DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2024.02.003

基于初速识别HFI的永磁牵引电机带速启动研究

伊建辉，矫利业，田久东，王　鹏，李梁京
（中车工业研究院（青岛）有限公司，山东 青岛 266109）

摘　要：为解决永磁牵引电机带速启动问题，文章提出了一种基于初速识别高频注入的带速启动技术，研究了脉振正弦波高频注入的技术原理及数学模型，对传统高频注入进行了改进使其适用于带速启动，并进行了仿真计算，同时给出了基于初速识别高频注入的永磁同步电机带速启动策略，设计试验对脉振正弦波高频注入技术以及带速启动策略进行了测试验证。研究得出脉振正弦波高频注入技术可以较高的精度跟踪转子实际位置和转速；基于高频注入的带速启动技术可以准确识别电机启动时的转速，并有效解决不同工况下的电机启动问题；试验验证了初速识别高频注入技术以及带速启动策略。

关键词：永磁同步电机；高频注入；带速启动；饱和凸极；极性辨识

中图分类号：U264.1；TM351　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-128X（2024）02-0025-08

0　引言

永磁同步电机由于其优异的控制性能和显著的节能效果广泛应用于轨道交通领域，采用永磁牵引系统是轨道交通车辆的发展趋势。永磁同步电机运行工况极其复杂，其中带速启动是永磁同步电机运行时常见的一个问题。带速启动是指永磁同步电机启动时电机便已经处于旋转状态，如电力机车过分相区后重新上电、电力机车溜坡状态下启动等，如果此时直接通电驱动电机可能会对牵引控制系统造成损坏，因此在通电驱动电机之前需要对电机的初始转速进行辨识，根据电机的初始转速采取相应的控制策略[1-3]。

永磁同步电机最常用的带速启动方法是在电机上设置速度或位置传感器，实时检测电机的转速，但是这种方法会增加硬件成本，并且会占用电机及控制器的空间，限制了系统的轻量化与小型化；另外还可以通过设置电压传感器获取电机的反电动势信息，根据反电动势信息计算电机转速，但同样会增加硬件成本及系统复杂度。此外，业界提出了无传感器初始转速识别方法，常用的无传感器转速识别方法包括短路电流法和抑制电流法[4-10]。短路电流法是指通过逆变器三相上桥臂或三相下桥臂同时导通，使电机定子绕组中产生短路电流，根据两次短路电流间隔或3次短路电流间隔转子转过的角度计算电机转速，但是这种方法需要考虑短路电流完全释放时间，估算的转子角度及速度可能存在较大误差，且算法处理起来较为复杂；抑制电流法是指通过设置电流环零状态的方式激活逆变器，并采用无位置传感器算法估算电机转子的速度，采用抑制电流法实现电机带速启动时需要在电机控制器上电瞬间抑制冲击电流，并消除电流跟踪控制器的稳态误差。

针对上述永磁同步电机带速启动存在的问题，创新性地提出了一种基于初速识别高频注入（HFI）的永磁同步电机带速启动技术。高频注入（HFI）是目前最为先进的一种无感转子位置辨识技术，可实现零速及低速时转子位置辨识与大负载启动，且具有很高的位置辨识精度，是目前无感转子位置辨识技术的研究热

基金项目：国家重点研发计划资助项目（2021YFB3803001）
通信作者：伊建辉，男，硕士，高级工程师，主要从事轨道交通装备及其控制方面的研究；E-mail: yijianhui@foxmail.com
引用格式：伊建辉, 矫利业, 田久东, 等. 基于初速识别HFI的永磁牵引电机带速启动研究[J]. 机车电传动, 2024(2): 25-32.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.02.003.
Citation：YI Jianhui, JIAO Liye, TIAN Jiudong, et al. A study on starting of permanent magnet traction motor in rotating state based on HFI for initial speed recognition[J]. Electric drive for locomotives,2024(2): 25-32.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.02.003.

点[11-13]。目前高频注入技术的研究主要针对电机零速启动的工况，尚未见针对带速启动工况的研究，因此需要对高频注入技术进行改进以实现电机无感带速启动。本文在研究高频注入技术原理的基础上，建立高频注入的数学模型及仿真模型，对信号获取方式进行优化使其适用于带速启动，给出基于高频注入的永磁同步电机带速启动策略，并设计测试试验进行验证。

1 高频注入

高频注入技术是通过向永磁同步电机定子绕组注入特定形式的信号，由于电机存在结构凸极性或饱和凸极性，电机的位置信息会包含在响应信号中，通过对响应信号进行分离提取得到转子位置信息[14-16]。常用的高频信号注入法主要包括旋转高频电压信号注入法和脉振高频电压信号注入法，旋转高频电压信号注入法主要用于凸极电机，而脉振高频电压信号注入法适用于凸极电机和表贴电机，因此选用适用范围较广的脉振高频电压信号注入法实现电机带速启动[17-19]。

1.1 数学模型

三相永磁同步电机实际同步旋转坐标系 d-q 与估计同步旋转坐标系 $\hat{d}$-$\hat{q}$ 关系如图 1 所示，θ 表示转子实际电角度，$\hat{\theta}$ 表示转子估计电角度。

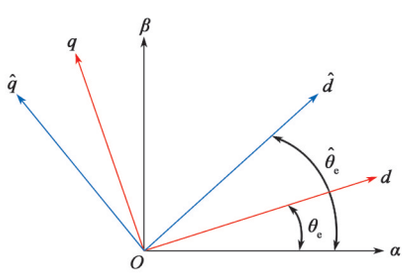


图 1 坐标系关系图

Fig. 1 Coordinate system diagram

根据图 1 可知，转子角度估计误差如式(1)所示。

$$\tilde{\theta}_{\mathrm{e}}=\theta_{\mathrm{e}}-\hat{\theta}_{\mathrm{e}} \tag{1}$$

三相永磁同步电机 d-q 坐标系下的电压方程如式(2)所示。

$$\left.\begin{aligned} u_d&=Ri_d+L_d\frac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t}-\omega_{\mathrm{e}}L_qi_q\\ u_q&=Ri_q+L_q\frac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t}+\omega_{\mathrm{e}}\left(L_di_d+\psi_{\mathrm{f}}\right)\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中：u_d、u_q 分别为直轴及交轴电压；R 为电机相电阻；L_d、L_q 分别为直轴及交轴电感；i_d、i_q 分别为直轴及交轴电流；ω_{e} 为电角速度；ψ_{f} 为永磁体磁链。

由于零速及低速时高频注入信号的频率远高于电机基波频率，此时电阻相比电抗小很多，此时高频激励下电机电压方程简化后如式(3)所示。

$$\left.\begin{aligned} u_{d\mathrm{h}}&\approx L_d\frac{\mathrm{d}i_{d\mathrm{h}}}{\mathrm{d}t}\\ u_{q\mathrm{h}}&\approx L_q\frac{\mathrm{d}i_{q\mathrm{h}}}{\mathrm{d}t}\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式中：$u_{d\mathrm{h}}$、$u_{q\mathrm{h}}$ 分别为直轴及交轴电压高频分量；$i_{d\mathrm{h}}$、$i_{q\mathrm{h}}$ 分别为直轴及交轴电流高频分量。

在估计同步旋转坐标系 $\hat{d}$-$\hat{q}$ 中，高频电压和高频电流关系如式(4)所示。

$$\left.\begin{aligned} \frac{\mathrm{d}\hat{i}_{d\mathrm{h}}}{\mathrm{d}t}&=\frac{1}{L^2-\Delta L^2}\left[\left(L+\Delta L\cos\left(2\tilde{\theta}_{\mathrm{e}}\right)\right)\hat{u}_{d\mathrm{h}}+\Delta L\sin\left(2\tilde{\theta}\right)\hat{u}_{q\mathrm{h}}\right]\\ \frac{\mathrm{d}\hat{i}_{q\mathrm{h}}}{\mathrm{d}t}&=\frac{1}{L^2-\Delta L^2}\left[\left(\Delta L\sin\left(2\tilde{\theta}_{\mathrm{e}}\right)\right)\hat{u}_{d\mathrm{h}}+\left(L-\Delta L\cos\left(2\tilde{\theta}_{\mathrm{e}}\right)\right)\hat{u}_{q\mathrm{h}}\right]\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

式中：L 为平均电感；ΔL 为半差电感。

L 和 ΔL 计算公式如式(5)所示。

$$\left.\begin{aligned} L&=\frac{L_d+L_q}{2}\\ \Delta L&=\frac{L_q-L_d}{2}\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

脉振高频电压信号注入法只在 $\hat{d}$ 轴注入高频正弦电压信号，注入信号形式如式(6)所示。

$$\left.\begin{aligned} \hat{u}_{d\mathrm{h}}&=u_{\mathrm{in}}\cos\left(\omega_{\mathrm{in}}t\right)\\ \hat{u}_{q\mathrm{h}}&=0\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

式中：u_{in} 为注入的高频电压信号幅值；ω_{in} 为注入的高频电压信号频率。

可得高频响应电流如式(7)所示。

$$\left.\begin{aligned} \hat{i}_{d\mathrm{h}}&=\frac{u_{\mathrm{in}}\sin\left(\omega_{\mathrm{in}}t\right)}{\omega_{\mathrm{in}}\left(L^2-\Delta L^2\right)}\left(L+\Delta L\cos\left(2\tilde{\theta}_{\mathrm{e}}\right)\right)\\ \hat{i}_{q\mathrm{h}}&=\frac{u_{\mathrm{in}}\sin\left(\omega_{\mathrm{in}}t\right)}{\omega_{\mathrm{in}}\left(L^2-\Delta L^2\right)}\Delta L\sin\left(2\tilde{\theta}_{\mathrm{e}}\right)\end{aligned}\right\} \tag{7}$$

1.2 位置信息获取

从式(7)可以看出，$\hat{q}$ 轴高频响应电流包含了转子角度估计误差信息，当转子位置误差为零时，$\hat{q}$ 轴高频响应电流也等于零，因此可以通过对 $\hat{q}$ 轴高频响应电流进行相应的信号处理，作为转子位置跟踪观测器的输入信号，从而得到电机转子的位置和速度。

将 $\hat{q}$ 轴高频响应电流 $\hat{i}_{q\mathrm{h}}$ 与调制信号 $\sin\left(\omega_{\mathrm{in}}t\right)$ 相乘，再经过低通滤波器 LPF 后可以得到转子位置跟踪观测器的输入信号 $f\left(\tilde{\theta}_{\mathrm{e}}\right)$，如式(8)所示。

$$f\left(\tilde{\theta}_{\mathrm{e}}\right)=\mathrm{LPF}\left(\hat{i}_{q\mathrm{h}}\sin\left(\omega_{\mathrm{in}}t\right)\right)=\frac{u_{\mathrm{in}}\Delta L}{2\omega_{\mathrm{in}}\left(L^2-\Delta L^2\right)}\sin\left(2\tilde{\theta}_{\mathrm{e}}\right) \tag{8}$$

由于转子位置误差非常小，因此可以对式(8)进行线性化处理，如式(9)所示。

$$f\left(\tilde{\theta}_{\mathrm{e}}\right)\approx\frac{u_{\mathrm{in}}\Delta L}{2\omega_{\mathrm{in}}\left(L^2-\Delta L^2\right)}2\tilde{\theta}_{\mathrm{e}}=2k\tilde{\theta}_{\mathrm{e}} \tag{9}$$

式中：$k=\dfrac{u_{\text{in}}\Delta L}{2\omega_{\text{in}}\left(L^2-\Delta L^2\right)}$。

根据式(9)采用锁相环PLL可以得到电机转子的角度和速度，采用的锁相环控制框图如图2所示。

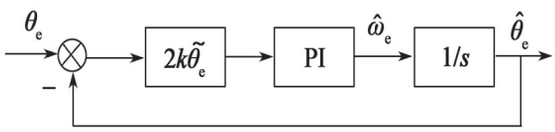


图2　锁相环转子角度及速度估算框图

Fig. 2　Block diagram for estimating rotor angle and speed by using phase-locked loop

1.3　极性辨识

由于$f\left(\tilde{\theta}_{\text{e}}\right)$与$2\tilde{\theta}_{\text{e}}$直接相关，因此当转子角度收敛时有可能收敛到真实值，也有可能收敛到与真实值相差180°的相反方向，此时需要对极性进行辨识，如果不进行极性辨识的话可能会造成电机反转。

极性辨识利用电机的饱和凸极特性，当在直轴上通入正向电流时，此时永磁体产生的磁场方向和直轴电流产生的磁场方向一致，直轴磁路会出现饱和现象，对应的直轴电感值增大，从而使电流减小；当在直轴上通入负向电流时，直轴磁路仍处于线性段，对应的直轴电感值不变，电流不发生变化。

2　高频注入改进及仿真计算

2.1　高频注入改进

传统脉振高频注入技术对Park变换后的d轴电流并没有进行处理便用于极性辨识，主要是由于传统高频注入主要针对电机静止状态下启动，而电机静止状态下启动时可以认为d轴电流只有高频响应电流，但是当电机处于转动状态下时会有基频分量，需要加入带通滤波器滤除基频分量及其他高频杂波分量，否则电机带速启动时会影响极性辨识的正确性导致电机反转。鉴于此对传统的脉振高频注入技术进行了改进，使其可以实现初始转速识别，改进后的永磁同步电机脉振高频注入控制结构框图如图3所示，不仅可以实现角度快速收敛，并且可以实现带速启动时正确地进行极性辨识。

当永磁同步电机初始转速不为0时，则改进后可以实现初速识别高频注入d轴电流响应与改进前d轴电流响应对比，如图4所示。从图4可以看出，改进前d轴电流响应为高频注入分量与初始转速引起的基波分量叠加而成，幅值响应并没有规律，此时d轴电流如果直接用于极性辨识可能会导致极性辨识失败引起反转；改进后的d轴电流响应仅包含高频注入分量，此时可以根据饱和凸极特性正确实现极性辨识。

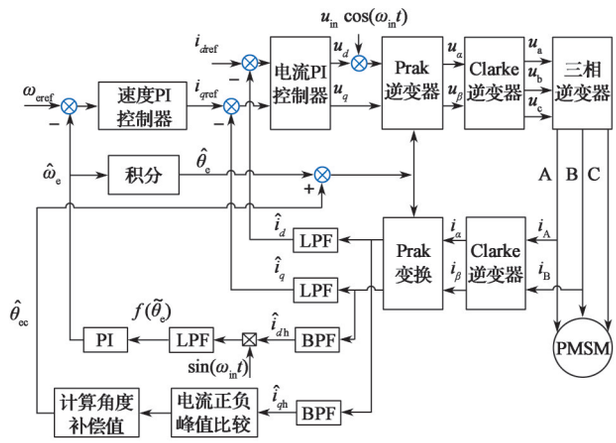


图3　改进后的脉振高频注入控制结构框图

Fig. 3　Block diagram of improved pulsating high-frequency injection control structure

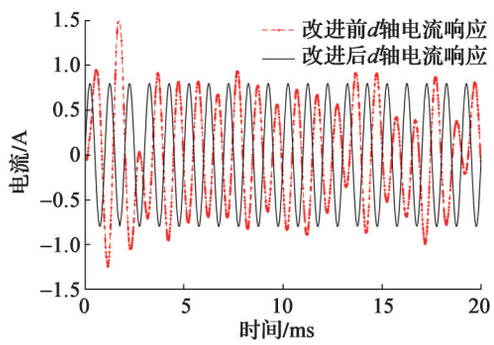


图4　改进前后d轴响应电流对比

Fig. 4　Comparison of d-axis response current before and after improvement

2.2　仿真计算

根据图3建立仿真模型进行仿真测试，仿真模型采用的电机主要技术参数如表1所示，高频注入信号幅值为20 V，频率为1 000 Hz，目标转速设置为150 r/min。

表1　电机主要技术参数

Table 1　Main technical parameters of the motor

序号	参数	参数值或说明
1	电机类型	PMSM
2	功率/W	1 000
3	电压/V	AC 380
4	额定转速/(r·min^{-1})	3 000
5	额定电流/A	1.8
6	磁极对数	3
7	相电阻/Ω	3.22
8	相电感/mH	0.083
9	直流侧电压/V	510
10	永磁体磁链/Wb	0.28

首先对转子的角度位置进行了仿真测试，如图5所示，通过脉振正弦波高频注入计算出的转子估算角度可以很好地跟踪转子实际角度，但是转子角度估算值相比实际值会有一定的相位延迟，这主要是由于使用

了带通滤波器BPF和低通滤波器LPF造成的。同时根据图5可以计算出转子的电转速为450 r/min、机械转速为150 r/min，可以达到设置的参考转速。

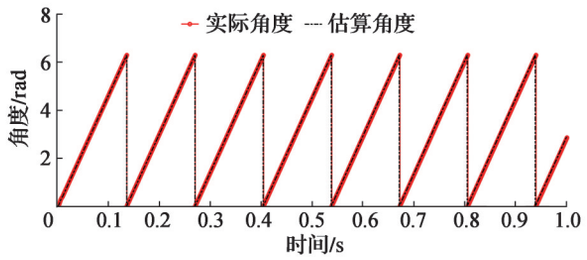


图5　转子角度仿真测试

Fig. 5　Simulation test of rotor angle

在对转子角度仿真测试的基础上对转子角度误差进行了仿真测试，如图6所示。从图6可以看出，大部分时间转子角度误差在0附近波动，说明脉振正弦波高频注入估算出的转子角度与转子实际角度误差很小。对图6进行分析可知，有些点的角度误差值很大，在−6.28 rad左右，并且呈规律地出现，这是由于采用滤波器的原因致使转子角度估算值相对于转子角度实际值有一定的相位延迟，当转子实际位置达到0左右时，而转子观测位置还在6.28 rad附近，这样便会造成−6.28 rad的较大误差，这也与图5表现出的规律一致。

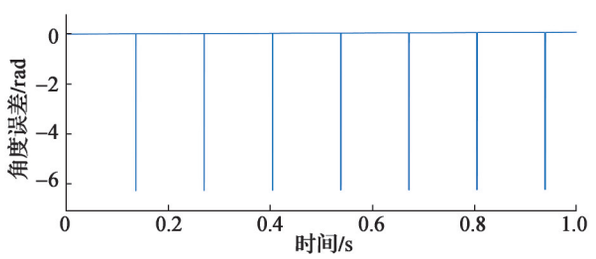


图6　转子角度误差仿真测试

Fig. 6　Simulation testing of rotor angle error

对转子角度及其误差仿真测试之后进一步对转速进行了仿真测试，如图7所示。从图7可以看出，估算转速曲线与实际转速曲线基本重合，可以高精度跟踪目标转速150 r/min。

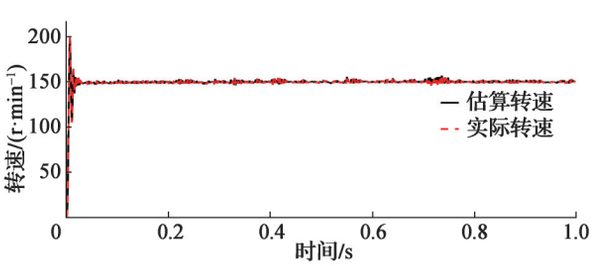


图7　转子转速仿真测试

Fig. 7　Simulation test of rotor speed

对d轴、q轴的高频及基频响应电流进行了仿真测试，如图8所示。图8中d轴、q轴的响应电流包含了基波信号以及高频信号，从图8可以看出，d轴电流以0为中心对称波动且波动幅值较大，q轴电流相比d轴电流波动很小。

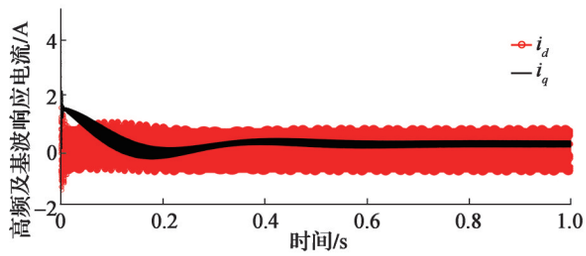


图8　高频及基频响应电流

Fig. 8　High frequency and fundamental frequency response current

图9为通过低通滤波器LPF获取的d轴、q轴基频响应电流，电流稳定之后d轴电流接近于0值，q轴电流为0.25 A左右，基频响应电流结果与采取的i_d=0控制策略一致。

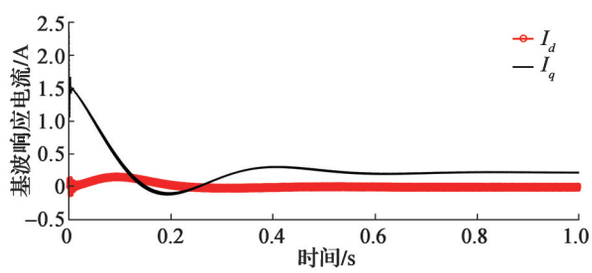
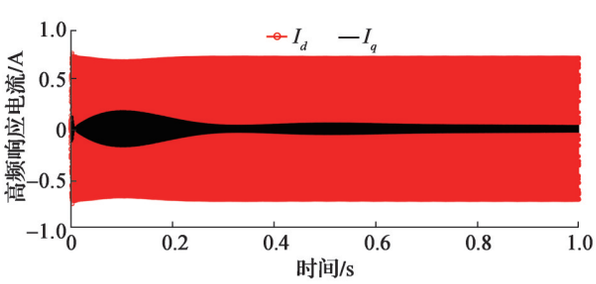


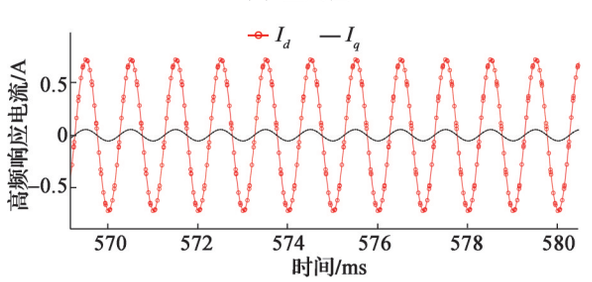
图9　基频响应电流

Fig. 9　Fundamental frequency response current

图10为通过带通滤波器BPF获取的d轴、q轴高频响应电流。从图10可以看出，d轴、q轴高频响应电流均以0值为对称轴，且d轴、q轴高频响应电流的频率均为1 000 Hz，与d轴高频注入电压频率保持一致。d



（a）全局图



(b) 局部放大图

图10　高频响应电流

Fig. 10　High frequency response current

轴高频响应电流幅值为0.7 A左右，而q轴高频响应电流幅值则非常小，仅为0.05 A左右，这也是选择往d轴注入高频信号的原因，不会产生大的q轴电流，从而避免了高频转矩引起转子抖动。

3　带速启动策略

为实现永磁同步电机的带速启动首先需要对初始转速进行预处理，初始转速预处理主要包括初始转速大小及转向识别、制动刹停等，其中最主要的是进行初始转速大小及转向识别，初始转速大小及转向识别可以采用上文提出的初速识别脉振正弦波高频注入技术实现。

基于初速识别高频注入的永磁同步电机带速启动策略如图11所示。首先使转子角度估算值收敛，然后根据电机的饱和凸极特性进行极性辨识，极性辨识完成之后开始进行转速计算；当转速为0时说明电机处于静止状态，此时从0速开始正常启动即可，低速时采用脉振正弦波高频注入（HFI）计算转子角度及速度，当转速升高之后随着频率上升此时高频注入不再适用，此时将切换到适用于高速的滑模观测器SMO计算转子角度和速度，调速至设定转速后启动结束；当转速不为0时要对转速正负进行检测，当转速为正时如果转速较低不满足高速切换要求，则低速采用脉振正弦波高频注入（HFI）计算转子角度及速度，当转速较高时满足高速切换要求，则采用滑模观测器SMO计算转子角度和速度；当转速为负时如果转速小于制动刹停转速，则制动刹停后再采用脉振正弦波高频注入（HFI）计算转子角度及速度，如果转速大于制动刹停转速，则等待转速降低后再重新启动。

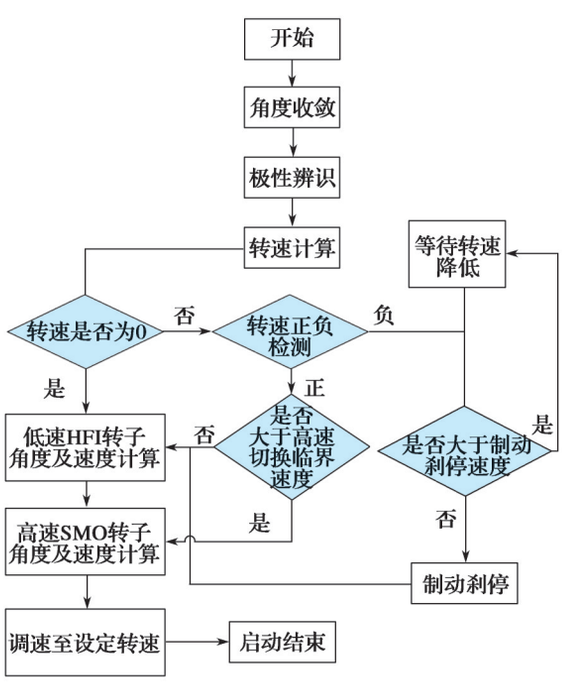


图11　基于高频注入的带速启动策略

Fig. 11　Starting strategy in rotating state based on high-frequency injection

4　试验测试

对改进后的初速识别脉振正弦波高频注入技术以及永磁同步电机带速启动策略通过试验测试进行验证，试验测试采用的电机主要技术参数见表1。

4.1　试验系统及方案

试验测试系统主要由电机控制器、电机及扇叶、示波器、上位机、鼓风机等组成，如图12所示，其中控制器为自研1 kW电机控制器，为了模拟永磁同步电机带速启动工况，采用鼓风机吹动电机扇叶，产生不同的初始转速。

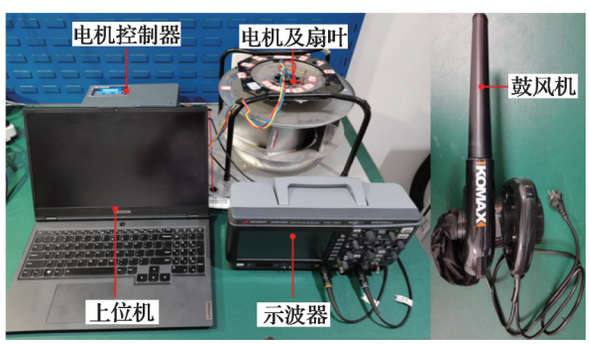


图12　试验测试系统

Fig. 12　Test system

采用上述试验测试系统首先对脉振正弦波高频注入技术进行试验验证，主要对高频注入估算的角度及速度、极性辨识进行了测试验证；其次对基于高频注入的永磁同步电机带速策略进行了试验验证，验证分以下几种工况进行：静止状态下启动，正向小于高速切换临界速度200 r/min下启动，正向大于高速切换临界速度200 r/min下启动，反向小于制动刹停速度−350 r/min下启动，反向大于制动刹停速度−350 r/min下启动。

4.2　高频注入试验测试

对脉振正弦波高频注入计算的角度及速度与电机位置传感器测量的角度及速度进行了对比分析，并测试了饱和凸极特性。

目标转速设定为150 r/min，转速稳定之后对高频注入的角度值及速度值进行测试分析。图13为角度试验测试曲线。从图13可以看出，高频注入计算的角度可以很好地跟踪传感器测量的角度，由于采用滤波器的原因高频注入计算的角度相比传感器测量的实际角度会有一定的相位延迟，这与前述的仿真结果一致。

图14为速度试验测试曲线。从图14可以看出，当目标转速设置为150 r/min时高频注入计算的转子速度可以以很小的误差跟踪传感器测量的转子实际速度，

转速误差可以控制在 2 r/min 以内，具有很好的转速精度。

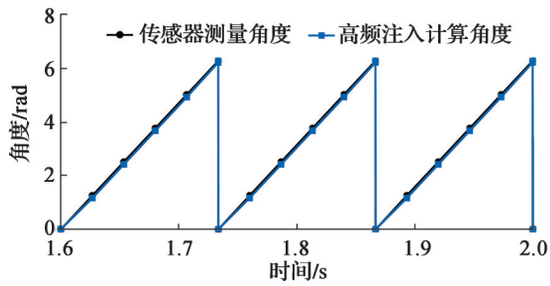


图 13　角度试验测试

Fig. 13　Angle test

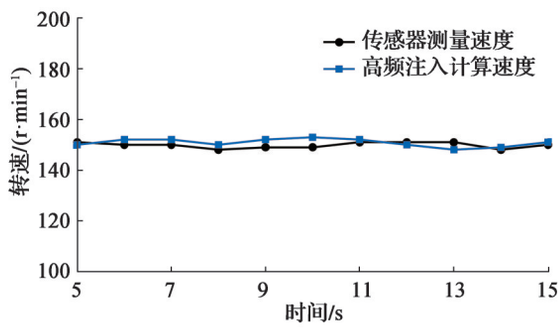


图 14　速度试验测试

Fig. 14　Speed test

图 15 为饱和凸极特性测试曲线，当注入高频信号角度与 d 轴重合时引起的高频响应电流称为正饱和响应，当注入高频信号角度与 d 轴相差 180°时引起的高频响应电流称为负饱和响应。正饱和响应时正半轴电流峰值为 0.6 A，小于负半轴电流峰值 0.7 A，此时无须对估算的角度进行补偿；负饱和响应时正半轴电流峰值为 0.7 A，大于负半轴电流峰值 0.6 A，此时需要对估算的角度补偿 180°。

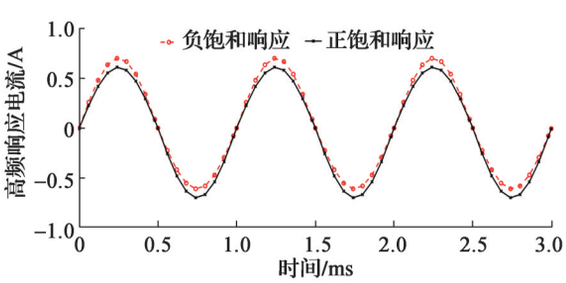


图 15　饱和凸极特性测试

Fig. 15　Saturated salient pole characteristic test

4.3　带速启动试验测试

为验证基于高频注入的永磁同步电机带速启动策略，对零速启动、正向初始转速启动、负向初始转速启动工况进行了试验测试。

零速启动测试转速如图 16 所示，设定目标转速为 600 r/min，当速度小于 200 r/min 时采用高频注入计算转子角度和速度，当速度大于 200 r/min 时采用滑模观测器计算转子角度和速度，最终转速稳定在 600 r/min。

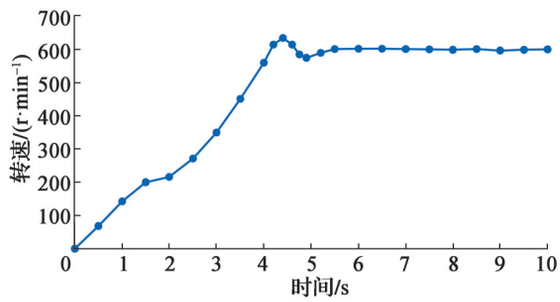


图 16　零速启动

Fig. 16　Zero speed start

正向启动测试如图 17 所示，正向小于高速切换临界转速 200 r/min 启动测试时设置初始启动转速为 100 r/min，启动时将在 100 r/min 转速的基础上直接采用高频注入（HFI），当转速大于 200 r/min 时切入滑模观测器 SMO，最终目标转速为 600 r/min。正向大于高速切换临界转速 200 r/min 启动测试时设置初始启动转速为 350 r/min，启动时将在 350 r/min 转速的基础上切入滑模观测器 SMO，最终目标转速为 600 r/min。

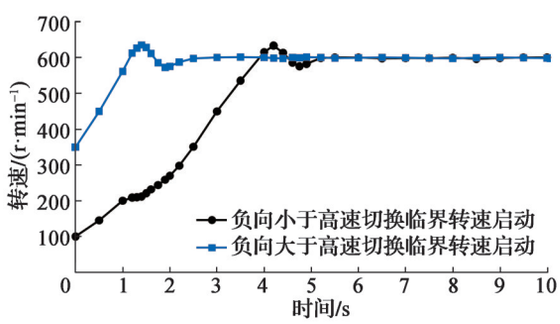


图 17　正向启动

Fig. 17　Forward start

负向启动测试如图 18 所示，负向小于制动刹停转速 −350 r/min 启动时设置初始启动转速为 −300 r/min，启动时先执行制动刹停，在 1.5 s 左右转速降为 0，之后执行与零速启动相同的控制策略，最终达到目标转速 600 r/min；负向大于制动刹停转速 −350 r/min 启动时设置初始启动转速为 −400 r/min，由于此时负向转矩较大，不足以提供制动力将电机制动刹停，此时执行等待策略，待转速降低后再进行相应控制。

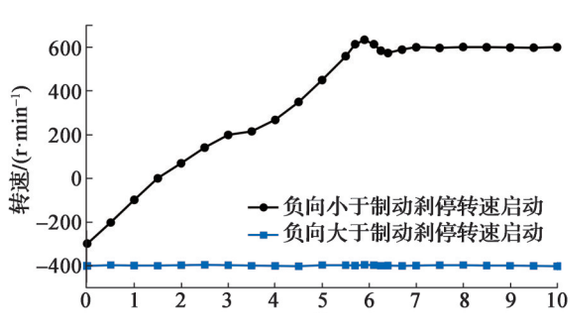


图 18　负向启动

Fig. 18　Negative start

5　结论

为解决永磁牵引电机带速启动问题，本文提出了一种基于初速识别高频注入的永磁同步电机带速启动策略，研究了脉振正弦波高频注入的技术原理，建立了高频注入的数学模型及仿真模型，对信号获取方式进行优化使其适用于带速启动，给出了基于高频注入的永磁同步电机带速启动策略，并设计试验对初速识别脉振正弦波高频注入技术以及带速启动策略进行测试验证。形成的研究结论如下：

①通过仿真测试及试验测试验证了脉振正弦波高频注入技术可以以较高的精度准确跟踪转子实际位置和转速，但由于采用了多个滤波器会导致高频注入估算的转子位置与实际位置有一定的相位延迟。

②基于初速识别高频注入的永磁同步电机带速启动策略可以准确识别电机启动时的转速，并根据起始转速有效地解决静止启动、正向启动、负向启动等不同工况下的电机启动问题。

③通过设计试验测试验证了脉振正弦波高频注入技术估算转子位置的准确性以及基于饱和凸极特性极性辨识方法的可行性，同时验证了基于初速识别高频注入带速启动策略的正确性。

参考文献：

[1] 熊成林, 冯晓云, 宋文胜. 牵引电动机无速度传感器带速重投解决方案[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(5): 820-825.
XIONG Chenglin, FENG Xiaoyun, SONG Wensheng. Solution for speed sensorless control system restarting at unknown speed of traction motor[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2012, 47(5): 820-825.

[2] 丁荣军, 桂卫华, 尚敬. 感应电机无速度传感器控制带速重投研究[J]. 机车电传动, 2008(3): 12-14.
DING Rongjun, GUI Weihua, SHANG Jing. Study on restarting at unknown speed with speed-sensorless control of induction motor[J]. Electric drive for locomotives, 2008(3): 12-14.

[3] 杨北辉, 钟立群, 朱龙胜. 轨道交通异步牵引电机无速度传感器矢量控制技术分析[J]. 现代城市轨道交通, 2019(9): 29-35.
YANG Beihui, ZHONG Liqun, ZHU Longsheng. Analysis of speed sensorless vector control technology for asynchronous traction motor in rail transit[J]. Modern urban transit, 2019(9): 29-35.

[4] 赵赫, 黄科元, 周佳新, 等. 适用于高速永磁同步电机的带速重投策略[J]. 电力电子技术, 2021, 55(6): 19-21.
ZHAO He, HUANG Keyuan, ZHOU Jiaxin, et al. The speed sensorless restart strategy of high-speed PMSM[J]. Power electronics, 2021, 55(6): 19-21.

[5] 耿运全, 何致远, 王子辉, 等. 基于电流谐振跟踪的热泵永磁风机无位置传感器带速启动研究[J]. 汽车技术, 2023(4): 36-43.
GENG Yunquan, HE Zhiyuan, WANG Zihui, et al. Research on sensorless coasting startup strategy of permanent magnet fan for heat pump based on current resonant tracking[J]. Automobile technology, 2023(4): 36-43.

[6] SEO D W, BAK Y, LEE K B. An improved rotating restart method for a sensorless permanent magnet synchronous motor drive system using repetitive zero voltage vectors[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2020, 67(5): 3496-3504.

[7] 高雅, 刘卫国, 骆光照. 大惯量负载永磁同步电机断电-寻优重投控制系统[J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 62-69.
GAO Ya, LIU Weiguo, LUO Guangzhao. A large inertia load PMSM power down-rejoining on optimizing control system[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2014, 29(5): 62-69.

[8] YANG S C, LORENZ R D. Surface permanent magnet synchronous machine position estimation at low speed using eddy-current-reflected asymmetric resistance[J]. IEEE transactions on power electronics, 2012, 27(5): 2595-2604.

[9] HORIE T, KONDO K. Experimental study on a restarting procedure at coasting condition for a rotation angle sensorless PMSM[J]. IEEJ journal of industry applications, 2014, 3(2): 131-137.

[10] YAMAKAWA T, WAKAO S, KONDO K, et al. Starting procedure of rotation sensorless PMSM at coasting condition for railway vehicle traction[J]. Electrical engineering in Japan, 2009, 169(2): 56-63.

[11] 吕德刚, 姜国威, 纪堂龙. 永磁同步电机低速域改进高频脉振注入控制[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2022, 27(6): 32-40.
LYU Degang, JIANG Guowei, JI Tanglong. Improved high frequency pulse injection control in low speed domain of permanent magnet synchronous motor[J]. Journal of Harbin university of science and technology, 2022, 27(6): 32-40.

[12] SERGEANT P, DE BELIE F, MELKEBEEK J. Rotor geometry design of interior PMSMs with and without flux barriers for more accurate sensorless control[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2012, 59(6): 2457-2465.

[13] 李浩源, 张兴, 杨淑英, 等. 基于高频信号注入的永磁同步电机无传感器控制技术综述[J]. 电工技术学报, 2018, 33(12): 2651-2664.
LI Haoyuan, ZHANG Xing, YANG Shuying, et al. Review on sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on high-frequency signal injection[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2018, 33(12): 2651-2664.

[14] 章回炫, 范涛, 国敬, 等. 永磁同步电机位置信号误差的影响分析及消除[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(增刊 1):

294-302.
ZHANG Huixuan, FAN Tao, GUO Jing, et al. Analysis and elimination of position signal error of permanent magnet synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40 (Suppl 1): 294-302.
[15] BIERHOFF M H. A general PLL-type algorithm for speed sensorless control of electrical drives[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2017, 64(12): 9253-9260.
[16] 宋金星, 张倩, 叶超, 等. 基于高频方波注入的永磁同步电机转矩脉动抑制策略[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(18): 7779-7786.
SONG Jinxing, ZHANG Qian, YE Chao, et al. Torque ripple suppression strategy for permanent magnet synchronous motor based on high frequency square wave injection[J]. Science technology and engineering, 2023, 23(18): 7779-7786.
[17] 刘伟, 刘浩民. 改进的脉振高频注入永磁同步电动机无传感器控制[J]. 电气技术, 2023, 24(6): 6-12.
LIU Wei, LIU Haomin. Improved sensorless control for pulsating high frequency signal injection of permanent magnet synchronous motor[J]. Electrical engineering, 2023, 24(6): 6-12.
[18] 杨红, 杨勇, 李生明. 基于高频信号注入的同步电机无传感器控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(4): 76-81.
YANG Hong, YANG Yong, LI Shengming. Sensorless control of synchronous motor based on high frequency signal injection[J]. Modular machine tool & automatic manufacturing technique, 2023(4): 76-81.
[19] 于安博, 刘利, 阚志忠, 等. 高频脉振信号注入永磁同步电机无滤波器初始位置辨识方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(4): 801-809.
YU Anbo, LIU Li, KAN Zhizhong, et al. Initial position identification of PMSM with filterless high frequency pulse signal injection method[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2021, 36(4): 801-809.

A study on starting of permanent magnet traction motor in rotating state based on HFI for initial speed recognition

YI Jianhui, JIAO Liye, TIAN Jiudong, WANG Peng, LI Liangjing

(CRRC Research Institute Qingdao Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266109, China)

Abstract: To solve the starting problem of permanent magnet traction motors in rotating state, this paper proposes a starting technology based on high-frequency injection (HFI) for initial speed recognition in rotating state. The technical principle and mathematical model of high-frequency injection of pulsating sine wave were studied, and the traditional high-frequency injection was improved to make it suitable for starting in rotating state, simulation calculation was carried out. Besides, a starting strategy for permanent magnet synchronous motor in rotating state was proposed based on high-frequency injection for initial speed recognition, and tests were designed to test and verify the pulsating sine wave high-frequency injection technology and the starting strategy in rotating state. Through research, it concluded that the pulsating sine wave high-frequency injection technology can track the actual position and speed of the rotor with high accuracy; the starting technology based on high-frequency injection in rotating state can accurately identify the speed of the motor when it starts up and effectively solve the motor starting problems under different working conditions. The test verifies the high-frequency injection technology for initial speed recognition and the starting strategy in rotating state.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; high-frequency injection; starting in rotating state; saturated salient pole; polarity identification

收稿日期：2023-11-08；修回日期：2024-03-01