一种改进的PMSM转子初始位置检测方法

张子良¹,胡存刚^{1,2,3},张云雷^{2,4}

(1.安徽大学 电气工程与自动化学院,安徽 合肥 230601;2.安徽大学 安徽省工业节电与电能质量控制协同创新中心,安徽 合肥 230601;
3.安徽大学 教育部电能质量工程研究中心,安徽 合肥 230601;
4.安徽大学 电子信息工程学院,安徽 合肥 230601)

摘要:提出了一种改进的永磁同步电机转子初始位置检测方法。首先向永磁同步电机中注入两次线性无 关的高频电压矢量得到两次电流响应,计算得到电感矩阵,通过电感间的关系提取转子位置信息,最后通过极 性判断确定转子实际位置。该方法较传统的高频电压注入法有精度高、结构简单等优点。仿真结果验证了该 方法的有效性。

关键词:永磁同步电机;高频电压注入法;线性无关;电压矢量 中图分类号:TM351 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dqcd19306

An Improved Method of Initial Rotor Position Detection for Permanent Magnet Synchronous Motor

ZHANG Ziliang¹, HU Cungang^{1,2,3}, ZHANG Yunlei^{2,4}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230601, Anhui, China;

2. Anhui Collaborative Innovation Center of Industrial Energy Saving and Power Quality Control,

Anhui University, Hefei 230601, Anhui, China; 3. Engineering Research Center of Power Quality,

Ministry of Education, Anhui University, Hefei 230601, Anhui, China; 4. School of Electronic

Information Engineering , Anhui University , Hefei 230601 , Anhui , China)

Abstract: An improved method was proposed to detect the initial rotor position for PMSM. Firstly, two groups of linearly independent high-frequency voltage vectors were injected into the PMSM to get two current response. Then, the inductance matrix was obtained by calculation, and the rotor position information was extracted through the relationship between the inductance. At last, the actual position of the rotor was determined by polarity judgment. The method has the advantages of high precision and simple structure. The effectiveness of the method was verified by simulation.

Key words: permanent magnet synchronous motor(PMSM); high-frequency voltage injection; linearly independent; voltage vectors

永磁同步电机具有高功率密度、高效率、体 积小和响应快等优点,应用在工业生产等各个领 域都拥有广泛的前景和独特的优势。目前常见 用于永磁同步电机的主要控制策略分为2种,1 种是矢量控制方法,1种是直接转矩控制方法,而 这2种控制策略都需要精确的转子初始位置作为 基础,因此电机启动需要预先对转子初始位置进 行检测。如果检测错误,可能导致永磁同步电机 起动失败甚至反转,这是不允许的,故转子初始 位置检测是电机运行不可或缺的一环。

最常见的永磁同步电机转子初始位置检测 方法主要有3种,1种是反电动势法,1种是高频 电压注入法,另1种是脉冲电压注入法。反电动 势法是利用电机运行中所产生的反电动势包含 的位置信息进行提取计算,该方法简单易行,但 存在明显的缺陷是在低速或零速时,由于电机没 有反电动势或者产生的反电动势太小,无法检测 转子初始位置;脉冲电压注入法是利用电机电感

作者简介:张子良(1993-),男,硕士研究生,Email:173638737@qq.com 12

的饱和特性,向静止电机同一绕组中注入一系列 角度不同幅值相同时间相等的脉冲电压矢量,通 过检测响应电流的幅值大小确定转子位置^[1-2],该 方法实施简单、适应性好,但存在检测精度不足、 检测时间长等缺点;而传统的高频电压注入法是 利用永磁同步电机凸极效性,向电机定子绕组中 注入高频旋转电压矢量,此时电机会产生包含转 子位置信息的响应电流,通过一定方法可以提取 位置信息^[3-8],该方法检测精度高、检测时间短,但 算法复杂、运算量大,且用到的滤波器较多,实际 操作困难。除此之外,近几年也有一些用特别的 方法来检测转子初始位置的研究^[9-10],例如向定 子绕组中注入方波或低频旋转电压矢量。

本文提出一种基于高频电压注入的转子初 始位置检测方法。该方法首先向永磁同步电机 定子绕组中注入2次高频电压矢量,产生2组响 应电流,通过算法获得转子位置信息,然后利用 极性判断确定转子初始位置。该方法能准确检 测转子初始位置,检测精度高,检测算法简单,具 有通用性。

1 转子初始位置检测方法

永磁同步电机在两相静止坐标系下的电压 方程为

$$\begin{bmatrix} u_{a} \\ u_{\beta} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_{a} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{1} + L_{2} \cos(2\theta) & L_{2} \sin(2\theta) \\ L_{2} \sin(2\theta) & L_{1} - L_{2} \cos(2\theta) \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{a} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} + \omega_{c} \Psi_{f} \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix}$$
(1)

其中
$$L_1 = \frac{(L_d + L_q)}{2}$$
 $L_2 = \frac{(L_d - L_q)}{2}$

式中: u_{α} , u_{β} 分别为 α , β 轴定子电压分量; i_{α} , i_{β} 分别为 α , β 轴定子电流分量;R为定子电阻;p为对时间t的微分; ω_{c} 为转子电角速度; Ψ_{f} 为永 磁体励磁磁链; θ 为转子位置角; L_{a} , L_{g} 分别为d,q轴定子电感分量; L_{1} 为均值电感, L_{2} 为差值 电感。

往定子绕组中注入高频电压信号,高频信号 频率一般为0.5~2kHz,远高于基频频率,故可以 忽略基频分量,且定子电阻可忽略不计,这样上 式便简化成下式:

 $\begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 + L_2 \cos(2\theta) & L_2 \sin(2\theta) \\ L_2 \sin(2\theta) & L_1 - L_2 \cos(2\theta) \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} (2)$ 对式(2)进行变换,易得到下式:

$$\mathbf{p}\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_{1}^{2} - L_{2}^{2}} \begin{bmatrix} L_{1} - L_{2}\cos(2\theta) & -L_{2}\sin(2\theta) \\ -L_{2}\sin(2\theta) & L_{1} + L_{2}\cos(2\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix}$$
(3)

向定子绕组注入2次线性无关的高频旋转电 压矢量,可以得到2次响应电流,为保证电机转子 在位置检测过程中不发生转动,电压幅值U_m一 般低于直流母线电压幅值的1/10,注入的电压矢 量在静止两相坐标系下的表达式为

$$\begin{bmatrix} u_{a1} & u_{a2} \\ u_{\beta1} & u_{\beta2} \end{bmatrix} = U_{m} \begin{bmatrix} \cos(\omega_{h}t_{1}) & -\sin(\omega_{h}t_{2}) \\ \sin(\omega_{h}t_{1}) & \cos(\omega_{h}t_{2}) \end{bmatrix}$$
(4)

式中: ω_h 为高频注入电压的频率; t₁, t₂ 分别为 两次高频电压矢量注入的时刻。

经计算,得到响应电流的稳态表达式为

$$\begin{bmatrix} i_{a1} & i_{a2} \\ i_{\beta1} & i_{\beta2} \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin(\omega_{h}t_{1}) & \cos(\omega_{h}t_{2}) \\ -\cos(\omega_{h}t_{1}) & \sin(\omega_{h}t_{2}) \end{bmatrix}$$
(5)

其中

$$K = \frac{U_{\rm m}}{\omega_{\rm h}(L_1^2 - L_2^2)} \qquad L_{11} = L_1 - L_2 \cos(2\theta)$$

 $L_{12} = L_{21} = -L_2 \sin(2\theta)$ $L_{22} = L_1 + L_2 \cos(2\theta)$ 由线性无关矩阵易知最后一项是可逆矩阵,于是 由逆矩阵计算可得:

$$\begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} i_{a1} & i_{a2} \\ i_{\beta1} & i_{\beta2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin(\omega_{h}t_{1}) & \cos(\omega_{h}t_{2}) \\ -\cos(\omega_{h}t_{1}) & \sin(\omega_{h}t_{2}) \end{bmatrix}^{-1} \\ = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} i_{a1}\sin(\omega_{h}t_{1}) + i_{a2}\cos(\omega_{h}t_{2}) & -i_{a1}\cos(\omega_{h}t_{1}) + i_{a2}\sin(\omega_{h}t_{2}) \\ i_{\beta1}\sin(\omega_{h}t_{1}) + i_{\beta2}\cos(\omega_{h}t_{2}) & -i_{\beta1}\cos(\omega_{h}t_{1}) + i_{\beta2}\sin(\omega_{h}t_{2}) \end{bmatrix}$$
(6)

式(6)中,电感矩阵中包含了按2倍转子位置的电 感分量,于是转子初始位置可以用下式得到:

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{L_{12} + L_{21}}{L_{11} - L_{22}} \right) \tag{7}$$

由式(6)、式(7)可知,最后得到的位置跟系数无 关,故说明该算法具有通用性。

所提方法中,整个转子初始位置检测的提取 过程如图1所示,其中带通滤波器用于滤除除高 频响应电流以外的电流信号,例如基频电流分量 等。图2为传统高频电压注入法的结构框图,其 中BSF,BPF,SFF分别为带阻滤波器、带通滤波 器、同步轴高通滤波器,而同步轴高通滤波器是 用来滤除带通滤波器无法滤除的正序电流分 量。通过图1和图2对比,易看出传统高频电压 注入法电路复杂,所用滤波器较多,操作难度大, 而本文提出的方法只用到带通滤波器,大大降低 了操作难度,具有用到的滤波器较少,电路结构 简单等优点。



图1 转子初始位置提取过程

Fig.1 The extraction process of initial rotor position



图2 高频电压注入法结构图

Fig.2 The structure chart of high frequency voltage injection

2 极性判断

上述检测方法并未确定转子 NS 极性。由电 感饱和效应可知,转子磁极方向电感最小,且 N 极电感略小于 S 极电感。这是因为电机在设计 时就将本身磁路设定于微饱和状态。对转子 N 极注入脉冲电压矢量, N 极磁路会过饱和,从而 导致电感 L_a 会减小,如图 3a 所示;相反,对转子 S 极注入脉冲电压矢量, S 极磁路会退饱和,电感 L_a 会增大,如图 3b 所示。





故只要在 θ 角位置处和 θ +180[°]角位置处分 别注入脉冲电压矢量 U_m ,注入时间小于10 ms, 电流响应幅值分别记为 I_1 , I_2 ,比较幅值大小。 如果 $I_1 > I_2$,则转子就在 θ 角位置处;如果 $I_1 < I_2$, 则转子在 θ +180[°]角位置处。

3 仿真研究

用 Matlab/Simulink 软件对本文所提出的转 子初始位置检测方法进行仿真研究, 仿真参数如下: 额定电压 380 V, 极对数 4, d 轴电感 0.603 3 mH, q 轴电感 1 mH, 定子电阻 0.05 Ω , 高频电压频率 1 500 Hz。

第一种情况:当转子初始位置 $\theta=10^{\circ}$ 。搭建 电路模型,通过向永磁同步电机注入2次高频电 压得到2次响应电流,再通过式(6)计算得到电感 矩阵,最后通过式(7)计算得到 $\theta=10^{\circ}$ 时的位置 检测波形,以波形纵坐标稳定值作为检测出的转 子初始位置,如图4所示,可以看出检测出的转子 初始位置 $\theta_{d}=13.80^{\circ}$ 。由于之前的仿真实验中注 入电压的时间 t=1 ms 太短,导致对 θ_{d} 和 $\theta_{d}+180^{\circ}$ 位置测出的电流 I_{1}, I_{2} 大小差异很小,故 将脉冲电压注入时间增加至t=5 ms,幅值 u=38 V,电流波形如图5所示,检测出 $I_{1}=10.64$ A, $I_{2}=9.71$ A,故 $I_{1}>I_{2}$,且 I_{1}, I_{2} 差异 足够大,不会出现差异淹没在噪声中的现象,因 此转子位置确定在 $\theta_{d}=13.80^{\circ}$,误差为 3.80° 。



第二种情况:当转子初始位置 θ =245°。同 理,搭建仿真模型,检测出转子初始位置波形,以 波形纵坐标稳定值作为检测出的转子初始位置, 如图6所示,可以看出,检测出的转子初始位置 θ_a =61.72°。同样对 θ_a 和 θ_a +180°位置进行极性 判断,注入电压的时间t=5 ms,电流波形如图7 所示,检测出 I_1 =11.03 A, I_2 =11.53 A, 故 I_1 < I_2 , 且 I_1 、 I_2 差异足够大,故由上述极性判断,可知转 子位置确定在 $\theta_a = 61.72^{\circ} + 180^{\circ} = 241.72^{\circ}$,误差为 3.28°。



图7 $\theta_a = 61.72$ 极性判断的电流波形

Fig.7 The current waveforms of polarity judgement when $\theta_d = 61.72^\circ$

图 8 为大量仿真实验得到的永磁同步电机转 子检测位置和实际位置的对比图。





由图 8 可以看出,该方法检测出的转子初始 位置误差偏小,能用于实际检测。但此方法只适 用于电机转子初始位置检测,因为此方法要求在 不同时刻分别向电机注入2次不同的高频旋转电 压矢量,产生的响应电流再通过一系列的算法得 到初始位置信息,所用的时间较长、周期较长,如 果应用在高速运转的电机中,该方法所得到位置 信息会带来极大的误差,无法适用。对于电机控 制来说,由于一直需要转子位置信息实现稳定运 行,往往在永磁同步电机上安装旋转变压器来提 取转子位置信息,由硬件芯片来进行控制电机稳 定运行。尽管通常电机检测方法是通过光电编 码器提取转子位置信息,但由于我们研究的是大 型汽车永磁同步电机驱动控制系统,要求电机能 快速地响应高速运行而且对抗震性要求很高。 然而,光电编码器启动时都需要一段时间进行转 轴定位,而且抗冲击震动性差,无法满足要求。由 于旋转变压器需要电机运转之后才能进行采样, 故无法用于转子初始位置检测。当电机从静止 到旋转时,将该方法获得的转子初始位置信息作 为旋转变压器的采样起始点,这样就能准确得到 转子所有时刻的位置信息,电机也能稳定运行。

4 结论

根据高频电压注入法的模型分析,提出一种 永磁同步电机转子初始位置检测的办法。通过2 次高频电压矢量的注入,产生2次响应电流,经过 算法提取转子位置信息,最后由极性判断确定转 子位置。此方法对电机的参数不敏感,鲁棒性 强,而由于算法中最后得到的位置信息与系数无 关,故该算法具有通用性。检测出来的位置误差 小,实现方法简单,所用到的滤波器较少。仿真 验证了该方法的有效性,能够很好检测出转子真 实的初始位置。

参考文献

- [1] 王子辉,陆凯元,叶云岳.基于改进的脉冲电压注入永磁同 步电机转子初始位置检测方法[J].中国电机工程学, 2011,31(36):95-101.
- [2] 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,2006,26(22):104-109.
- [3] 林瑶瑶,仲崇权.无传感器永磁同步电机初始位置检测研究[J].电力电子技术,2013,47(10):102-104.
- [4] 边石雷,曹云峰,蔡旭.永磁同步电机初始位置检测研究[J].电力电子技术,2013,47(4):39-40.
- [5] 鲁家栋,刘景林,卫丽超.永磁同步电机转子初始位置检测 方法[J].电工技术学报,2015,48(7):24-28.
- [6] 万山明,吴芳,黄声华.基于高频电压信号注入的永磁同步 电机转子初始位置估计[J].中国电机工程学报,2008,28 (33):82-86.
- [7] 廖勇,沈朗,姚骏,等.改进的面贴式永磁同步电机转子初 始位置检测[J].电机与控制学报,2009,13(2):203-207.
- [8] 王冉珺,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,2012,16(1):62-66.
- [9] 徐艳平, 部亚秋, 钟彦儒. 基于低频信号注入法的 PMSM 低 速无传感器控制[J]. 电力电子技术, 2011, 45(3):62-63.
- [10] Wu X, Feng Y, Liu X, et al. Initial Rotor Position Detection for Sensorless Interior PMSM with Square-wave Voltage Injection [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(11); 99.

收稿日期:2018-07-17 修改稿日期:2018-09-03