

# 基于逆变器控制的异步电机离线参数自整定方法研究

程文, 苏建徽, 王建国, 瞿小丽

合肥工业大学电气与自动化工程学院, 合肥 230009

**摘要:** 基于PWM逆变器-电机平台, 在异步电机全静止状态下通过单相交流实验离线辨识参数, 分析了注入的电流频率与励磁支路阻抗、转子支路阻抗的关系, 以此选取合适的辨识频率; 同时分析了死区对辨识结果的影响, 通过注入2个频率相等, 幅值不同的正弦波电流计算实部补偿电压, 最后实验证明辨识算法准确辨识出电机所有参数。

**关键词:** 异步电机, 单相交流实验, 辨识频率, 死区

## 1 引言

在异步电机矢量控制中, 磁链观测和电流环调节器参数优化都依赖电机参数, 对异步电机参数的辨识主要有离线辨识和在线辨识, 离线辨识的目的是实现控制器参数的自整定, 为矢量控制提供一组可信度较高的初始值<sup>[1]</sup>, 在线辨识的目的是跟踪电机参数的变化, 实时调整参数, 使控制性能不因为参数变化而下降。本文主要关注离线参数辨识, 而传统的离线辨识方法需要进行空载和堵转实验, 可行性不高。

因此本文基于PWM逆变器-电机平台, 提出一种全静止状态下的异步电机离线参数自整定方法, 将电机一相绕组开路, 通过注入单相正弦电流辨识参数, 并利用频率域分析的方法<sup>[5]</sup>, 分析了注入的正弦电流频率与励磁支路阻抗、转子支路阻抗的关系, 选取了50HZ、15HZ、0.03HZ的正弦波电流辨识漏感、转子电阻和互感, 最后通过实验验证了该方法的可行性。

## 2 异步电机等效电路

在单相交流实验中, 认为电机处于堵转状态, 此时异步电机单相等效电路如图1所示,  $u_s$  为电机相电压,  $i_s$  电

机相电流,  $R_s$  为定子电阻,  $R_r$  为转子电阻,  $L_{s\sigma}$  为定子漏感,  $L_{r\sigma}$  为转子漏感,  $L_m$  为互感。

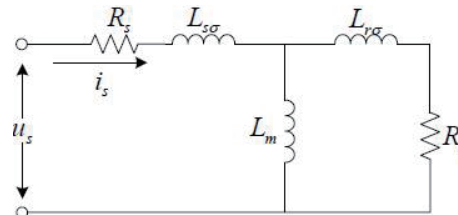


图1 异步电机单相等效电路图

变频器与电机的连接方式如图2所示, 变频器主拓扑电路为电压型的PWM逆变器, 电机简化成星形连接的三个绕组。  $U_{dc}$  为直流母线电压, VT<sub>1</sub>~VT<sub>6</sub> 为六个开关管, 逆变器的三相输出 a、b、c 连接到电机 A、B、C 三个绕组上。

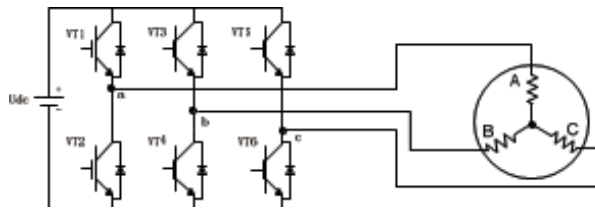


图2 电压型PWM逆变器和异步电机

### 3 单相交流实验

单相交流实验的控制框图如图 3 所示, S1 为一双掷开关, 辨识定子电阻时指令电压为直流, 辨识漏感、转子电阻、互感时, 指令电压为电流环 PI 调节器输出。

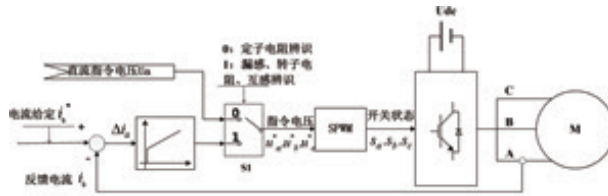


图 3 参数辨识的控制框图

流过励磁支路和转子支路的电流是对相电流的分流, 其大小取决于注入电流频率的大小, 表 1 为注入电流频率与励磁支路的阻抗、转子支路阻抗的关系, 由表 1 可知, 1) 给定电流频率较高 (如 50HZ),  $X_m \gg R_r$ , 励磁支路相当于开路; 2) 给定电流频率在转差频率附近时 (如 3HZ),  $X_m \approx R_r$ , 励磁支路和转子支路流过的电流大致相等或者可以认为在一个数量级上; 3) 给定电流频率较低 (如 0.03HZ),  $X_m \ll R_r$ , 转子支路相当于开路。流过转子支路的电流越大, 转子电阻的辨识结果误差越小, 考虑到集肤效应的影响, 采用 15HZ 的电流辨识转子电阻; 同理, 可采用 0.03HZ 的电流辨识互感。

表 1 给定电流频率与励磁支路以及转子支路阻抗关系

频率/HZ	50	3	0.03
阻抗	$X_m \gg R_r$	$X_m \approx R_r$	$X_m \ll R_r$

## 4 电机参数辨识

### 4.1 定子电阻辨识

定子电阻辨识采用直流伏安法, 在电机 A 相和 B 相之间注入占空比为 50% 的低频方波激励, 如图 4 所示, 当

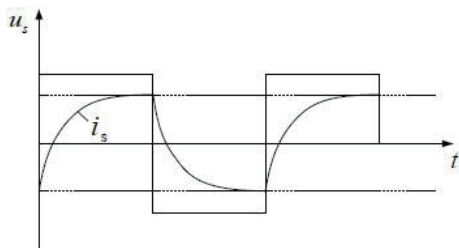


图 4 低频方波激励

电流达到稳态时, 电机 AB 两相之间相当于两个定子电阻串联, 用欧姆定律计算定子电阻:

$$R_s = u_s / 2i_s \quad (1)$$

死区导致逆变器输出电压损失, 辨识定子电阻时输出电压值小, 导致定子电阻辨识值误差很大, 由文献 [7] 可知, 在一个开关周期内死区造成电压损失可表示为:

$$\Delta u_D = \begin{cases} \frac{-2U_{dc}t_D}{T}, i_s > 0 \\ \frac{2U_{dc}t_D}{T}, i_s < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $T$  为开关周期,  $t_D$  为死区时间。当开关周期、逆变器直流侧电压、死区时间固定时, 死区造成电压的损失仅与电流方向有关。在半个方波周期内, 电流达到稳态时方向不变, 因此采用死区补偿消除死区对辨识定子电阻产生的影响。

### 4.2 漏感辨识

A 相和 B 相之间通 50HZ 的单相正弦交流电, 此时电机单相等效电路图如图 5 所示, 当绕组中通过的电流达到额定值, 采用傅里叶分析 [6] 的方法计算出电机短路电阻和电抗。

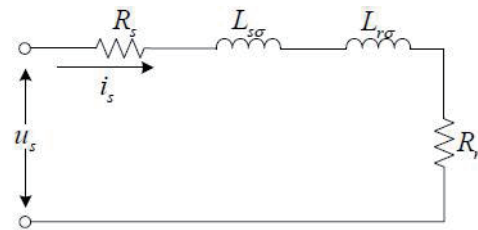


图 5 漏感辨识的电机等效电路

漏感辨识中, 电机单相电路近似为定转子电抗的简单串并联, 串联线路的阻抗为  $Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq}$ , 其中等效电路电阻  $R_{eq}$  和等效电路电抗  $X_{eq}$  分别为:

$$R_{eq} = 2(R_s + R_r) = U_{Re} / I_m \quad (3)$$

$$X_{eq} = 2(X_{s\sigma} + X_{r\sigma}) = U_{Im} / I_m \quad (4)$$

式中,  $I_m$  为注入电流幅值;  $U_{Re}$  和  $U_{Im}$  为逆变器输出电压基波的实部和虚部, 由文献 [6] 可得到  $U_{Re}$  和  $U_{Im}$  的计算公式为:

$$U_{Re} = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \sin \omega t dt \quad U_{Im} = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \cos \omega t dt \quad (5)$$

式中,  $u(t)$  表示逆变器输出电压; 则漏感和转子电阻分别为:

$$L_\sigma = X_{eq} / 4\omega \quad R_r = R_{eq} / 2 - R_s \quad (6)$$

式中,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f = 50\text{HZ}$ 。漏感辨识中, 死区的影响主要有两个方面: 一是逆变器输出电压畸变, 二是零电流错位现象 [1]。逆变器输出电压畸变会使傅里叶积分不准确, 由

文献 [6] 可知, 死区只会影响逆变器输出电压基波的实部, 对虚部没有影响, 因此辨识出的漏感是准确的, 而转子电阻不准确。傅里叶积分的初始时刻要求是电流正向过零, 零电流钳位现象导致难以准确判断何时电流正向过零, 因此实际实验时, 给定电流的初始相位为零, 采用定时器计数的方法, 在一个电流周期开始时刻开始积分。

### 4.3 转子电阻和互感辨识

辨识转子电阻时注入电流频率为 15HZ, 辨识互感时注入电流频率是 0.03HZ。死区对实部电压有影响, 需要对其进行修正, 通过注入两个频率相同, 幅值不同的交流信号可计算出误差补偿电压  $U_{comp1}$ , 由文献 [6] 可得到其计算公式如下:

$$U_{comp1} = (U_{Re1} I_{m2} - U_{Re2} I_{m1}) / (I_{m2} - I_{m1}) \quad (7)$$

修正之后, 互感两端的电压实部  $U_{Re^*}$  和虚部  $U_{Im^*}$  为:

$$U_{Re^*} = (U_{Re} - 2R_s I_m) / 2 \quad U_{Im^*} = (U_{Im} - 2\omega L_\sigma I_m) / 2 \quad (8)$$

则互感两端的电压其幅值  $|U|$  和相角  $\alpha$  表示为:

$$|U| = \sqrt{U_{Re^*}^2 + U_{Im^*}^2} \quad \alpha = \arctan(U_{Im^*} / U_{Re^*}) \quad (9)$$

则转子电阻和互感分别为:

$$R_r = |U| / I_m \cos \alpha \quad L_m = |U| / \omega I_m \sin \alpha \quad (10)$$

## 5 实验验证

实验平台是以 TMS320F28335 DSP 为主控制器的通用变频器, 采用以上辨识方法编写控制算法, 对一台 15KW 的异步电机进行参数辨识, PWM 逆变器的开关频率是 3KHz, 直流侧电压为 300V, 死区时间为  $2.5\mu s$ 。

### 5.1 软件程序流程图

程序框图如下图所示:

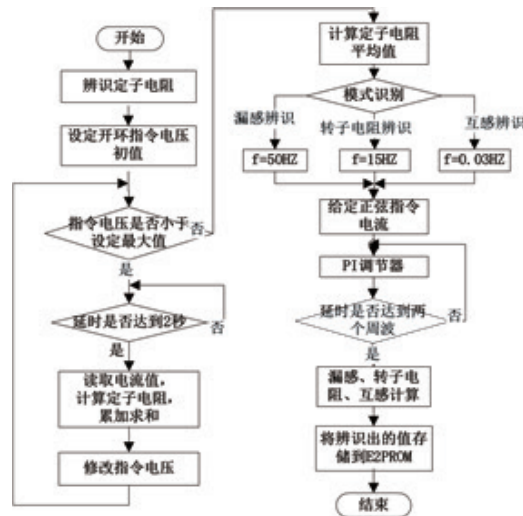


图 6 参数辨识程序流程图

如图 6 所示, 参数辨识程序主要包含两个部分, 开环部分辨识定子电阻, 单相电流单环部分辨识漏感、转子电阻、互感, 通过模式识别, 选择注入正弦电流的频率。

### 5.2 辨识结果

电机铭牌参数和辨识结果如表 2 所示。

表 2 电机参数辨识结果

参数	真实值	辨识值	误差%
$R_s / \Omega$	0.212	0.215	1.42
$L_\sigma / \text{mH}$	2.50	2.42	3.20
$R_r / \Omega$	0.210	0.205	2.38
$L_m / \text{mH}$	59.40	55.45	6.65

## 6 结语

本文基于电压型 PWM 逆变器的单相交流实验, 在异步电机全静止状态下离线辨识参数, 选取了合适的辨识频率, 并在不同频率下对电机等效电路近似处理, 推导出各个参数的计算公式, 同时分析了死区对辨识结果的影响, 采用注入 2 个频率相等, 幅值不同的正弦波电流计算实部补偿电压, 最后实验结果表明电机所有参数的辨识误差小, 验证了辨识算法的有效性。

## 参考文献

- [1] 凌光. 基于全阶观测器的异步电机无速度传感器矢量控制研究 [D]. 浙江: 浙江大学, 2012: 38-39.
- [2] 马小亮. 矢量控制系统中异步电机参数的估算和测量 [M]. 电气传动, 2010, 40(7): 1~3
- [3] Sonnaillion M O, Bisheimer G, DeAngelo C, et al. Automatic induction machine parameters measurement using standstill frequency-domain [J]. IET Electr on Power Appl, 2007, 1(5): 833~838.
- [4] Gastli A. Identification of induction motor equivalent circuit parameters using the single-phase test [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1997, 10(19): 51~56.
- [5] Seok J K, Moon S I, Sul S K. Induction machine parameter identification using PWM inverter at standstill [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1997, 12(2): 127~132.
- [6] 陈伟, 于泳, 徐殿国, 徐壮. 基于自适应补偿的异步电机静止参数辨识方法 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(6): 156~162.
- [7] 胡渊, 蒋锐, 韩淳. SVPWM 逆变控制的死区补偿策略 [J]. 电气技术, 2011, 15(3): 1~3