

地铁车辆牵引系统电机过压及过流故障的原因分析及改进措施

侯向阳 许镇宇

(西安市轨道交通集团有限公司运营分公司, 710016, 西安//第一作者, 工程师)

摘要 介绍了西安地铁 3 号线牵引系统过压过流判定逻辑,通过对列车监控系统数据分析,得出列车正线运营时牵引系统检测空转滑行,导致电机相电流过流及直流滤波电压过压,引起牵引系统短暂的保护状态,并断开高速断路器。重点对牵引系统控制策略及空转滑行控制策略进行详细描述,并提出了优化改进措施。

关键词 列车监控系统; 高速断路器; 空转滑行; 牵引电机; 控制策略

中图分类号 TM307⁺.1; U264.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.04.037

Cause Analysis and Improvement Measures of Metro Vehicle Traction System Motor Overvoltage and Overcurrent

HOU Xiangyang, XU Zhenyu

Abstract The judgement logic of Xi'an Metro Line 3 traction system overvoltage and overcurrent is introduced. By analyzing data of TCMS (train control and management system), it is concluded that the traction system detects coasting when the train is operating on the main line, which leads to motor phase current overcurrent and DC filter voltage overvoltage, triggering temporary protection state of traction system, and tripping off high-speed circuit breaker. The detailed description of the traction system control strategy and coasting control strategy are expounded, and optimization and improvement measures are proposed.

Key words TCMS (train control and monitoring system); high-speed circuit breaker; coasting; traction motor; control strategy

Author's address Operation Branch, Xi'an Rail Transit Group Co., Ltd., 710016, Xi'an, China

西安地铁 3 号线自开通以来,运营中偶发牵引系统高速断路器闪断问题。根据列车监控系统记录,牵引系统出现电机相电流过高或超高、直流滤波电压过压或超压,并报警 TCU(牵引控制单元)中

等故障或 TCU 严重故障。经分析,当列车空转滑行程度严重时,逆变器将进行空转滑行校准,从而导致牵引逆变器磁场瞬时变化过大,磁场控制失稳,进而报电机相电流过高故障。故障发生后,牵引系统会激发短暂的保护,随后自动复位。牵引系统的滑行保护机制虽不影响运营,但故障的频繁发生会对牵引电机及逆变器内部电子元件的使用寿命有很大影响。因此,优化软件设计防止高速断路器频繁闪断,具有非常重要的意义。

1 故障原因分析

1.1 牵引系统的故障上报逻辑

电机相电流过流:当电机相电流传感器检测电流超过 2 000 A 时,记录电机相电流过高,报中等故障,禁止牵引逆变器动作;当检测电机相电流超过 2 400 A 时,报严重故障,断开高速断路器,并于电流小于 1 500 A 时复位。

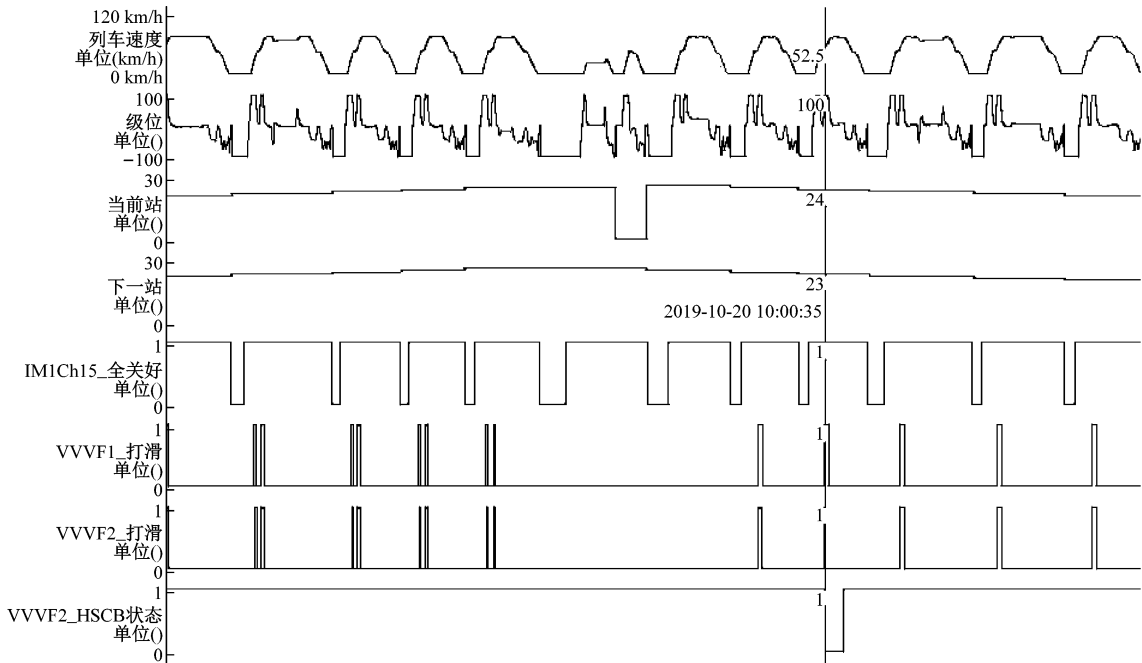
直流滤波电压过压:当滤波电压传感器检测到滤波电压超过 2 100 V 时,记录直流滤波电压过压,报中等故障,禁止牵引逆变器动作;当检测滤波电压超过 2 200 V 时,报严重故障,断开高速断路器,并于电压小于 1 800 V 时复位。

当牵引系统进行空转滑行校准时,会偶尔报出牵引系统发生电机相电流高和滤波电压高故障,此时牵引逆变器会抑制工作 200 ms。当牵引逆变器抑制工作后,电压和电流会在 200 ms 内恢复到正常值,牵引逆变器会在 500 ms 后恢复正常工作。当报出牵引系统发生电机相电流超高和滤波电压超高故障时,牵引逆变器会断开高速断路器,此时高速断路器重新闭合需要 30 s 时间。经分析,在列车空转或滑行过程中,牵引逆变器的磁场瞬时变化过大,牵引逆变器磁场控制失稳,进而导致了滤波电压高或者电机相电流高故障的发生。

1.2 高速断路器闪断问题的数据调查

从列车运行记录(如图 1 所示)可以看出:列车在正线运行过程中,牵引逆变器时常检测到列车的空转滑行。图 1 中 VVVF2-HSCB(变压变频电源 2-

高速断路器)的数据记录显示,HSCB 偶发断开 30 s。同时,列车监控系统记录牵引系统“电机相电流超高”、“直流线路电压超压”及“TCU 严重故障”等故障信息。



注:VVVF1 及 VVVF2 分别为变压变频电源 1 及变压变频电源 2;HSCB 为高速断路器。

图 1 列车运行记录截图

Fig. 1 Train traveling record

1.3 牵引系统的控制策略

1.3.1 逆变器功率电路概述

牵引逆变功率模块为牵引电机提供 VVVF(变压变频)电源,是电压源型逆变器(如图 2 所示),以 PWM(脉宽调制)模式运行。PWM 技术控制给牵引电机提供 3 相平衡的电压,并能方便地改变加在电机上的基波电压幅度和频率。通过开关大功率电子器件,+HV 或 -HV(DC 1500 V 的输入或输出端)交替地施加到星型连接的电机,以得到对称交变的波形。

逆变器的输出电流由 A-CMDR(R 相电流传感器)和 A-CMDS(S 相电流传感器)监测,直流输入电压由有源型电压传感器(A-FVMD)监测。所有的电流传感器和电压传感器都提供了功率电路到控制单元的光耦隔离。牵引系统使用的矢量控制技术,可减少响应时间,优化转矩调整的精度,改善了低速性能。矢量控制技术能提供非常迅速的磁通响应和力矩响应(磁通的建立时长 < 1 s),可优化电机电流控制效率。

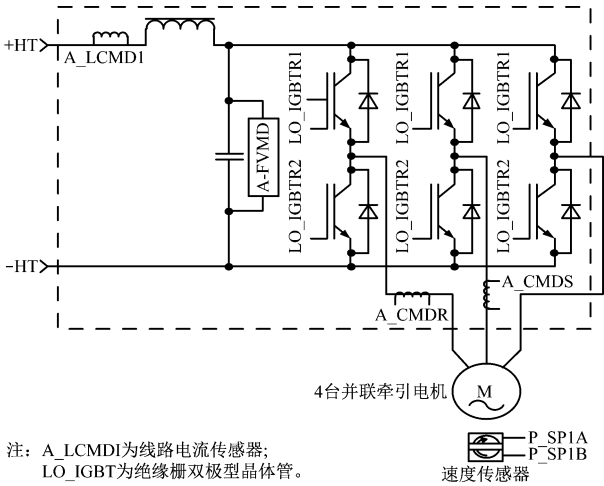


图 2 牵引逆变器

Fig. 2 Traction inverter

1 台牵引逆变器配置 1 个双通道的速度传感器,用于控制 4 台并联的牵引电机。速度传感器具有 2 个通道,以保证冗余度。当 1 个通道发生故障,另 1 个通道仍可提供速度信息。速度传感器信号仅在列车低速运行、磁通建立阶段,以及列车空转或

轮滑控制时使用。

1.3.2 详细的控制策略

1) 低速区控制策略:在转子频率低于 5 Hz 时,通过速度传感器的速度信息来计算电机内的磁通,以确保电机转矩的高精度控制。

2) 恒转矩阶段控制(矢量控制)策略:电机磁通是基于对电机端子电压的积分来计算的。该电压应具有正确的变化频率,故使用速度传感器来确定施加于电机上的电压变化频率。这样可减少电机建立励磁的时间。在恒转矩阶段,磁通量恒定,电机电压和速度同比增加(磁通量恒定,故转矩恒定),故可通过控制定子电压的幅值和频率来实现恒转矩。

3) 恒功率阶段控制(标量控制)策略:与恒转矩阶段控制时的励磁建立类似,恒功率阶段仍使用速度传感器来确定电机上的电压变化频率。在恒功率阶段,对电机两端加最大电压,并通过控制定子电压的频率来实现恒功率。

4) 空转或滑行控制策略:在列车空转或滑行时使用速度传感器,将 4 个牵引电机并行连接,则 1 个电机的空转或打滑将会引起其他电机的空转或打滑。这是因为如果 1 个电机空转或滑行,则此电机承受的力就会迅速降得很低,此时其他电机受力会迅速增大,一旦超出其黏着力则电机就会趋向空转或打滑。由于平衡时 4 个电机同速转动,所以仅需通过监测 1 个电机的速度来校正空转或打滑。

1.4 相电流过流的分析

当牵引系统检测到车辆空转或滑行时,将对牵引力、电制动力进行控制,并通过检测车辆的加速度及加速度变化率来判定车辆是否处于空转滑行状态。如判断列车已进入空转、滑行状态,则牵引系统进入调解过程,主要调整牵引或电制动的下降曲线斜率、牵引力或电制动力恢复曲线斜率。

目前,相电流过流问题主要产生在第 1 次空转或滑行的回复阶段中;在严重滑行情况下,如牵引、电制动力恢复效果不佳,则会产生 2 次滑行,甚至产生多次滑行。在严重滑行时,由于车控模式下每个轮对的滑行程度不完全一样,故即使有速度传感器,4 台电机的磁场也不能完全耦合在一起。在多次调整恢复的过程中,电机的瞬时失速会导致逆变器控制的电流瞬时失控,进而使逆变器短时(200 ~ 500 ms)进行保护性动作,停止牵引力或制动力的

作用,使车轮恢复到自由状态,再重新建立磁场耦合进行控制。

进一步分析可知,电机相电流超高故障的发生主要有两种:

1) 在空转或滑行控制过程中,牵引或电制动力恢复曲线调整滞后(或空转滑行情况比较严重,磁场瞬时变化过快),进一步导致电流加大,激发逆变器保护动作,断开高速断路器。此时的电机相电流高或者超高状态并不属于故障,而逆变器会把保护状态以故障的形式上报给列车监控系统。在车轮长时间严重空转或滑行的过程中,极偶尔会发生此现象。

2) 电机相关回路出现短路或过载等现象,导致电流过高,进而断开高速断路器,从电源输入侧彻底保护逆变器,这是真实的故障。

2 策略优化及改进措施

2.1 策略优化方案

1) 更新空转滑行策略,放缓力的恢复和磁场的耦合控制,防止在空转或滑行过程中,定子磁场过快地跟随异常的转子磁场变化,从而导致电流进入限制区域。

2) 在磁场控制策略中,对单轴或多轴轮对同时出现空转或滑行时的磁场变化进行精细化区分及控制,通过磁场滤波器的参数调节及速度传感器的滤波参数调节,增强磁场控制的兼容性,以确保任一空转或滑行工况下,均能实现有效控制,从而避免相电流过流现象发生。

3) 把电机相电流故障同空转或滑行控制进行区分。在空转或滑行过程中,电流抑制的保护动作不会以故障形式报给列车监控系统。只有发生短路等真正的故障,才会以故障形式上报给列车监控系统。

2.2 优化效果

目前,策略优化后的新版本软件已经应用在所有列车上。根据列车监控系统下载的列车正线运行记录数据,牵引系统没有因检测到空转或滑行而进行保护动作的故障报警。通过对空转滑行策略的优化及牵引系统软件的升级,有效解决了正线运行列车牵引系统报电机相电流过高或超高、直流滤波电压过压或超压故障的问题,避免了高速断路器闪断问题,保证了地铁列车的安全运行。

(下转第 228 页)