

SFM07型地铁电动列车牵引控制系统概述

李岳明¹ 张金刚¹ 任志刚² 刘尧¹

1. 北京市地铁运营有限公司地铁运营一分公司 北京 102200

2. 北京市地铁运营有限公司运营二分公司 北京 102200

摘要: 北京地铁八通线更新车辆所用的牵引系统为日本东洋电机公司产品, 牵引系统核心部件为控制牵引电机运动的VVVF装置。所更新车辆用VVVF逆变器装置采用矢量控制方式, 可以高速、高精度地控制电动机的输出力矩, 下面对该牵引系统原理做一定介绍。

关键词: 电动列车; 列车牵引系统; VVVF装置

Introduction to traction control system of SFM07 Metro electric train

Yueming Li¹, Jingang Zhang¹, Zhigang Ren², Yao Liu¹

1. Beijing Metro Operation Co., Ltd. metro operation No. 1 branch, Beijing, 102200

2. Beijing Metro Operation Co., Ltd. operation No. 2 branch, Beijing, 102200

Abstract: The traction system used by the updated vehicles of the Beijing Metro Batong Line is the product of Toyo Electric Co., LTD. The core component of the traction system is the VVVF device which controls the movement of the traction motor. The VVVF inverter device used in the updated vehicle adopts vector control mode, which can control the output torque of the motor with high speed and high precision. The principle of the traction system is introduced below.

Keywords: Electric train; Train traction system; VVVF device

一、牵引系统的组成及特征

电动列车的牵引系统主要由低压控制装置、逆变器单元、断路器单元、制动电阻器、滤波电抗器及母线断路器单元组成。低压控制器通过改变VVVF牵引逆变器三相IGBT晶体管的开度和开关速度, 从而达到低压控制高压、直流电压逆变成可变脉宽的交流电压的目的, 并通过改变电机电压和频率, 最终达到驱动鼠笼式三相异步电动机转速的目的; 逆变器单元由IGBT功率模块(PW-UT)、制动斩波器(BCH)、电压检测设备(DCPT-UT)、直流滤波电容器(FC)、电流检测单元(CT-UT)、控制放大器(AMP-UT)、数字接口组件(IF-UT)和开关组件(SW-UT)等组成; 断路器单元由高速度断路器(HB)、线路接触器(L1、L2)、充电电阻(CGR)和放电电阻(DCGR)等组成。母线断路器单元由母线高速度断路器(BHB)、母线单位开关(BLB1、BLB2)等组成。

二、主电路工作原理

每辆动车配备一个牵引控制单元; 一个牵引控制单

元控制两个IGBT逆变器单元, 每个逆变器单元分别驱动两台电机(1C4M)。牵引时电网通过受流器、主隔离开关MS、主熔断器MF、高速断路器HB、线路接触器(L1、L2)及VVVF逆变器装置给牵引电机供电。再生制动时以相反的路径吸收能量, 另外电阻制动时本车的制动电阻(BR1、BR2)将反馈的能量消耗掉。主要部件如下:

2.1 主隔离开关

由主电路的闭合、分断开关(MS)和滤波电容器(FC)的电荷放电开关(MDS)组成。

2.2 滤波电抗器(FL)

用于控制电网线路的电流脉动, 并限制特定频率的电流。

2.3 滤波电容器(FC)

用于稳定电网直流电压, 储存电能并滤除一定频率的谐波电流。

2.4 线路接触器(L1)与充电电阻(CGR)

线路接触器(L1)与电阻(CGR)构成充电限流环

节。在主线路通过受流器受流, 高速度断路器(HB)闭合后, 为防止过大的充电电流冲击使滤波电容器受损, 线路接触器L1起先保持断开状态, 待电容电压达到一定值后闭合L1, 将限流电阻CGR短接。

2.5 逆变器装置

SIU、V、W和S2U、V、W构成逆变器的主要结构, 每一桥臂上的组件由IGBT(绝缘栅双极型晶体管)和与其反并联的大功率二极管组成。列车在牵引工况下, 该装置将线路直流电能变换为电压和频率可调的交流电能供给牵引电机; 电制动工况下, 该装置以整流方式将牵引电机电能反馈给电网(再生制动)或消耗在电阻上(电阻制动)。

2.6 制动斩波器(BCH)、制动电阻(BR1、BR2)

再生制动工况下, 如果直流线路电压超过系统设定值, 制动斩波器触发导通, 一部分再生电能通过制动电阻消耗掉了, 这样就抑制了线路电压的上升。其它情况下, 线路内的直流电压如有异常上升, 制动斩波器也能被触发。

2.7 CTL、CTU~W 主线路及电机电流传感器

2.8 DCPT1~2 主线路电压传感器

三、VVVF 逆变器控制原理

牵引系统所用VVVF逆变器主要用于直流电能变换为交流电能, 驱动交流异步电动机转动并对其实施调速控制。下面简单介绍VVVF逆变器的功能及原理。

3.1 直流电-交流电的转换控制

逆变器的3相IGBT按照一定顺序进行导通和关断, 可将逆变器输入的直流电变换为交流电。任一瞬间, 每一相总有一个元件导电, 元件按一定的顺序轮流导通, 即逆变器输出端U、V、W形成相位差 120° 的三相交变电压; 任一相上、下两组元件在同一瞬间只允许有一个元件导通; 电流从正(负)组元件转换到负(正)组元件, 遵照“先关断、后导通”的原则, 而且必须在“关”与“开”之间留有一定的时间间隔, 以免形成直流电源的贯通短路。

3.2 电机转向控制

VVVF装置通过控制IGBT的导通顺序来改变逆变器的输出相序, 从而控制电机改变转动的方向。

3.3 牵引—再生制动模式的转换控制

根据电机的转矩 $T=K(V/F_i)^2F_s$, VVVF装置通过控制转差率 F_s 实现牵引和再生制动工况的转换——即控制逆变器输出频率, 当电机定子旋转磁场的转速大于电机转子的转速, 转差率 $F_s > 0$, 则列车处于牵引工况; 当电机定子旋转磁场的转速小于电机转子的转速时, 转差率 $F_s < 0$, 则列车处于再生制动工况。

3.4 电压和频率的控制

本逆变器装置对输出电压和频率的控制使用的是矢

量控制方式, 同一相的工作半周内, 正组(或负组)元件以一定规律多次开通和关断, 使得半周内该相输出电压波形变为许多矩形波, 这些矩形波幅值相同, 宽度不等(中间部分较宽, 越向两侧越窄)。半个周期内, 电压脉冲宽度越宽, 则脉冲序列等效的正弦电压幅值就越大, 反之亦然; 通过改变产生脉冲序列的调制波频率即可改变逆变器输出电压的频率。

3.5 逆变器的频率控制模式

3.5.1 脉冲波形

地铁车辆用的逆变器控制装置中, 线电压波形的半周期内根据脉冲数的多少来表示调制的状态。例如, 脉冲数为9时, 就称为[脉冲波形9]。脉冲数越多, 则输出波形越好, 越能根据电压波形进行精密控制; 但另一方面, 脉冲数越多会导致主线路开关元件的开关频率越高, 逆变器的动作任务会越繁重。逆变器开关元件的开关频率为 f_{ch} 、逆变器输出频率为 f_i , 则脉冲波形数 N 与 f_{ch} 、 f_i 有如下关系: $f_{ch}=N \times f_i$

提高 f_{ch} 会带来半导体开关的转换性能负担和线路损失的增加, 并且控制速度受到控制性能的限制。因此提高 f_i , 则有必要减小 N 。当控制同一个脉冲波形的逆变器输出电压时, 需要对(波形)脉冲宽度进行增减, 即对载波上的调制波的幅值进行增减, 从而实现逆变器输出电压的控制。

3.5.2 同步调制方式和异步调制方式

如果功率电子元件(IGBT)的开关频率为逆变器输出频率的整数倍数, 使其与逆变器输出频率共同变化, 即为[同步调制方式]; 如果开关频率与逆变器输出频率不为整数倍, 并将开关频率设定为一定的数值, 即为[异步调制方式]。同步调制时, 在某一个工作频率范围内, 每半周期中脉冲波形数 N 是一定的。工作频率越高, 则高一级的频率范围内脉冲波形数就会减少, 在方波阶段, 开关频率与工作频率相同, 但是脉冲波形的转换是非连续的, 会产生各种频次谐波。因此采用同步调制方式时, 波形对称性好, 但输出频率低时, 谐波频率随之降低, 输出波形特性变差, 易与谐波叠加产生畸变, 影响后续控制器的逻辑运算; 异步调制时, 载波和调制波的频率是有一定的数值的, 而且与连续变化的逆变器输出频率是没有关系的。异步调制简单易实现, 但其输出波形对称性差, 尤其在逆变器输出频率高时, 每周期输出脉冲数小, 输出特性差。因此电机正常运行通常采用同步调制方式; 电机在启动时, 速度较低, 为了实现控制的简便化, 通常采用非同步方式。

3.5.3 电动机的转矩控制方法

SFM-07型列车的VVVF装置通过使用反馈线路来控制转矩,本牵引控制系统根据逆变器的输出电流(电动机电流)来计算转矩并对其进行控制;矢量控制方面,VVVF装置将电动机电流分为转矩分电流、励磁分电流分别进行控制,并对转矩分电流采用高速控制,从而实现高速、高精度的转矩控制。

3.6空转和滑行的检测与保护

VVVF牵引控制系统能快速、有效可靠地抑制列车的空转/滑行,充分利用轮轨粘着条件,尽快恢复轮轨间的再粘着,具有空转、滑行保护功能。下面简单介绍一下控制方法。

(1)检测空转/滑行是以检测到的电机速度的微分值来实现的。

(2)检测到列车发生空转/滑行后,在较短的时间内即可降低牵引力/制动力,待轮轨粘着恢复后,再快速将牵引力/制动力恢复到原先的80%左右,保持一段时间,再慢慢恢复到原先牵引力/制动力的状态。

(3)此过程中若又发生新的空转或滑行,则采取同样的措施,使粘着恢复。

3.7电制动与空气制动配合控制

VVVF牵引系统控制的电制动(含再生和电阻制动)与空气制动采取混合运算的控制方式,按列车制动力的要求,优先发挥电制动力的功效,当电制动力不足或失效时,由空气制动补足或替代。电制动与空气制动协调配合、平滑转换。

四、VVVF控制系统对列车牵引和制动工况控制的不同阶段

列车的牵引控制系统对列车的控制分为以下几个阶段,下面予以简单说明。

4.1牵引工况

(1)恒力矩区,在此区域,电机磁通和电机电流恒定,而电机力矩正比于磁通与电流的乘积,因此电机力矩恒定。

(2)恒功率区,在此区域,电机电压和电机电流保持恒定,处于恒功率运行状态,这时牵引力随着速度上升而反比下降。

(3)自然特性区,在此区域,电机电压恒定,随着速度上升,电机电流呈反比下降,牵引力随速度的上升呈平方关系反比下降。

4.2制动工况

(1)恒电压、恒转差率区,在此区域,电机电压保持最大值,转差频率保持负的最大值。电机电流随着速度下降呈反比上升,制动力与速度呈平方关系上升。

(2)恒电压、恒力矩区,在此区域,电机电压保持恒定的最大值,电机电流随速度呈正比下降,制动力保持恒定。

(3)恒力矩、恒磁通区,在此区域,转差率保持恒定,则电机电流恒定。逆变器控制电机电压随频率成正比下降,以保持电机的磁通恒定,因此制动力保持恒定。

五、VVVF牵引控制系统的监控功能

5.1系统状态监视和故障记录功能

本地铁列车牵引控制系统具有完善的状态监视和故障记录功能,其中控制单元故障代码化,可以对故障前1秒到故障后0.5秒的数据每10毫秒记录一次,故障数据包括故障点数据和历史数据。另外系统能够根据监测到的故障信息指导司机进行操作和查找。为方便日常维护,相应牵引逆变器内有相应维护用接口,可通过便携式测试单元访问该接口,并可完成如下功能:

(1)读取牵引控制单元故障信息;

(2)动态监测牵引系统的各种实时信息(如网压、电机电流、逆变器模块温度等)。

牵引控制单元印制面板内设置LED指示灯和测试孔,指示一定的牵引控制信息,如牵引控制单元开机自检信息、电源指示等,以方便维修人员对牵引控制单元状态和故障做出判断和测量。

5.2系统保护功能

牵引控制系统具有完备的保护功能,例如系统有主电路电流过大(HBT_F),主电动机电流过大(MMOC_D),F/R同时(FR-F),P/B同时(PB-F),逆变器设备过热(THD2_F),三轨停电(NVD_F),大空转(BSLP_F),大滑行(BSLB_F),制动电阻超负荷(BROH-F),控制电压低(D10ok_F),FC电压低(LVD_F),微机处理器异常(WD_F)等保护项目,一旦某些监测点的数据出现异常,系统可及时采取保护措施,避免部件受到损坏。同时通过监视网络系统将具体故障信息传送到司机室列车监视控制系统显示器进行显示报警。

六、结语

以上简单介绍了地铁八通线SFM-07型电动列车的VVVF牵引控制系统,该牵引控制系统具有如下特点:1、大幅降低电机保养,延长车辆的大修周期;2、控制机构简便,降低保养程度;3、再生制动的速度范围大,节省电能。

参考文献:

[1]高爽.地铁车辆构造与维修管理.中国铁道出版社.2003年.

[2]电气工程师手册第二版.机械工业出版社.2004年.