

文章编号: 1671- 251X( 2010) 10- 0052- 04

# 同步电动机磁链观测的稳定性研究

陆锦生<sup>1,2</sup>, 何凤有<sup>1,2</sup>, 刘侠<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学信电学院, 2. 江苏省电力传动与自动化工程技术研究中心, 江苏 徐州 221008)

**摘要:** 简要分析了基于电压模型的同步电动机磁链观测器的原理; 针对传统电压模型中积分环节带来的直流偏置误差和积分零点漂移问题, 提出了一种基于 *MT* 轴系电压模型的磁链观测器模型, 并在该模型中引入了积分负反馈环节。仿真结果表明, 与基于传统电压模型的磁链观测器相比, 基于 *MT* 轴系电压模型的磁链观测器的稳定性得到了增强, 且能够很好地抑制直流偏置扰动和积分零点漂移。

**关键词:** 同步电动机; 磁链观测; 电压模型; 负反馈; *MT* 轴系

**中图分类号:** TD614      **文献标识码:** A

Stability Research of Flux Observation of Synchronous Motor

LU Jinsheng<sup>1,2</sup>, HE Fengyou<sup>1,2</sup>, LIU Xia<sup>1</sup>

(1. School of Information and Electrical of CUMT., Xuzhou 221008, China. 2. Jiangsu Electrical Drive and Control Engineering Technology Research Center, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** The paper briefly analyzed the principle of flux observation of synchronous motor based on voltage model. In order to solve problems of DC bias error and zero-drift caused by integral link in traditional voltage model, it proposed a model of flux observation based on voltage model in *MT* coordinate, and put forward integral negative feedback in the model. The simulation result showed that

收稿日期: 2010- 06- 14

作者简介: 陆锦生(1986- ), 男, 江苏南通人, 中国矿业大学在读硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。E-mail: lu.jinsheng.love@163.com

分析具有较高的精度, 且 FFT 算法可以提高分析速度, 易于在仪器中实现。尽管傅里叶变换会不可避免地由于“频谱泄漏”和“栅栏效应”而产生误差, 但通过引入二阶海宁卷积窗和双峰插值算法可以减小这种误差, 提高检测精度, 仿真实验证明了这一点。但傅立叶变换在非平稳时变信号的分析上就显得无能为力。对于波动谐波、快速变化的谐波以及细节性突变的谐波, 必须寻找其它更有效的检测方法。小波变换对暂态信号的敏感弥补了傅里叶变换的缺陷, 而且小波包可以实现信号频带的均匀划分, 提高了信号的检测精度。因此, 将小波变换与傅里叶变换以及加窗插值法相结合应该是一种很好的谐波分析方案。

## 参考文献:

[1] 付周兴, 赵永秀. 电网谐波测量技术的现状与发展[J].

工矿自动化, 2004(2): 18-21.

- [2] 庞浩, 李东霞, 俎云霄, 等. 应用 FFT 进行电力系统谐波分析的改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2003(6): 46-50.
- [3] 李益华, 林文南, 李茂军. 电力系统谐波检测的 FFT 加窗插值算法与小波分析方法的比较[J]. 电力科学与技术学报, 2007, 22(2): 39-42.
- [4] GAOUDA A M, SALAINA M M A, SULTAN A Y, et al. Power Quality Detection and Classification Using Wavelet Multiresolution Signal Decomposition [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1999, 14(4): 1469-1476.
- [5] 刘敏, 王克英. 基于加窗双峰谱线插值的高精度 FFT 谐波分析[J]. 电测和仪表, 2006(3): 20-23.
- [6] 许珉, 张鸿博. 基于 Blankman-harris 窗的加窗 FFT 插值修正算法[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2005(4): 99-101.

compared with flux observation based on traditional voltage model, the one based on voltage model in *MT* coordinate has better stability and can restrain DC bias disturbance and integral zero-drift.

**Key words:** synchronous motor, flux observation, voltage model, negative feedback, *MT* coordinate

## 0 引言

同步电动机磁场定向矢量控制系统中的关键单元是磁链观测器, 其作用是观测到气隙磁链的幅值以及旋转角度的信息, 以此构成磁场定向的基准坐标轴(*MT*轴)线。同步电动机气隙磁链可由定子电压、电流计算出来, 常称为电压模型; 也可以通过转子及定子电流计算出来, 称为电流模型。电压模型的磁链主要是通过对同步电动机感应电势进行积分来获得, 在该过程中只有定子电阻会影响到计算精度。而定子电阻容易测量, 数值相对较小, 对磁链辨识影响不大, 相对来说容易控制, 因此, 电压模型的磁链辨识方法比较常用。但是该方法在计算过程中需要引入一个纯粹的积分环节, 该积分环节会带来直流偏置误差和积分零点漂移问题。对此, 笔者提出采用*MT*轴系下负反馈的方法来解决这2个问题, 并采用小信号模型方法分析微小扰动时的观测器稳定性。

## 1 同步电动机的电压模型

同步电动机的电压模型如图1所示。其中 $\Psi^f(u)$ 表示由电压模型计算得到的气隙磁链实际值 $\Psi^e(u)$ 表示由电压模型计算得到), 可用于实现磁链反馈;  $|\Psi^e(u)|$ 表示气隙磁链的幅值;  $\varphi_s$ 表示 $\alpha$ 轴和*M*轴之间的磁链位置角。

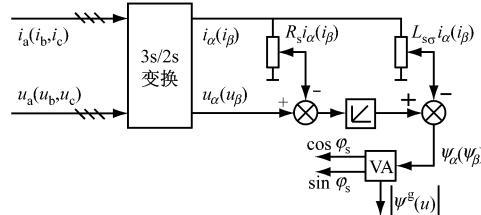


图1 同步电动机的电压模型

电压模型的原理: 根据定子电流、电压实际测量值, 经3s/2s变换后得到 $i_a, i_b, u_a, u_b$ , 再利用矢量分析器VA得到气隙磁链的幅值和位置角。

在 $\alpha-\beta$ 坐标系中, 有

$$\Psi_a = \int E_a dt = \int \left( u_a - R_s i_a - L_{so} \frac{di_a}{dt} \right) dt \quad (1)$$

$$\Psi_b = \int E_b dt = \int \left( u_b - R_s i_b - L_{so} \frac{di_b}{dt} \right) dt \quad (2)$$

$$|\Psi^e(u)| = \sqrt{\Psi_a^2 + \Psi_b^2} \quad (3)$$

$$\cos \varphi_s = \frac{\Psi_a}{|\Psi^e(u)|} \quad (4)$$

$$\sin \varphi_s = \frac{\Psi_b}{|\Psi^e(u)|} \quad (5)$$

式中:  $\Psi_a, \Psi_b$  分别为气隙磁链的 $\alpha, \beta$ 轴分量;  $u_a, u_b$  分别为定子电压的 $\alpha, \beta$ 轴分量;  $R_s$  为定子电阻;  $L_{so}$  为定子漏感。

## 2 MT轴系磁链观测器

$\alpha-\beta$ 坐标系下电压模型的磁链观测方法存在的主要问题是积分零点漂移的抑制。近年来, 交流电动机变频调速系统无速度传感器控制常采用*MT*轴系感应电势来辨识磁链(即*MT*电压模型), 再由磁链和感应电势计算出速度, 实现无速度传感器控制<sup>[1-4]</sup>。令 $\alpha-\beta$ 坐标系为静止的定子坐标系, *MT*轴系为同步旋转坐标系。气隙磁链矢量 $\Psi$ 位于*M*轴上,  $\varphi$ 代表*M*轴与 $\alpha$ 轴的交角, 则 $\Psi = \Psi_m e^{j\varphi}$ ,

$$E = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d\Psi_m}{dt} e^{j\varphi} + j\omega \Psi_m e^{j\varphi} = E_M e^{j\varphi} + jE_T e^{j\varphi}, \text{ 其中}$$

$\Psi_m$  为 $\Psi$ 的幅值。因此, 有

$$E_M = \frac{d\Psi}{dt} \quad (6)$$

$$E_T = \omega \Psi_m \quad (7)$$

$$\Psi = \int E_M dt \quad (8)$$

$$\omega = \frac{E_T}{\Psi_m} \quad (9)$$

$$\varphi_s = \int \omega dt \quad (10)$$

旋转变化对应的旋转关系为

$$\begin{cases} E_M = E_\alpha \cos \varphi_s + E_\beta \sin \varphi_s \\ E_T = -E_\alpha \sin \varphi_s + E_\beta \cos \varphi_s \end{cases} \quad (11)$$

根据上述分析得到的*MT*轴系磁链观测器模型如图2所示。

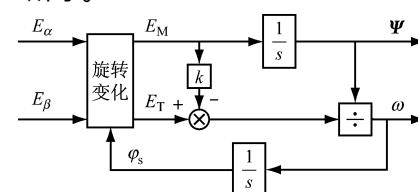


图2 *MT*轴系磁链观测器模型

图2也可以采用极坐标形式表示<sup>[1]</sup>, 如图3所示。其中 $|E|$ 为输入电动势的幅值,  $\varphi_e$ 为旋转电压

矢量在  $\alpha-\beta$  静止坐标系下的相位角,  $\varphi_s$  为观测到的旋转气隙磁链在静止坐标系下的相位角,  $\hat{E}_M$ 、 $\hat{E}_T$  分别为  $E_M$ 、 $E_T$  的观测值,  $\hat{E}'_T$  为对  $E_T$  修正后的输出值,  $\hat{\Psi}$  为  $\Psi$  的观测值,  $\hat{\omega}$  为观测的旋转角速度<sup>[5-6]</sup>;  $k$  为校正所取的系数, 其作用在下节中作详细分析;  $I_1$ 、 $I_2$  为积分器, 位于闭环中。在  $\alpha-\beta$  坐标系和  $MT$  轴系中各矢量的关系如图 4 所示。

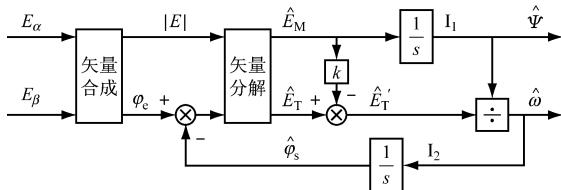


图 3  $MT$  磁链观测器模型的极坐标形式

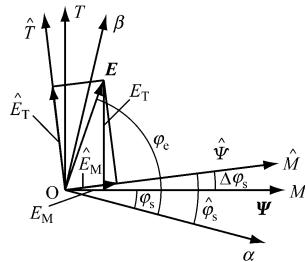


图 4  $\alpha-\beta$  坐标系和  $MT$  轴系中各矢量的关系

积分零点漂移的抑制过程: 当积分器  $I_1$  出现零点漂移时, 若该漂移使  $\hat{\Psi}$  减小, 则  $\hat{\omega}$  和  $\Delta\varphi_s$  (观测角度与实际角度之差) 加大,  $\hat{E}_M$  增大, 使  $\hat{\Psi}$  恢复原值; 若漂移使  $\hat{\Psi}$  增大, 则  $\hat{\omega}$  和  $\Delta\varphi_s$  减小,  $\hat{E}_M$  减小, 最后使  $\hat{\Psi}$  恢复原值。同理, 当积分器  $I_2$  出现零点漂移时, 若该漂移使  $\Delta\varphi_s$  减小, 则  $\hat{E}_M$  和  $\hat{\Psi}$  减小,  $\hat{E}_T$  增大, 使得  $\hat{\omega}$  增大以将  $\hat{\varphi}_s$  恢复到原值; 若漂移使  $\Delta\varphi_s$  增大, 则  $\hat{E}_M$  和  $\hat{\Psi}$  增大,  $\hat{E}_T$  减小, 使得  $\hat{\omega}$  减小以将  $\hat{\varphi}_s$  恢复到原值。该模型解决了传统电压模型不能抑制积分器零点漂移的问题。

### 3 磁链观测器稳定性仿真分析

#### 3.1 稳定性仿真

根据图 3 在 Matlab/Simulink 环境下构建仿真模型。仿真中输入电动势幅值  $|E| = 30$  V, 电压角频率  $\omega = 31.4 \text{ rad/s}$ 。

当  $k$  取不同值时磁链观测器的响应曲线如图 5 所示, 分别给出了气隙磁链幅值  $\psi_m$  的理论值和观测值、角速度  $\omega$  的理论值和观测值以及磁链位置角  $\varphi_s$  的理论值和观测值。

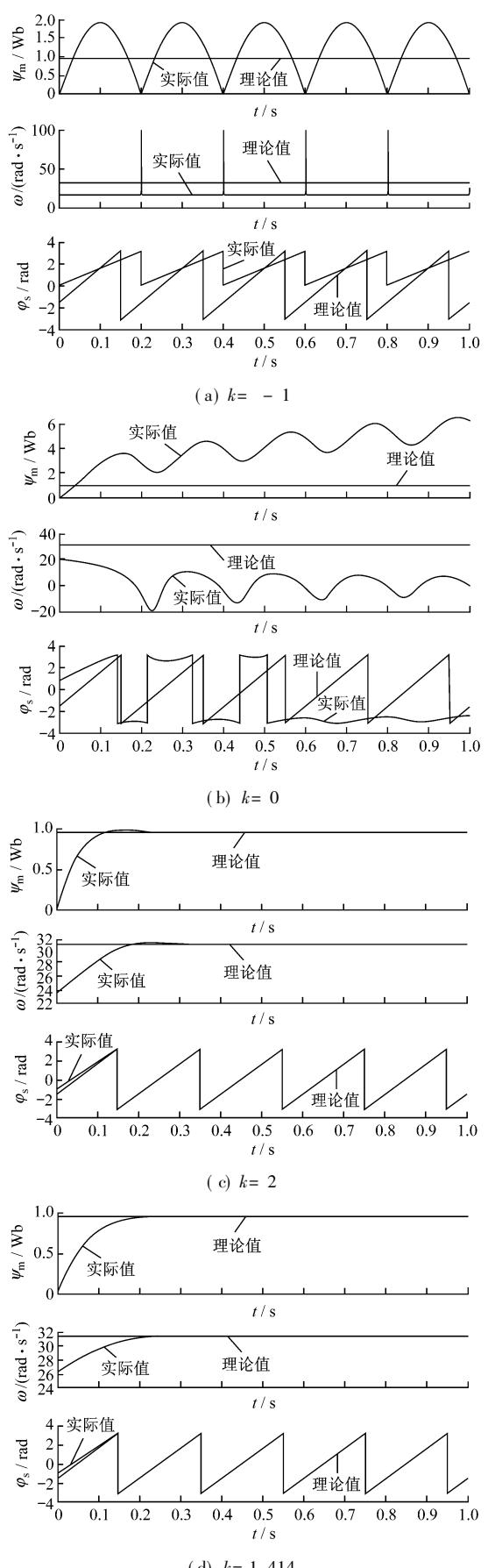
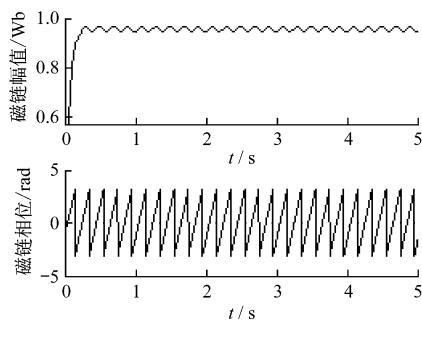


图 5  $k$  值对磁链观测器稳定性的影响

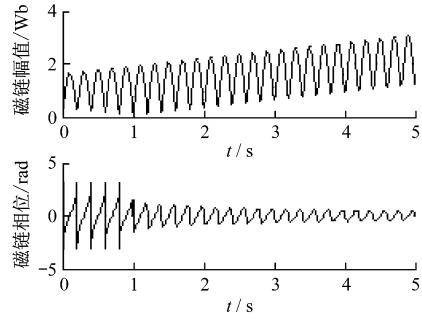
从图5可看出, 当 $k=0$ 时, 磁链观测器处于振荡状态; 当 $k>0$ 时, 磁链观测器稳定; 当 $k<0$ , 磁链观测器处于发散状态。仿真结果说明引入校正环节后, 磁链观测器的稳定性得到了增强。

### 3.2 直流偏置扰动仿真

若同步电动机变频调速系统的检测环节存在误差, 会使得磁链观测器输入电动势信号中存在直流信号, 即存在直流偏置。比较分析此时2种电压模型对直流偏置的抑制能力。假设输入电动势信号中的 $E_a$ 存在直流偏置 $|E|$ , 即 $\dot{E}_a=E_a+|E|$ 。仿真时假设存在 $1\% \times |E|$ 的直流偏置, 即 $k=0.01$ , 仿真结果如图6所示。



(a) MT 电压模型



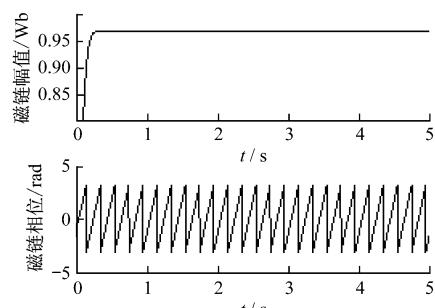
(b) 传统电压模型

图6 直流偏置情况下两种电压模型对直流偏置抑制的仿真结果

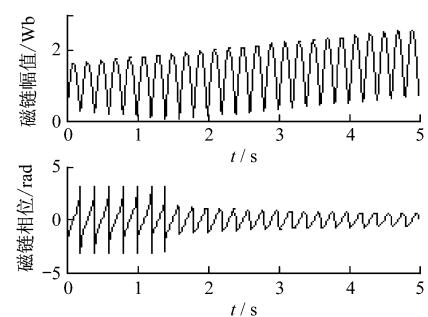
从图6可看出, 传统电压模型在输入信号存在直流偏置情况下, 观测出的磁链呈发散状态, 说明此时基于传统电压模型的磁链观测器不能稳定工作; 而MT电压模型则能较好地抑制直流偏置。

### 3.3 积分零点漂移抑制仿真

采用2种电压模型对磁链观测器模型中2个积分器零点漂移的抑制作用进行仿真分析, 结果如图7所示。从图7可看出, MT电压模型得到的磁链并没有因为积分零点漂移的存在而出现漂移, 而传统的电压模型在积分器存在零点漂移时, 其输出的磁链也会出现漂移。



(a) MT 电压模型



(b) 传统电压模型

图7 2种电压模型抑制积分器零点漂移仿真结果

## 4 结语

分析了传统的电压模型, 提出采用MT轴系下的负反馈方式可以有效地解决直流偏置误差和积分零点漂移问题, 并通过仿真验证了MT轴系下磁链观测器的稳定性, 对从事永磁同步电动机控制系统研究的工程技术人员具有一定的理论指导意义。

## 参考文献:

- [1] 赵峰, 温旭辉, 龚汝振, 等. 一种新颖的磁链观测电压模型[J]. 电机与控制应用, 2005, 32(8): 32-35.
- [2] 高金文, 温旭辉, 赵峰. 基于锁相环的磁链观测技术研究[J]. 电机与控制应用, 2006, 33(5): 20-24.
- [3] 马小亮, 魏学森. 数字矢量控制和直接力矩控制调速系统中的电压模型[J]. 电工技术学报, 2004, 19(3): 65-69.
- [4] 高景德, 王祥衍, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 清华大学出版社, 2005.
- [5] HAMEFORS L. Speed Estimation from Noisy Resolver Signals [C]/6th International Power Electronics and Variable Speed Drives Conference, 1996, Nottingham: 279-282.
- [6] 周晓峰. 交-直-交同步电动机矢量控制系统研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2007.