

永磁同步电机无位置传感器控制技术研究

张可心 朱云雷 王雷 韩旭帅 田继萍

河北科技大学电气工程学院, 河北 石家庄 050018

[摘要]自 2000 年起, 随着现代电力电子科学技术水平的提高日益快速发展, 永磁同步电机系统的技术性能得到日益的改善, 其实际使用的范围将也会越来越扩大。永磁同步电机的电机效能较高, 性能较好。但是, 由于其运行方式的复杂性, 使得其运行更加困难。传统的位置传感器中一般使用了编码器、传感器等, 使电机的体积变大, 同时它也可能导致由于各种外部因素影响系统而最终导致整个系统运行的异常混乱, 进而直接影响关系到整个系统运行的安全稳定性与可靠性。文中着重研究分析提出了三相 PMSM 无位置传感器系统的控制技术。

[关键词]永磁同步电机; 无位置传感器; 控制技术

DOI: 10.33142/aem.v4i7.6408

中图分类号: TM351

文献标识码: A

Research on Sensorless Control Technology of Permanent Magnet Synchronous Motor

ZHANG Kexin, ZHU Yunlei, WANG Lei, HAN Xushuai, TIAN Jiping

School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei, 050018, China

Abstract: Since 2000, with the rapid development of modern power electronics science and technology, the technical performance of permanent magnet synchronous motor system has been improved day by day, and its practical application range will be expanded. Permanent magnet synchronous motor has high motor efficiency and good performance. However, due to the complexity of its operation mode, its operation is more difficult. The traditional position sensors generally use encoders and sensors, which makes the volume of the motor larger. At the same time, it may also lead to the abnormal confusion of the operation of the whole system due to various external factors affecting the system, and then directly affect the safety, stability and reliability of the operation of the whole system. This paper focuses on the research and analysis of the control technology of three-phase PMSM sensorless system.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; no position sensor; control technology

引言

电动机装置作为其中一个能把电力能源直接转换为工业机械能源的主要装置, 在现代工业机械生产过程中也具有十分重要独特的应用地位。各种电动机在现代工业、农业、生活、宇宙航行等社会各个各方面中均已占有十分重要的地位。其中, 以 BLDC、ACR、和永磁电机为代表。具有起动平稳、调速、转矩对等诸优势, 但其内部存在着机械交换结构, 不但会降低电动机使用寿命, 而且极易发生火花, 从而制约了其使用。随着人们对电磁技术的了解越来越多, PMSM 技术逐渐被人们所重视, 它由于结构简单、性能好而在现代工业控制领域占有很大的比重。随着我国工业用电量的不断增加, PMSM 由于功率损耗小而带来的优点也日益引起人们的关注。随着功率电子器件的不断发展, 通过开关管的接通与断开, 实现了电子交换, 替代了传统的机械替换^[1]。

1 概述

PMSM 是一种具有高扭矩、高效率、高惯量比、易于维护的永磁同步电动机。在采用磁场定向矢量控制时, 必须对转子位置、转速等参数进行精确测量, 而采用机械传感器, 不仅增加了系统的造价, 而且还增加了系统的重量,

对工作环境的要求也随之提高。无传感技术是指采用特殊的控制方法, 通过对电机线圈中的电流进行检测, 来估计电机的转速和位置, 为三相 PMSM 控制系统的发展方向奠定基础。

无位置传感器技术是利用其他电子信号来实现对转子位置、角度的跟踪。在中、高速地区, 采用了滑模观测器、扩展卡尔曼滤波器和模型参考自适应算法。在零、低速条件下, 常用的是高频注入法。采用脉振高频注入技术在电机低速控制中的应用^[2]。

2 永磁同步电机模型建立

本论文以 d-q 坐标系为基础, 假定: 1) 三相线圈对称, Y 形连接; 2) 反应电动势均为正弦 3) 反应局部磁路均为线形, 不需考虑涡流、余磁的损失率等的影响; 4) 在永磁体转子中没有阻尼效应, 转子绕组中也没有阻尼器绕组。

使 d 轴与转子磁极重合。PMSM 在 dq 坐标系下定子电压方程为:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} \psi_d - \omega_e \psi_q \\ u_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \psi_q - \omega_e \psi_d \end{cases} \quad (1)$$

在(1)中, u_d 和 u_q 分别是同步转子的 d 轴和转子 q 轴分量的定子绕组电压分量; i_d 、 i_q 是同步旋转坐标系 d, q 轴分量, RS 是定子电阻; 其中, ψ_d 、 ψ_q 是定子绕磁链同步旋转坐标系 d, q 轴分量, ω 为磁电角度速度^[3]。

磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

L_d 、 L_q 为 d、q 轴等效电感。

电磁转矩方程为:

$$T_e = \frac{3}{2} n_p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) = \frac{3}{2} n_p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

3 永磁同步电机矢量控制原理

本文所使用的 SVPWM 即电压空间向量脉冲宽度调制。其基本思想就是通过对逆变器之间的切换方式和接通时间进行控制, 从而生成一个有效的电压向量, 从而形成类似的环形磁场。采用三相桥式逆变器, 在 6 个开关器件的情况下, 三个器件在任何时刻都处于打开状态, 这样就会产生八种不同的组合, 产生八个向量, 其中两个为零向量。如图 1 所示^[4]。

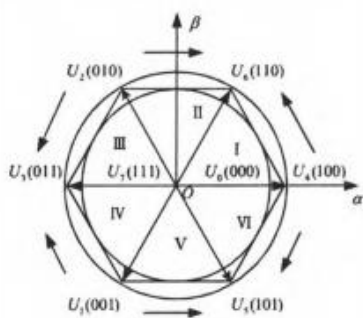


图 1 矢量示意图

这 8 个基本向量将复平面分成了 6 个区, 成为扇区。每个扇区 60°。

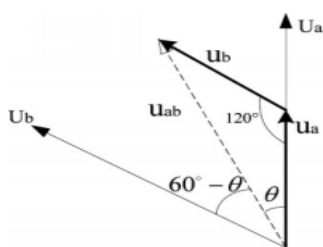


图 2 矢量合成图

如图 2 所示, u_a 和 u_b 表示某两个相邻方向的基本电压空间矢量, 合成电压矢量 u_{ab} 值为:

$$u_{ab} = u_a + u_b \quad (4)$$

公式(4)中矢量 u_{ab} 的值为 U_d , 根据正弦定理得下面公式:

$$u_a = \frac{2}{\sqrt{3}} \sin(60^\circ - \theta) U_d \quad (5)$$

$$u_b = \frac{2}{\sqrt{3}} \sin(\theta) U_d$$

在逆变器上通过电压空间矢量脉宽调制器(SVPWM)来控制三相逆变器上的桥臂开关时, 它利用从交流电机上的三相绕组上所能获得的驱动电流 U_A 、 U_B 、 U_C 的公式为:

$$U_A(\theta) = |u_a| + |u_b| \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) = U_d \cos(\theta)$$

$$U_B(\theta) = |u_b| \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) - |u_a| \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) = U_d \cos\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) \quad (6)$$

$$U_C(\theta) = |u_a| \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + |u_b| \cos(\pi) = U_d \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)$$

SVPWM 是一种三相交流电压, 它的驱动电流是根据线圈电阻器上的电荷和电荷的不同而产生的。线圈电阻是电机的固有特性, 通过测量三相电流, 可以估算出各相绕组的反电动势。三相线圈的反电动势计算公式:

$$E_A = U_A(\theta) - I_A R_A$$

$$E_B = U_B(\theta) - I_B R_B \quad (7)$$

$$E_C = U_C(\theta) - I_C R_C$$

公式(7)中, 线圈的电流为 I_A , I_B , I_C , R_A , R_B , R_C 为线圈的电阻。通过公式(7), 通过 SVPWM 方法, 可以计算出各相绕组的反电动势, 并且反电动势的相位正好对应于三相电机中的转子相位, 这样, 能够直接利用三相线圈中的反相电动势来得到三相转子之间的无位置角。

4 永磁同步电机无位置传感器启动运行整体方案

对永磁同步电动机的工作状态进行实时观测是其工作的前提条件。传统的传感器可以在各种工况下得到转子的信息, 但在低转速时, 其对转子位置的预报能力会降低, 同时由于信噪比较低时, 它的有效信号通常很小, 很难被提取出来。在低转速、零转速时, 这种方法无法精确地检测出电机的位置与转速。由于电动机在全工况下会产生“预知死区”, 因此, 在调速时, 控制器所设定的定子电压向量必须与电动机的转子保持一致, 从而防止电动机失步。为了在较低的转速下得到精确的转子位置, 采用高频信号注入技术来解决这个问题。该方法的基本原理是将高频电压或电流信号与电动机的三相绕组叠加, 并将其相应的高频或高频信号与转子的位置信息结合起来。该方法利用带通滤波器和低通滤波器, 对电机的电流、电压进行一系列的处理, 从而实现了对转子的实时定位和跟踪。本论文所使用的是一种脉振高频电压注入法^[5]。

5 脉振高频电压信号注入法控制技术

5.1 脉振高频电压信号注入原理

脉振高频注入法是将高频正弦波输入到估算的同步坐标系统的直轴方向(即 d 轴), 因此, 在静态坐标系中, 注入信号为脉冲频率较高的电压信号。在输入信号后, 对 q 轴通过调制和解调的方法获得了转子的位置和转速。

在 d 轴注入高频正弦电压信号:

$$\begin{cases} u_{dh} = u_{in} \cos(\omega_{in}t) \\ u_{qh} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中 u_{in} 是输入电压信号幅值, ω_{in} 是输入电压信号频率。最终可得高频注入下的交直流电流

$$\begin{cases} i_{dhn} = \frac{u_{in} \sin \omega_{in}t}{\omega_{in}(L^2 - \Delta L^2)}(L + \Delta L \cos 2\theta_e) \\ i_{qhn} = \frac{u_{in} \sin \omega_{in}t}{\omega_{in}(L^2 - \Delta L^2)}(\Delta L \sin 2\theta_e) \end{cases} \quad (9)$$

由以上可知, 若 dq 轴的电感值不等, 即非 0, 则 d 轴和 q 轴电流与位移角相关, 若偏移角为 0, 则 d 轴的电压与平均阻抗相关, q 轴电流为 0。因此, 很显然, 当 q 轴电流为 0 时, 能够准确地获取位置信息, 就可以将 q 轴上的高频电流信号进行信号处理, 并将其作为观测器的输入信号输入, 从而得出转子的准确位置和转速^[6]。

5.2 基于 PLL 的转子位置估计

由上述公式 (9) 可知, i_{qhn} 不仅和位置角误差有关, 还与调制信号 $\sin \omega t$ 有关, 而且是随时间而变化的。首先, 根据下面的策略, 对 q 轴上的高频电流信号进行提取。首先是要考虑采用何种的带通滤波器, 由于对每个高频信号产生的估计高频电流都是与 L 相关联的, 所以就必须要考虑使用带通滤波器 BPF 来直接获得高频电流, 同时也要考虑到转子的位置信息。再用乘法器解调制 q 轴上的高频电流成分, 相当于经过带通滤波器的信号再乘以 $\sin \omega t$, 这样可以得到 $\sin \omega t$ 的平方, 这个平方可以化为 $1 - \cos 2\omega t$, 对于高频信号而言, 如果经过低通滤波器, 这个 $1 - \cos 2\omega t = 1$ 。所以最后可以把经过滤波、解调, 再滤波之后的电流信号表示为:

$$\Delta i_q = LPF(i_{qhn} \sin \omega_{in}t) = \frac{u_{in}}{\omega_{in}(L^2 - \Delta L^2)}(\Delta L \sin 2\theta_e) \quad (10)$$

那么最终可以得到跟转子位置误差信息相关的 i_q 电流信息, 对其进行进一步处理就可以得到位置信息了。根据 PLL 的转子位置估算, 给出了如下控制框图。

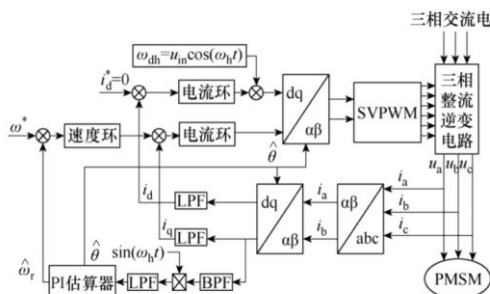


图3 基于 PLL 的脉振高频电压注入的 PMSM 的无位置控制框图

利用 PI 调节器组成 PLL 系统, 实现对 PMSM 的转子角的跟踪。此方法, 类似于一个锁相环, 当系统工作在稳定状态时, 相位差不会随着时间变化而变化, 此时处于锁定状态^[7]。

5.3 仿真研究

根据上面给出的一个基于 PLL 的脉振高频电压注入系统的无位置系统框图, 在一个 MATLAB/simulink 环境条件下可以建立系统模型如图:

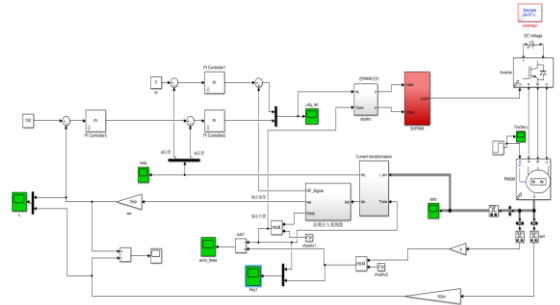


图4 基于 PLL 的脉振高频电压注入的 PMSM 的无位置控制系统仿真模型

其中, 仿真中电机的参数为: 极对数 $P_n=2$; 定子电感 $L_d=0.00473H$, $L_q=0.009H$; 定子电阻 $R=0.45 \Omega$; 磁链 $\psi_f=0.683Wb$; 转动惯量 $J=0.008Kg \cdot m^2$ 。仿真时间为 4s。其中脉振高频电压信号的幅值 $V_{in}=20V$, 频率 $f=1000Hz$ 。为验证无位置控制仿真模型的正确性, 设置参考转速 $N=100r/min$, 仿真结果如图所示

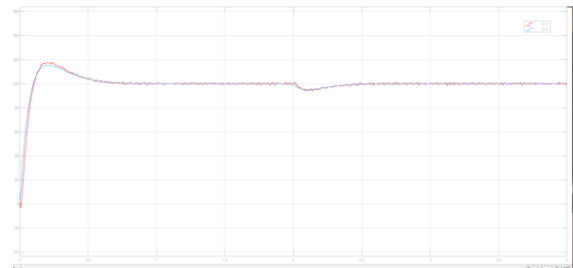


图5 估计转速与实际转速变化曲线

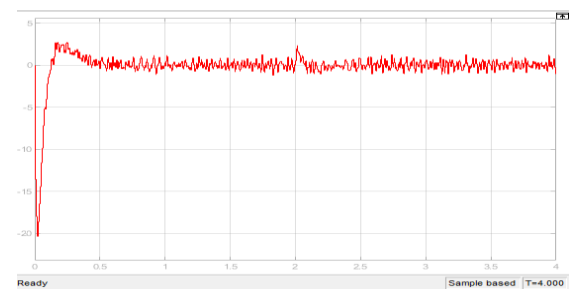


图6 转速估计误差曲线

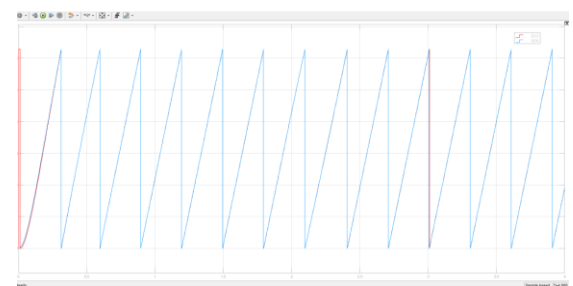


图7 转子估计与实际值曲线

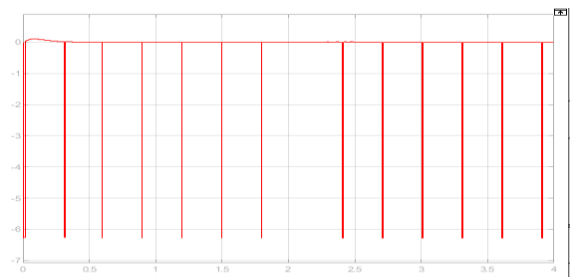


图8 转子位置差曲线

图5为永磁同步电机的实际转速和跟踪转速仿真波形。可以看出,转速从启动时刻到达到参考设定值花了0.6s,期间有一定的超调量,在2s时加入2N的转矩负载,可以看出在经过短暂的的振荡之后,迅速又达到了之前的转速参考设计值,也就是100r/min。图6为转速估计误差曲线。可以看出,电机在启动运行后,无位置传感器能被很好地用来跟踪电机实际的转速,并能使其将误差控制在0左右。图7分别显示了出电动机转子的实测转动位置角和实际估计转动位置角,图8示出电动机的转子位置差曲线,能够明显发现在当出电机转子起动之后,估计转子位置角能够被很好地跟上到实测的转子位置,而且其偏差范围基本都在0附近;在2.0s时刻,控制系统进入有转矩给定的矢量控制状态,位置角迅速跟踪实际值,恢复到正常状态。全过程位置观测误差较小,电机运行平稳^[8]。

6 结束语

本文建立了永磁同步电动机的数学模型,介绍了永磁同步电动机电压空间矢量SVPWM控制的原理。阐述了永磁同步电机无位置传感器的现状以及本文所采用的脉振高频电压信号的方法。在仿真建模方面采用正弦电压信号注

入的控制方式,在MATLAB/Simulink中建立了基于锁相环控制的无位置控制的仿真模型。从仿真模拟结果来看,该系统具有较好的动态特性和精度。与理论知识基本一致,为低速下永磁同步电机无传感器控制技术进一步研究提供了实验理论基础。

【参考文献】

- [1]吕德刚,薛俊泉.表贴式永磁同步电机的超前角弱磁控制[J].哈尔滨理工大学学报,2020,25(6):40-45.
 - [2]陈威,吴桂初,方攸同.基于绕组分布函数理论和动态磁网络的两种内置式永磁牵引电机解析建模方法[J].电工技术学报,2020,35(2):377-386.
 - [3]梁戈,黄守道,李梦迪,等.基于高阶快速终端滑模扰动观测器的永磁同步电机机械参数辨识[J].电工技术学报,2020,35(2):395-403.
 - [4]陈超,陈振,赵静,等.基于五相电流源型逆变器的一种新型PMSM就近空间矢量容错组合策略[J].电工技术学报,2020,35(2):404-412.
 - [5]杨鑫宇.基于凸优化的永磁同步电机三电平无位置控制研究[D].安徽:安徽大学,2021.
 - [6]徐波.基于高频信号注入法的PMSM无位置传感器控制研究[D].江苏:南京理工大学,2019.
 - [7]杨云程.永磁同步电机无位置传感器控制系统研究[D].黑龙江:哈尔滨工业大学,2018.
 - [8]田明秀,王丽梅,郑健芬.永磁同步电机无传感器转速和位置控制方案[J].沈阳工业大学学报,2005(5):42-45.
- 作者简介:张可心(1999.9-)男,汉族,硕士研究生,主要研究方向为永磁同步电机无位置传感器控制方向。