

一种新型城轨用牵引电机牵引制动性能的试验方法

何伯钧, 敬华兵, 肖泉华, 梁文超, 梁金成

(株洲变流技术国家工程研究中心有限公司, 湖南 株洲 412001)



作者简介: 何伯钧 (1985-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电机试验与变频器设计。

摘 要: 在对新型城轨用牵引电机的数学模型进行分析的基础上研究了电机运行过程, 分析了该电机的牵引性能、制动性能, 推导了城轨用牵引电机的运行控制方法, 得到了影响牵引电机运行特性的典型参数。根据其运行控制方法, 通过试验完成了该新型牵引电机的牵引、制动性能测试, 得到了 190 kW 城轨用交流变频牵引电机的牵引、制动性能测试参数及性能测试曲线, 与文献的理论曲线吻合。测试结果也验证了城轨用牵引电机牵引制动性能的正确性和有效性。

关键词: 牵引电机; 牵引性能; 制动性能; 性能测试; 测试曲线; 轻轨车

中图分类号: TM343

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2012)05-0070-06

Test Method of Traction and Braking Characteristics for a Novel Urban-rail Traction Motor

HE Bo-jun, JING Hua-bing, XIAO Quan-hua, LIANG Wen-chao, LIANG Jin-cheng

(Zhuzhou National Engineering Research Center of Converters Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Based on the analysis of mathematics model for a novel urban-rail traction motor, the operation process of traction motor was researched, the traction and braking characteristics of the motor were analyzed, control method of traction motor was presented, and typical parameters of the traction motor were deducted. With operation controlling method, test of traction and braking characteristics were accomplished to obtain traction & braking parameters and characteristics curves for 190 kW urban-rail AC variable-frequency traction motor by experiment, which accorded with theoretical curves of literature. The traction and braking characteristics of traction motor were also verified by testing results.

Key words: traction motor; traction performance; brake performance; performance test; testing curves; LRV

0 引言

目前我国电气化轨道交通及城轨地铁交通建设正快速发展。城轨车辆的运输能力及牵引特性主要由牵引电机的转矩特性及速度特性决定。城轨用交流牵引电机不存在换相限制, 能实现较大的恒转矩启动和较宽的恒功率调速区, 其承受瞬变过程能力强, 可实现宽范围的平滑调速, 有利于加快城轨列车的牵引、制动和调速过程; 同时, 城轨用交流牵引电机的动态控制性能和粘着性能好, 具有很高的性价比和功率体积比, 有取代直流牵引电动机的趋势^[1]。

文章研究的城轨用 MTA A4-200 交流牵引电机采用意大利电机生产厂商 Ansaldo Breda 的工艺技术, 将应

用于重庆市新型城市轻轨列车, 是一种新型的特殊的牵引电机, 对其牵引制动性能的研究非常必要。为适应特殊的使用工况, MTA A4-200 型牵引电机在结构上做了相应的处理, 采用了国内少有的 C 级绝缘等级, 轴上无键槽附有绝缘涂层, 并且采用了轴向冷却通风技术; 考虑到城轨线路的复杂运行工况, 该类型牵引电机的调速范围较宽, 电机额定频率 78.4 Hz, 额定转速 2 352 r/min, 正常运行范围在 25~139 Hz (电机转速相应运行在 750~4 170 r/min)。电机的过载能力较强, 电机的额定功率为 190 kW, 牵引过载能力达到了 1.5 倍, 制动过载能力达到了 2.5 倍, 具有调速范围宽、频率范围大、牵引制动性能好等特点。本文从城轨用交流牵引电机的牵引性能、制动性能等方面, 对其运行特性、控制方法进行介绍, 并以 MTA A4-200 型城轨用交流牵引电机为研究对象, 对该类特殊要求的城轨用交流牵引电机

收稿日期: 2011-12-15; 收修改稿日期: 2012-02-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61075065)

的牵引性能和制动性能进行了验证。

1 城轨用交流牵引电机的数学模型

城轨用交流牵引电机一般采用异步电机, 其通用等效电路如图 1 所示。

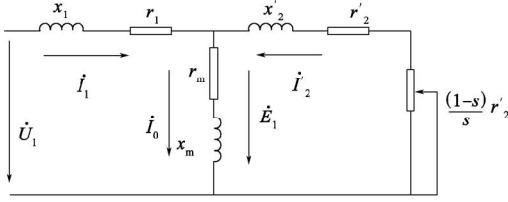


图 1 异步电机通用等效电路

图中, r_1 为定子电阻, x_1 为定子电抗, r_m 为励磁电阻, x_m 为励磁电抗, r_2' 为转子铜耗对应等效电阻, $\frac{(1-s)}{s}r_2'$ 为转子轴机械功率对应等效电阻, x_2' 为转子等效漏电抗, $\dot{I}_1$ 为定子电流, $\dot{I}_2'$ 为转子等效电流, $\dot{I}_0$ 为励磁电流, $\dot{U}_1$ 为电源电压, $\dot{E}_1$ 为主磁通感应电势。

根据异步电机通用等效电路得到交流牵引电机的基本关系式:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= -E_1 + I_1 Z_1 = I_0(r_m + jx_m) + I_1(r_1 + jx_1) \\ E_2' &= I_2'(\frac{r_2'}{s} + jx_2') \\ I_1 &= I_0 + (-I_2') \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: E_2' 为转子电势等效值。

在牵引工况下, 根据式 (1) 和异步电机通用等效电路推得牵引电机转差率^[4]:

$$s = \frac{P_{Cu2}}{P_{em}} = \frac{m_2 I_2'^2 r_2'}{m_2 E_2 I_2 \cos \varphi_2} = \frac{I_2' r_2'}{E_2 \cos \varphi_2} \quad (2)$$

即: 在牵引工况下, 随着负载增加, 转子等效电流 I_2' 增加, 转差率 s 随之增加, 牵引电机转速 n_1 将下降。

交流牵引电机工作在制动工况时, 电机转速 n_1 高于同步转速 n , 此时 $s < 0$, 转子回路电阻 $\frac{r_2'}{s}$ 为负。根据式 (1) 和交流牵引电机等效电路得到转子侧全机械功率 P_j 和转子侧电磁功率 P_{em} 的计算公式:

$$\left. \begin{aligned} P_j &= m_2 I_2'^2 \frac{1-s}{s} r_2' < 0 \\ P_{em} &= m_2 I_2'^2 \frac{r_2'}{s} < 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

在制动工况时, 牵引电机轴上输入的机械能将转化为电能, 并由电机转子传递到电机定子。根据交流牵引电机等效电路得到转子侧功率因数:

$$\cos \varphi_2 = \frac{\frac{r_2'}{s}}{\sqrt{(\frac{r_2'}{s})^2 + x_2'^2}} < 0 \quad (4)$$

电磁转矩表达式^[5]如式 (5) 所示:

$$T_{em} = C_{T1} \Phi_m I_2' \cos \varphi_2 < 0 \quad (5)$$

式中: C_{T1} 为转矩常数; 电磁转矩为负, 为制动性的。

在制动工况下, 定子侧功率因数角 φ_1 的取值范围在 $90^\circ < \varphi_1 < 180^\circ$ 。根据异步电机通用等效电路推得定子侧有功功率 P_1 和定子侧无功功率 Q_1 :

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 < 0 \\ Q_1 &= m_1 U_1 I_1 \sin \varphi_1 > 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

在制动工况下, 交流牵引电机工作在发电运行状态, 定子侧有功功率回馈至电网, 但仍然从网侧吸收无功功率。

2 电机的牵引性能分析

牵引电机启动时, 维持给定电枢电流不变, 采用改变电动机端电压的方法进行调速, 此时牵引变频器采用恒压频比方式进行控制 ($U_1/f_1 = \text{const}$), 得到主磁通表达式^[6]:

$$\dot{\Phi}_m = \frac{\dot{E}_1}{-j4.44 f_1 N_1 k_{\omega 1}} \propto \frac{\dot{E}_1}{f_1} \approx \frac{\dot{U}_1}{f_1} \quad (7)$$

式中: N_1 为定子每相绕组串联匝数; $k_{\omega 1}$ 为定子基波绕组系数。

交流牵引电机运行在恒磁通工作区。由式 (2)、式 (3) 推得牵引电机的电磁转矩表达式:

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_1} = \frac{3pf}{2\pi} \left(\frac{E_1}{f_1}\right)^2 \frac{1}{\frac{r_2'}{s} + \frac{s(x_2')^2}{r_2'}} \quad (8)$$

式中: Ω_1 为电机同步角速度, rad/s; p 为牵引电机极对数。

对式 (8) 中的电磁转矩进行微分运算得到:

$$\frac{dT_{em}}{ds} = 0 \quad (9)$$

由式 (8)、式 (9) 推得最大电磁转矩如式 (10) 所示:

$$T_M = \frac{1}{2} \frac{3p}{2\pi} \left(\frac{E_1}{f_1}\right)^2 \frac{1}{2\pi L_2'} \propto \left(\frac{E_1}{f_1}\right)^2 \quad (10)$$

式中: $L_2' = \frac{x_2'}{2\pi f_1}$, 为转子漏电抗系数的等效值。

在恒磁通区, 牵引电机的最大电磁转矩也近似为恒定值, 牵引电机工作在恒转矩工作区, 这是交流牵引电机在基频点以下具有的特性。由式 (8) 推得电机的机械功率表达式:

$$P = T_{em} \Omega \quad (11)$$

式中: Ω 为牵引电机机械角转速, rad/s。

在恒转矩特性区, 随电机转速增加, 电机的机械功率即电机牵引功率将随转速的上升而增加。

牵引电机达到额定频率点转速后, 牵引变频器将电枢电压逐渐升高到允许最高电压。从基频往上调节转速时, 由式 (8) 推得电机最大转矩 T_M 与变频器频率

f_1 (即牵引电机定子侧频率) 的关系表达式:

$$T_M = \frac{1}{2} \frac{3pU_1^2}{2\pi f_1 [r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}]} \approx \frac{1}{2} \frac{3pU_1^2}{2\pi f_1 (x_1 + x_2')} = \frac{3}{4} \frac{pU_1^2}{\pi^2 f_1^2 (L_1 + L_2')} \propto \frac{1}{f_1^2} \quad (12)$$

式中: U_1 为电枢电压, 为恒定值。

随着牵引电机定子侧频率 f_1 的提高, 电机的电磁转矩下降, 而电机转速却升高。由式 (11) 可知: 牵引电机的输出机械功率基本保持不变; 又由式 (7) 得到: 在基频以上, 电枢电压不变, 气隙磁通将随电机转速的提高而减小。因此在基频以上, 牵引电机工作在弱磁恒功调速区域。

随着电机转速进一步提高, 若保持电动机端电压不变, 牵引电机的励磁电流将继续减小。在此范围内, 牵引电机的功率不能再维持恒定, 只能随转速的提高而下降。可得到牵引电机的牵引功率表达式^[7]:

$$\left. \begin{aligned} P &= CFv \\ P &= U_a I_a \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: C 为电机传动效率常数; F 为轮周牵引力, kN; v 为车辆运行速度, km/h; U_a 为电枢电压, I_a 为电枢电流。

随着转速的继续提高, 输出功率随之减小, 电机牵引力和电枢电流将逐渐减小, 牵引电机运行在自然特性区。

图2所示为城轨用 190 kW MTA A4-200 交流牵引电机的理想牵引性能曲线^[8]。由图2可得: 牵引电机在 0~1 662 r/min 转速区间运行在恒转矩工作区, 电机转矩维持在 1 554 · m, 牵引功率随转速的上升而增大; 在 1 662~3 324 r/min 转速区间运行在恒功率工作区, 牵引功率维持在 271 kW, 电机转矩随转速的上升而减小; 在 3 324~4 154

r/min 转速区间运行在自然特性区, 电机转矩和牵引功率均随转速的上升而减小。

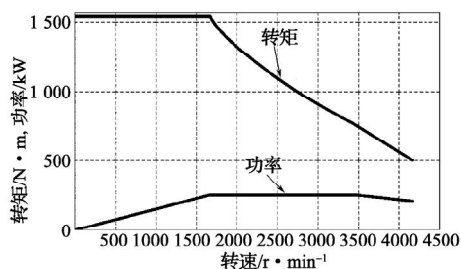


图2 MTA A4-200 牵引电机理想牵引性能曲线

3 电机的制动性能分析

交流牵引电机在制动工况下为发电运行状态, 当牵引电机在高速制动时, 此时电机的反电动势较大, 制动时制动电阻直接接在牵引电机电枢两端, 由异步电机通用等效电路可推得制动电流表达式:

$$i_{\text{break}} = \frac{E_1}{R_b} = \frac{C_e \phi_m}{R_b} \quad (14)$$

式中: E_1 为牵引电机反电动势; ϕ_m 为励磁磁通; R_b 为制动电阻。

牵引电机制动电阻的选取按下式进行计算^[9]:

$$R_b \leq U^2 / (PK) = (U_a K_1 K_2)^2 / (PK) \quad (15)$$

式中: U_a 为牵引变频器直流侧电压; P 为制动功率; K 为制动裕量系数, 取 1.3。

由式 (14) 可知: 为了保证电机的制动电流, 当电机转速下降时, 必须相应地增加励磁电流, 牵引电机的制动功率也相应增加, 牵引电机运行在调磁控制工作区。当电机运行至调磁控制和调压控制的临界点时, 励磁电流为允许的最大值, 此时牵引电机的制动电流 i_{break} 达到最大, 牵引电机所对应的转速为调磁控制允许的最低转速。

牵引电机的励磁电流达到最大值后, 电机的励磁电流不能再调节, 随着转速的继续下降, 电机的制动电流和制动功率将会减小, 可得到电机的端电压表达式^[10]:

$$U = (C_e K_s n_1 + R) I_a \quad (16)$$

式中: U 为电机端电压; I_a 为电枢电流; C_e 为牵引电机电势常数; K_s 为励磁系数; n_1 为电机转速; R 为电枢电路总电阻。

由式 (16) 可知: 电机端电压将随电机转速和电枢电流的下降而减小, 电机将进入调压控制工作区, 牵引变频器采用变压变频模式进行控制。

图3为城轨用 190 kW MTA A4-200 交流牵引电机的理想制动性能曲线^[8]。由图3

得到: 牵引电机在 4 154~3 324 r/min 转速区间运行在调磁控制工作区, 电机转矩和牵引功率均随转速的下降而增大; 在 3 324~0 r/min 转速区间运行在调压控制工作区, 电机转矩维持在 1 392 N · m, 制动功率随转速的下降而减小。

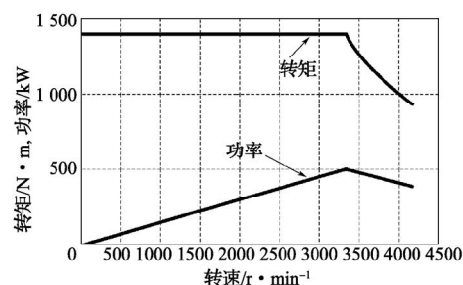


图3 MTA A4-200 牵引电机理想制动性能曲线

4 牵引制动性能测试

4.1 测试条件

本测试牵引电机为四极三相交流牵引电机 MTA A4-200, 其具体参数如下: $P_N = 190$ kW, $U_N = 1 053$ V, $I_N = 126$ A, $f_N = 78.4$ Hz, $n_N = 2 353$ r/min, $\cos \varphi_N = 0.87$ 。

根据上述交流牵引电机的牵引、制动性能的分析, 在铁道部牵引电气设备检测站对城轨用 MTA A4-200 交流牵引电机的牵引制动性能完成了系统测试。其中, 测试用转矩转速传感器采用 NJ2 型磁电式扭矩传感器, 电压/电流传感器采用高精度测量传感器 SP112401, 用 FLUKE 功率分析仪对牵引电机的电压、电流、电功率、

功率因数等参数进行分析计算及数据显示。

图4为牵引性能测试和制动性能测试的系统框图。直接接入直流电源到回馈直流母线, 直流电压为1 900 V; 拖动变频器和回馈变频器均采用IGBT三相变流器, 额定容量630 kVA, 额定输出电压1 140 V, 牵引变流模块输出PWM波为牵引电机提供电源。

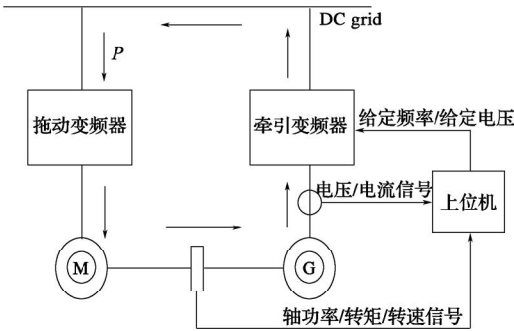


图 4 性能测试系统框图

牵引制动性能测试均采用对拖负载法实现, 被试牵引电机和陪试电机联轴组成对拖机组, 能量可通过变频器回馈至直流母线实现能量循环。在牵引性能测试工况下, 被试牵引电机作为拖动电机工作在电动状态。在各测试频率点, 上位机通过检测牵引电机轴功率及电枢电压, 对牵引变频器的输出频率及输出电压进行闭环控制, 通过2台变频器之间的频差, 达到控制被试电机牵引功率的目的。

制动性能的测试方法与牵引性能测试方法基本相同, 不同点是在制动工况下, 牵引电机采用回馈制动的方法工作在发电状态进行测试。

4.2 测试方法

以55 Hz频率点为例, 其测试方法为: 以恒压频比 $U_1/f_1=\text{const}$ 控制方式启动牵引变频器, 待牵引电机旋转

后, 将牵引变频器的输出频率给定至55 Hz。待牵引电机达到额定频率55 Hz后, 以恒频变压方式55 Hz/0 V启动回馈变频器, 然后将发电机端电压给定至额定电压。之后微调增加牵引变频器的输出频率, 根据转矩转速传感器得到的轴功率数据, 将牵引电机的牵引功率给定至271 kW^[8], 记录此时的牵引电机电压、电流、轴功率、效率、功率因数和电机转速等试验参数。牵引电机在其他频率点下的牵引性能测试方法与上述试验方法相同。

以111 Hz频率点为例, 制动性能测试方法为: 以恒压频比 $U_1/f_1=\text{const}$ 控制方式启动拖动变频器, 待拖动电机旋转后, 将拖动变频器的输出频率给定至111 Hz。待拖动电机达到额定频率111 Hz后, 以恒频变压方式在111 Hz/0 V启动牵引变频器, 将牵引电机端电压给定至额定电压。之后微调减小牵引变频器的输出频率, 根据转矩转速传感器得到的轴功率数据, 将牵引电机的制动功率给定至485 kW^[8], 记录此时的牵引电机电流、输入功率、效率、功率因数和速度等试验参数。牵引电机在其他频率点下的制动性能试验方法与上述试验方法相同。

4.3 测试结果

表1和图5分别为通过牵引性能测试得到的测试数据以及性能测试曲线, 可得到牵引电机在0~55 Hz频率段运行在恒转矩工作区, 转矩基本维持在1 605 N·m, 牵引功率随转速的上升而增加, 在55 Hz输入电功率为290 kW, 牵引功率达到271 kW; 牵引电机在55~111 Hz频率段运行在恒功率工作区, 输入电功率为290 kW, 轴功率维持在271 kW, 转矩随转速的上升而减小, 在111 Hz转矩值为789 N·m; 牵引电机在111~139 Hz频率段运行在自然特性区, 牵引功率和电机转矩都随电机转速的上升而减小。

表1 牵引性能测试数据

f/Hz	U/V	I/A	P ₁ /kW	cos ψ	N _s /r·min ⁻¹	N _r /r·min ⁻¹	s/%	T/N·m	P ₂ /kW	η/%
/	/	/	/	/	/	0	/	1 604.0	0	/
35.0	600.5	206.16	187.261	0.876 4	1 050	1 018.4	2.95	1 604.0	171.062	91.35
45.0	698.8	222.27	241.792	0.898 8	1 350	1 310.1	2.93	1 611.5	221.094	91.44
55.0	907.2	210.37	290.250	0.878 1	1 650	1 616.2	2.05	1 606.1	271.838	93.66
78.3	1 053.2	174.54	285.738	0.897 5	2 349	2 316.8	1.41	1 120.8	271.914	95.16
97.9	1 050.8	181.40	300.889	0.911 4	2 937	2 892.7	1.54	896.3	271.521	90.24
110.9	1 051.5	171.84	285.635	0.912 7	3 327	3 279.5	1.46	789.3	271.084	94.91
125.0	1 052.1	157.28	261.488	0.912 4	3 750	3 698.6	1.36	627.4	243.020	92.94
138.9	1 051.1	140.66	233.697	0.912 7	4 167	4 119.6	1.17	503.9	217.401	93.03

对比图5牵引性能测试曲线与图2理想牵引性能曲线: 恒转矩工作区均运行在0~55 Hz, 恒功率工作区均运行在55~111 Hz, 自然特性区均运行

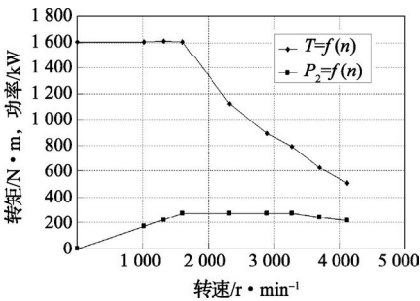


图 5 牵引性能测试曲线

在111~139 Hz, 牵引性能测试曲线中工作区间的划分与理想牵引性能曲线保持一致。在恒转矩工作区, 测试转矩数据为1 606 N·m, 与理想牵引性能曲线中的转矩值1 554 N·m基本一致。在恒功率工作区, 测试功率数据为271 kW, 与理想牵引性能曲线中的牵引功率值271 kW保持一致。

表2和图6分别为通过制动性能测试得到的测试数据以及性能测试曲线。可得到牵引电机在111~139 Hz频率段运行在调磁控制工作区, 制动电流、

制动功率和电机转矩都随转速的下降而增加，在 111 Hz 频率点，制动电流达到 230 A，制动功率达到 485 kW，回馈电功率达到 448 kW，转矩为 1 365 N·m；

牵引电机在 0~111 Hz 频率段运行在调压控制工作区，电机端电压和制动功率随转速的下降而减小，电机转矩维持在 1 365 N·m。

表2 制动性能测试数据

f/Hz	U/V	I/A	P_1/kW	$\cos \psi$	$N_s/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	$N_t/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	$s/\%$	$T/\text{N}\cdot\text{m}$	P_2/kW	$\eta/\%$
/	/	/	/	/	/	0	/	1 365.1	0	/
49.9	701.5	189.26	201.307	0.875 4	1 497	1 533.5	-2.34	1 365.1	219.215	91.83
78.4	1 099.8	190.10	318.786	0.880 4	2 352	2 387.0	-1.44	1 366.1	341.491	93.35
110.9	1 252.4	229.67	447.739	0.898 7	3 327	3 389.7	-1.85	1 363.5	484.024	92.50
125.1	1 284.4	203.52	408.392	0.902 0	3 753	3 807.4	-1.45	1 098.0	437.804	93.28
139.0	1 287.5	178.05	358.920	0.904 0	4 170	4 223.9	-1.27	879.5	389.054	92.25

对比图 6 制动性能测试曲线与图 3 理想制动性能曲线：调磁控制工作区均运行在 111~139 Hz，调压控制工

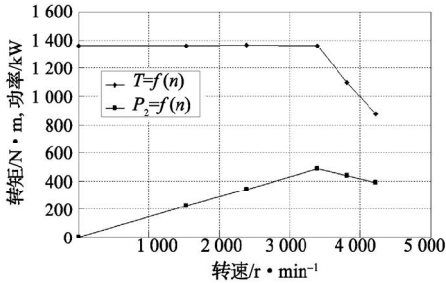


图 6 制动性能测试曲线

作区均运行在 0~111 Hz，制动性能测试曲线中工作区间的划分与理想制动性能曲线保持一致。在调压控制工作区，测试转矩数据恒定在 1 365 N·m，与理想制动性能曲线中的转矩值 1 392 N·m 基本一致。

图 7 为牵引电机在牵引性能测试 78.4 Hz 频率点下的电压、电流波形，电压波形为 PWM 波。

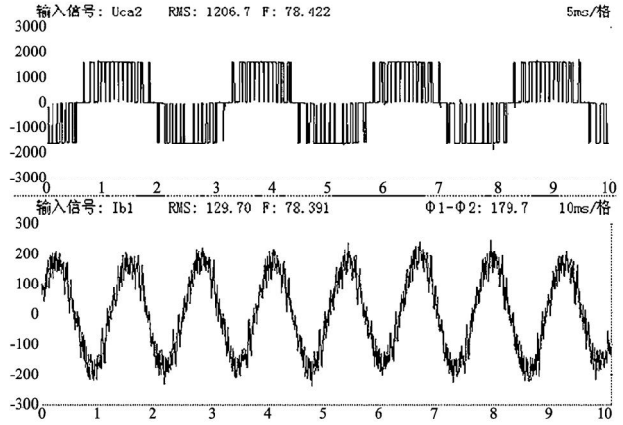
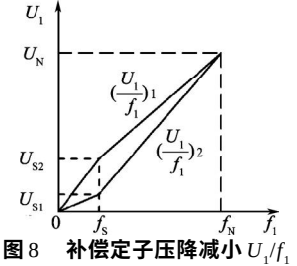


图 7 牵引性能测试电压/电流波形

4.4 关键问题分析

交流牵引电机在启动及停机过程中，均采用恒压频比控制方式，此时应保证 $U_1/f_1=\text{const}$ 的值不能过大。当牵引电机的电枢电压随定子侧频率增长或减小过快时，由式 (7) 可知：牵引电机的气隙磁通 ϕ_m 有可能超出电机所能允许的范围，将会导致励磁电流突然增大，从而对牵引电机的电气、机械性能产生不利的影响。因此在牵引电机启动、停机过程中，应保证压频比的比值不能过大，可采用以下 2 种方法来保证牵引电机的顺利启停。

①适当提高电机的启动电压 U_s ，达到定子压降补偿的目的，可减小主磁通感应电动势 E_1 的上升速率。如图 8 中所示， f_N 为牵引电机额定频率， f_s 为启动频率， U_N 为牵引电机额定电压， U_{s1} 为启动电压， U_{s2} 为补偿定子压降后的启动电压。由图中所示，补偿定子压降提高启动电压 U_s 后，牵引电机的压频比 U_1/f_1 上升速率将显著减小。

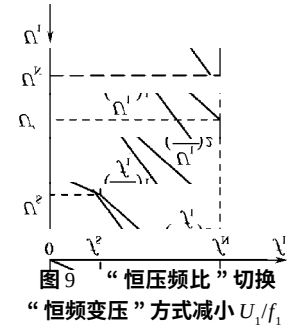


由式 (10) 推得在基频以下的最大电磁转矩表达式为：

$$T_M = \frac{1}{2} \frac{3p}{2\pi} \left(\frac{U_1}{f_1}\right)^2 \frac{f_1}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}} \tag{17}$$

最大电磁转矩 T_M 随 f_1 的降低而减小。因此，在牵引电机开始启动频率很低时， T_M 将限制电动机的带载能力，适当补偿定子压降提高启动电压 U_1 ，也可适当增大牵引电机的电磁转矩，从而增强牵引电机的带载能力。

②不改变牵引电机的启动电压 U_s ，先通过恒压频比控制方式缓慢建立电机磁场，使牵引电机启动到额定频率点时，牵引电机的电枢电压 U' 略低于额定电压 U_N ，再通过恒频变压方式维持额定频率 f_N 不变，将电枢电压逐渐给定至额定电压。利用此方法，牵引电机的压频比 U_1/f_1 上升速率也将显著减小 (图 9)。



在做制动性能测试时，由于在 111 Hz 测试点，190 kW 交流变频牵引电机的制动功率要求达到 485 kW，因此通过扩大对拖机组频差的方法，牵引电机的制动电流将远远超过其额定电流，将会对牵引电机的电气、机械性能产生不利的影响，从而制动功率将达不到制动测试的要求。此时，应适当提高牵引电机的端电压，使其超过电枢电压额定值，从

而达到抑制制动电流的目的。由式(13)可知:在相同的制动电流下,适当提高牵引电机端电压,制动功率将能显著提高,制动功率可以达到制动测试的要求。

5 结论

①针对新型城轨用交流牵引电机的控制方法,对牵引性能的恒转矩、恒功率控制和制动性能的调磁控制、调压控制分别进行了详细的分析,得到了影响牵引电机运行特性的典型参数。同时通过性能测试验证了牵引制动特性的正确性和有效性,可以有效适应城市轻轨的快速、宽范围内的牵引、制动要求。

②将所得结论推广至多台交流牵引电机,可用于描述该类城轨用牵引电机的负荷特性,进而可以将该结论应用于电气化轨道交通负荷特性的相关研究中,从而为研究牵引系统负荷特性的相关工作提供了一种思路和方法。

③目前已对牵引性能、制动性能、牵引制动性能测试等方面进行了研究,今后还应对涉及牵引电机的其他性能和采用牵引电机后对其他设备产生的影响进行深入研究。

参考文献:

[1] 张林德,关振宏. 新型异步牵引电机试验系统的仿真研究

[J]. 节能技术, 2004, 22(127): 28-29.

- [2] 尚敬,刘可安,年晓红,等. 牵引电动机无速度传感器及带速度重投控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(15): 118-123.
- [3] 丁荣军,桂卫华,陈高华. 电力机车交流传动系统的半实物实时仿真[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(4): 96-102.
- [4] 李益丰,高培庆,谷细凤. 逆变器供电的异步牵引电机特性曲线的计算[J]. 机车电传动, 1997(6): 8-11.
- [5] Ehsani M, Yimin Gao, Gay S. Characterization of electric motor drives for traction applications [J]. Industrial Electronics Society, 2003, 1:891-896.
- [6] 渡边朝纪,福田典子. 高速列车机车车辆的牵引性能[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(4): 32-36.
- [7] 丁荣军. 交流传动机车牵引特性曲线与变流器—牵引电机系统的匹配[J]. 机车电传动, 1999(6): 14-16.
- [8] Ansaldo Breda. Traction Motor of CEMF-C2010-001 Type and Routine test programme for the MTA A4-200V Traction motor [S]. Italy: Ansaldo Breda, 2010.
- [9] WANG Yuhua, MIAO Jianlin, WEI Yuanfang. The Research of Traction Motor Energy-Saving Regenerative Braking Control Technology [J]. 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2010, 3:930-933.
- [10] SHU Wen, GUO Jun, TONG Laisheng, WU Guangning. Study on effect of voltage distortion on insulation of variable-frequency adjustable-speed traction motor [C] // 2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2005:249-252.