Study on Condition Monitoring of Electrical Components Based on Multi Electromagnetic Coil Antenna*

LI Wenfang*, LI Haixia, YU Chunlai
(Faculty of Engineering, Huanghe S & T College, Zhengzhou He'nan 450000, China)

Abstract: The low frequency electromagnetic radiation field is used for condition monitoring and fault diagnosis of electrical components. The main purpose is to establish the receiving coil array to detect and monitor the radiated electromagnetic field around the electrical components, and apply it to the condition monitoring and fault diagnosis of various power components. A flexible three-dimensional printed coil antenna is proposed for motor fault detection. Firstly, the most sensitive stray field in the acquisition module is the target to find the best position of the coil antenna. Secondly, the most sensitive position of the antenna is identified by using the finite element method. Then, the magnetic field of the motor is observed when the coil and winding inside the component are short circuited. The change of harmonic order amplitude of magnetic field is helpful to identify short circuit fault. Finally, the results are compared according to the change of normal magnetic field and fault magnetic field amplitude, and sent to the signal processing unit for diagnosis.

Key words: electromagnetic coil antenna; electrical components; fault; monitoring
EEACC: 5270; 7310L **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2023.01.033

基于多电磁线圈天线的电气部件状态监测研究*

李文方*, 李海霞, 禹春来
(黄河科技学院工学部, 河南 郑州 450000)

摘 要: 利用低频电磁辐射场对电气元件进行状态监测和故障诊断。其主要目的是建立接收线圈阵列, 对电气部件周围的辐射电磁场进行检测和监测, 并将其应用于各种电力元件的状态监测和故障诊断。提出了一种柔性三维印刷线圈天线, 用于电机故障检测。首先, 以捕获组件中最敏感的杂散场为目标, 找到线圈天线的最佳位置。再利用有限元方法, 首先对正常状态下机器周围的磁场进行天线最敏感位置的识别。然后, 在元件内部的线圈和绕组发生短路时, 观察电机的磁场。磁场谐波阶数幅值的变化有助于识别短路故障。最后, 根据正常磁场和故障磁场振幅的变化对结果进行比较, 并发送到信号处理单元进行诊断。

关键词: 电磁线圈天线; 电气元件; 故障; 监测
中图分类号: TP732 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2023)01-0198-05

现代工业过程要求电机长时间不间断运行, 来提高系统的生产能力和经济可行性。在工业过程中, 由于机械故障导致的意外停机(如定子短路故障)会在很短的时间内造成严重的损失, 有时甚至无法补偿, 在典型的 15 kW 感应电动机中, 从单个匝间故障发展为严重故障的时间甚至不到 2 s[1-2]。因此, 对于连续运行的电气元件, 状态监测和故障检测是很有必要的。事实上, 对机器运行的监控能有效检测即将发生的故障、防止进一步损坏并最终降低维护成本。

早期用过电流和过电压检测等技术来检测故障, 然而, 这些技术要求拆卸机器并使其离线[3]。在必须连续运行的现代工业过程中, 关闭电机可行性不高, 因此, 在线故障检测方法应运而生。在当前的在线监测和保护方法中, 最流行和有效的方法是气隙磁通特征法。在这种技术中, 电机的旋转电磁场由安装在电机轴内的传感器测得, 通过分析低频磁场特征来检测电机故障, 检测效率高[4-5]。文献[6]解释了在故障诊断中使用杂散场的优点。气隙磁通量在匝间短路的识别中有很好的应用前景[7-9], 但缺点是安装和维护传感器不便[10], 因为传感器需要安装在电机轴内。传感器因机器各异。

因此, 提出了一种使用机器轴外部的辐射电磁场的方法, 建立一个整体传感器, 该传感器具有自适应性和非侵入性, 利用传感器捕捉机器驱动器辐射的磁场, 对机器进行状态监测, 并通过分析磁场的频

项目来源: 河南省高等学校重点科研项目(22B413006)
收稿日期: 2021-07-21 **修改日期**: 2022-02-18

率响应,来检测故障的准确位置。另外,建议使用多个磁线圈天线,并将其整合到机器上,来同时从机器的多个最佳位置检测所有辐射场。

1　设计步骤

处理短路故障的第一步是迅速检测故障并准确识别故障位置。因此,本文的主要目的是寻找断层的位置。磁线圈天线是最合适的工具,用于机轴附近捕获辐射磁场。然而,由于绕组的磁场是闭环的,距离取决于通过导线的电流,因此收集辐射场主要部分的天线的最佳位置非常重要。为了确定天线的位置,提出了两个相关参数:角度指数(α)和距离指数(d),如图 1 所示。

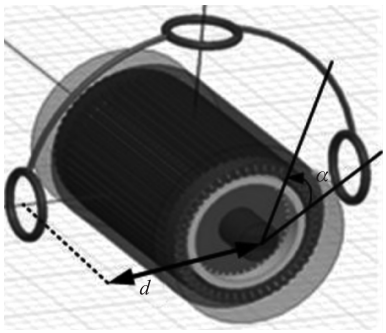


图 1　三维天线示意图

由于这种天线(传感器)不能直接得到,并且在制作这种天线时使用了两种不同的材料(铜和用于连接的非导电材料),因此采用了三维打印技术。三个线圈的大小和及其位置 α 和 d 是灵活的。因此,该传感器组可用在具有不同电压等级和其他特性的任何尺寸的机器上。

模型中的这两组参数是由磁场强度(H)计算得到的。通过麦克斯韦方程[11],这个通量强度可以估计为:

$$H=\frac{\beta I_0 Dl\sin\alpha}{4\pi d}\sin(wt-\beta d)\alpha \tag{1}$$

式中:I_0 是线圈中的外加电流,α 和 d 分别为载流导线与监测点之间的角度和距离,D 为电机直径,l 为电机通电线圈的长度,β 为波束频率。

由于杂散磁场垂直于通过载流导线的电流,天线在垂直于短路线圈的点处达到最大敏感位置。在获得线圈传感器的最佳位置之后,应用故障电流来确定故障绕组。在这种情况下,定子绕组中的初始短路用匝间短路来表示。辐射磁场的谐波和间谐波在诊断过程中起着重要的作用,因为故障会影响这些谐波的幅值和位置。故障电流的谐波阶数确定如下:

$$f_{\text{slot}}=f_s\left[k\frac{m}{p}\pm1\right] \tag{2}$$

式中:k 是整数,m 是定子中的槽数,p 是极对数。f_h 为旋转磁场频率,h 为定子谐波匝数,$f_h=\pm f_s/h$ 由主谐波 f_s 得到的,谐波滑差可以表示为

$$S_h=\frac{f_h-f_r}{f_h}=1\pm(1-s)h \tag{3}$$

式中:S_h 是谐波滑差,f_r 是转子频率。谐波磁场的感应转子电流频率为

$$f_{2h}=f_s[1\pm(1-s)h] \tag{4}$$

在感应电机中,定子电流在基频附近匝间短路产生的频率 f_{sth} 由下式给出

$$f_{sth}=f_s\left[1\pm km\left(\frac{1-s}{p}\right)\right] \tag{5}$$

利用频域信号处理技术对谐波进行分析,提取故障信息。将磁线圈放置在最佳位置,来收集正常和故障情况下的磁通强度。然后将磁通强度用于频率分析,来得到故障结果。

采用三维有限元方法进行了仿真。图 2 显示了在仿真中使用的感应电动机的机器模型。在一定距离内监测辐射场的线称为监测线。

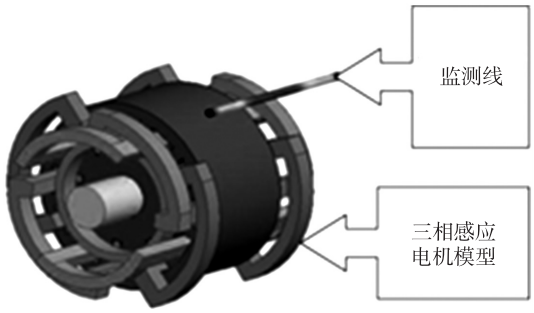


图 2　用监测线捕捉磁场强度的三相异步电动机有限元模型

本文设计了一台三相异步电动机进行仿真。设计中的尺寸以及所有其他细节都是从 7.5 HP、230 V、1 800 RPM 的鼠笼式感应电动机的工业特性中准确获得的。在 50 Hz 频率下求解模型的模拟时间为 120 min。由于线圈中的导线曲线很小,且监测距离较远,采用改进的广义柔性最小残差法(Generalized Minimal Residual,GMRES)作为求解这类大模型方程的迭代方法。传统的 GMRES 基本上是针对线性问题设计的[12-13],但求解模型是非线性的,因此,用柔性 GMRES 来将非线性问题离散成许多线性问题。为了提高解的准确性,采用非线性共轭梯度作为预条件。当用非线性共轭梯度法通过最小化剩余平方范数 $F(x)_2^2$ 来求解平方方程组 $F(x)=0$ 时,通常需要用线性变换来预处理系统,例如由一个近似雅可比矩阵在起始点的近似因式分解 LU 计算

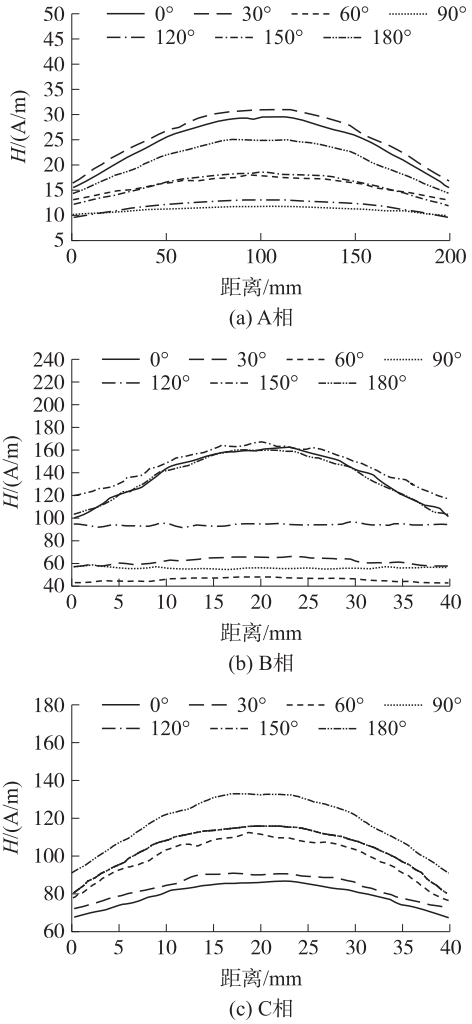
(通常这样的近似雅可比矩阵可以从问题简化中得到)。因此,可以将方程最小化为 $BF(x)_2^2$,其中 $B=(LU)-1$,通过求解 $LU_r=F(x)$ 计算 $r=BF(x)$。

为了获得可靠的精度,该模型采用 570 万自由度的精细网格。

2 结果分析与讨论

采用第 1 节中所述的求解方法对设计的模型进行多个距离的分析后,选择在观测频率阶数下显示最敏感峰值的距离作为最佳距离。线圈天线与机轴的最佳距离已确定为 200 mm。在将监测点固定在 200 mm 后,将该点绕机器旋转,并对每个相位的机器施加电流,以找到辐射场敏感的最佳角度。

图 3(a)~3(c)显示了角度为 0°至 180°的磁场,当只有 A、B 或 C 相通电时,由图 3 可知,感应电机 A、B 和 C 三相中,最佳角度(α)分别为 30°、150°和 180°。在 200 mm 距离内的这三个角度上,磁场



x 轴上的距离是沿着平行于轴 200 mm 的监测线,见图 2

图 3 机器在 A 相、B 相和 C 相不同位置的磁场强度和 α 值

强度最高。也就是说,最敏感的角度为机器的电压和电流的变化或发生故障时预期点处的磁场出现最大波动的位置。

在确定参数 d 和 α 的最佳值后,将带有谐波的不平衡电流施加到机器的每个相位上,施加电流的的特定位置处假定在运行期间发生的短路。当短路发生时,产生一个新的电流回路,从而激发新的磁场,进而导致低阶谐波阶数的波动(一次谐波频率为 50 Hz,九次为 450 Hz)。谐波变化可以根据特定谐波中通过电流的方向而减小或增大。如果它跟主线圈电流方向相同,变化将增加,否则将减少[14-15]。

对三个不同角度的三相短路(A 相 30°、B 相 150°和 C 相 180°)分别进行了计算,并将所得的磁场与正常状态下的磁场进行了比较。为了进行综合分析,对磁场的时间响应和频率响应进行了研究。图 4(a)~4(c)显示了故障发生时整个 40 ms 内正常电流和故障电流之间的差异。

在大约 1 400 匝绕组中增加了一匝微小短路,磁场变化如图 4(a)~4(c)所示,可见,峰值之间的

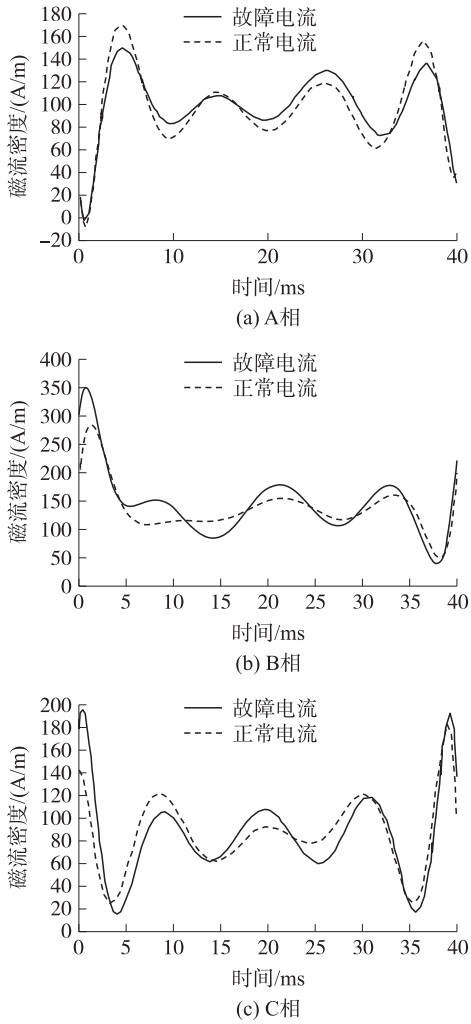


图 4 正常电流和故障电流之间的磁场比较

差异明显。磁场的峰值差异可用来检测机器早期故障。在图 4(a)中,短路匝中的通过电流的方向与正常线圈的方向相反;因此,故障绕组的磁场峰值低于正常绕组的磁场峰值。在图 4(b)和 4(c)中,短路匝中的通过电流与正常线圈的方向相同;因此,故障绕组的磁场峰值高于正常绕组。

B 相峰值差异较大,故给 B 相绕组中增加一匝微小短路故障,对 B 相单独通电时的频率响应进行进一步分析,以定位故障位置。图 5(a)~5(c)显示了正常和故障条件下三个传感器频率响应之间的差异。正如预期的那样,其中一个传感器(传感器 2)的变化更大,因此更容易进行分析和故障定位识别。通过观察沿频率响应的峰值位置,可以确定故障位置;通过比较正常和故障情况下的两个峰值之间的最大差值来识别短路匝数。如图 5 所示,对于三个不同位置的传感器,在不同的谐波阶次处最大峰值皆有差异。将三个传感器的这些变化量送入数据分析模块,通过 MATLAB 中的神经网络进行故障定位。

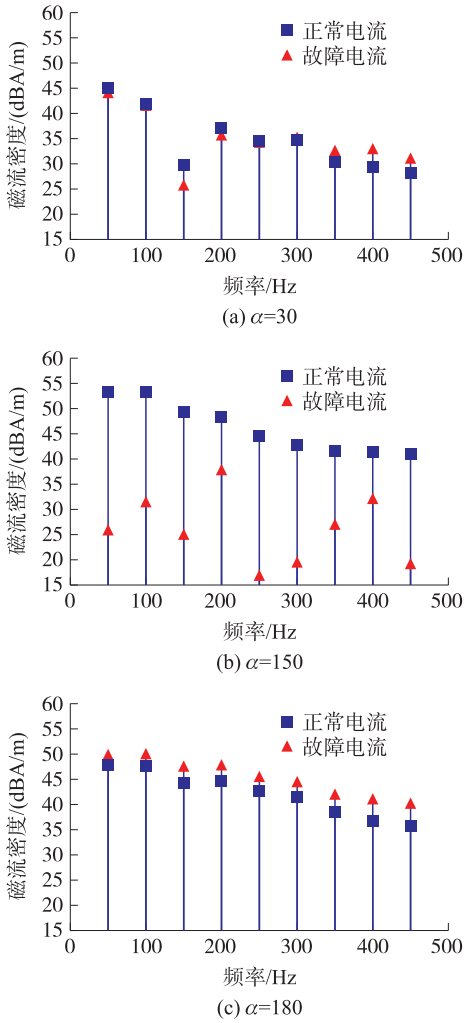


图 5　位置传感器对正常和故障状态的频率响应分析

3　结论

研究了一种用于电力元件非接触状态监测的新型传感器,利用三维打印机设计并加工了线圈天线,其线圈角度、距离和半径均可控制。以感应电机的状态监测为例,得到了上述三个参数的最优值。对短路和不平衡电流进行了时间响应和频率响应分析。由于短路会损坏电机绕组,建立了电机绕组的三维有限元模型。3-D 打印传感器用于定位由于微小匝间短路引起的故障,该短路通常无法通过常规方法识别。为了捕获磁场,基于工业约束,考虑了两个不同的优化指标来寻找天线的最敏感位置。

参考文献:

[1] Gerada C, Bradley K J, Sumner M, et al. The Results do Mesh[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2007, 13(2): 62-72.

[2] 潘超,石文鑫,孟涛. 单相变压器匝间短路电磁特性研究[J]. 高电压技术,2020,46(5):1839-1856.

[3] Derworiz R, Leblanc N, Berner W. Executing a Flawless Turnaround: Lessons Learned at a Petrochemical Facility [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2013, 19(5): 39-48.

[4] Mirzaeva G, Saad K I, Jahromi M G. Comprehensive Diagnostics of Induction Motor Faults Based on Measurement of Space and Time Dependencies of Air Gap Flux[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 2657-2666.

[5] Park Y, Lee S B, Yun J, et al. Air Gap Flux-Based Detection and Classification of Damper Bar and Field Winding Faults in Salient Pole Synchronous Motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(4): 3506-3515.

[6] Ceban A, Pusca R, Romary R. Study of Rotor Faults in Induction Motors Using External Magnetic Field Analysis [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(5): 2082-2093.

[7] Romary R, Jelassi S, Brudny J F. Stator-Interlaminar-Fault Detection Using an External-Flux-Density Sensor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(1): 237-243.

[8] 熊小伏,王嫱,陈星田. 一种基于电流比变化量的变压器匝间短 路保护方法[J]. 电力系统保护与控制,2013, 41(9): 112-115.

[9] Barzegaran M, Mazloomzadeh A, Mohammed O A. Fault Diagnosis of the Asynchronous Machines Through Magnetic Signature Analysis Using Finite-Element Method and Neural Networks[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(4): 1064-1071.

[10] Barzegaran M R, Mohammed O A. Condition Monitoring of Electrical Machines for Extreme Environments Using Electromagnetic Stray Fields[C]//2014 International Conference on Electrical Machines(ICEM), Berlin, Germany, 2014:2479-2485.

[11] Sarikhani A, Barzegaran M, Mohammed O A. Optimum Equivalent Models of Multi-Source Systems for the Study of Electromagnetic Signatures and Radiated Emissions From Electric Drives[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(2):1011-1014.

[12] Morikuni K, Reichel L, Hayami K. FGMRES for Linear Discrete Ill-Posed Problems[J]. Applied Numerical Mathematics, 2004, 75:175-187.

[13] 郝琛, 韩立会, 程有莹. 求解 CMFD 的改进流水线并行 GMRES 方法[J]. 现代应用物理, 2021, 12(1):38-44.

[14] Ge B, Ghule A N, Ludois D C. High Torque Density Macro-Scale Electrostatic Rotating Machines: Electrical Design, Generalized $ d-q $ Framework, and Demonstration[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(2):1225-1238.

[15] Tsuzuki K, Suzuki Y, Yamamura S, et al. Design of Bulk HTS Rotating Machine Using Closed-Circuit Magnetization[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(5):5204205.

李文方(1983—),女,河南驻马店人,副教授,硕士,主要研究方向:自动控制、智能检测,41441677@qq.com。