

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

李 良¹, 周 明¹, 王 伟¹, 宋文乐¹, 谷 雨¹, 刘 杨¹, 王金宇²

(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. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘 要: 随着物联网技术的发展, 如何将物联网技术与非侵入式电力设备运行状态监测技术相结合成为当前研究热点之一。为了探索基于物联网技术的电气设备运行状态监测新模式, 以感应电机定子绕组温度的非侵入式在线监测为出发点, 首先提出了一种基于自适应法和最小二乘法的电机定子绕组温度辨识方法, 并结合当前物联网技术的发展, 设计了一种基于全过程监督技术的感应电机全寿命周期监督定子温度监测系统。以 1 台 5.5 kW 感应电机为例进行试验验证, 结果表明该系统具有较强的鲁棒性。所提出的理念和技术可以为其他大型电力设备的状态监测提供重要参考和技术支撑。

关键词: 感应电机; 物联网; 定子绕组; 绕组温度; 在线监测

中图分类号: TM 346 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)11-0069-06

A Real-Time Temperature Monitoring System for Induction Motor Stator Winding Based on Whole Process Mobile Monitoring Technology

LI Liang¹, ZHOU Ming¹, WANG Wei¹, SONG Wenle¹, GU Yu¹, LIU Yang¹, WANG Jinyu²

(1. State Grid Hebei Cangzhou Power Supply Company, Cangzhou 061000, China;

2. School of Electrical and Electronics Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: With the development of the internet of things technology, how to combine the internet of things technology with non-intrusive power equipment operation monitoring technology have become a hot research topic. In order to explore a new mode of monitoring the running state of electrical equipment based on internet of things technology, the non-intrusive on-line monitoring of the stator winding temperature of induction motor was taken as the starting point. Firstly, a method of identifying the stator winding temperature of induction motor based on adaptive method and least squares method was proposed. Combined with the development of the current internet of things technology, a life cycle monitoring system for induction motor stator winding temperature based on whole process monitoring technology was designed. The stator temperature monitoring system based on induction motor life cycle monitoring was tested on a 5.5 kW induction motor. The results show that the system has strong robustness. The concept and technology presented can provide important reference and technical support for condition monitoring of other large power equipment.

Key words: induction motor; internet of things; stator winding; winding temperature; on-line monitoring

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。

周 明(1984—), 男, 工程师, 研究方向为电气试验。

王 伟(1980—), 男, 高级工程师, 研究方向为输变电设备运维检修管理。

0 引言

感应电机具有运行稳定、结构简单等特点,广泛应用于社会生产中。电流的热效应导致感应电机绕组在运行过程中产生热量,使得电机温度升高。尤其对于某些用于驱动关键设备的高压大功率感应电机来讲,实现全过程温度监控,对电机运行状态评估、故障预警、保障工业企业安全生产等具有非常重要意义^[1]。在大多数情况下,传统侵入式温度测量方法需要将电机端盖打开后在定子绕组上安装温度传感器,耗时耗力。这种情况下就需要一种非侵入式的温度评估方法。

国内外学者在非侵入式定子绕组温度评估方面,提出了很多方法,主要是对定子绕组电阻值的评估。例如,文献[2]提出了一种基于定子电阻的温度估计方法,根据定子电阻估计存在的误差,电压型磁链观测器得到的磁链与电流不正交的现象,推导出实际的定子电阻,进而折算得到温度。文献[3]通过向交流电压注入直流信号来估计定子绕组的温度。文献[4]通过改变开环电机驱动中的空间矢量脉宽调制,间歇地向电机注入直流电压,通过测量恒定电流和可变负载条件下的相电流直流分量来估计定子温度。文献[5]提出了一种基于人工神经网络的定子电阻估计方法,为了训练神经网络,采用了反向传播算法。神经网络的权值调整是通过反向传播定子测量电流和估计电流之间的误差信号实现的。

物联网技术作为一种新兴技术,可以与前述非侵入式定子绕组温度评估方法结合起来,用以监测设备状态。物联网技术集成了传感技术、互联网技术、智能计算技术等,应用在工业生产过程中,可以大大提高生产效率,更重要的是可以便捷地获取生产设备的运行信息,便于预警和维护,以降低各类安全生产事故发生的概率^[6]。文献[7]提出通过一种新的运行管理模式将物联网技术集成到电网中。文献[8]提出了设备维修智能物联网(IItem)的概念。通过各种传感器采集机电设备的静态和动态信息以适应物联网的信息传输需求。根据机电设备的特点,对设备信息进行智能化处理,提取复杂设备的运行状态特征,进行状态分析、建模、故障诊断、故障预测等,以实现关键设备组的在线安全监控、故障预测和综合保护。

将物联网技术与电气设备监测相结合,可以让物联网技术更好地对电网中的关键电气设备进行状态监测。

本文从感应电机定子绕组温度监测入手,提出了一种非侵入式的定子绕组评估方法。该方法基于自适应算法和最小二乘法评估得到定子绕组阻值;然后根据电阻与温度的关系式得到绕组温度;并详细介绍了基于物联网的监督全过程管控技术在感应电机绕组温度监测方面的应用,设计了一套定子绕组温度实时监测系统,实现了在电机全寿命周期内的温度监测。最后用1台5.5 kW电机进行了试验验证,验证了该系统运行的可靠性,为电气设备的状态监测及安全运行提供了重要技术支持。

1 基于自适应算法和最小二乘法的定子绕组温度评估

利用 $dq0$ 坐标系下标准最小二乘法形式的电机参数辨识模型,采用带遗忘因子的递推最小二乘法辨识得到电机电感参数。然后将上述辨识得到的电感值作为自适应系统中的初值代入,从而实现电机运行状态下的定子绕组温度辨识。

1.1 基于自适应算法的绕组温度估计

由文献[9]可知,自适应系统可分为前馈和反馈,当前馈部分的传递函数为正,且反馈环节满足一定的条件时,自适应参数辨识是收敛的。满足该条件的自适应算法为

$$\hat{\chi} = K_1 \varepsilon + K_2 \int_0^1 \varepsilon d\tau + \hat{\chi}(0) \quad (1)$$

式中: $\hat{\chi}$ ——待辨识参数;

K_1, K_2 ——比例、积分系数;

ε ——误差;

τ ——积分变量;

$\hat{\chi}(0)$ ——待辨识参数的初始值。

α, β 坐标下的感应电机电压和电流为

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: u_α, u_β ——定子电压的 α, β 分量;
 u_A, u_B, u_C ——各相电压;
 i_α, i_β ——定子电流的 α, β 分量;
 i_A, i_B, i_C ——各项电流。

定子电压方程:

$$\begin{cases} u_\alpha = R_s i_\alpha + p\psi_\alpha \\ u_\beta = R_s i_\beta + p\psi_\beta \end{cases} \quad (4)$$

式中: R_s ——定子电阻;
 p ——微分算子;
 ψ_α, ψ_β ——定子磁链的 α, β 分量。

转子电压方程为

$$\begin{cases} R_r i'_\alpha + p\psi'_\alpha + \omega\psi'_\alpha = 0 \\ R_r i'_\beta + p\psi'_\beta + \omega\psi'_\beta = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: i'_α, i'_β ——转子电流的 α, β 分量;
 $\psi'_\alpha, \psi'_\beta$ ——转子磁链的 α, β 分量;
 ω ——电机转速。

定子磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_\alpha = L_s i_\alpha + L_m i'_\alpha \\ \psi_\beta = L_s i_\beta + L_m i'_\beta \end{cases} \quad (6)$$

转子磁链方程为

$$\begin{cases} \psi'_\alpha = L_s i_\alpha + L_m i'_\alpha \\ \psi'_\beta = L_s i_\beta + L_m i'_\beta \end{cases} \quad (7)$$

式中: L_s ——定子自感;
 L_m ——定转子互感。

将式(4)~式(7)整理得到电压和电流模型为

$$\begin{cases} p\psi'_\alpha = \frac{L_r}{L_m}(u_\alpha - R_s i_\alpha) - \frac{L_r L_s - L_m^2}{L_m} p i_\alpha \\ p\psi'_\beta = \frac{L_r}{L_m}(u_\beta - R_s i_\beta) - \frac{L_r L_s - L_m^2}{L_m} p i_\beta \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} p\psi'_\alpha = -\frac{R_r}{L_r}\psi'_\alpha - \omega\psi'_\beta + \frac{L_m R_r}{L_r} i_\alpha \\ p\psi'_\beta = -\frac{R_r}{L_r}\psi'_\beta - \omega\psi'_\alpha + \frac{L_m R_r}{L_r} i_\beta \end{cases} \quad (9)$$

式中: L_r ——转子自感。

式(9)中虽然不含定子电阻,但式(8)中含有待辨识变量,可采用自适应辨识方法^[8],以电流模型为参考模型,电压模型为可调模型,利用2个模型输出转子磁链的误差构成自适应律,实时调节可调模型的定子电阻,以达到可调模型跟踪参数模型的目的。根据式(1)可以得到定子电阻辨识

算法:

$$\hat{R}_s = K_1 \varepsilon + K_2 \int_0^1 \varepsilon d\tau + \hat{R}_s(0) \quad (10)$$

其中: $\varepsilon = \psi'_\beta \hat{\psi}'_\alpha - \psi'_\alpha \hat{\psi}'_\beta$ 。

利用异步电机定子绕组的电阻与温度的关系式,可得定子绕组温度:

$$T_s = T_{s0} + \frac{R_s - R_{s0}}{\alpha R_{s0}} \quad (11)$$

式中: T_{s0} ——定子绕组的参考温度;

R_{s0} ——对应的定子电阻;

α ——电阻的温度系数。

1.2 基于最小二乘法的参数初值确定

由于采用自适应算法辨识定子温度需要提前获取电感参数,所以提出基于最小二乘法的电感估计方法。首先推导出 $dq0$ 坐标下的电机参数模型,然后利用带遗忘因子的最小二乘法辨识得到电感参数。为了克服最小二乘法在多噪声情况下不稳定的问题,采用带遗忘因子的递推最小二乘法。递推如下:

$$\begin{cases} \hat{\theta}_{N+1} = \hat{\theta}_N + K_{N+1}(y_{N+1} - \varphi_{N+1}^T \hat{\theta}_N) \\ K_{N+1} = P_N \varphi_{N+1} (\lambda + \varphi_{N+1}^T P_N \varphi_{N+1})^{-1} \\ P_{N+1} = \frac{1}{\lambda} (I - K_{N+1} \varphi_{N+1}^T) P_N \end{cases} \quad (12)$$

式中: θ_N ——待辨识参数;

K_{N+1} ——增益矩阵;

φ_N ——观测矩阵;

P_N ——协方差矩阵;

λ ——遗忘因子。

根据文献[10],当电机运行工况稳定时,通过推导可得标准最小二乘法形式的电机参数辨识模型:

$$\begin{bmatrix} -\frac{di_{sd}}{dt} & -i_{sd} & \omega_r i_{sq} & \frac{du_{sd}}{dt} & u_{sd} \\ -\frac{di_{sq}}{dt} & -i_{sq} & -\omega_r i_{sd} & \frac{du_{sq}}{dt} & u_{sq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \\ k_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d^2 i_{sd}}{dt^2} - \omega_r \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{d^2 i_{sq}}{dt^2} + \omega_r \frac{di_{sd}}{dt} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中: $k_1 = (R_s \tau_r + L_s) / (\sigma L_s \tau_r); k_2 =$

$$R_s/(\sigma L_s \tau_r); k_3 = 1/(\sigma \tau_r); k_4 = 1/(\sigma L_s); k_5 = 1/(\sigma L_s \tau_r); \sigma = 1 - L_m^2/(L_s L_r)$$

式中: i_{sd}, i_{sq} ——定子 d 轴和 q 轴电流;

$k_1 \sim k_5$ ——待辨识的参数;

σ ——电机漏感系数;

τ_r ——电机转子时间常数, $\tau_r = L_r/R_r$ 。

对式(13)进行离散化处理,然后运用带遗忘因子的递推最小二乘法对辨识模型进行处理,最终得到 L_s, L_r, L_m 具体数值。由于电感参数在电机运行过程中可视为常数,所以可将辨识得到的电感数值作为自适应算法的初值。另外,为了确保辨识得到的初值参数准确无误,将起动过程计算得到的初值与辨识结果进行比较,从而保证最终的温度辨识结果准确无误。

2 全过程移动监督系统

2.1 系统总体框架

全过程移动监督系统功能涵盖工程、任务、技术监督及知识库四大核心功能以及工程进度统计分析、问题综合统计分析、知识库统计分析等方面辅助决策功能。技术标准、技术监督细则、问题库等功能为上层业务提供数据支撑。主站端服务部署在企业内网,移动终端通过安全接入平台与主站端进行数据交换。用户可通过办公用 PC 机、移动终端媒介访问使用系统。系统总体物理部署如图 1 所示。

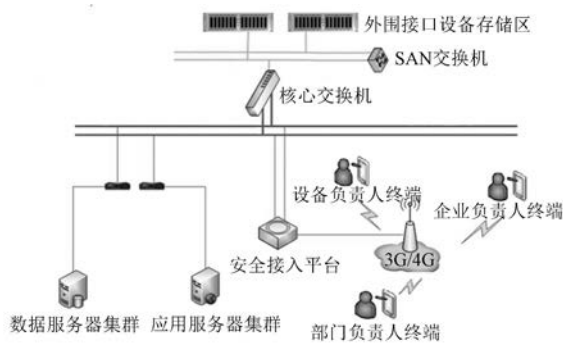


图 1 系统总体物理部署框架

该系统的特点如下。

(1) 设置权限,不同的权限等级可查看不同密级的数据,用户、企业、部门、设备生产厂家等分别具有不同的权限等级。

(2) 所有监测及辨识得到的数据,如电压、电流、功率因数以及辨识得到的温度等数据,均可以

根据用户需求查看。显示方式分为数据显示和曲线显示。

(3) 采用云端储存技术,将数据实时上传并存储,同时对于故障状态下的数据,采用自适应时间补偿进行加密存储,方便后续故障特性分析。

2.2 系统对温度的辨识过程

该系统对温度的辨识过程如下。

(1) 管理系统获取现场电压、电流、温度传感器等其他传感器的数据信息,并同步至主站。

(2) 主站将传回的电气量和传感器数据进行分析,根据自适应系统的温度辨识方法对电机定子温度进行评估。

(3) 主站将结果派发至各个部门的移动端,巡视人员填写巡视任务执行信息,并发送至主站。若绕组温度出现预警,则由巡检人员作出相应措施。

辨识结果在移动终端和数据中心电脑终端可同步显示,其中移动终端携带方便,可随时随地监测设备状态,具有很强的灵活性。移动终端绕组温度监测界面显示如图 2 所示。该温度监测界面可分为 2 个模块。(1) 运行中的任务。该模块主要显示了所选择任务的具体名称及状态,图 2 中可以看到,系统曾经发出过温度过高预警,巡检人员可手动操作选择任务完成或回退。(2) 详细信息。在该模块中,可供查看的数据有电压、电流、绕组温度、有功功率、无功功率。显示方式可以为数据显示或曲线显示。该系统不仅可以查看当前运行状态,也可以查看历史数据,实现全生命周期内的运行状态监测,如图 2 显示了历史中某一天的绕组温度数据,显示方式为数据显示。



图 2 移动终端显示界面

3 实例分析

为了验证全过程移动监督技术在绕组温度监测方面的可行性,在某 5.5 kW 感应电机中安装电压、电流互感器及温度传感器。电机参数如表 1 所示。

表 1 5.5 kW 感应电机参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	5.5
额定频率/Hz	50
功率因数	0.88
额定电压/V	380
额定电流/A	10.6

为了确保上述温度评估算法的准确性和温度监测系统的实用性,采用温度传感器直接测量定子绕组温度,即在电机定子绕组上安装温度传感器,并将温度信号通过无线传输方式传送至数采中心。温度传感器及安装后的定子端部绕组如图 3 所示。

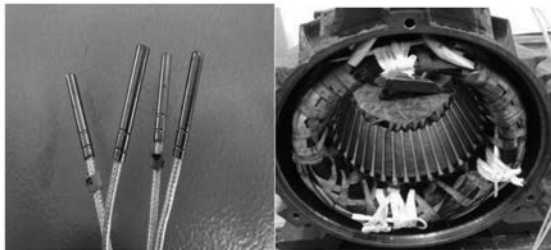


图 3 可安装于绕组端部的温度传感器

该方法比较直接,可以及时地将传感器安装点的温度采集出来,但采集到的温度为传感器安装位置的温度,并不能反映整个绕组的平均温度;此外,试验过程中温度传感器的安装和维护需要打开电机端盖,这在工程实际中相对来说比较费时费力,同时也只能在电机检修或停机时安装,否则会影响安全生产。为了验证文中所提出的温度辨识方法的准确性以及所建立的全过程移动监测系统的有效性,该试验中仍采用安装温度传感器的方法。

全过程移动监督系统将采集到的电机电压、电流等电气量数据传回主站,主站利用前述温度辨识方法对绕组温度进行评估;同时,装设于绕组表面的温度传感器数据也传回主站。系统对 2 种

方法评估得到的温度同步显示,其中某 24 h 内每小时的温度数据显示如图 4 所示。为了验证系统的鲁棒性,在 13 时左右给该电机加载。从图 4 可以看出,该电机在加载时刻,绕组温度急剧增加且超过临界值,主站监测到温度异常并将预警实时传送给各移动终端,接收预警后及时采取措施,开起备用机,并及时将该故障机切除出系统。因此,从 13 时以后温度逐渐回落,并且停机后检测不到电压、电流信号,自适应温度辨识法得到的温度瞬间变为零。

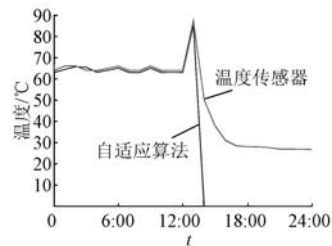


图 4 某 24 h 内电机绕组温度曲线图

此外,系统监测和评估得到的各种数据上传至云端保存在主站内。对该电机来说,从有温度监测以来的所有历史数据均可以在终端内选择性地显示,巡检人员可以随时调取、查看。图 5 所示为某月内每日电机绕组温度曲线图。

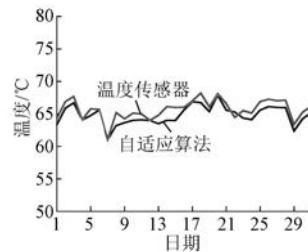


图 5 某月内每日电机绕组温度曲线图

4 结 语

本文提出了一种基于自适应算法和最小二乘法的感应电机定子温度评估方法。该方法实质上对于定子绕组阻值的辨识,根据电阻与温度的关系可得定子绕组的温度数据。将该辨识方法与物联网技术相结合,设计了一套基于全过程移动监督技术的感应电机定子绕组温度监测系统,并用 1 台 5.5 kW 电机进行试验,验证了该系统具有较强的鲁棒性。该系统不仅可以应用在电机运

行温度监测方面,且可以扩展到电气设备运行的各种运行状态和参数,对实现设备全寿命周期内的参数全监督。对于预测设备故障,保障设备安全运行具有极其重要意义。

【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] 林飞,张春朋,宋文超,等.感应电机定子温度监测的一种新方法[J].电力系统自动化,2003,27(3):58.
- [3] SABAGHI M, FARAHANI H F, HAFEZI H R, et al. Stator winding resistance estimation for temperature monitoring of induction motor under unbalance supplying by DC injection method [C] // 2007 42nd International Universities Power Engineering Conference, 2007.
- [4] ZHANG P, LU B, HABETLER T G. An active stator temperature estimation technique for thermal Protection of inverter-fed induction motors with considerations of impaired cooling detection [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46 (5) : 1873.
- [5] POPOV N Z, VUKOSAVIC S N, LEVI E. Motor temperature monitoring based on impedance estimation at PWM frequencies [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29 (1) : 215.
- [6] 刘琳.物联网技术在企业安全生产监管中的应用探讨[J].网络安全技术与应用,2019(5):87.
- [7] SHEN X, CAO M. Internet of things for power transmission and distribution intelligent monitoring and full lifecycle management [C] // 2014 China International Conference on Electricity Distribution (CIGED), 2014.
- [8] XU X, ZUO Y B, WU G X. Design of intelligent internet of things for equipment maintenance [C] // 2011 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2011.
- [9] 张超羽.基于模型参考自适应的感应电机温度辨识方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [10] 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.

收稿日期:2019-07-14

(上接第24页)

- [10] 李永恒,刘陵顺,闫红广.基于积分滑模控制的对称六相永磁同步电机调速系统研究[J].电机与控制应用,2018,45(12):1.
- [11] 向凡,许鸣珠.基于改进滑模速度控制器的永磁直线同步电机直接推力控制[J].电机与控制应用,2019,46(6):38.
- [12] 方一鸣,于晓,牛犇,等.永磁同步电机的自适应模糊终端滑模速度控制[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(12):4855.
- [13] 邓艳艳,林旭梅.永磁同步电机滑模自适应控制[J].计算机仿真,2015,32(2):337.
- [14] 华志广,窦满峰,赵冬冬,等.基于改进型滑模观测器的PMSM无位置传感器控制[J].西北工业大学学报,2018,36(4):754.

收稿日期:2019-08-06