 kHz ，则逆变器的工作频率必须远小于谐振频率，而且开关脉冲频率要大于其好几倍。在运行过程中，滤波器通常发热厉害，时间久了性能下降使其谐振频率上升，通过仿真计算看出，当接近开关脉冲频率时会出现过流与过压，甚至烧毁IPM等，为此通过测试滤波器的参数观察其变化趋势来控制 and 避免IPM的损坏，这也是一个有效的措施。

虽然这些措施都较有效，但是在计算机所报的故障代码中，仍然常有过热故障代码显示。对照外方提供的手册与对该故障的分析看出，由于系统对过热故障是以故障反馈信号中断时间 $t > 2\text{ ms}$ 来报的，这样，由于其他原因，如运行中接插件接触不良等也可能引起误报故障。另外，由于开关频率高(6 kHz)，主模块损耗大，IPM模块内部发热也高，也可能引起故障。

通过分析看出，维护手册中说明的IPM故障代码及其故障含义往往与实际观察的分析不能完全对应。如反应的故障代码是IPM过热，但实际分析中并未过

热；如故障代码为IPM过流，实际分析与观察中，也并不是如此。此外，IPM对短路保护应很灵敏，而实际运用中发生了多次IPM烧毁或炸掉的故障。

对此，对运行中所暴露的故障进一步分析，有如下几点看法：

①在供应商给的监控资料中，未提及短路故障及其相应的故障代码，从上述分析中看出，短路故障也按过流故障流程来处理，这会存在以下问题：虽然在实施过流保护后有一个约 1.8 ms 的锁定时间，在此锁定时间后，故障仍未消失时又会在驱动信号作用下触发导通，于是再次发生短路，不断持续下去，对于开关频率为 6 kHz 的逆变器，在 1 s 内有可能发生几百次短路故障。对于短路故障虽能快速关断，但对器件有损害，在产品目录中规定承受最大不超过100次，因而发生器件烧毁是有可能的。但在供应商资料中未提及对此类故障采取的措施。

②每块IPM驱动电路板上都有7个连接器，包括3个电气连接器和4个光纤连接器。由于该电源投入使用时间长，维修时要经常拔插，有可能接触不良，加之列车一直在运行中，在运行时的冲击与振动下，这些接插件本身或寿命上的一些问题，也有可能引起IPM故障误报。

通过采取对接插件的更换与更新，对IPM及其驱动电路板的重新检查测试，以及对滤波电感参数测试等措施，这些都取得了较好的收效，降低了故障率。

4 结语

①AC01/02型地铁列车的辅助电源逆变器和充电器开关频率高，采用高频变压器隔离，性能好，重量轻，技术上较为先进。功率开关器件采用IPM，驱动及保护电路简单，但由于其故障保护灵敏，带来了鲁棒性不足，以致故障不断，运营维护成本高。

②辅助电源中所用IPM品种规格多，且是三菱独家生产，因而时常发生备品不能及时供应而影响运营。考虑到运营时间长后IPM备品的可采购性，要做好采用通用型IGBT替代的技术储备。

③对IPM驱动电路板及其他控制电路板要及时做好国产化的开发工作，一方面可降低成本，另一方面也保证供货源。

参考文献：

- [1] 陶生桂，杜红武，胡兵. 变流变频技术在电动车组中的应用[J]. 电机与控制应用，2006:3-8.
- [2] 陈国呈. PWM变频调速技术[M]. 北京：机械工业出版社，1998.
- [3] 陈国呈. PWM变频调速及软开关电力变换技术[M]. 北京：机械工业出版社，2001.
- [4] 王曰凡，陶生桂. 地铁1号线IGBT静止辅助逆变器研制[J]. 城市轨道交通研究，2000(2):16-19.