

储能式有轨电车的电液联合制动控制方案

曾 鸣 彭 靖 黄云逸

(广州电力机车有限公司, 510850, 广州//第一作者, 工程师)

摘 要 储能式有轨电车在调试试验及正常运行中, 会因储能系统电压逐渐降低而出现电制动异常等突发情况。为降低制动盘磨损、综合优化改善车辆的行驶安全, 针对某型号储能式有轨电车, 提出了一种适用于储能式有轨电车的电液联合制动控制方案, 并进行了一系列试验。试验结果表明, 该电液联合制动控制方案能有效减少电制动异常的情况, 同时具有可行性和安全性。

关键词 储能式有轨电车; 电制动异常; 液压制动; 电液联合制动

中图分类号 U482.1.02

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.01.016

Electric-hydraulic Combined Braking Control of Energy Storage Type Tram

ZENG Ming, PENG Jing, HUANG Yunyi

Abstract In test and normal operation, the abnormal electric braking and other emergencies of the energy storage tram will happen. In order to reduce the brake disc wear, improve the vehicle running safety, an electric-hydraulic combined braking control strategy suitable for a certain type of energy storage tram is proposed, and a series of experiments are carried out. The result shows that the electric-hydraulic combined braking control strategy can effectively reduce abnormal electric braking with certain feasibility and safety in application.

Key words energy storage tram; abnormal electric brake; hydraulic brake; electric-hydraulic brake

Author's address Guangzhou Electric Locomotive Co., Ltd., 510850, Guangzhou, China

储能式有轨电车虽然节能环保, 而且建设投资少、运营成本低, 但在运行中其储能系统电压会逐渐降低, 容易出现电压不足的情况, 以致牵引电机无法满功率输出, 甚至会引起电机过流保护, 进而导致电制动切除, 影响行车安全。

本文提出以电制动为主的电制动和液压制动联合控制, 在电制动失效或电制动不足时, 可智能调整补充液压制动力, 不仅能有效消除车辆在欠压

状态下强行输出目标转矩所带来的安全隐患, 还能降低液压制动使用频率、合理调整液压制动力, 进而有效地提高列车运行的安全性。

1 传统制动控制方式

目前, 常见的弓网式有轨电车以电制动和液压制动为主要制动模式, 紧急制动时还可加以磁轨制动辅之。一般情况下, 传统弓网式有轨电网友压稳定, 其电制动输出控制和液压制动输出控制基本相对独立。当 CAN(控制器局域网)通信正常时, 变流器控制单元(DCU)在接收车辆控制单元(VCU)传输的电制动转矩后直接施加电制动; 而制动控制单元(BCU)先接收 VCU 传输的制动百分比(y_z)、载荷百分比(y_G)及制动信号等相关信息, 再根据默认电制动在正常输出状态所对应的液压制动理论值施加液压制动。由于储能式有轨电车电压存在波动, 因此, 此类制动控制方式并不能完全满足储能式有轨电车的制动控制需求。

2 电液联合制动控制方式

广州电力机车有限公司在弓网式有轨电车制动控制系统的基础上, 通过修增相关系统间的通信协议, 提出电液联合制动的控制方式。当车辆储能电压满足制动功率需求时, VCU 给 DCU 输出正常的目标电制动转矩(M_b); 当车辆处于储能欠压状态进行制动工作时, VCU 给 DCU 输出安全可承受的最大电制动转矩(M_c), 且 VCU 给 BCU 发送相关制动模式所对应的目标补充液压制动力($F_{液}$), 且 $F_{液} \leq 0.5 F_{液, max}$ ($F_{液, max}$ 为最大液压制动力)。同时, VCU 对实际所施加的电制动反馈值 $F_{电, 反}$ 和液压制动力反馈值 $F_{液, 反}$ 进行采集判断, 若偏差超出了误差范围, 还能进行实时校准。储能式有轨电车电液联合制动控制方式如图 1 所示。

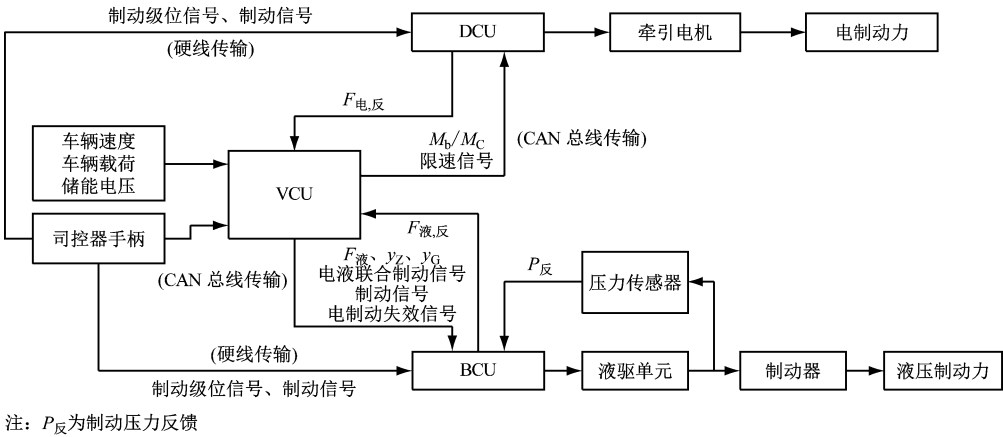


图 1 储能式有轨电车电液联合制动控制方式示意图

3 电液联合制动控制方案

3.1 制动模式

储能式有轨电车制动模式有常用制动模式和紧急制动模式。采用电液联合制动控制的有轨电车在不同的工况和制动模式下,会触发不同的电液联合制动信号。

1) 常用制动模式。在常用制动模式下,CAN总线通信正常工作以总线信号为主,即VCU通过总线将常用制动信号传送给BCU。若电制动正常,则触发电液联合制动信号1激活;若电制动不正常,则BCU执行电制动失效的常用制动控制逻辑;当CAN总线通信不正常时,BCU将由硬线直接采集的常用制动信号及制动级位信号作为依据,并执行降级模式的常用制动。

2) 紧急制动模式。控制手柄一旦置于紧急制动位,则会通过硬线触发磁轨制动和撒沙动作。CAN总线通信正常工作以总线信号为主,VCU通过总线将紧急制动信号传送给BCU,并通过总线触发撒沙动作。若电制动正常,则触发电液联合制动信号2激活;若电制动不正常,则BCU执行电制动失效的紧急制动控制逻辑。当CAN总线通信不正常时,BCU将由硬线直接采集的紧急制动信号及制动级位信号作为依据,执行降级模式的紧急制动。

电制动失效工况下,不同制动模式的电液联合制动信号触发方式也不同。当车辆单端变流器工作异常或同侧2个牵引电机发生故障时,则判定为50%电制动失效;当车辆两端变流器工作异常或整车4个牵引电机都发生故障时,则判定为100%电制动失效。若在常用制动模式下,VCU和BCU检测到电制动失效信号,则触发电液联合制动信号3

激活;若在紧急制动模式下,VCU和BCU检测到电制动失效信号,则触发电液联合制动信号4激活。

3.2 电液联合制动控制流程

VCU实时采集车辆载荷(G)、当前车速(v)和储能模块电压(U)等信息,并根据以上信息实时计算出当前储能模块侧和变流器侧可安全承受的整车最大电制动力(F_c)。车辆运行过程中,VCU实时检测各电液联合制动信号的激活状态,且根据相关状态计算出相对应的 M_b 和 $F_{液}$,并通过CAN总线分别发送给变流器和制动控制单元。具体电液联合制动控制流程图如图2所示。

3.3 计算分析

3.3.1 制动百分比与控制手柄制动级位

控制手柄的制动级位信息通过硬线直接传送至DCU和BCU,同时VCU采集控制手柄的输出电压,并换算出相应的制动百分比 y_z 。 y_z 与控制手柄级位关系见表1。其中,B1~B7为常用制动级位,B8为紧急制动级位。

表 1 制动百分比与控制手柄级位的关系	
制动级位	$y_z/\%$
零位	0
B1	β_1
B2	β_2
B3	β_3
B4	β_4
B5	β_5
B6	β_6
B7	100
B8	100

3.3.2 载荷

BCU采集列车载荷传感器电流(I),并转发给

VCU 进行计算。VCU 将 y_z 的计算结果发送给 BCU, 并根据 G 来核算 I 。各载荷工况下的参数对应关系如表 2 所示。

表 2 不同载荷工况下的参数对应关系

载荷工况	I	G	y_z
AW0(空载)	I_0	G_0	0
AW2(额定)	I_2	G_2	y_2
AW3(超载)	I_3	G_3	100%

由于 y_G 与 G 呈线性关系, 故有:

$$y_G = a_1 \times G + c_1 \quad (1)$$

式中:

c_1 ——载荷百分比调整值;

a_1 —— G 与 y_G 的比例系数。

由式(1)和表 2 可得, 在 AW2 工况下, $y_G = y_2$ 。根据不同载荷工况下的 I 与 y_G , 可以得到二者的对应关系为:

$$y_G = a_2 \times I^2 + b_2 \times I + c_2 \quad (2)$$

其中, a_2 、 b_2 及 c_2 为二次项式的系数。

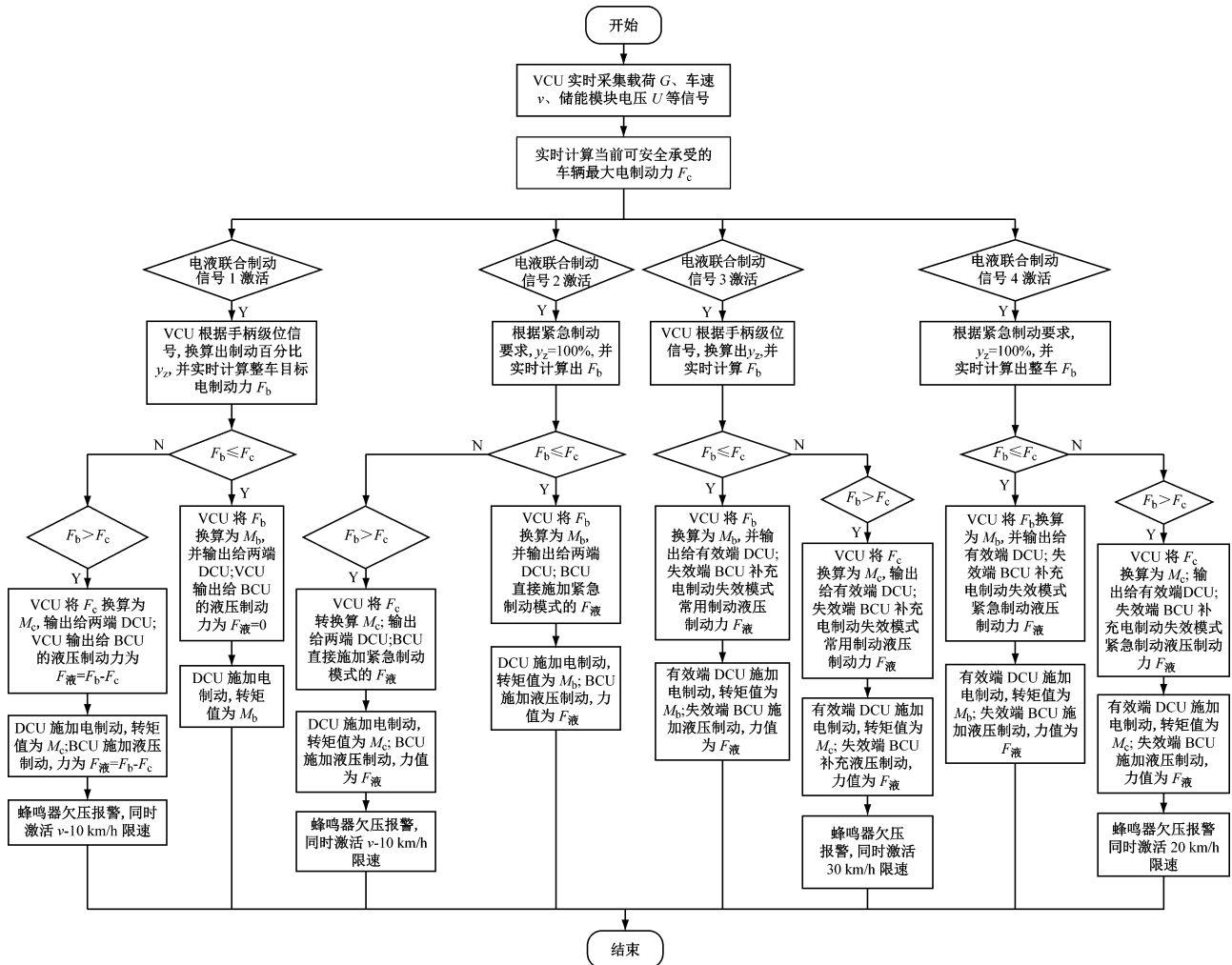


图 2 电液联合制动控制流程图

3.3.3 目标电制动力与目标电制动转矩

根据电制动特性曲线, 可得出当前 F_b 与当前 M_b 。

1) 当 $G < G_2$ 时, 当前 F_b 有:

当 $G_2/G \times 45 \text{ km/h} < v \leq 70 \text{ km/h}$ 时

$$F_b = y_z \times P_{b, \max} / v$$

当 $v_1 < v \leq G_2/G \times 45 \text{ km/h}$ 时,

$$F_b = y_z \times F_c \times G / G_2$$

当 $0 < v \leq v_1$ 时,

$$F_b = y_z \times F_c \cdot v \cdot G / (G_2 \cdot v_0) \quad (3)$$

式中:

$P_{b, \max}$ ——整车最大电制动功率;

v_1 ——列车低速运行控制速度, 取 5 km/h 。

2) 当 $G \geq G_2$ 时, 当前有:

当 $G_2/G \times 45 \text{ km/h} < v \leq 70 \text{ km/h}$ 时,

$$F_b = y_z \times 3.6 P_{b,\max} / v$$

当 $v_1 < v \leq G_2/G \times 45 \text{ km/h}$ 时,

$$F_b = y_z \times F_c$$

当 $0 < v \leq v_1$ 时,

$$F_b = y_z \times \frac{F_c}{5} \times v \quad (4)$$

由 F_b , 可得:

$$M_b = \frac{F_b \times D \times \eta_c}{2 \times 2 \times N \times \mu_c} \quad (5)$$

式中:

N ——电机个数;

η_c ——齿轮传动效率;

μ_c ——齿轮传动比;

D ——轮径(按半磨耗轮计算)。

3.3.4 可安全承受的电制动力与可安全承受的电制动转矩

根据变流器和储能系统的过流保护要求,设定过流保护阈值为 $I_{\text{阀}}$ 。当列车运行一段时间后,随着储能系统电压的下降,可安全输出的制动功率也会随之减小,则当前 F_c 为:

$$F_c = \frac{N \times I_{\text{阀}} \times U}{v} \quad (6)$$

根据 F_c , 即可求出当前可安全承受的电制动转矩为:

$$M_c = \frac{F_c \times D \times \eta_c}{2 \times 2 \times N \times \mu_c} \quad (7)$$

3.3.5 目标液压制动力

在电液联合制动模式中,针对目标液压制动力的施加包括两种方式:一是常用制动模式下电制动力不足而补充液压制动力,该液压制动力值由 VCU 计算得出并发送给 BCU;二是紧急制动模式下,BCU 直接采集相关信号后经自身控制单元计算输出相应的液压制动力。

常用制动模式下 VCU 发送给 BCU 的当前目标液压制动力 $F_{\text{液}}$ 为:

$$F_{\text{液}} = \begin{cases} F_b - F_c, & F_{\text{液}} < 0.5 F_{\text{液},\max} \\ 0.5 F_{\text{液},\max}, & F_{\text{液}} \geq 0.5 F_{\text{液},\max} \end{cases} \quad (8)$$

4 试验结果

针对上述电液联合制动控制方案,在 AW2(额定载荷)工况下进行了一系列试验。其中,各速度

级下的常用制动均采用最大常用制动力,即施加 100% 电制动力。试验结果为:

1) 在制动试验中,当储能系统欠压状态制动时,虽有蜂鸣器报警欠压,但未再出现因电压不足而切除电制动的突发情况。

2) 在正常常用制动试验中:当 $F_b \leq F_c$ 时,向 DCU 输出 M_b ,向 BCU 输出 $F_{\text{液}} = 0$;当 $F_b > F_c$ 时,向 DCU 输出 M_c ,向 BCU 输出 $F_{\text{液}} = F_b - F_c$,并激活限速模式(速度由 v 减少 10 km/h)。

3) 在正常紧急制动试验中:当 $F_b \leq F_c$ 时,向 DCU 输出 M_b ,BCU 直接施加紧急制动模式的 $F_{\text{液}}$;当 $F_b > F_c$ 时,向 DCU 输出 M_c ,BCU 直接施加紧急制动模式的 $F_{\text{液}}$,同时激活限速模式(速度由 v 减少 10 km/h)。

4) 在电制动失效试验中:当 $F_b \leq F_c$ 时,向 DCU 输出 M_b ,失效端 BCU 施加电制动失效模式的常用或紧急制动 $F_{\text{液}}$;当 $F_b > F_c$ 时,向 DCU 输出 M_c ,向有效端 BCU 输出 $F_{\text{液}} = F_b - F_c$,失效端 BCU 施加电制动失效模式的常用或紧急制动 $F_{\text{液}}$,同时激活限速模式(限速为 20 或 30 km/h)。

综上所述,试验数据与结果同方案理论目标相符合,有效验证了该电液联合制动控制方案的可行性与安全性。

5 结语

在某型号储能式有轨电车的静动态试验过程中,会因储能系统电压逐渐降低而出现电制动异常等突发情况。针对这一安全隐患,本文提出了一种适用于储能式有轨电车的电液联合制动控制方案,并在 AW2 工况下进行了一系列试验。试验结果表明,电液联合制动控制方案能有效避免因电压不足而切除电制动的情况,其操作便利,具有可行性,而且提高了行车的安全性。

参考文献

- [1] 杨永勤. 自主研发的 100% 低地板现代有轨电车制动系统[J]. 城市轨道交通研究, 2014(12): 108.
- [2] 谢春杰. 燃料电池混合动力 100% 低地板有轨电车制动系统研发[J]. 现代国企研究, 2017(2): 115.
- [3] 朱剑月, 程祖国, 罗雁云, 等. 低地板轻轨交通系统[J]. 城市轨道交通研究, 2003(5): 13.

(收稿日期: 2018-03-07)