机车电传动 2016 年第 3 期（2016–05–10）
ELECTRIC DRIVE FOR LOCOMOTIVES № 3，2016（May 10, 2016）
文章编号：1000–128X(2016)03–0018–06

永磁同步电机离线参数辨识方法研究

张瑞峰[1,2]，詹哲军[2]，李　岩[2]，李国锋[2]，尹忠刚[1]
（1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院，陕西 西安　710048；
2. 中车永济电机有限公司 技术中心，陕西 西安　710016）

摘　要：通过采用直流伏安法辨识电机定子电阻参数，采用高频注入法和脉冲电压法辨识电机定子电感参数，并对电感参数的 2 种辨识方法进行了分析和比较，分析永磁同步电机的数学模型，推导出了离线辨识永磁体磁链方法。仿真和试验结果验证了离线辨识定子电阻、定子电感和永磁体磁链方法的有效性。

关键词：永磁同步电机；离线参数辨识；高频注入法；脉冲电压法
中图分类号：TM351　　**文献标识码：**A
doi：10.13890/j.issn.1000-128x.2016.03.005

Research on Off-line Parameter Identification of Permanent Magnet Synchronous Motor

ZHANG Ruifeng[1,2], ZHAN Zhejun[2], LI Yan[2], LI Guofeng[2], YIN Zhonggang[1]

(1. School of Automation and Communication Engineering, Xi'an University of Technology, Xi' an, Shaanxi 710048, China;
2. Technical Center, CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710016, China)

Abstract: DC volt-ampere method was used to identify stator resistance, and high-frequency injection method and pulse voltage method were used to identify stator inductance of PMSM. The two identification inductance methods were analyzed and compared, and with the PMSM mathematical model, the off-line calculation of permanent magnet flux linkage was derived. Simulation and experiment result showed that off-line identify stator resistance, stator inductance and permanent magnet flux linkage was effective.

Keywords: permanent magnet synchronous motor (PMSM); off–line parameter identification; high-frequency injection method; pulse voltage method

0　引言

对永磁同步电机的精确控制需要知道其电机参数，无论是永磁同步电机无速度传感器控制还是电机的弱磁控制以及新型控制算法，大多都需要在知道电机参数的前提下进行。然而一些永磁同步电机在出厂时并没有给出控制电机所需要的电机参数，例如定子电阻、永磁体磁链和等效的 d、q 轴电感等。要更好地的控制电机，就必须在运行电机之前对所需要的电机参数进行辨识[1–8]。辨识的方法一般是通过注入一定频率和幅值的电压，在电机静止或微动的情况下获得电机参数，这类方法就是通常所说的离线参数辨识的方法。

文章采用多种方法分别对永磁同步电机的定子电阻、定子电感和永磁体磁链进行离线辨识，并通过仿真和试验验证了所采用辨识方法的有效性。

1　永磁同步电机数学模型

永磁同步电机在 d–q 坐标系下的电压方程为

$$\left.\begin{aligned} u_d &= R_s i_d + pL_d i_d - \omega L_q i_q \\ u_q &= R_s i_q + pL_q i_q + \omega L_d i_d + \omega \psi_f \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

d–q 坐标系下的磁链方程为

$$\left.\begin{aligned} \psi_d &= L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q &= L_q i_q \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

收稿日期：2015–04–27；修回日期：2016–04–05
基金项目：中国铁路总公司科技研究开发计划课题（2014J001-B）

d–q 坐标系下的电磁转矩方程为

$$T_e=n_p\left(\psi_d i_q-\psi_q i_d\right)=n_p\left[\psi_f i_q+\left(L_d-L_q\right)i_d i_q\right] \tag{3}$$

式中：u_d、u_q 分别为 d、q 轴定子电压；i_d、i_q 分别为 d、q 轴定子电流；R_s 为定子电阻；θ 为转子位置角；L_d、L_q 分别为电机 d 轴、q 轴电感；ψ_f 为永磁体磁链；ψ_d、ψ_q 分别为 d、q 轴定子磁链；T_e 为电机的电磁转矩；n_p 为电机极对数。

2　永磁同步电机的离线参数辨识

2.1　定子电阻辨识方法

永磁同步电机在 ABC 轴系的定子电压方程为

$$u_s=R_s i_s+p(L_s i_s)+p(\psi_f e^{j\theta}) \tag{4}$$

式中：u_s 为定子电压空间矢量；L_s 为等效同步电感。

当给永磁同步电机的三相绕组施加较低的直流电压时（如图 1 所示），电机的定子侧没有交变的电流，不会产生旋转磁场，因而电机转子不会转动，也没有反电动势，这时产生的三相定子电流会很快到达一个稳定的值。因为电机不会转动并且电流是一个稳定的值，所以在稳态时，式（4）中的第三项和第二项为 0，则电压方程为

$$u_s=R_s i_s \tag{5}$$

图 1 中，u_e 为施加在电机绕组上的电压，$i_b=i_c=-i_a/2$。因此可以通过施加的电压 u_e 和测得的 i_a 来计算得出定子电阻 R_s 的值：

$$R_s=\frac{2}{3}\frac{u_e}{i_a} \tag{6}$$

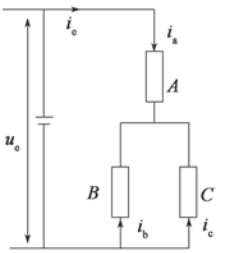

图 1　PMSM 定子电阻直流试验等效图

由于辨识电阻时，施加在电机侧的直流电压较低，逆变器中开关管的管压降会对辨识结果产生较大的影响，因此要在辨识的过程中对管压降所损失的电压进行补偿。

2.2　定子电感辨识方法

辨识永磁同步电机定子电感的方法有多种，下面主要对高频注入法和脉冲电压法进行分析。

2.2.1　基于高频注入法的定子电感辨识方法

永磁同步电机在 α–β 轴系的数学模型可表示为

$$\begin{bmatrix}u_\alpha\\u_\beta\end{bmatrix}=R_s\begin{bmatrix}i_\alpha\\i_\beta\end{bmatrix}+p\begin{bmatrix}\psi_\alpha\\\psi_\beta\end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\begin{bmatrix}\psi_\alpha\\\psi_\beta\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}L_Z+L_X\cos 2\theta & L_X\sin 2\theta\\L_X\sin 2\theta & L_Z-L_X\cos 2\theta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_\alpha\\i_\beta\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\psi_f\cos\theta\\\psi_f\sin\theta\end{bmatrix} \tag{8}$$

式中：ψ_α、ψ_β 分别为定子磁链的 α、β 轴分量；i_α、i_β 分别为定子电流的 α、β 轴分量；u_α、u_β 分别为定子电压 α、β 轴分量。

且定义：

$$L_Z=\frac{L_d+L_q}{2} \tag{9}$$

$$L_X=\frac{L_d-L_q}{2} \tag{10}$$

给永磁同步电机注入高频电压矢量 U_{sv}，可以表示为：

$$\dot{U}_{sv}=\dot{U}_{av}+a\dot{U}_{bv}+a^2\dot{U}_{cv} \tag{11}$$

式中：$a=e^{j120^\circ}$；U_{av}、U_{bv}、U_{cv} 分别为在电机 A、B、C 轴注入高频电压矢量。

通过选择合适的电压幅值，可以让电机不会转动，当频率较高时，能够忽略掉电阻上的压降，且电机静止时 θ 为常数，所以式（8）等号右边第二项的微分为 0。式（7）、式（8）合并可得

$$\begin{bmatrix}U_{sv}\cos\theta_v\\U_{sv}\sin\theta_v\end{bmatrix}=p\left\{\begin{bmatrix}L_Z+L_X\cos 2\theta & L_X\sin 2\theta\\L_X\sin 2\theta & L_Z-L_X\cos 2\theta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{\alpha v}\\i_{\beta v}\end{bmatrix}\right\} \tag{12}$$

式中：$i_{\alpha v}$、$i_{\beta v}$ 分别为施加高频电压矢量得到的 α、β 轴的高频电流分量；θ_v 为注入的高频电压矢量的相位。

以下公式中的 ω_v 为注入的高频电压的角速度。

对式（12）两边同时积分，可以得到

$$\begin{bmatrix}i_{\alpha v}\\i_{\beta v}\end{bmatrix}=\frac{U_{sv}}{\left(L_Z^2-L_X^2\right)\omega_v}\begin{bmatrix}L_Z\cos(\theta_v-\frac{\pi}{2})-L_X\cos(2\theta-\theta_v+\frac{\pi}{2})\\L_Z\sin(\theta_v-\frac{\pi}{2})-L_X\sin(2\theta-\theta_v+\frac{\pi}{2})\end{bmatrix} \tag{13}$$

将式（13）写成矢量形式为

$$\dot{i}_{sv}=\frac{U_{sv}L_Z}{\left(L_Z^2-L_X^2\right)\omega_v}e^{i(\theta_v-\frac{\pi}{2})}+\frac{-U_{sv}L_X}{\left(L_Z^2-L_X^2\right)\omega_v}e^{i(2\theta-\theta_v+\frac{\pi}{2})}=$$

$$\dot{i}_{vp}+\dot{i}_{vn}=i_{vp}e^{i(\theta_v-\frac{\pi}{2})}+i_{vn}e^{i(2\theta-\theta_v+\frac{\pi}{2})} \tag{14}$$

式中：

$$i_{vp}=\frac{U_{sv}L_Z}{\left(L_Z^2-L_X^2\right)\omega_v},i_{vn}=\frac{-U_{sv}L_X}{\left(L_Z^2-L_X^2\right)\omega_v} \tag{15}$$

当电机存在凸极效应时，$L_d<L_q$，故 L_X 不等于 0，将负号保留在 i_{vn} 中使其为正，此时的高频电流信号可以看成是 2 个旋转矢量。由式（14）知，当 2 个矢量同相时，$\theta_v-\frac{\pi}{2}=2\theta-\theta_v+\frac{\pi}{2}$，合成的电流矢量最大，为两者的幅值之和，最大电流可表示为

$$i_{svmax}=i_{vp}+i_{vn}=\frac{U_{sv}(L_Z-L_X)}{\left(L_Z^2-L_X^2\right)\omega_v}=\frac{U_{sv}}{(L_Z+L_X)w_v}=\frac{U_{sv}}{L_d\omega_v} \tag{16}$$

当 2 个矢量反向时，$\theta_v-\frac{\pi}{2}=-(2\theta-\theta_v+\frac{\pi}{2})$，这时合成的矢量最小，为两者的幅值之差，最小电流可表示为

$$i_{vhmin}=i_{vp}-i_{vn}=\frac{U_{sv}(L_Z+L_X)}{\left(L_Z^2-L_X^2\right)\omega_v}=\frac{U_{sv}}{(L_Z-L_X)\omega_v}=\frac{U_{sv}}{L_q\omega_v} \tag{17}$$

U_{sv} 和 ω_v 均为给定值，因此只要测出三相电流，计算出电流矢量的幅值，然后分别求出其最大值和最