

一种永磁同步电动机转子初始位置检测方法

何栋炜¹, 方仁桂², 高 培³

(¹福建工程学院, 福州 350119; ²福建省计量科学研究院, 福州 350001; ³福建对外经济贸易职业技术学院, 福州 350000)

摘要:针对永磁同步电动机转子初始位置检测问题, 利用估计坐标系下输入高频电压, 永磁同步电动机响应电流包含转子位置信息的特性, 提出了一种检测方法。并使用 MATLAB/Simulink 工具箱来建立仿真模型, 对所提出方法的正确性及性能进行验证。仿真实验表明: 所提出方法可以快速准确地检测出永磁同步电动机转子初始位置, 并且方法简单无需设计滤波器, 所需计算量很少, 检测过程时间不受转子位置等因素影响, 符合工程应用要求。

关键词: 永磁同步电动机; 转子初始位置检测; 高频信号注入; 磁极判断

中图分类号: TM931.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-7027(2018)01-0000-00

0 引言

永磁同步电动机

永磁同步电动机在工业领域应用广泛, 其转子初始位置检测是电机控制的关键问题。本文提出一种基于高频信号注入的转子初始位置检测方法, 该方法具有结构简单、检测精度高、不受转子位置影响等优点。

在永磁同步电动机中, 转子初始位置检测是电机控制的关键问题。本文提出一种基于高频信号注入的转子初始位置检测方法, 该方法具有结构简单、检测精度高、不受转子位置影响等优点。

本文主要研究永磁同步电动机转子初始位置检测方法, 通过分析电机特性, 提出一种基于高频信号注入的检测方法, 并验证其可行性和精度。

1 引言

永磁同步电动机控制中, 永磁转子位置信息或多或少影响着系统运行性能。而大量应用增量式编码器和无传感器技术的永磁同步电动机控制系统中, 转子初始位置检测结果直接决定了系统的正常启动与运行性能, 因此转子初始位置检测问题得到了广大研究人员的关注。永磁同步电动机初始位置检测要求在静止情况下获取转子的初始位置^[1], 现有方法大致可分为开环与闭环两种方法。

开环方法是指利用传感器获得电机的响应信号, 间接地推算出转子初始位置。最简单的开环方法即霍尔传感器方法, 其检测精度由传感器的安装密度直接决定。此外, 常见的旋转高频信号注入法也属于该类^[2], 并且在此基础上发展出了基于零序电压^[3]、电压脉冲注入^[4]、转子估计坐标系下高频

信号^[5]等开环方法。

闭环方式是指利用传感器获取当前估计位置上输入激励下(一般是输入电压)电机的响应信号(响应电流), 根据这些信号通过一定的算法获取当前估计位置与真实位置的偏差信息, 并通过一定算法(如锁相环等)调整输入激励, 使得估计位置不断逼近实际位置^[6,7]。

理论上闭环方法可以获得无穷高的检测精度, 但实际中受到采样精度及输出精度等因素影响, 检测精度有限。开环方法的检测结果同样受以上因素影响, 并且容易受到噪声等因素影响。检测时间方面, 闭环方法的检测时间一般不固定, 受转子实际位置和算法收敛速度等因素影响, 而开环方法的检测时间一般为固定(由算法复杂度决定, 不随转子实际位置等因素变化)。此外, 一般开环方法的程序实现相比闭环方法相对简单, 易于实现。

本文利用永磁同步电动机在转子估计坐标系下高频信号注入时, 响应电流与估计位置间的三角函数关系, 提出一种检测方法: 在两个位置进行高频信

收稿日期: 2017-12-15

基金项目: 福建省中青年骨干教师教育科研项目(科技 A 类)(15Y4100); 福建工程学院科研启动基金项目(17Y4100)

号注入,使用所设计的算法从响应电流中推算出转子位置,并通过仿真实验验证方法的正确性及性能。

检测方法原理

永磁同步电动机静止时相量形式电压方程

永磁同步电动机在 $\alpha\beta$ 坐标系下的电压方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_\alpha \\ \dot{U}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d\psi_\alpha}{dt} \\ \frac{d\psi_\beta}{dt} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\dot{U}_\alpha, \dot{U}_\beta$ 分别是定子电压在 α, β 轴上的分量; i_α, i_β 分别是定子电流在 α, β 轴上的分量; R 为绕组电阻; ψ_α, ψ_β 分别是电机电感在 α, β 轴上的分量; ω_e 为电机转子永磁体磁链; ω_e 为转子电角速度。

静止情况下电压方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_\alpha \\ \dot{U}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d\psi_\alpha}{dt} \\ \frac{d\psi_\beta}{dt} \end{bmatrix} \quad (2)$$

考虑稳态时,电压方程记作相量形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_\alpha \\ \dot{U}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} j\omega_e \psi_\alpha \\ j\omega_e \psi_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

记 $\dot{U}_\alpha = U_\alpha \angle \theta_\alpha, \dot{U}_\beta = U_\beta \angle \theta_\beta, i_\alpha = I_\alpha \angle \theta_{i_\alpha}, i_\beta = I_\beta \angle \theta_{i_\beta}$, 可以得到:

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} j\omega_e \psi_\alpha \\ j\omega_e \psi_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

记实际位置为 θ , 估计位置为 $\hat{\theta}$, 估计误差: $\bar{\theta} = \theta - \hat{\theta}$ 。当 $\alpha\beta$ 坐标系与估计位置坐标系间有如下关系:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_\alpha \\ \dot{U}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \bar{\theta} & \sin \bar{\theta} \\ -\sin \bar{\theta} & \cos \bar{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{\hat{\alpha}} \\ \dot{U}_{\hat{\beta}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

将电压方程转换到估计位置坐标系下:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{\hat{\alpha}} \\ \dot{U}_{\hat{\beta}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\hat{\alpha}} \\ i_{\hat{\beta}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d\psi_{\hat{\alpha}}}{dt} \\ \frac{d\psi_{\hat{\beta}}}{dt} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $\dot{U}_{\hat{\alpha}} = U_{\hat{\alpha}} \angle \theta_{\hat{\alpha}}, \dot{U}_{\hat{\beta}} = U_{\hat{\beta}} \angle \theta_{\hat{\beta}}, i_{\hat{\alpha}} = I_{\hat{\alpha}} \angle \theta_{i_{\hat{\alpha}}}, i_{\hat{\beta}} = I_{\hat{\beta}} \angle \theta_{i_{\hat{\beta}}}$ 。

由于结构上的不同,内埋式永磁同步电动机 ($i^* \times D^*$) 具有明显的凸极效应,即 $\psi_{\hat{\alpha}} \neq \psi_{\hat{\beta}}$ 。由式 (6) 响应电流包含转子位置信息 ($\bar{\theta}$); 而理论上表贴式永磁同步电动机 ($D^* \times D^*$) 不具有凸极效应,即 $\psi_{\hat{\alpha}} = \psi_{\hat{\beta}}$, 显然,电流信号不含转子位置

信息。但是通常使主磁路在空载条件下已处于基本饱和状态,故其存在饱和性凸极,因此 $D^* \times D^*$ 也可认为具有一定的凸极效应^[6-8]。

转子初始位置检测方法

在某一假定转子位置 $\hat{\theta}_0$ 下选择注入信号:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{\hat{\alpha}} \\ \dot{U}_{\hat{\beta}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_0 \cos(\omega_e t + \hat{\theta}_0) \\ \dot{U}_0 \sin(\omega_e t + \hat{\theta}_0) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: \dot{U}_0 为注入的电压信号幅值; ω_e 为信号的角频率。记作相量形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{\hat{\alpha}} \\ \dot{U}_{\hat{\beta}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_0 \cos(\omega_e t + \hat{\theta}_0) \\ \dot{U}_0 \sin(\omega_e t + \hat{\theta}_0) \end{bmatrix} \quad (8)$$

则式 (6) 可以记作如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{\hat{\alpha}} \\ \dot{U}_{\hat{\beta}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\hat{\alpha}} \\ i_{\hat{\beta}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} j\omega_e \psi_{\hat{\alpha}} \\ j\omega_e \psi_{\hat{\beta}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

进一步有:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{\hat{\alpha}} \\ \dot{U}_{\hat{\beta}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\hat{\alpha}} \\ i_{\hat{\beta}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} j\omega_e \psi_{\hat{\alpha}} \\ j\omega_e \psi_{\hat{\beta}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

由式 (10) 易得到瞬时表达式:

$$\dot{U}_{\hat{\alpha}} = R i_{\hat{\alpha}} + \omega_e \psi_{\hat{\alpha}} \sin(\omega_e t + \hat{\theta}_0) \quad (11)$$

式中: $\bar{\theta}$ 为假定转子位置 $\hat{\theta}_0$ 对应估计误差, $\bar{\theta} = \theta - \hat{\theta}_0$ 。由于 $\psi_{\hat{\alpha}} \neq \psi_{\hat{\beta}}$, 显然有 $\delta \neq 0$ 。

对式 (11) 进行处理可以得到:

$$\dot{U}_{\hat{\alpha}} = R i_{\hat{\alpha}} + \omega_e \psi_{\hat{\alpha}} \sin(\omega_e t + \hat{\theta}_0) \quad (12)$$

通常,电流采样频率与注入信号频率为整数倍关系,因此使用离散傅里叶 ($1/2$ 周期) 方法可以很容易分离出其中的直流分量的幅值,即:

$$\dot{U}_{\hat{\alpha}} = R i_{\hat{\alpha}} + \omega_e \psi_{\hat{\alpha}} \sin(\omega_e t + \hat{\theta}_0) \quad (13)$$

记:

$$\dot{U}_{\hat{\alpha}} = R i_{\hat{\alpha}} + \omega_e \psi_{\hat{\alpha}} \sin(\omega_e t + \hat{\theta}_0) \quad (14)$$

因此有:

$$\dot{U}_{\hat{\alpha}} = R i_{\hat{\alpha}} + \omega_e \psi_{\hat{\alpha}} \sin(\omega_e t + \hat{\theta}_0) \quad (15)$$

当前估计位置基础上,在 $\hat{\theta}_0 \pm \pi/2$ 位置上注入

相同信号,同理可以得到:

$$\left[\dot{e} \left(\ddot{y}_e \hat{e} \frac{\dot{u}}{u} \right) \ddot{o} \ddot{o} \hat{o} \tilde{Q} \right]_{B\hat{e}} \quad \ddot{a} \ddot{u} \quad \ddot{e} \ddot{o} \ddot{o} \left(\ddot{y} \ddot{y}_e^- \right) \quad \left(\dot{y} \varnothing \right)$$

结合式 (ýü) ý式 (ýø), 易得:

$$\frac{\bar{y} \bar{y}_{\bar{e}} \hat{1} \bar{y} \bar{y}_{\bar{e}} \hat{1} \bar{\partial} \bar{\epsilon} \bar{\partial} \bar{\partial} \bar{\partial}}{[\bar{\epsilon} \bar{y}_{\bar{e}} \hat{e} \bar{u} \bar{a} \bar{u}] \bar{\partial} \bar{\iota} \bar{\partial} (\hat{\partial} \bar{\partial})_{\bar{\epsilon}}]} \quad (\bar{y} \bar{u})$$

$$\ddot{y}_e \hat{=} (\ddot{y}_{\ddot{y}_e} \hat{=} \ddot{y}_{\ddot{y}_e}) \acute{a}\ddot{y} \quad (\acute{y}\tilde{N})$$

即利用两次信号注入的响应电流可以计算得到实际位置与当前估计位置的误差关系 \bar{y}_y , 再由式 (5) 计算得到初步检测结果 y_p 。受转子凸极对称特性影响, 初步检测结果可能落在实际位置 (即 $y_{\frac{1}{2}\pi}$) 上, 因此检测结果需要结合转子磁极位置进行修正, 获得最终检测结果 $y_{p_{\text{修正}}}$ 。综上所述, 本文提出检测方法的实施流程如图 4 所示。

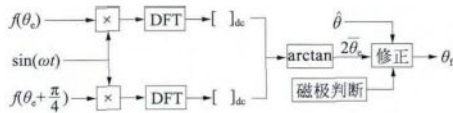


图 9 本文提出检测方法框图

5.2 仿真结果及分析

本文利用 ×÷-éË÷ÓÇDíàæiö¿ 工具箱来建立仿真模型,并完成仿真实验验证所提出方法的正确性及性能。由于 ×÷-éË÷ÓÇDíàæiö¿ 所提供的永磁同步电动机模型不具有实际中的磁路饱和特性,因此为仿真方便,选择 ì×Ð× 作为仿真对象,实验电机参数为:额定功率 ýþþÍ ,额定转速 ÊþþþìÇàió ,绕组电阻 úÚý ÷ ,æ轴电感为 ýÊÚòãñ ,Á轴电感为 ÊúÝãñ ,转子磁链 þÚþÆýøîí ,极对数 üþ Í× 频率为 ýþ¿ñØ ,仿真步长为 ý øð 。选择注入电压信号的频率为 øþþñØ ,幅值为 üþÔ þ 。选取初始估计位置:ý.ÉùÇü。考虑到电流响应的暂态过程,两次激励分别持续 þÚþøð ,计算选取最后一个周期的电流采样结果进行计算。

以实际转子位置为 $\hat{\theta}_r$ 时为例, 对采样电流进行坐标系变化可以获得如图 5 所示的 \hat{i}_α 波形, 选取两个电流响应的最后一个周期的采样结果进行计算, 结合记录下的对应 $\hat{\theta}_r$ 进一步得到如图 6 所示 \hat{e}_α 、 \hat{e}_β 。对这两个结果应

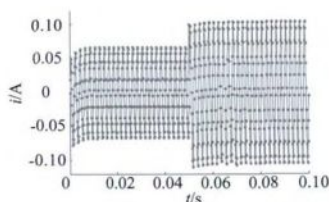


图 5 \bar{A} 轴电流

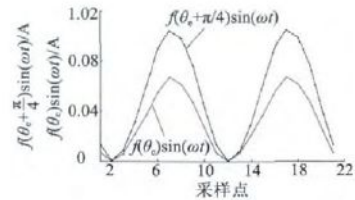


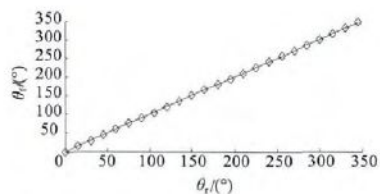
图 4 过程计算结果

用式(16)最终获得初步的检测结果 \hat{y}_b , 再结合磁极判断结果最终获得检测结果 \hat{y}_b^p

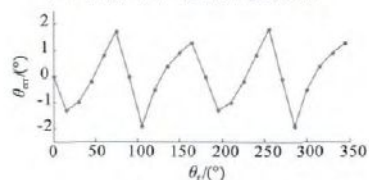
对一个永磁同步电动机的一个电角度周,进行间隔 $\gamma_0 N$ 的转子位置进行测试,结果如表 γ 和图 \bar{u} 所示 p 。由图 \bar{u} 可以看出,使用本文提出算法得到的检测结果与实际位置基本一致,结合表和误差图 $\bar{u}(i)$ ($\bar{y}_{en} \in \bar{y}_0, \bar{u} \bar{y}_i$)可知,检测误差小于 γN ,满足永磁同步电动机的起动要求 p 。

表 9 实验结果

$\bar{\sigma}_\Delta C(\Psi)$	$\bar{y}_\Delta C(\Psi)$	$\bar{\sigma}_\Delta C(\Psi)$	$\bar{\sigma}_\Delta C(\Psi)$	$\bar{\sigma}_{\Delta\Delta} C(\Psi)$
p	áÆúÁú	pÚp	pÚp	pÚp
yø	àýÚø	yÊÚÑ	yÊÚÑ	áyÚÊ
Êp	âÊýÚú	yáÚp	yáÚp	áyÚp
üø	ápÚÊ	aaÚÆ	aaÚÆ	apÚý
úp	ÊýÚú	ápÚÆ	ápÚÆ	pÚÆ
Ñø	àÊÚø	ÑaÚÑ	ÑaÚÑ	yÚÑ
áp	ápÚp	ápÚp	ápÚp	apÚp
yþø	yýúÚý	ýpÊÚý	ýpÊÚý	áyÚú
yýþ	yáÆÚú	yýúø	yýúø	apÚø
yÊø	áyÑáÚý	aaaÚú	yÊøÚú	pÚú
yþp	áyáÆÚý	áyáÚý	yþpÚú	pÚú
yúø	áyýÑÚú	áyÊÚÑ	yáúÚÊ	yÚÊ
yÆp	áÆáÚú	pÚp	yÆpÚp	pÚp
yúø	àáyÚú	yÊÚÑ	yáÊÚÑ	áyÚÊ
yýþ	âÊýÚú	yáÚp	yþáÚp	áyÚp
yýþ	ápÚÊ	aaÚÆ	yýaÚÆ	apÚý
yüþ	ÊýÚø	ápÚÆ	yapÚÆ	pÚÆ
yøø	àÊÚø	ÑaÚÆ	yøaÚÆ	yÚÆ
yÑþ	ÆáÚÆ	ÆáÚú	yáúÚú	apÚý
yÆø	yýúÚý	ýpÊÚý	yÆÊÚý	áyÚú
Êþp	yáÆÚú	yýúø	yáúÚø	apÚø
Êýø	áyÑáÚý	aaaÚú	ÊýøÚú	pÚú
ÊÊþ	áyáÆÚý	áyáÚý	ÊÊþÚú	pÚú
Êüø	áyýÑÚú	áyÊÚÑ	ÊaaÚÊ	yÚÊ



(a) 检测结果与实际位置关系



(b) 误差分析

图 11 实验结果

结 语

本文提出了一种永磁同步电动机转子初始位置检测方法,并通过仿真实验进行验证和分析研究。结果表明:该方法在原有系统基础上,无需电机参数等附加条件,只需要在两个位置对电机进行高频信号注入,就可以快速且准确地检测出转子初始位置。此外,该方法简单计算量小,易于工程实现。理论上该方法也适用于其他电机,因此有待于在工程上进行考察。

参考文献

- [1] 王成元. 电机现代控制技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
- [2] 王成元, 王成元. 永磁同步电动机初始位置检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1004.
- [3] 王成元, 王成元. 永磁同步电动机初始位置检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1004.
- [4] 王成元, 王成元. 永磁同步电动机初始位置检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1004.
- [5] 王成元, 王成元. 永磁同步电动机初始位置检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1004.

(上接第 10 页)

分别计算它们在 $\theta = 0^\circ$ 时的齿槽转矩,并将三条曲线绘制于同一图中,如图 5 所示。

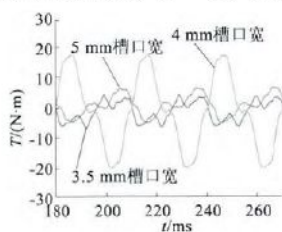


图 5 $\theta = 0^\circ$ 时,变槽口宽度时电机的齿槽转矩

从图 5 中可以看出,当改变槽宽时,电机的合成齿槽转矩发生明显变化。当槽宽为 5 mm 时齿槽转矩最小,为 $-10 \text{ N}\cdot\text{m}$;槽宽为 4 mm 时,齿槽转矩为 $-20 \text{ N}\cdot\text{m}$;槽宽为 3.5 mm 时齿槽转矩最大,为 $-30 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。由此可见,在极弧系数最优爪极偏移时,进一步改变槽宽可以继续减小齿槽转矩。

如果槽口宽度为 4 mm 保持不变,优化极弧系数,得出当 $\theta = 0^\circ$ 时,齿槽转矩最小,为 $-10 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

虽然上述的分析是在将聚磁式永磁爪极电机简化为二维模型的基础上得到的,但文献[1]已验证了简化模型的有效性,因此分析所得结果也是可信的。

- [6] 韦鲲,金辛海. 表面式永磁同步电机初始转子位置估计技术[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1004.
- [7] 王冉琦,刘恩海. 永磁同步电机转子初始位置的检测方法[J]. 电机与控制学报, 2004, 8(1): 1-4.
- [8] 王成元,王成元. 永磁同步电动机初始位置检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1004.
- [9] 王成元,王成元. 永磁同步电动机初始位置检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1004.
- [10] 王成元,王成元. 永磁同步电动机初始位置检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1004.

作者简介:何栋炜(1980-),男,博士,讲师。

结 语

本文提出了采用爪极偏移削弱聚磁式永磁爪极电机齿槽转矩的新方法。基于电机二维简化模型,采用二维有限元软件计算齿槽转矩,并通过参数化方法确定了磁极极弧系数和爪极偏移量的较佳组合,验证了方法的有效性。

参考文献

- [1] 王秀和,杨玉波. 基于极弧系数选择的实心转子永磁同步电动机齿槽转矩削弱方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1004.
- [2] 白海军,张凤阁. 外永磁转子爪极电机转矩研究[J]. 电机与控制学报, 2004, 8(1): 1-4.
- [3] 王博. 轴向分段式永磁外转子爪极电机的性能分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2004, 32(1): 1-4.
- [4] 杨玉波,王秀和,陈谢杰. 基于不等槽口宽配合的永磁同步电机齿槽转矩削弱方法[J]. 电工技术学报, 2004, 19(1): 1-4.
- [5] 王秀和. 永磁电机[M]. 北京:中国电力出版社, 2004.
- [6] 赵斌. 永磁外转子爪极发电机的设计与分析[J]. 济南:山东大学, 2004.

作者简介:耿振(1980-),男,硕士研究生,主要研究方向为永磁伺服电机。