

某型舰艇异步电动机故障在线检测装置^{*}

周智勇^a, 孙俊忠^a, 魏成昊^b

(海军潜艇学院 a. 机电研究所; b. 培训系训练处, 山东 青岛 266042)

摘要:在分析定子绕组匝间短路、转子断条、轴承故障等3种异步电动机故障特征的基础上,通过采集定子电压、定子电流信号,应用连续细化傅里叶变换、自适应滤波,并结合转子齿槽谐波转差率估计、检测阈值自适应技术,实现了在线检测异步电动机故障。

关键词:异步电动机;故障检测;检测装置

中图分类号:TP273

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2009)03-0016-03

作为结构简单、工作可靠、维护方便的机械动力,异步电动机广泛应用于海军各型舰艇之中,并发挥着极其重要的作用,其安全运行关系到舰艇的战斗力和生命力。异步电动机故障检测,特别是初期故障检测是保障其安全运行的关键措施之一。异步电动机故障主要包括定子绕组匝间短路、转子断条与轴承故障,发生概率分别约为15%、10%、40%^[1]。

1 异步电动机故障的特点

定子绕组匝间短路故障主要是由匝间绝缘老化、破损等造成的,与舰艇电机恶劣的工作环境有关,发生初期可能仅仅引起电机输出转矩降低或者电机轻微发热,对电机的正常使用影响不大,但持续发展将导致相间短路,甚至烧毁电机等严重故障,因此必须予以检测。定子绕组匝间短路故障属于渐进性故障,亦即发生、发展直至恶化为严重故障需要持续一定时间。文献资料证明实测电机发生匝间短路故障之后,仍然持续运行750h(其间启动67次)。因此,在定子绕组匝间短路故障发生初期即实施检测具有可行性,并且对于合理安排维修,避免事故停机等是非常重要的。

异步电动机在运行过程中,转子导条受到径向电磁力、旋转电磁力、离心力、热弯曲挠度力等交变应力的作用,加之转子制造缺陷,可能导致导条或端环出现裂痕,甚至断条故障。转子断条也是典型的渐进性故障,初期通常一两根导条断裂,或者导条和端环连接处出现裂痕,导致电机出力下降甚至停机。因此,必须实施转子断条故障在线检测,特别是初发性转子断条故障在线检测,也是非常重要的。

滚动轴承,特别是深沟球轴承以压倒性优势广泛应用

于异步电动机之中。滚动轴承由内滚道和外滚道组成,其间一组滚动体转动。在负载平衡、对中良好的正常工作条件下,疲劳失效从位于滚道和滚动体表面下的微小裂纹开始,并逐渐扩展,继而引起材料碎片脱落,导致轴承故障,其发生概率高,约为40%,是舰艇异步电动机故障率最高的部分,因此也必须实施在线检测。

上述故障均是渐进发展的,在初发阶段即实现可靠检测,有助于合理安排、组织预知维修和主动维修,避免事故停机。

2 异步电动机故障特征

舰艇异步电动机在故障初期所体现的、区别于电机正常运行状态的特征是细微的,提取该故障特征并据此实现初期故障检测必须保证高灵敏度。在工程实际中,电机固有不对称、定子电压不对称及波动、负载波动等因素将导致电机体现某些“虚假”特征,这可能混淆电机初期故障特征,造成误判。因此,在保证初期故障检测高灵敏度的同时必须保证其高可靠性,二者在一定程度上是相互对立的。

2.1 定子绕组匝间短路

J. Sottile, J. L. Köhler以定子负序视在阻抗作为故障特征量检测异步电动机定子绕组匝间短路故障^[2],该方法对定子电压不对称具备鲁棒性。G. B. Kliman, W. J. Premerlani等则根据定子负序电流故障分量实现定子绕组匝间短路故障检测之目的,其技术关键在于:根据电机负序等效电路模型、正常样本数据确定正常电机在当前定子电压、负载状态下应当体现的定子负序电流值;测量、计算电机在当前定子电压、负载状态下实际的定子负序电流值;将二者进行对比,判断匝间短路故障发生与否及严重程度。

* 收稿日期:2008-11-05

作者简介:周智勇(1972—),男,山西忻州人,硕士,副教授,主要从事船舶电力系统方面的研究。

2.2 转子断条故障

异步电动机转子断条故障发生之后,在定子电流中将出现 $(1 \pm 2s)f_1$ 频率的附加电流分量(s 为转差率, f_1 为供电频率),以此作为故障特征,对定子电流信号做傅里叶频谱分析即可进行转子断条故障检测。姜建国、汪庆生等采用自适应滤波方法抵消定子电流 f_1 频率分量^[3],以凸现转子断条故障特征—定子电流 $(1 - 2s)f_1$ 频率分量,从而显著提高故障检测灵敏度。K Abbaszadeh, J Milimonfared 等应用小波分析技术处理定子电流信号^[4],提取小波分解系数反映转子断条故障特征,据此改善故障检测灵敏度。

2.3 轴承故障检测

振动信号频谱分析是准确、可靠的异步电动机轴承故障检测方法。该方法采集轴承时域振动信号并变换至频域,进而将频域振动信号与轴承所固有的频域振动特性对比,以判断轴承故障发生与否。但该方法需装设振动传感器,而振动传感器造价高、容易损坏,这就限制了该方法的进一步推广应用。Randy R Schoen, Thomas G Habetler 等提出了定子电流信号频谱分析方法。类似于转子断条故障,异步电动机轴承故障发生之后,在定子电流中将出现 $|f_1 \pm mf_v|$ 频率的附加电流分量(f_v 为轴承振动特征频率, $m = 1, 2, 3, \dots$)。鉴于定子电流信号易于采集,相对振动信号频谱分析而言,这类方法具有更广阔的发展、应用前景^[5]。

上述分析表明:研究兼具高灵敏度与高可靠性的故障检测方法,实现异步电动机初期故障检测是必然发展趋势。

3 检测装置研制方案

根据电机故障特点及特征分析,在检测装置的研制过程中,采取如下技术对策与措施:基于便携式计算机,以易于采集的定子电压、定子电流信号作为分析媒介,高灵敏度、高可靠性地实现定子绕组匝间短路、转子断条与轴承故障检测。具体而言,采用定子负序视在阻抗滤波值及定子视在阻抗角作为故障特征,结合样本学习与检测阈值自整定技术,高灵敏度、高可靠性地检测异步电动机定子绕组匝间短路故障;采用定子电流 $(1 \pm 2s)f_1$ 、 $|f_1 \pm mf_v|$ 频率分量作为故障特征,将小波分析、连续细化傅里叶变换、自适应滤波、转子齿槽谐波转差率估计、检测阈值自整定技术有机结合,高灵敏度、高可靠性地检测异步电动机转子断条与轴承故障。

3.1 定子绕组匝间短路故障检测

基于BP神经网络技术,以定子负序导纳平均值作为故障特征量,异步电动机定子绕组匝间短路故障检测基本过程如下:

- 1) 进行负载实验,获取样本数据,训练神经网络,得到定子电压、定子电流、输入功率与定子负序导纳平均值之间的映射关系。
- 2) 根据样本数据确定正常电机定子负序导纳平均值

波动幅度 $Y_{av}^- \pm Y_{av}^-$ 。

- 3) 采集定子三相电压电流瞬时信号, $u_a, u_b, u_c, i_a, i_b, i_c$ 。
- 4) 计算当前定子负序导纳平均值 $Y_{av}^- \text{real}$ 。
- 5) 判断定子负序导纳平均值是否逾越正常波动幅度,检测严重匝间短路故障。
- 6) 计算定子三相电压、电流有效值 $U_a, U_b, U_c, I_a, I_b, I_c$ 。
- 7) 计算定子输入功率直流分量,

$$P_{\text{dDC}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [u_a(k) i_a(k) + u_b(k) i_b(k) + u_c(k) i_c(k)]$$

8) 根据 $U_a, U_b, U_c, I_a, I_b, I_c$ 及 P_{dDC} , 利用BP神经网络估计正常电机在该运行状况下的定子负序导纳平均值

$$Y_{av}^- \text{esti}, \text{并设置检测阈值 } Y_{av}^- \text{esti} \pm \frac{Y_{av}^-}{2}.$$

- 9) 将当前定子负序导纳平均值与检测阈值对比判断是否存在轻微匝间短路故障。
- 10) 根据前述判断,给出维修建议。

3.2 转子断条故障检测

基于连续细化傅里叶变换、神经网络与自适应滤波技术的鼠笼式异步电动机转子断条故障检测本过程如下:

1) 进行负载实验,获取样本数据,训练神经网络,确定定子电压、定子电流、输入功率与转差率 s 之间的映射关系。

2) 采集定子三相电压、电流瞬时信号, $u_a, u_b, u_c, i_a, i_b, i_c$ 。

3) 对 i_a 做连续细化傅里叶变换,确定其基波分量的频率 f_1 幅值和初相角,据此形成噪声信号 u_s 。

4) 计算定子三相电压电流平均值 U_{av}, I_{av} 。

5) 计算定子输入功率直流分量,

$$P_{\text{dDC}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [u_a(k) i_a(k) + u_b(k) i_b(k) + u_c(k) i_c(k)]$$

6) 根据 $U_{av}, I_{av}, P_{\text{dDC}}$, 利用BP神经网络,估计正常电机在该运行状况下的转差率 s 边频与 f_1 分量幅值之比 $\frac{I_m(1-2s)f_1}{I_{mf_1}}, \frac{I_m(1+2s)f_1}{I_{mf_1}}$, 并设置检测阈值。

7) 根据 f_1, u_s 对 i_a 做自适应滤波,抵消其 f_1 分量,结果记为 e_T 。

8) 根据 P_{dDC} 判断电机负载状况,如果电机空载运行选择 $\frac{I_m(1+2s)f_1}{I_{mf_1}}$ 作为故障特征量,否则选取 $\frac{I_m(1-2s)f_1}{I_{mf_1}}$ 。

9) 对 e_T 做连续细化傅里叶变换,根据 s, f_1 确定 $\frac{I_m(1-2s)f_1}{I_{mf_1}}$ 或 $\frac{I_m(1+2s)f_1}{I_{mf_1}}$ 的具体数值,并与检测阈值做比较,

判断转子是否存在断条故障。

10) 根据检测结果,给出维修建议。

3.3 转子断条与定子绕组匝间短路故障联合检测技术设计

应用定子负序导纳平均值方法检测鼠笼式异步电动机定子绕组是否存在匝间短路故障,并采取如下策略:如果存在匝间短路故障,则结合定子三相绕组(等效)阻抗角方法判断故障发生相;如果并不存在匝间短路故障,则应

用基于连续细化傅里叶变换、神经网络与自适应滤波技术的鼠笼式异步电动机转子断条故障检测方法进行转子断条故障检测。

3.4 轴承故障检测技术设计

轴承故障一般分为外滚道故障、内滚道故障、滚动体故障及保持架故障,振动固有频率分别根据式(1)~(4)计算。

外滚道故障固有频率

$$f_{OD} = \frac{n}{2} f_m \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \right) \quad (1)$$

内滚道故障固有频率

$$f_{ID} = \frac{n}{2} f_m \left(1 + \frac{BD}{PD} \cos \right) \quad (2)$$

滚动体故障固有频率

$$f_{BD} = \frac{PD}{2BD} f_m \left(1 - \left(\frac{BD}{PD} \right)^2 \cos^2 \right) \quad (3)$$

保持架故障固有频率

$$f_{CD} = \frac{1}{2} f_m \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \right) \quad (4)$$

其中: f_m 为电动机的转频; n 为滚动体数目; BD 和 PD 为滚动体直径和轴承节径; α 为滚动体的接触角。

根据上述固有频率,即可计算定子电流特征频率。

$$f_{CF} = |f_1 \pm mf_v| \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

式中: f_1 为供电频率; f_v 为上述振动固有频率。

类似于转子断条故障,将连续细化傅里叶变换、自适应滤波、转子齿槽转差率估计、检测阈值自适应技术有机结合,对轴承故障进行检测,并给出维修建议。

3.5 检测装置硬件设计

检测装置硬件设计如图1,被测三相异步电动机定子运行三相电压和电流分别经3个电压互感器和电流互感器送数据采集系统。数据采集系统在以CPLD为核心的控制器控制下,进行实时同步电机电压电流的数据采集,同时将采集结果通过USB接口上传到计算机,计算机将采集结果存储。采集结束后,计算机软件分析采集数据,并给出故障指数和维修建议。

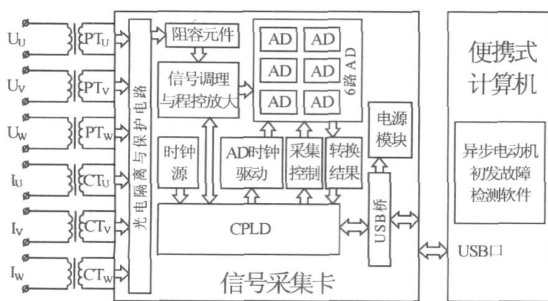


图1 检测装置硬件结构

4 结束语

长期以来,由于没有专门的状态检测手段,舰艇异步电动机的维修仍以计划维修与事后维修为主,视情维修、主动维修的应用难以进行。不恰当的计划维修有可能将早期故障引入设备,引起故障多发。而事后维修则是在故障发生后所进行的修复行动,这时故障已经发生,损失已经造成了,更重要的是,有可能因设备损坏而贻误战机。本装置通过采集、分析舰艇异步电动机的定子电压、定子电流信号,对其定子绕组匝间短路、转子断条及轴承故障实现早期检测。其主要性能指标如下:

- 1) 基于便携式计算机,以易于采集的定子电压、定子电流信号作为分析媒介,实现便携、在线意义下的异步电动机故障检测。
- 2) 异步电动机定子绕组匝间短路故障动模实验,匝间短路环电流约为0.5倍额定电流时,予以可靠检测。
- 3) 异步电动机转子断条故障动模实验,在1根导条断裂情况下予以可靠检测。
- 4) 异步电动机轴承故障动模实验,在外滚道故障情况下予以可靠检测。

舰艇异步电动机初期故障检测装置可以在定子绕组匝间短路、转子断条、轴承故障的初期发展阶段即予以可靠检测,避免故障的进一步发展、恶化、停机,从而有利于减少设备损坏程度,节约维修费用、维修时间,军事经济意义显著。

参考文献:

- [1] IAS Motor Reliability Working Group Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations [J]. Part I IEEE Transactions on Industry Applications, 1985, 21(4): 853 - 864.
- [2] Marques A J, Cardoso, Cruz S M A, et al. Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors [C]//in Park s vector approach Proceedings of the 1995 IEEE IAS Annual Meeting, San Diego (USA): [s. n.], 1995: 642 - 646.
- [3] 姜建国,汪庆生,杨秉寿,等.用自适应方法提取鼠笼式异步电机转子断条的特征分量[J].电工技术学报, 1996(4): 176 - 179.
- [4] Cruz S M A, Marques A J, Cardoso. Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors[J]. extended Park s vector approach Electric Machines and Power Systems, 2000, 28: 289 - 299.
- [5] Kliman G B, Premerlani W J, Birsan Yazici, et al. Sensorless online motor diagnostics [J]. IEEE Computer Applications in Power, 1997, 10(2): 39 - 43.