

车载牵引系统和轨旁供电系统的电压控制策略

朱冬进 王 伟

(中车浦镇庞巴迪运输系统有限公司, 241060, 芜湖//第一作者, 工程师)

摘要 为保证车载牵引系统电制动性能的尽可能发挥, 对车载牵引系统和轨旁供电系统的电压控制策略进行了研究。根据车辆配置车载制动电阻和线路设置轨旁能量吸收装置的不同情况, 结合牵引系统依据网压线性减少电制动功率和以恒定斜率降低电制动力的2种不同电压控制方式, 分析了再生制动能量有效吸收的控制方式, 提出了设置线路轨旁能量吸收装置的合理距离值。

关键词 城市轨道交通; 车载牵引系统; 轨旁供电系统; 电压控制

中图分类号 U231.8

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2019.10.019

Voltage Control Strategy of Vehicle Traction System and Trackside Power Supply System

ZHU Dongjin, WANG Wei

Abstract In order to ensure the full play of the electric braking performance in vehicle traction system, the voltage control strategy of vehicle traction system and the trackside power supply system is studied. According to different conditions of vehicle brake resistor and trackside energy absorbing devices along the line, two voltage control methods are proposed, one is to reduce the electric braking power based on network voltage linearity and another is to reduce the electric braking force following a constant slope. With an analysis of the control method that will effectively absorb the regenerative braking energy, the reasonable distance between trackside energy absorbing devices on the mainline is proposed.

Key words urban rail transit; vehicle traction system; trackside power supply system; voltage control

Author's address CRRC Puzhen Bombardier transportation Systems Ltd., 241060, Wuhu, China

车载牵引系统是城市轨道交通列车驱动系统的组成部分。在直流供电系统中, 车载牵引系统把电网上的直流电压逆变成一个带有可变振幅和频率的三相交流电压, 为牵引电动机运行提供所需的能量。车载牵引系统具有电牵引和电制动的基本

功能。轨旁供电系统的主要功能是将电力系统的电源引入轨旁供电系统的牵引变电所, 通过变电所变压至合适的电压制式, 为城市轨道交通车辆提供持续电能。

1 牵引供电系统标准要求及特性说明

电力牵引系统电压的主要特性设计需要满足 GB/T 1402—2010《轨道交通牵引供电系统电压》的要求。该标准定义了电力牵引地面装置(包含轨旁供电系统)和机车车辆(包含车载牵引系统)的电压特性参数, 适用于铁路、城市轨道交通, 以及工矿企业电气化运输等领域。牵引供电系统的电压及其容许的极限值在该标准中已明确, 针对不同的标称电压, 如 750 V 和 1 500 V 电压等, 给出了最低持续电压 $U_{\min 1}$ 、最低非持续电压 $U_{\min 2}$ 、最高持续电压 $U_{\max 1}$ 、最高非持续电压 $U_{\max 2}$ 、最高长时限过电压 $U_{\max 3}$ 的限值, 并对这些限值进行了补充说明。不同的最大电压限值所对应的持续时间如图 1 所示, $U_{\max 1}$ 和 $U_{\max 2}$ 之间的持续时间不超过 5 min。

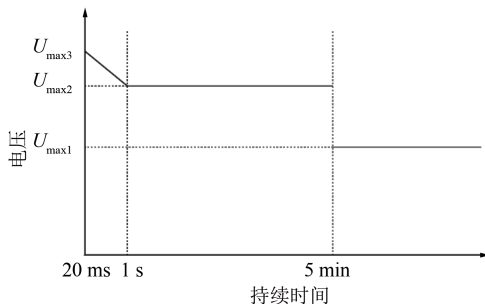


图1 不同的最大电压限值所对应的持续时间

在实际的设计过程中, 电力牵引系统除了要满足上述的标准限值外, 还应考虑多列车运行的相互影响。因此, 轨旁供电系统电压特性还应满足以下要求:

1) 空载电压: 指线路上没有列车时的线网电压。为提高牵引效率, 空载电压应尽量大, 但须小

于最高持续电压。

2) 最低电压:当车辆在距离牵引变电所较远位置运行时,车辆所处位置的网压不能低于车载牵引系统工作的最低电压限值。

3) 最高电压:在线路上列车电制动将能量反馈到线网上,导致线网电压短时增加的情况下,可允许网压短时高于最高持续电压,但应小于等于最高非持续电压。

4) 电制动持续电压:为保证车载牵引系统的电制动可以持续满功率工作,线网上的电压值应满足电制动持续满功率工作的电压,尽量避免车辆采用机械制动。

虽然列车在电制动时允许网压短时高于最高持续电压,但电制动能量应能及时被相邻车辆或本列车的用电设备及车载制动电阻消耗。在没有车载制动电阻的系统中,为避免网压超过安全电压限值,应设置轨旁能量吸收装置,用以吸收再生制动的多余能量。通常车载牵引系统具有导向安全的过压控制策略,所以,为了车载牵引系统和轨旁供电系统能匹配工作,电力牵引系统设计时需要车载牵引系统的过压控制策略进行分析研究。

2 车载牵引系统电压控制策略研究

城市轨道交通车辆在制动时,应优先使用电制动。在多辆车同时运行的线路上,电制动产生的能量将优先被线路上其它运行的车辆和本列车的用电设备吸收,以实现再生制动,节约能源。当线路上其它车辆无法完全吸收列车电制动所产生的能量时,一般采用车载制动电阻或轨旁能量吸收装置(如电阻、超级电容、能馈等)来消耗多余的电制动能量。当车载制动电阻或轨旁能量吸收装置无法吸收制动列车的多余电能时,网压将快速上升。当网压上升到一定数值时,车辆牵引系统将启动过压保护措施来保证车辆自身和系统的安全。

为了避免网压进一步升高,在牵引过压控制上,一般采用依据网压线性减少电制动功率,以及以恒定斜率降低电制动力的方式来限制产生多余的电制动能量。

2.1 依据网压线性减少电制动功率

车载牵引系统在网压大于最高持续电压后,电制动功率会以网压为依据线性下降,并在此过程中补充机械制动。对 750 V 系统(如北京地铁 4 号线),通常在网压大于 900 V、达到在 900~1 000 V

之间时,电制动功率将从 100%线性下降至 0;对于标称电压为 1 500 V 的牵引系统(如哈尔滨地铁 1 号线),通常在网压大于 1 800 V、达到 1 800~2 000 V 之间时,电制动功率将从 100%线性下降至 0。

车载牵引系统有过压斩波功能。对于配备了全功率制动电阻的车辆,通常将制动电阻的阈值设置在最高持续电压(如合肥地铁 1 号线的制动电阻斩波阈值设置为 1 800 V),这样就可以将受电弓或集电靴的电压维持在最高持续电压水平。对于配备了轨旁能量吸收装置的线路,可以通过轨旁能量吸收装置来吸收车辆再生制动的能量。轨旁能量吸收装置的开启阈值和关闭阈值通常都设置在最高持续电压阈值下(如成都地铁 7 号线轨旁能量吸收装置的开启阈值设置为 1 710 V,关闭阈值设置为 1 680 V),对线网起到稳压作用,电压被限制在最高持续电压范围内。

2.2 以恒定斜率降低电制动力

车载牵引系统在网压大于最高持续电压后,以恒定斜率降低电制动力,并在此过程中补充机械制动。因为牵引系统电制动功率为电制动力与列车运行速度的乘积,所以当列车在施加制动时,随着列车速度和电制动力的减小,电制动功率也将随之减小,降低了再生制动能量,从而有效抑制了网压的进一步增加。当电制动力为 0 时,电制动功率为 0。

当牵引系统检测到输入直流电压大于最高持续电压时,系统将以一个恒定的斜率来减小电制动力,该斜率的设置通常和牵引系统的过压保护激活条件关联。如芜湖单轨 2 号线项目,牵引系统过压保护封锁的条件是电压大于等于 940 V 且超过 200 ms。当牵引系统以 82.585 kN/s 的斜率降低电制动力时,可以保证在 200 ms 的时间内使电制动力下降至 0,不会触发过压保护。

同样,应用此过压控制方式的牵引系统也具有过压斩波功能。对于配备制动电阻的车辆,受电弓或集电靴的电压维持在最高持续电压水平。对于配备轨旁能量吸收装置的线路,首先将通过轨旁能量吸收装置来对线路进行稳压,当轨旁能量吸收装置不可再吸收列车的多余电能时,应采用此过压控制方式来抑制电压的进一步上升。配备轨旁能量吸收装置的线路,其车辆牵引系统过压斩波功能的阈值通常设置在最高持续电压和最高非持续电压之间。与配备全功率制动电阻的车辆相比,该阈值

更高。如芜湖单轨 2 号线项目,其车辆牵引系统的功能激活阈值设置为 950 V,这样可以将受电弓或集电靴的电压限制在 950 V 左右,不会超过最高非持续电压。

上述两种牵引系统的过压控制方案,均是基于车载制动电阻或轨旁能量吸收装置无法全部吸收多余的再生制动能量情况下所采取的过压保护措施。

3 轨旁供电系统电压控制策略研究

根据牵引系统的过压控制策略可知,当列车在电制动时,如果再生制动的能量不能有效吸收,则牵引系统直流输入环节电压将快速上升,进而激活牵引系统过压控制,牵引系统输出的电制动力随之减小。此时,为了满足总的制动力需求,车辆将施加机械制动。

供电系统的设计中,车辆应尽可能使用电制动,尽量避免使用机械制动。这样,既能通过能量的回收产生一定的经济效益,又能减少制动闸瓦的机械磨损,降低其对环境的影响,并减少制动闸瓦的更换频率。单列车再生制动如图 2 所示。

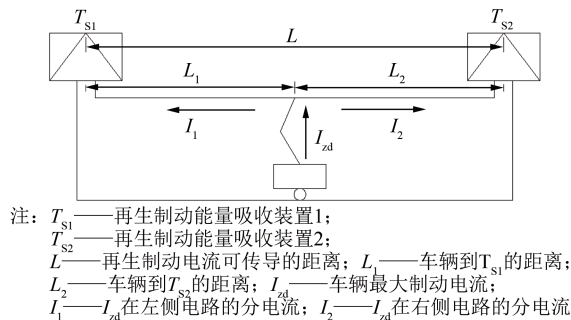


图 2 单列车再生制动示意图

当车辆配置全功率车载制动电阻时,可以通过牵引系统制动斩波功能将牵引直流输入环节电压维持在最高持续电压水平,以便牵引系统能够满功率工作,充分发挥电制动功能。

在车载制动电阻取消的情况下,再生制动能量吸收装置成为轨旁供电系统不可或缺的一部分,需要通过轨旁再生制动能量吸收装置来维持线网电压的稳定,使其不超过最高持续电压。再生制动能量吸收装置的容量应根据牵引系统的电流曲线进行配置,以保证能够完全吸收列车再生制动能量。此外,需要根据线路压降来合理分布轨旁能量吸收装置,并根据变电站特性调整线路空载电压。下面基于芜湖单轨 2 号

线项目的轨旁供电系统进行分析。

3.1 轨旁能量吸收装置最大允许距离分析

芜湖单轨 2 号线项目牵引供电系统采用双边供电,该项目车辆电制动电流如图 3 所示。

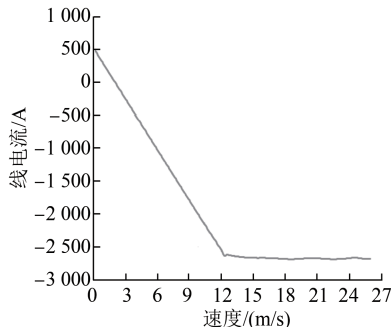


图 3 芜湖单轨 2 号线车辆电制动电流

由图 3 单轨车辆的电制动电流曲线可知,车辆最大制动电流 $I_{zd} = 2\,691\text{ A}$ 。假设轨旁能量吸收装置门槛电压为 U_{zs} ;车辆等效为电流源,制动电压为 $U_{车}$,且最大值 $U_{车,max} = 900\text{ V}$;接触轨电阻率 R 为 $7.5\text{ m}\Omega/\text{km}$ 。根据图 2 建立等效模型,再生制动电流可传导的距离 L 与上述参数的关系为:

$$U_{车,max} = I_{zd} \times L \times R + U_{zs} \quad (1)$$

进而可得

$$L = (U_{车,max} - U_{zs}) / (I_{zd} \times R) \quad (2)$$

由式(2)可知,单列车再生制动能量可被吸收的最大距离取决于车辆的制动电压和能量吸收装置门槛电压的差值。可通过增大列车最大制动电压、降低变电所再生制动能量吸收装置门槛电压来增大列车再生电能的传导距离。在车辆的 $U_{车,max} = 900\text{ V}$ 、牵引变电所空载电压为 823 V 的情况下,通常将能量吸收装置门槛电压设置为 870 V (避免因电网电压波动造成能量吸收装置空转),且不考虑有相邻车吸收的情况。经计算,此时的能量吸收装置最大允许距离约为 1.5 km 。由于采用双边供电,则再生制动能量吸收装置的最大距离为 3 km 。

3.2 线路空载电压分析

根据芜湖单轨 2 号线项目供电站电压特性,可以输出 802 V 、 823 V 及 850 V 3 档电压。

通过调整整流变压器抽头变比至 -2.5% 档位,降低整流机组空载电压,从而减小中压能馈的门槛电压至 850 V ,此时可将列车制动电能最大可被吸收距离增大至 5 km 。需要注意的是,当整流变压器抽头调整至 -2.5% 挡位时,牵引网上某些位置的电压可能较低。当出现牵引网电压低于最低持续电

压时,不建议使用调整整流变压器抽头来增大列车制动电能最大可被吸收距离。

4 轨旁供电系统电压控制方案应用

对车载牵引系统及轨旁供电系统电压控制策略进行研究,符合要求的轨旁供电系统的技术参数见表 1。

表 1 轨旁供电系统技术参数

| 项目 | 参数值 |
|----------------------|-------|
| 变电站空载电压/V | 812 |
| 轨旁能量吸收装置启动电压/V | 840 |
| 制动最大电压/V | 900 |
| 供电轨允许压降/V | 60 |
| 轨旁能量吸收装置之间的最大距离/km | 5.313 |
| 轨旁能量吸收装置之间的最大允许距离/km | 6.000 |

如表 1 所示,供电轨允许压降可以达到 60 V;该压降对应的轨旁能量吸收装置之间的最大允许距离为 6.000 km,实际线路轨旁能量吸收装置之间的最大距离是5.313 km,小于最大允许距离。

应用该供电系统的车辆测试数据如图 4 所示。

由图 4 可知,列车在线路上从起动加速到 83 km/h 后开始制动,牵引状态变为 0,制动状态变为 1,牵引逆变器输入电压在制动过程中快速上升后趋于稳定,整个过程中牵引逆变器的状态值为 9(状态值为 9 表示牵引逆变器处于正常工作的状态)。从测试数据可以看出,在整个制动过程中,牵引逆变器直流输入电压被有效抑制,未出现因为过压减少电制动力的现象,车辆和轨旁能量吸收装置配合良好,车辆工作状态正常。

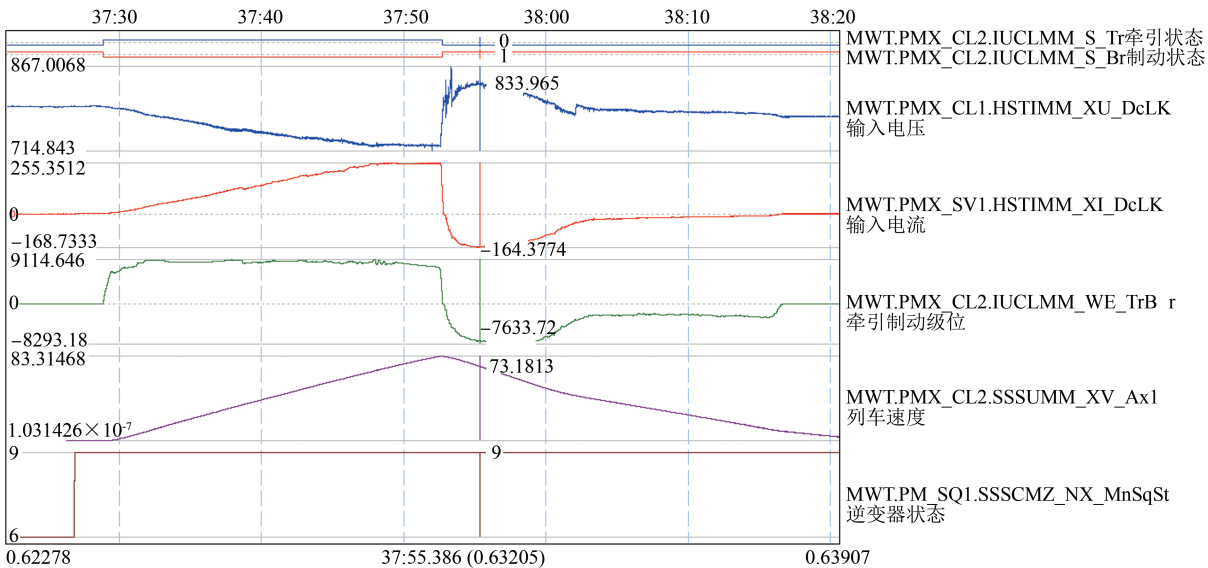


图 4 车辆牵引系统测试数据截图

5 结语

为保证车辆电制动充分发挥,车辆及轨旁供电系统的设计需要保证牵引网压小于最大持续电压。对于车载制动电阻,需要启动及时,且能够吸收再生制动的所有能量,不会引起牵引系统制动电阻过温保护。对于轨旁能量吸收装置,由于车辆与轨旁能量吸收装置之间有一定的距离,轨旁能量吸收装置启动阈值的设定需要考虑由此产生的线路压降,不应造成牵引系统过压保护,不应造成车辆使用机械制动。

参考文献

[1] 冯晓云.电力牵引交流传动及其控制系统[M].北京:高等教育出版社,2009:20.
[2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.轨道交通牵引供电系统电压:GB/T 1402—2010[S].北京:中国标准出版社,2011:1.
[3] 曾之煜,陈桁,敖娜娜.逆回馈型再生制动能量吸收装置系统的控制[J].电气化铁道,2011(4):31.
[4] 王靖满,黄书明.城市轨道交通供电系统技术[M].上海:上海科学普及出版社,2011:246.

(收稿日期:2019-05-07)