无感FOC非线性磁链观测器

非线性磁链观测器可以快速实现正反转切换；可以观测到极低的转速而不需要强拖启动。但是在零速时带载能力很弱，所以一般情况下还是使用IF开环+速度环闭环控制电机。

非线性磁链观测器的状态变量为磁链值，观测的磁链值收敛于电机实际磁链值，观测器收敛。非线性是由于观测器存在sin和cos项，所以是非线性观测器。

表贴式永磁同步电机**alpha-beta**轴电压方程如下所示：

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s \frac{d}{dt} & 0 \\ 0 & R_s + L_s \frac{d}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_e \psi_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -sin\theta \\ cos\theta \end{bmatrix}$$

$$\frac{di_\alpha}{dt} = -\frac{-R_s}{L_s} i_\alpha + \frac{\omega_e \psi_f}{L_s} sin\theta - \frac{u_\alpha}{L_s}$$

$$\frac{di_\beta}{dt} = -\frac{-R_s}{L_s} i_\beta - \frac{\omega_e \psi_f}{L_s} cos\theta - \frac{u_\beta}{L_s}$$

将公式变换：

$$L \begin{bmatrix} \dot{i_\alpha} \\ \dot{i_\beta} \end{bmatrix} = -R_s \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \omega_e \psi_m \begin{bmatrix} sin\theta \\ -cos\theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix}$$

定义状态变量：

$$\begin{bmatrix} \dot{x_1} \\ \dot{x_2} \end{bmatrix} = L \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} - w_e \psi_m \begin{bmatrix} sin\theta \\ -cos\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = -R_s \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix}$$

将上述方程积分：

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = L \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \psi_m \begin{bmatrix} cos\theta \\ sin\theta \end{bmatrix}$$

定义控件向量 $eta(x)$:

$$eta(x) = \begin{bmatrix} eta(x_1) \\ eta(x_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} - L \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \psi_m \begin{bmatrix} cos\theta \\ sin\theta \end{bmatrix}$$

非线性磁链观测器模型：

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} + \frac{\gamma}{2} \begin{bmatrix} eta(x_1) \\ eta(x_2) \end{bmatrix} (\psi_m^2 - \|eta(x)\|^2)$$

收敛条件： $\|eta(x)\|^2 = \psi_m^2$

模型离散化：

$$\begin{bmatrix}\hat{x}_{1k}\\ \hat{x}_{2k}\end{bmatrix}=T_s\left[\begin{bmatrix}y_{1(k-1)}\\ y_{2(k-1)}\end{bmatrix}+\frac{\gamma}{2}\begin{bmatrix}eta(x_1)_{k-1}\\ eta(x_2)_{k-1}\end{bmatrix}(\psi_m^2-\|eta(x)\|^2)\right]+\begin{bmatrix}\hat{x}_{1(k-1)}\\ \hat{x}_{2(k-1)}\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}cos\hat{\theta}\\ sin\hat{\theta}\end{bmatrix}=\frac{1}{\psi_m}\left(\begin{bmatrix}\hat{x}_{1k}\\ \hat{x}_{2k}\end{bmatrix}-L\begin{bmatrix}i_\alpha\\ i_\beta\end{bmatrix}\right)$$

模型离散化：

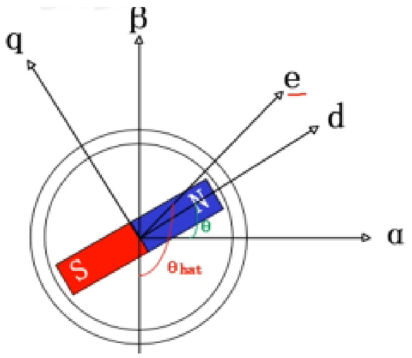
$$\begin{bmatrix}\hat{x}_{1k}\\ \hat{x}_{2k}\end{bmatrix}=T_s\left[\begin{bmatrix}y_{1(k-1)}\\ y_{2(k-1)}\end{bmatrix}+\frac{\gamma}{2}\begin{bmatrix}eta(x_1)_{k-1}\\ eta(x_2)_{k-1}\end{bmatrix}(\psi_m^2-\|eta(x)\|^2)\right]+\begin{bmatrix}\hat{x}_{1(k-1)}\\ \hat{x}_{2(k-1)}\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}cos\hat{\theta}\\ sin\hat{\theta}\end{bmatrix}=\frac{1}{\psi_m}\left(\begin{bmatrix}\hat{x}_{1k}\\ \hat{x}_{2k}\end{bmatrix}-L\begin{bmatrix}i_\alpha\\ i_\beta\end{bmatrix}\right)$$

基于反电动势的PLL：

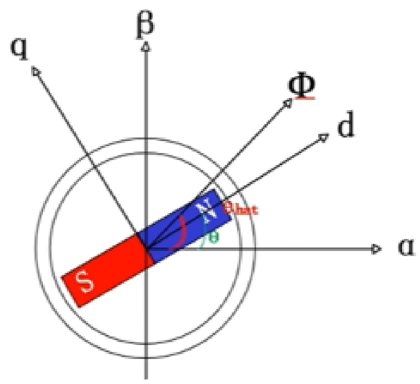
基于反电动势观测器系统观测的是反电动势电压，由于电压经过电感相位相对电流相位超前90°，故观测器得到的角度需要将90°补偿回来：

实际值： $\hat{\theta}'=\hat{\theta}-\frac{\pi}{2}$ ， $\hat{\theta}$ 是观测值。



$$sin(\theta-\hat{\theta})=sin\theta cos\hat{\theta}-cos\theta sin\hat{\theta}=sin\theta cos(\hat{\theta}-\frac{\pi}{2})-cos\theta sin(\hat{\theta}-\frac{\pi}{2})=-sin\theta sin\hat{\theta}-cos\theta cos\hat{\theta}$$

基于磁链观测器的PLL：



$$sin(\theta-\hat{\theta})=sin\theta cos\hat{\theta}-cos\theta sin\hat{\theta}$$

参考文献

[1] Sensorless Control of Surface-Mount Permanent-Magnet Synchronous Motors Based on a Nonlinear Observer.