

铁道车辆的磁阻电动机(PRM)和逆变器控制

神孫子 博 等 (日)

【摘要】 兼用永久磁铁的永磁辅助型磁阻电动机(PRM)是同步电动机的一种。简要介绍该型电动机的主要参数和控制系统的特特点;重点论述电动机与控制装置组合试验的结果。确认系统控制稳定,再生制动时,由永久磁铁产生的感应电压不会导致什么问题。这种电动机可以取代现在的异步牵引电动机。

关键词: PRM 逆变器 参数 控制 再生制动 试验

1 前言

近年来,在电动汽车和驱动空气压缩机用的电动机领域,以高效、节能为目标的磁阻电动机正在加紧开发。

现在,铁路车辆用的牵引电动机中,三相异步电动机是主流,但为了提高效率、降低运行时的噪声、改善性价比,不久前对磁阻电动机的适用性进行了研究。这里就所开发的兼用永久磁铁的永久磁铁辅助型磁阻电动机(PRM)主电路系统作一论述。

2 车辆主要参数

作为磁阻电动机开发前提条件的车辆,其主要参数见表1。

表1 车辆主要参数

编 组	相当于 4M6T
车轮直径/mm	新制 860(最小>774)
驱动方式	平行万向节驱动(齿数比 7.071)
编组重量/t	空车 254.9,最大荷重时 454.9
最高速度/km·h ⁻¹	120
启动加速度/m·s ⁻²	0.649(空车~最大荷重)
减速度/m·s ⁻²	减速度 1.167(常用最大)
预期粘着系数	M车平均 18.5%以上
接触网电压/V	牵引:DC1 500,再生:DC1 650

3 牵引电动机主要参数和特性试验结果

3.1 牵引电动机主要参数

以表1的车辆参数为前提,设计、试制的磁阻电动机的参数如表2所示。

表2 牵引电动机主要参数

牵引电动机	永久磁铁辅助型磁阻电动机
冷却方式	全封闭自冷
定额	持续:80 kW-750 V-84 A-2 400 r/min 小时:95 kW-830 V-92 A-2 400 r/min
效率/%	94.0(小时定额时)
功率因数/%	77.0
极数	8
最高使用转速/r·min ⁻¹	5 820
空载感应电压/V	952(在 5 820 r/min 时)
结构特征	装有冷却装置的完全密闭结构
重量/kg	455

3.2 特性试验结果

图1是所试制磁阻电动机的输出转矩要求的电流特性(逆变器驱动、热态)设计值和实测值比较。额定转矩的特性试验结果示于表3。

根据图1和表3,可以得出以下几点:

(1)为得到设定的转矩,所需要的电流低于计划值(即计划电流值可得到超过设定值的转矩)。

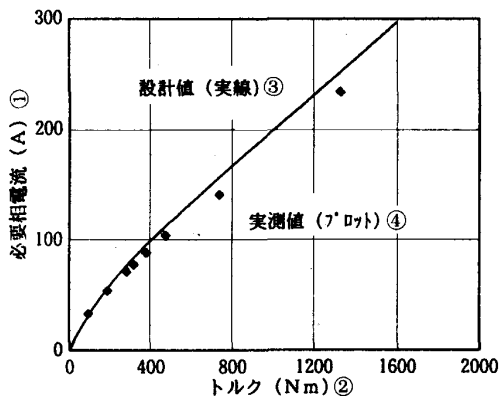


图1 试制样机的输出转矩要求的电流特性
①要求的相电流;②转矩;③设计值(实线);④实测值(点)

表 3 额定负荷特性试验结果(热态)

	设计值	实际负荷 逆变器	实际负荷 正弦波	实际负荷 逆变器
驱动电源	—	逆变器	正弦波	逆变器
频率	160	160	150	150
电压/V	830	1 040	899	990
电流/A	92	89	90	89
输出功率/kW	95	95.1	89.2	89.2
扭矩/Nm	378.0	378.5	378.5	378.5
效率/%	94.0	93.6	94.1	94.0

注:实测效率中包含了试验设备的传动损失。转矩是介于传动装置后的转矩测量仪的读数。电流、电压以基波有效值表示。

(2) 在与计划值大体同等的效率时,可以比以前 1M 车的效率(约 92%左右)增加 2%。如果扣除传动损失,则效率还可提高(假定传动效率为 99%,则 160 Hz 逆变器传动时的效率可达 94.5%)。

表 4 为 L_d 、 L_q 的测定结果和据此算出的磁阻转矩。由表 4 看,实测磁阻转矩稍大于设计值,可以认为实测值就与设计值大体一致。

表 4 磁阻转矩

	电流/A	L_d /mH	L_q /mH	磁阻转矩/Nm
设计值	92	6.1	1.7	211.8
实测值	90	7.3	2.4	219.7

注:把总扭矩加在一起时的比较。

4 永久磁铁辅助型磁阻电动机控制

4.1 转子位置传感器

永久磁铁辅助型磁阻电动机是同步电动机的一种,它以矢量控制作为手段,能稳定且高精度地控制其输出转矩,用传感器检测电动机转子相对定子的位置(回转角)。回转角检测器是解析器,因为它坚固,因此,即使在振动、电磁、噪声、高温等恶劣环境下,也能稳定、高精度地进行检测。

4.2 转矩控制

图 2 为永久磁铁辅助型磁阻电动机矢量控制框图。把电动机转子永久磁铁的磁通方向定义为 d 轴,把与它垂直的方向定义为 q 轴时,电动机输出转矩为:

$$T_{orq} = \Phi_f \times i_q + (L_d - L_q) \times i_d \times i_q$$

式中,右边第一项为永久磁铁产生的转矩,第二项表示由转子的凸极产生的磁阻转矩成份。由上式可见,即使电流有效值相同,d 轴电流和 q 轴电流的比率不一样,输出的转矩也有变化。

在控制框图中的矢量控制演算部分,是用最小的电流有效值,把能够追踪已给出的转矩指令特性曲线输出转矩的 i_d^* (d 轴指令电流)和 i_q^* (q 轴指令电流)预先测定并作为记忆函数输出。

在低、中速的所谓恒转矩领域,根据电压指令演算及电流反馈,操作输出电压,使电动机流过的电流 i_d 和 i_q 追随电流指令值,以进行电流瞬时值控制。

在高速运转时,以逆变器输出最大恒定电压的单脉冲模式进行控制。对于单脉冲模式,欲使电压振幅固定是不可能的,但可利用电压相位角的快速操作,按转矩的电流成份进行反馈控制,从而实现稳定而快速的电流控制。

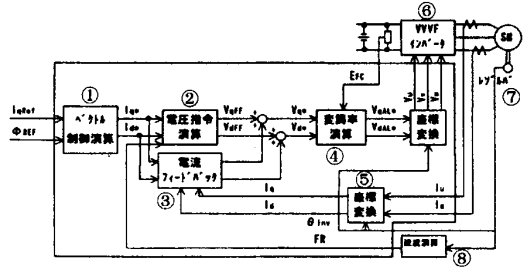


图 2 控制框图

① 矢量控制演算;② 电压指令演算;③ 电流反馈;④ 变频率演算;⑤ 坐标变换;⑥ VVVF 逆变器;⑦ 解析器;⑧ 速度演算

4.3 惰行时的控制

惰行时,与现在的异步电动机同样要关断门电路,但因为这次采用有永久磁铁的 PRM,因而在惰行时会有感应电压产生。若空载感应电压高,惰行时的电动机就会变成发电机而产生再生制动作用,这令人担心。其实,不使用永久磁铁的纯磁阻电动机也有这种担心。出于对功率因数的改善以及系统价格性能等方面考虑,把磁铁用作补充的。

在上述系统中,最高速度时空载感应电压选定为 950 V。

另一方面,因为接触网电压在 900 V~1 800 V,所以在高速区惰行时,如果网压偏低,电流就会从电动机流向电网而产生再生制动作用。由空载感应电压引起惰行的制动力(计算值)如图 3 所示。

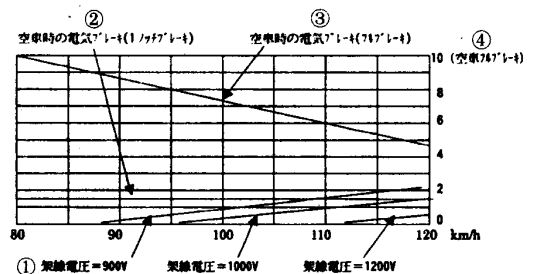


图 3 惰行时的制动力

① 接触网电压;② 空车电制动(1 节制动);③ 空车电制动(全部制动);④ 空车全部制动

通常,网压在 1 300 V~1 700 V 范围内变动,在

1 300 V时没有制动作用;低于 1 200 V、速度为 120 km/h 时,因其制动量只为 1 节空车制动的二分之一左右,可以认为实用上是没有问题的,惰行中只要关断门电路,永久磁铁电动机不进行削弱磁场控制,这是一个进步。

5 与控制装置组合的试验结果

5.1 PRM 控制的特点

(1) 因为是永久磁铁辅助型磁阻电动机,有永久磁铁,所以能最大限度利用磁阻转矩,并且由永久磁铁产生的空载感应电压低。

(2) 惰行时,与异步电动机一样,仅需关断门电路。牵引和再生时,用单脉冲控制进行最大输出控制。

5.2 试验电路和试验条件

图 4 为试验电路。以实用规模的飞轮作为电动机负荷来进行评价性试验。图 4 中试验接触器的作用是:断开时,PRM 纯粹惰行;合闸时,惰行的 PRM 向电源

输出电流,以便根据电流来测定减速度。另外,在惰行试验时,电源侧接有再生负荷电阻器。

5.3 牵引——再生制动试验

(1) 8 极电动机与通常的异步电动机比较,其频率加倍,无论用异步的、3 脉冲模式或单脉冲模式对电动机都能较好地控制。图 5 为速度在 120 km/h 时牵引、惰行、再生试验曲线。

在异步状态,对 q 轴电流及 d 轴电流作恒流控制。因切换到 3 脉冲模式是进行电流反馈控制的,由于调制率的限制,q 轴电流减少,但可使 d 轴电流增加,从而确保既定的转矩。另外,在单脉冲模式,可以看到 q 轴电流及 d 轴电流与电流指定值不一致,而曲线图上没有表示别的指令值,因此就用电压相位角的快速操作,对转矩电流进行反馈控制。再生制动也与牵引时一样,在高速时由单脉冲模式控制。

(2) 对前进位、后退位、再牵引和前进制动,后退制动、再制动等最为常用的操作位进行了鉴定试验。结果表明,当级位变换时,没有出现电流突变情况,确认了其良好的控制性能。

5.4 惰行试验

在高速作惰行时,对速度和向电源输出电流的情况进行了评价。当电源电压为 1 100 V 并从 120 km/h 开始惰行时,向电源输出的电流在断开触点时为最大值 43 A,随速度降低而减少,到速度为 100 km/h 时则无输出,这时的减速度为 0.136 km/h/s(图 6)。

另外,当把逆变器和电动机隔离作纯粹的惰行时,其减速度为 0.093 km/h/s。

$0.136 \text{ km/h/s} - 0.093 \text{ km/h/s} = 0.043 \text{ km/h/s}$,这减速度就相当于爬 1.3‰ 的坡道,可以说在实际运行中是不成问题的。

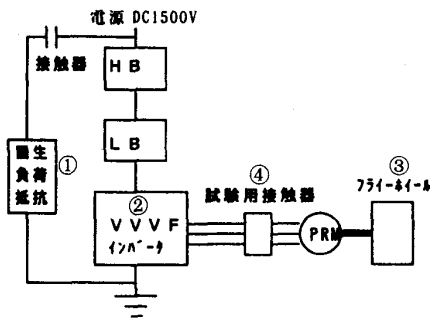


图 4 试验电路

①再生负荷阻抗;②VVF 逆变器;③飞轮;④试验接触器

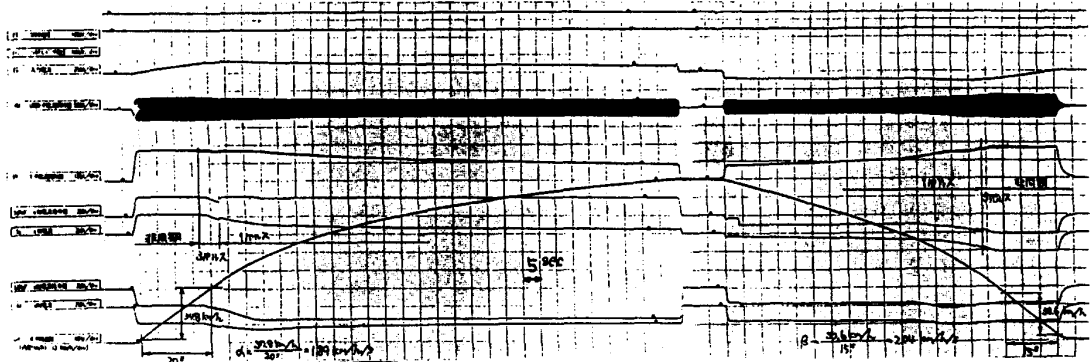


图 5 牵引、惰行、再生试验结果(120 km/h)

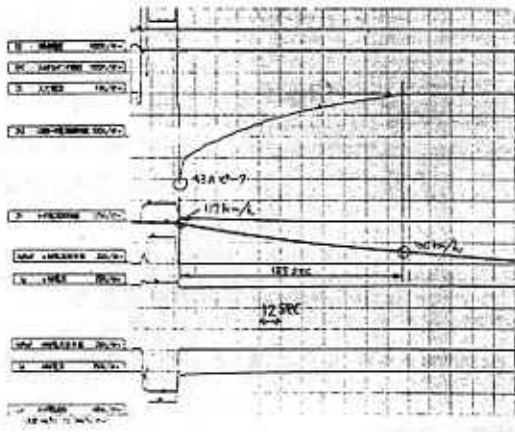


图 6 电源电压 1 100 V、速度 120 km/h 时的情行试验结果

向电源输出电流的减少的情况是：在电源电压为 1 200 V 时，从 120 km/h 开始惰行的输出电流，在断开触点时为 18 A(最大值)，随速度的降低而减少，到速度为 110 km/h，已无输出电流。在电源电压 1 300 V 下，从 120 km/h 开始惰行，在断开触点时输出电流最大值为 2 A，其流动时间仅 1 s。表 5 是上述情况的归纳。

表 5

电源电压/V	惰行开始速度 /km·h ⁻¹	输出终止的速度 /km·h ⁻¹	输出开始电流 /A
1 100	120	100	43
1 200	120	110	18
1 300	120	120	2
纯粹惰行时	120	—	—

本试验是把再生负荷阻抗器接入电源来进行的，输出电流则是电源电压与电动机感应电压的差值除以电动机内部阻抗值而得，由此可作出图 3 的特性曲线。

如上所述，即使在电源电压较低的时候，由于空载感应电压而向电源输出电流也很小，和异步电动机一样仅关断门电路，应该是没有问题的。图 7 为惰行时的电流、电压波形。

5.5 瞬时响应试验(略)

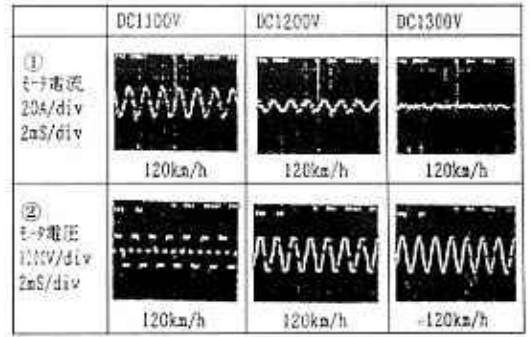


图 7 惰行时电动机电流、电压波形

①电动机电流；②电动机电压

5.6 保护协调的试验结果(略)

6 小结

这个控制系统的开发，可以得出以下几点良好的试验结果：

(1) 不仅对异步、3 脉冲模式、单脉冲模式能进行稳定控制，即使在电源突变、负荷切断的瞬变状态，也有良好的控制性能。

(2) 由于空载感应电压而流向电源的电流很小，同异步电动机一样，仅需关断门电路，不会出现不良情况。

(3) 可以确认在 OVD 保护动作时，OVDRf 自行灭弧的保护方式对 PRM 是没有问题的。

根据这次系统所作的地面试验，可以确认，用磁阻电动机取代现在用的异步电动机驱动，有较多优良特性。

今后，要使主回路系统更加小型化、高效化，以提高性能，降低成本，与此同时，下一步的目标则要用现车进行性能确认。

摘译自《铁道サイバネ・シンポジウム论文集》

第 37 回，2000 年 11 月

译者：彭文生

校者：陈开运