

基于快速参数辨识的感应电机转子温度 在线评估方法

李 良¹, 何瑞东², 路艳巧², 李 勇¹, 宋文乐¹, 叶方舟¹, 葛佳蔚³

(1. 国网河北省电力有限公司沧州供电分公司, 河北 沧州 061000;

2. 国网河北省电力有限公司, 河北 石家庄 050011;

3. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘 要: 工程实际中, 如何快速准确监测感应电机转子温度对电气设备状态评估、故障预测和安全生产具有重要意义。但受运行条件限制, 转子温度很难直接测得且通过间接评估方法也存在较大难度。针对这一问题, 提出一种快速参数辨识的转子温度评估方法, 利用转子槽谐波辨识得到转子转速, 进而利用可模拟电机堵转运行的起动初始阶段的实测电参数求解得出转子电阻。将上述求解得到的转速与转子电阻, 当作实时辨识转子电阻的扩展卡尔曼滤波法(EKF)所需初值, 避免了初值求解迭代时间过长的问题, 实现了快速在线辨识转子电阻。进而基于金属材料电阻值与温度之间的关系, 求出转子实时变化温度数据。以 1 台 22 kW 感应电机为例, 辨识了负载条件下的转子温度情况, 验证了所提出方法的有效性与可行性。

关键词: 感应电机; 转子温度; 在线辨识; 扩展卡尔曼滤波

中图分类号: TM 346 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)03-0051-06

doi: 10.12177/emca.2019.169

On-Line Evaluation Method of Induction Motor Rotor Temperature Based on Rapid Parameter Identification

LI Liang¹, HE Ruidong², LU Yanqiao², LI Yong¹, SONG Wenle¹, YE Fangzhou¹, GE Jiawei³

(1. Cangzhou Power Supply Company of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd.,

Cangzhou 061000, China;

2. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050011, China;

3. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University,
Beijing 102206, China)

Abstract: In practice, it is very significant to monitor the rotor temperature of induction motor quickly and accurately for state evaluation, fault prediction and safety production of electrical equipment. However, due to the limitation of the real operating conditions, it is difficult to directly monitor or indirectly evaluate the rotor temperature. To solve this problem, a rapid parameter identification method for rotor temperature evaluation is proposed. The rotor speed is obtained by using the harmonic identification of rotor slot, and then the rotor resistance is obtained by measuring the electrical parameters at the initial stage of starting which can simulate the locked rotor operation of the motor. The rotor speed and resistance obtained by the above solution are regarded as the extended Kalman filter (EKF) initial value for real-time identification of rotor resistance. The proposed EKF method avoids the problem of long iterative time of initial value, and realizes the rapid on-line identification of rotor resistance. Based on the relationship between the resistance value of metal material and the temperature, the real-time temperature data of rotor

收稿日期: 2019-11-05; 收到修改稿日期: 2020-01-02

作者简介: 李 良(1982—), 男, 高级工程师, 研究方向为电气设备状态监测、技术监督管理。

can be obtained. Taking a 22 kW induction motor as an example, the rotor temperature under different load conditions is identified, and the validity and feasibility of the proposed method are verified.

Key words: induction motor; rotor temperature; on-line identification; extended Kalman filter (EKF)

0 引言

感应电机具有结构简单、可靠性强、造价低等优点,在工农业及其他领域得到广泛应用。电机在运行过程中,定转子绕组故障、过载运行等原因均会引起转子温升过高,导致绕组绝缘寿命降低。工程实际中,对于一些驱动关键机械设备的电机,监测转子温度对设备本身的状态评估、故障预测和安全生产具有重要意义。然而,转子是旋转部件,导致转子侧温度难以直接测量。因此,如何快速准确获得转子温度,成为当前该领域的一个难点问题。

在电机系统运行状态评估方面,已有大量学者开展相关研究。在能效评估与故障辨识方面,文献[1]针对实际运行中电机系统无转矩转速传感器的问題,提出了基于可测电气量的能效在线评估方法;文献[2]则提出了一种用于诊断电机定子绕组故障的方法。在转子温度辨识方面,针对感应电机转子温度的实时估计问题,文献[3-4]提出了无需安装温度传感器的参数辨识方法,并基于等效电路推导出转子温度;文献[5-7]提出利用最小二乘法辨识电机参数的方法,分析了辨识过程中可能遇到的常见问题;文献[8]将最小二乘法与神经网络相结合,完成了电机参数的在线辨识,并对噪声环境下的辨识鲁棒性进行了系统分析;文献[9]考虑到工况波动、参数非线性等因素,提出了一种参数辨识方法,提高了辨识精度,但计算量较大。文献[10-11]研究了基于递推最小二乘法的电机参数辨识方法,深入分析了辨识算法中充分激励问题。

以往研究中,通常需要用到电机转速才能完成对转子温度的评估,但在工程实际中,无传感器驱动电机尤其是高压大功率电机,无法实时获得准确的转速信息。为此,文献[12-15]提出可以通过在频域分析定子电流检测到的转子槽谐波来解决转速辨识问题。此外,感应电机本体参数以及辨识算法所需初值参数的准确确定,也是影响参数及温度辨识的关键因素^[16]。因此,在现场运行环境中,缺少转速和参数初值等情况下,如何

获得一种快速而可靠的方法对电机转子温度进行评估,是目前急需解决的一个关键问题。

针对这一问题,本文主要研究在转子槽数未知的情况下,采用基于槽谐波的辨识方法快速、准确地确定转子转速;针对利用扩展卡尔曼滤波法(EKF)在线辨识转子电阻时存在如何准确确定参数初值的问题,利用可模拟电机堵转运行的起动初始阶段的实测电参数求解得出转子电阻;将上述求解得到的转速与转子电阻当作初值,实现了转子电阻参数与温度的快速准确辨识。以1台22 kW感应电机为例,进行试验验证,辨识了不同负载条件下的转子温度情况,验证了所提辨识方法的可行性与实用性。本文研究成果为工程实际中感应电机转子温度在线辨识提供了重要的技术支持。

1 转子温度在线评估理论

感应电机转子温度估计实际上是对转子电阻的辨识,以往研究一般采用EKF进行参数辨识。工程应用中存在2个问题:首先,速度参数是EKF识别温度的前提,但大多数电机在现场运行时不安装速度传感器;其次,在模型建立过程中,感应电机等效电路参数的初始值辨识耗时较长,难以满足现场快速辨识的需求,同时参数辨识的精度和快速收敛性也是一个难点问题。针对以上2个问题,为了实现转子温度的现场辨识,本文提出了相应的解决方法如下:

(1) 采用转子槽谐波法辨识转子转速。首先利用快速傅里叶变换对现场实测电流波形进行频谱分析,提取出由转子开槽所引起的空间旋转谐波磁势在定子绕组中感应的谐波电动势及电流的频率,然后反推获得电机转速。同时,对于现场未知转子槽数的电机,采用基于蒙特卡罗法的在线转子槽数辨识方法,并以空载和额定负载条件下的电机转速作为确定转子槽数的参考^[17]。

(2) 感应电机起动初始状态视作近似堵转状态,因在初始阶段电机转速较低,可近似模拟堵转试验。因此,可通过对电压和电流波形的积分,得到起动过程中的有功功率,进而获得系统等效电

阻,减去已知的定子电阻,便可获得转子电阻的初始值。进一步采用 EKF,将该电阻值作为初值,辨识运行中的转子电阻实际值。

基于以上分析,参数辨识流程如图 1 所示。采用转子槽谐波法求出转子转速,并将起动力矩作为堵转条件,得到参数的初值。将转速、参数初值和实测电压、电流数据输入到自适应模型中进行参数辨识,获得转子电阻,进而转换为温度值。

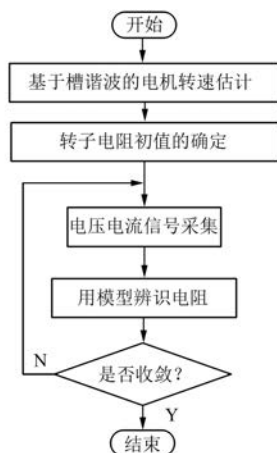


图 1 参数辨识流程图

2 转速和转子电阻初值的确定方法

2.1 转速辨识方法

获得电机转速的方法主要有以下 2 种,具体采用哪种方法可根据现场情况而定:

(1) 转子槽频率法。因转子开槽调制引起的槽谐波磁场在定子绕组中感生谐波电动势,进而产生相应的谐波电流,由于其频率与转子转速直接相关,故可以通过监测定子电流中的转子槽频率分量来辨识转子转速^[1,17]。

(2) 转速传感器法。工程实际中,对于一些关键设备会装有转速传感器的情况,可直接测量转速且精度较高,因此,可直接从传感器二次侧获取转速信号。

2.2 转子电阻初值的确定

为了加快模型的辨识速度,提高模型的收敛性,需要对电阻、电感等参数进行初值处理。这些参数在不同工况下具有不同特性,直接影响辨识的精度。本文提出了一种基于起动过程初始阶段前几个周波实测数据求解参数初值的方法。因为电机起动时转速较低,可以近似认为是堵转状态,

所以采用该方法求解的电阻可以作为辨识模型的初始值。

将上述模拟电机堵转过程与已知的空载数据相结合,通过传统等效电路参数求解方法,得到电机定、转子电抗参数,进而得到电机定转子漏抗和激磁电抗值。这些参数可以为后续的参考自适应法模型动态计算电阻提供参数初值参考,以减少初值估算的计算量,提高转子温度的实时辨识速度。

为了验证上述处理方法的可行性,对 1 台 22 kW 实验室电机进行低压直接起动试验,利用数据采集系统记录定子侧三相电压和电流数据。图 2 所示为针对不同周期电压电流求解得到的转子电阻初始值。图 2 中,“1 次”代表求解时只用 1 个周波进行处理;依此类推,“6 次”代表利用相邻的 6 个周波依次处理对应的首个被处理周期的电阻值。采用这种处理方式,主要是为了避免测试数据波动性带来的误差。结果表明,在电动机起动的前 20 个周期中,转子电阻收敛有效,可以作为初值使用。但是,考虑到起动初始几个周期会存在直流衰减分量,故建议通过对第 5~20 个周期进行求解,根据试验数据计算转子电阻初始值的平均值。需要特别注意的是,利用该方法在实际辨识过程中,根据不同转子槽型特点,需适当考虑因集肤效应带来的起动阶段和稳态运行时的电阻误差。

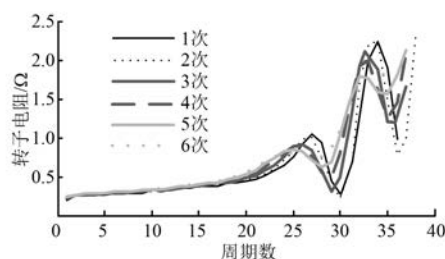


图 2 采用不同周期起动实测波形求解转子电阻

3 基于卡尔曼滤波法的转子温度评估模型

3.1 EKF

首先采用 EKF 对电机转子电阻进行辨识,进一步利用金属电阻与温度之间的关系,用电阻动态值间接反映电机转子温度变化情况。卡尔曼滤波算法(KF)利用含噪声数据对系统状态进行最

小误差方差估计。对于非线性模型,通过对其过程进行线性泰勒近似处理,得到 EKF。该算法可以进行自适应系统辨识,利用机端所采集的电气量参数辨识转子电阻,具有较好的动态跟踪辨识及调节性能。

参考文献[18]中的论述,针对某一待辨识的系统,可描述成如下形式:

$$\begin{cases} x_{t+1} = f(x_t, u_t) + \omega_{x1} \\ y_t = h(x_t) + \omega_{x2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_{t+1} 、 y_t 分别为系统方程和观测方程; u_t 为输入矩阵。

因为被观测值与实际参数之间存在误差,所

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha}(t+1) \\ i_{s\beta}(t+1) \\ \psi_{r\alpha}(t+1) \\ \psi_{r\beta}(t+1) \\ R_r(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - t \frac{R_s}{\sigma L_s} - t \frac{R_r(t)}{\sigma L_s L_r} & 0 & t \frac{R_r(t)M}{\sigma L_s L_r^2} & \omega(t)t \frac{M}{\sigma L_s L_r} & 0 \\ 0 & 1 - t \frac{R_s}{\sigma L_s} - t \frac{R_r(t)}{\sigma L_s L_r} & -\omega(t)t \frac{M}{\sigma L_s L_r} & t \frac{R_r(t)M}{\sigma L_s L_r^2} & 0 \\ t \frac{R_r(t)M}{L_r} & 0 & -t \frac{R_r(t)}{L_r} & -\omega(t)t & 0 \\ 0 & t \frac{R_r(t)M}{L_r} & -\omega(t)t & -t \frac{R_r(t)}{L_r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{s\alpha}(t) \\ i_{s\beta}(t) \\ \psi_{r\alpha}(t) \\ \psi_{r\beta}(t) \\ R_r(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{t}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{t}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{s\alpha}(t) \\ u_{s\beta}(t) \end{bmatrix} + \omega_{x1} \quad (3)$$

式中: 下标“s”、“r”分别代表定、转子侧参数; σ 为漏磁系数; L 、 M 分别为自感和互感系数; ψ 为磁链。

同时,将定子电流作为观测量,描述为^[17]

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha}(t) \\ i_{s\beta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{s\alpha}(t) \\ i_{s\beta}(t) \\ \psi_{r\alpha}(t) \\ \psi_{r\beta}(t) \\ R_r(t) \end{bmatrix} + \omega_{x2} \quad (4)$$

3.2 EKF 转子电阻辨识过程

结合上述分析,进一步将式(3)和式(4)简写成矩阵形式,转子电阻作为待辨识量,可得:

以引入 ω_{x1} 、 ω_{x2} 分别作为系统误差和观测误差,将式(1)线性化可得:

$$\begin{cases} x_{t+1} = A_t x_t + B_t u_t + \omega_{x1} \\ y_t = C_t x_t + \omega_{x2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: A_t 、 B_t 、 C_t 为系数矩阵。

以 ω 、 i_s 、 ψ_r 为状态变量,将 $\alpha\beta 0$ 坐标系下的电机状态方程也改写为状态方程,且转子电阻作为状态变量。在辨识过程中,可近似认为 R_r 不随时间变化,但在实际运行中该参数是变化的,只是变化速度远低于电流和磁链变化速度,故假设在某个局部很短的时间段内 R_r 保持不变,即 $R_r(t+1) = R_r(t)$ 。将状态方程离散化处理,可得:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x(t+1) \\ R_r(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_t & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x(t) \\ R_r(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_t \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u(t) + \omega_{x1} \\ y(t) = \begin{bmatrix} C_t & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x(t) \\ R_r(t) \end{bmatrix} + \omega_{x2} \end{cases} \quad (5)$$

在求解过程中,设置状态变量的迭代初值 $x(0) = 0$, $R_r(0) = 0$ 。进一步可利用文献[17]中介绍的方法完成参数辨识过程。

3.3 电阻与温度变化关系

利用 EKF, 计算电机转子的动态电阻。在得到其动态电阻的条件下,可以根据转子电阻与其

温度的关系,获得转子绕组在运行过程中的温度变化情况。式(6)是电阻值与其温升值之间的关系,可以获得转子绕组在运行过程中的温度变化情况:

$$R = R_0[1 + \alpha \Delta T] \tag{6}$$

式中: R_0 为参考温度下电阻值; α 为电阻温度系数; ΔT 为温度升高值。

式(6)反映了电阻与温度之间的线性关系。为了得到电机在某一运行状态下的温度情况,将式(6)转换为

$$T = \frac{R - R_0}{\alpha R_0} + T_0 \tag{7}$$

式中: T_0 为参考温度。

使用式(7)需要获得参考温度下的转子电阻值,则需要在空载、短路试验的过程中对电机的转子温度进行测试。将该温度作为参考温度 T_0 ,测量所得转子电阻 R_0 作为参考值代入式(7)进行计算。

4 试验验证

4.1 测试平台

为了验证所提方法的可行性,以实验室 1 台 22 kW 电机为例,在电机转子侧安装了转子转速、转矩传感器和温度传感器,如图 3 所示。为了便于与试验结果比较,基于空载和堵转试验求得电机的等效电路参数,如表 1 所示。



图 3 测试平台

4.2 试验结果分析

根据前述分析,利用辨识得到的电阻与温升之间关系可以推断转子温度,因此设置电机从冷态直接起动,完成起动后带满载稳定运行的试验方案。在整个试验过程中,实时辨识转子电阻及温升变化情况,由此来获得随运行时间变化的转

表 1 22 kW 感应电机实测等效电路参数

参数名称	参数值
定子电阻/ Ω	0.44
定子漏抗/H	1.61
转子电阻/ Ω	0.42
转子漏感/H	1.61
激磁电感/H	30.16

子温升变化特点。需要说明的是,由于试验平台安装了转矩、转速传感器,可以直接获取转子转速,故采用槽频率方法对转速辨识的结果仅作为试验过程中的一个环节,不在文中详细列出。

利用起动过程辨识得到的转子电阻为 0.38 Ω ,代入前述模型获得的转子电阻如图 4 所示。结果验证了辨识模型辨识转子温度的准确性和所提转子电阻初值的正确性。在测试过程中,电机带满载运行持续一定时间,仪表实时记录温度。通过数据采集系统,获得电机机端电气量参数,进而利用所提方法完成转子的电阻和温升的辨识。整个过程的辨识结果如图 5 所示。由图 5 可以看出,辨识得到的转子温度和实测温度基本一致,同时验证了所提辨识方法的动态跟踪性能良好。

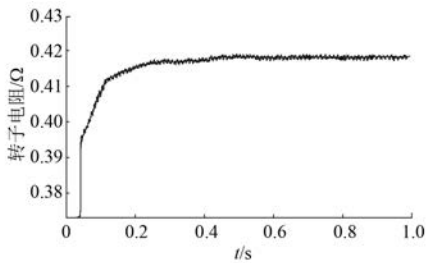


图 4 22 kW 电机转子电阻辨识结果

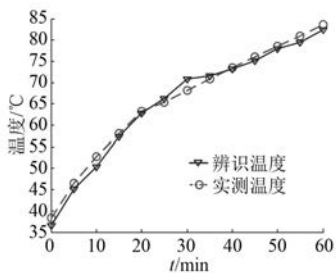


图 5 实测和辨识的转子温度随时间变化规律

5 结 语

本文提出了一种基于快速参数辨识的感应电

机转子温度识别方法。首先,利用转子槽谐波辨识得到转子转速;其次,利用电机起动初始阶段运行状态模拟堵转运行,通过实测电气参数求解得出转子电阻;最后,将上述参数作为初值,利用EKF进行转子电阻在线辨识。所提方法避免了初值求解迭代时间过长的问题,可实现快速在线辨识转子电阻,进而获得转子温升。以1台22 kW感应电机为例,设计了相应的试验方案,验证了所提转子温度辨识方法的可行性。

【参考文献】

- [1] 王庆,张蓬鹤,赵海森,等.基于可测电气量鼠笼式异步电机能效在线监测方法[J].微特电机,2013,41(12): 26.
- [2] ELDEEB H H, BERZOY A, MOHAMMED O. Stator fault detection on DTC-driven IM via magnetic signatures aided by 2-D FEA co-simulation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(6): 2892707.
- [3] REIGOSA D D, GUERREROJ M, DIEZ A B, et al. Rotor temperature estimation in doubly-fed induction machines using rotating high-frequency signal injection [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(4): 3652.
- [4] LEE S B, HABETLER T G, HARLEY R G, et al. An evaluation of model-based stator resistance estimation for induction motor stator winding temperature monitoring [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17(1): 7.
- [5] STEPHAN J, BODSON M, CHIASSON J. Real-time estimation of the parameters and fluxes of induction motors [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30(3): 746.
- [6] 张虎,李正熙,童朝南.基于递推最小二乘算法的感应电动机参数离线辨识[J].中国电机工程学报, 2011, 31(18): 79.
- [7] 蒋铁铮,郑逢时.同步电机参数最小二乘辨识多值性及收敛性的改善方法[J].电机与控制学报, 1999, 3(4): 203.
- [8] CIRRINCIONE M, PUCCI M, CIRRINCIONE G, et al. A new experimental application of least-squares techniques for the estimation of the induction motor parameters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(5): 1247.
- [9] WANG K, CHIASSON J, BODSON M, et al. A nonlinear least-squares approach for identification of the induction motor parameters[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(10): 1622.
- [10] EKSIOGLU E M, TANC A K. RLS algorithm with convex regularization [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2011, 18(8): 470.
- [11] 赵海森,杜中兰,刘晓芳,等.基于递推最小二乘法与模型参考自适应法的鼠笼式异步电机转子电阻在线辨识方法[J].中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5386.
- [12] SILVA W L, LIMA A M N, OLIVEIRA A. Speed estimation of an induction motor operating in the nonstationary mode by using rotor slot harmonics[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(4): 984.
- [13] KEYSAN O, ERTAN H B. Real-time speed and position estimation using rotor slot harmonics [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(2): 899.
- [14] GHOSH E, MOLLAEIAN A, HU W, et al. A novel control strategy for online harmonic compensation in parametrically unbalanced induction motor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(7): 2528223.
- [15] PINEDA-SANCHEZ M, RIERA-GUASP M, ANTONINO-DAVIU J A, et al. Instantaneous frequency of the left sideband harmonic during the start-up transient: a new method for diagnosis of broken bars [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(11): 4557.
- [16] 李良,周明,王伟,等.基于全过程移动监督技术的感应电机定子绕组温度实时监测系统[J].电机与控制应用, 2019, 46(11): 69.
- [17] 李鹏宇.感应电机转子电阻辨识及温升在线评估方法[D].北京:华北电力大学, 2018.
- [18] 张鑫磊,余秀月,赵海森,等.基于辨识技术的感应电机能效在线监测模型[J].华北电力大学学报(自然科学版), 2014, 41(6): 46.