

基于转子磁场定向矢量控制的感应电机 改进磁链观测方法

马会贤

(银川能源学院, 宁夏 银川 750105)

摘要: 传统的磁链观测方法通常采用低通滤波器取代电压模型的纯积分环节, 由于其易于实现, 较多应用于工程实践。但其忽略了直流偏置, 并随之引入了相位偏差以及幅值上的误差。针对这一现象, 提出改进磁链观测的方法, 采用高通与低通滤波环节串联的方式, 在此基础上推导出相对应的相位及幅值的偏差补偿策略, 解决了直流偏置问题。最后通过仿真和试验对所述方法进行有效性和准确性的验证。

关键词: 感应电机; 磁链观测; 直流偏置; 转子磁场定向矢量控制

中图分类号: TM 346 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)08-0065-04

Improved Flux Observation Method Based on Rotor-Field Oriented Vector Control of Induction Motor

MA Huixian

(Yinchuan Energy Institute, Yinchuan 750105, China)

Abstract: Based on voltage mode flux linkage, the traditional method usually used low-pass filter easy to be applied in implement instead of pure integral element. However, this method ignored the DC bias and brought the deviation in phase and amplitude. To solve this problem, put forward the improved flux observation method. In the base of improved method, deduced the corresponding compensation strategy, solving the problem of DC bias. Simulation and experiments showed the effectiveness of the proposed method owning high practical value.

Key words: induction motor; flux observation; DC bias; rotor-field oriented vector control

0 引言

随着汽车、轨道交通等领域交通运输方式的迅猛发展, 传动技术的应用也愈加广泛。现代传动技术普遍采用转子磁场定向控制或直接转矩控制, 而对磁链的准确观测是实现控制的关键。传统的磁链观测方法包括电流模型、电压模型及混合观测模型^[1]。但是, 由于对电机参数过度依赖, 基于电流模型的磁链观测方法易引起磁链观测的不准确程度较高, 所以较多应用在低速场合。对于较多传动技术应用的场合比如轨道交通领域, 电动机在高速等级下工作比重较大。与此同时, 传统的电压模型的观测方法则由于其电机转子侧参数不敏感, 因而应用较为广泛^[1]。

在实际的应用中, 由于电磁干扰、传感器测量及 AD 采样误差等实际问题, 使得电压模型在实际工程中存在纯积分环节直流偏置和积分饱和问题^[2]。针对这一现象, 本文采用了一种改进的磁链观测模型, 分别对电压模型的纯积分环节使用低通串联高通滤波环节取代, 并实时采用补偿措施, 以此保证了磁链观测的准确性, 并进行了仿真和试验验证。

1 传统磁链观测方法

传统的电压模型根据电机定子侧电压以及电流估算电机磁链的幅值和相位, 并依据感应电机数学模型, 其定子磁链为

$$\varphi_s = \int (u_s - i_s R_s) dt \quad (1)$$

并在此基础上可推导得出转子侧磁链:

$$\varphi_r = (\varphi_s - \sigma L_s i_s) L_r / L_m \quad (2)$$

式中: φ_s 、 φ_r 、 u_s 、 i_s ——电机定、转子磁链和定子侧电压、电流;

R_s 、 L_r 、 L_s 、 L_m 、 δ ——电机定子侧电阻, 转子、定子电感、互感, 漏感系数。

学者们往往采用低通滤波器取代电压模型中的纯积分环节, 以此解决直流偏置的问题^[3]。

$$\varphi_s = \frac{1}{s + \omega_{cl}} (U_s - R_s I_s) \quad (3)$$

式中: ω_{cl} ——低通截止频率。

虽然通过一阶低通滤波环节替换纯积分环节能够在一定程度上消除积分饱和现象, 但其在相位和幅值上同样会存在一定的误差, 与此同时, 由于直流偏置的频率较低, 因而采用低通滤波环节无法解决实际工程中由于传感器测量等造成的直流偏置问题^[4], 因而还需补偿其滤波环节所造成的误差。

2 改进的磁链观测方法

结合上文所述, 传统的方法主要有以下问题有待解决: (1) 解决实际工程中的直流偏置问题; (2) 对滤波环节所产生的相位和幅值上的误差进行适当的补偿措施。

为解决直流偏置问题, 现采用高通滤波与低通滤波环节串联的方法, 分别对电压模型中的电压和电流项进行处理。

$$\varphi_s = \frac{s}{s + \omega_{ch}} \frac{1}{s + \omega_{cl}} U_s - \frac{s}{s + \omega_{ch}} \frac{1}{s + \omega_{cl}} R_s I_s \quad (4)$$

其中: $\varphi_s = \varphi_{sc} + j\varphi_{\beta}$, $U_s = U_{sc} + jU_{\beta}$, $I_s = I_{sc} + jI_{\beta}$ 。

高通与低通滤波环节串联能够提高磁链观测精度的原因如下: (1) 串联高通滤波环节后, 该环节能够对单低通滤波环节产生的误差进行补偿, 并且能够消除直流偏置的影响; (2) 在实际工程中电机电压较电机电流变化缓慢, 由此对电压和电流分别用不同的截止频率进行处理, 可以采用不同的截止频率保证磁链观测的

准确性^[5]。

为提高电机磁链观测精度, 针对前文的第二个问题可分别进行处理, 其中相位方面:

相比实际情况, 经过 LPF 滤波后的观测磁链相位上超前实际磁链 ($90^\circ - \phi_L$), 并且可以很容易得出

$$\varphi_L = -\arctan\left(\frac{\omega_e}{\omega_{cl}}\right) \quad (5)$$

从而可以得出相位方面需补偿的角度为 $-(90^\circ - \phi_L)$ 。

对于幅值方面, 相比实际磁链, 可推得

$$\begin{cases} |U_s - R_s I_s| = |\varphi_L^*| |j\omega_e| \\ |U_s - R_s I_s| = |\varphi_L| |j\omega_e + \omega_{cl}| \end{cases} \quad (6)$$

另两式相等, 可推导得出其幅值方面的补偿为

$$M_L = \frac{\sqrt{(\omega_e^2 + \omega_{cl}^2)}}{|\omega_e|} \quad (7)$$

与此同时, 针对高通滤波的相位方面可得出

$$\varphi_H = \arctan\left(\frac{\omega_{ch}}{\omega_e}\right) \quad (8)$$

则, 相位上的补偿应为 $-\phi_H$ 。

在幅值方面, 依照低通滤波环节的推导过程, 可得

$$|\varphi_s^*| = |\varphi_L| \frac{|j\omega_e|}{|j\omega_e + \omega_{ch}|} \quad (9)$$

则幅值补偿系数为

$$M_H = \frac{\sqrt{(\omega_e^2 + \omega_{ch}^2)}}{|\omega_e|} \quad (10)$$

综上所述, 就高通和低通滤波环节, 整体相位补偿为 $-(90^\circ + \phi_H - \phi_L)$, 整体幅值补偿为 $\sqrt{(\omega_e^2 + \omega_{ch}^2)} \sqrt{(\omega_e^2 + \omega_{cl}^2)} / |\omega_e|^2$ 。相位方面的补偿表达推导为

$$e^{-j(90^\circ + \varphi_H - \varphi_L)} = \frac{1}{\sqrt{(\omega_e^2 + \omega_{cl}^2)} (\omega_e^2 + \omega_{ch}^2)} [(\omega_e^2 - \omega_{cl}\omega_{ch}) - j(\omega_e\omega_{cl} + \omega_e\omega_{ch})] \quad (11)$$

同幅值方面相结合很容易得出总补偿量为

$$C = \left[\frac{(\omega_e^2 - \omega_{cl}\omega_{ch})}{\omega_e^2} - j \frac{(\omega_{cl} + \omega_{ch})}{\omega_e} \right] \quad (12)$$

整理可得

$$\begin{aligned} \varphi_{s\alpha}^* + j\varphi_{s\beta}^* &= \\ \left[\frac{(\omega_e^2 - \omega_{cL}\omega_{cH})}{\omega_e^2} - j \frac{(\omega_{cL} + \omega_{cH})}{\omega_e} \right] (\varphi_{s\alpha} + j\varphi_{s\beta}) &= \\ \left[\varphi_{s\alpha} \frac{(\omega_e^2 - \omega_{cL}\omega_{cH})}{\omega_e^2} + \varphi_{s\beta} \frac{(\omega_{cL} + \omega_{cH})}{\omega_e} \right] + & \\ j \left[\varphi_{s\beta} \frac{(\omega_e^2 - \omega_{cL}\omega_{cH})}{\omega_e^2} - \varphi_{s\alpha} \frac{(\omega_{cL} + \omega_{cH})}{\omega_e} \right] & \quad (13) \end{aligned}$$

选取截止频率与同步频率变化,即取 $\omega_{cL} = \lambda_L \omega_e, \omega_{cH} = \lambda_H \omega_e$, 对式(13)简化后得到相应的补偿公式为

$$\begin{aligned} \varphi_{s\alpha}^* + j\varphi_{s\beta}^* &= [\varphi_{s\alpha}(1 - \lambda_L\lambda_H) + \varphi_{s\beta}(\lambda_L + \lambda_H)] + \\ & j[\varphi_{s\beta}(1 - \lambda_L\lambda_H) - \varphi_{s\alpha}(\lambda_L + \lambda_H)] \quad (14) \end{aligned}$$

通常情况下,选取 $\lambda_L = 2\lambda_H$, 并且由文献[6-7]可知 $\lambda_L = 0.2 \sim 0.3$ 为最佳, 并且为了防止在低速情况下 ω_{cL}, ω_{cH} 过低致低通滤波时间常数过大, 故而需对其进行下限限定, 一般设定最小值为 1 rad/s。

3 仿真及试验验证

为了更好地验证前文所述改进磁链观测模型和补偿措施, 本文将从仿真和试验两个方面进行重点验证。

同前文分析一致, 仅通过 LPF 滤波代替积分环节, 则与实际磁链相比, 所观测获得的磁链会在相位及幅值方面造成一定的偏差, 当添加高通滤波环节后的观测误差可明显减轻。但从图 1 可以看出, 该偏差依旧存在, 因而需要增添相位和幅值上的补偿措施, 以此保证磁链观测的准确性。

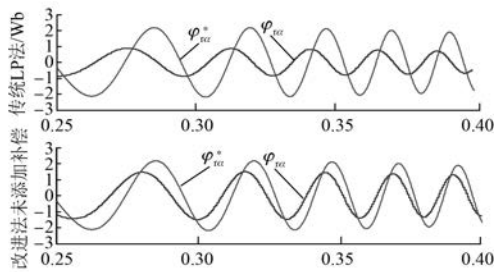


图 1 仅有低通滤波与未加补偿的改进方法的观测效果对比

从仿真波形图 2 中, 很明显可以看出未添加补偿时磁链在相位和幅值方面均有较大偏差, 增添相位和幅值补偿后, 通过改进的观测方法能够保证观测磁链值能准确地跟踪电机实际磁链值。

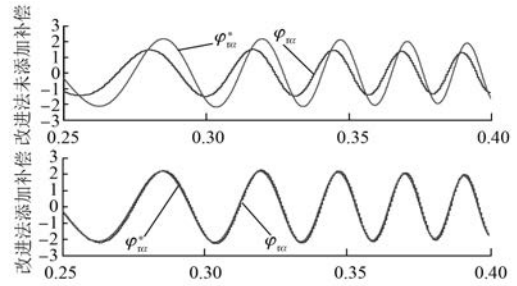


图 2 高通串联低通滤波环节未添加与添加补偿环节的差异

在地面试验平台上对前文所述改进的磁链观测模型进行验证。如图 3 所示, 为电机频率在全速范围即 5 Hz, 70 Hz 和 120 Hz 工况下的磁链观测效果。从图 3 可看出, 在电机全速范围内, 改进

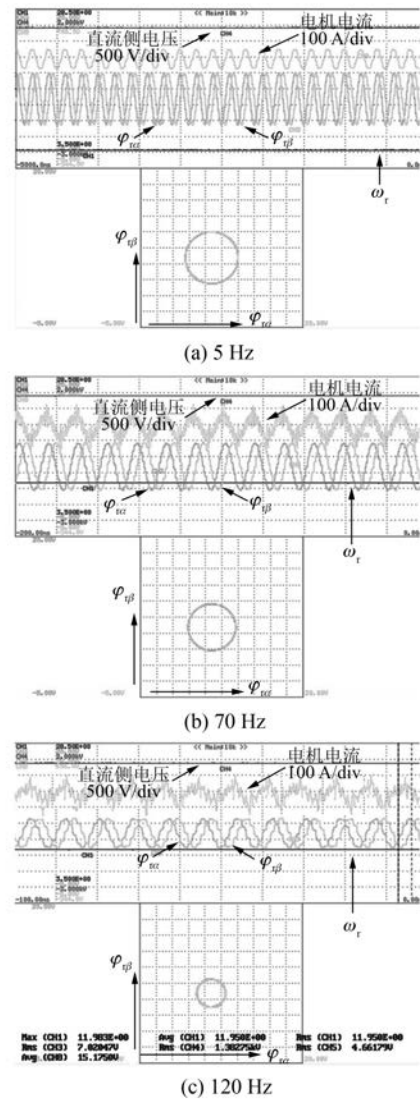


图 3 低中高速下磁链观测试验波形

的考虑铁耗的电压型磁链观测正常,磁链波形正弦度较好,转子磁链轨迹在稳态时其轨迹近似圆形,无积分漂移现象发生,并且不存在积分饱和的现象。当电机转速达到 120 Hz 时,电机工作于弱磁区域,在该频率下,转子磁链的轨迹面积明显小于恒励磁区域,在该区域,磁链观测依旧具有良好的稳定性。

4 结 语

本文通过对传统的电压磁链观测模型进行分析,针对其积分饱和、存在直流偏置等问题进行详尽分析,并提出采用低通和高通滤波环节,以此提高整体的观测准确性。在此基础上采取了相应的补偿措施,使得电机在全速范围内均保证了良好的观测稳定性。最终通过仿真和试验验证了文中所述理论的准确性和可行性。

【参 考 文 献】

- [1] 文晓燕. 列车牵引电机低速运行优化控制研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [2] HO S M, SOOK H D. An improved stator flux estimation for speed sensorless stator flux orientation

control of induction motors [J]. PESC, 2011, 15 (2) : 1581-1586.

- [3] SEYOUM D, GRANTHAMAND C, RAHMAN M F. Simplified flux estimation for control application in induction machines [J]. IEMDC, 2003, 3 (2) : 691-695.
- [4] ZHANG X, QU W L. Method for elimination of DC offset and steady state error for voltage module flux observer [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2006, 25 (2) : 39-42.
- [5] HU J, WU B. New integration algorithms for estimating motor flux over a wide speed range [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1998, 13 (5) : 969-977.
- [6] ANDRADE D A, SILVERIRA A W F V. DSP based torque estimation in three-phase cage induction motors [J]. IEMDC, 2007, 2 (2) : 1726-1731.
- [7] IDRIS N R N, YATIM A H M. An improved stator flux estimation in steady-state operation for direct torque control of induction machines [J]. IEEE Transactions Industry Applications, 2000, 38 (3) : 110-116.

收稿日期: 2017 -03 -22

(上接第 47 页)

- [2] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [3] LIN J K. A new approach of dead-time compensation for PWM voltage inverters [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2002, 49 (4) : 476-483.
- [4] KIM H S, KIM K H, YOUN M J. Online dead-time compensation method based on time delay control [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2003, 11 (2) : 279-285.
- [5] JEONG S, PARK M. The analysis and compensation of dead-time effects in PWM inverters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1991, 38 (2) : 108-114.
- [6] CHOI J, SUL S. Inverter output voltage synthesis using novel dead time compensation [J]. IEEE Transactions on power Electronics, 1996, 11 (2) : 221-227.

- [7] 王庆义, 邓歆, 罗慧, 等. 一种新的基于 SVPWM 策略的死区补偿方法 [J]. 电气传动, 2008, 38 (2) : 19-22.
- [8] 胡庆波, 吕征宇. 一种新颖的基于空间矢量 PWM 的死区补偿方法 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (3) : 13-17.
- [9] SUKEQAWA T, KAMIYAMA K, MIZUNO K, et al. Fully digital vector controlled PWM VSI-fed AC drives with an inverter dead-time compensator strategy [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1991, 27 (3) : 552-559.
- [10] GARCIA M, LIPO T A. On-line dead-time compensation technique for open-loop PWM-VSI drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1999, 14 (4) : 683-689.

收稿日期: 2016 -08 -16