

感应电机转子断条故障诊断方法研究进展

方 芳

海军工程大学 电气与信息工程学院,湖北 武汉 430033

摘 要: 转子发生断条故障后,电机的电流信号中将会出现故障特征频率分量。而基于定子电流信号分析的故障诊断方法可以做成非侵入式,结构简单,数据采集方便,因此是该方向研究的热点。总结了近年来基于定子电流信号分析的转子故障诊断方法,并对进一步的研究进行了展望。

关键词: 感应电机; 转子断条; 故障诊断

中图分类号: TM343

文献标志码: A

文章编号: 1673-3185(2010)05-77-05

Research Progress of Fault Diagnosis Methods for Rotor Bar of Induction Motor

Fang Fang

College of Electric and Information Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract: When the bar of rotor is broken, some feature frequency components will emerge in the current. The fault diagnosis system based on analyzing the current signal is of interest in this area. This diagnosis system may be designed as a non-invasion type into the induction machine, which is simple in hardware and easy to sample the signals. This paper surveys previous works on rotor broken-bar fault diagnosis by current signal analysis and concludes with a range of further issues that must be solved.

Key words: induction machine; rotor broken-bar; fault diagnosis

1 引 言

感应电机的转子故障主要是指转子断条、转子端环断裂以及转子中的高阻接头故障。故障原因既可能是电动机制造过程中出现质量隐患,如铸件质量低下、焊接不良以及转子强度不够等。也可能是电动机使用过程中出现的故障,譬如电机的频繁启动和过载运行,使转子承受着高温和极大的应力。高温和应力的长期作用,使得转子导条和端环容易产生材料疲劳或造成高阻接头,在导条断裂后,断裂的导条会使相邻的导条流过更大的电流,从而使相邻导条承受更大的机械和热应力,导致这些导条加速断裂,促使转子故障范围和程度进一步扩大,严重时断裂的导条甚至会刮伤定子绕组,造成电机报废^[1-3]。

由于基于定子电流信号分析的故障诊断方法可以做成非侵入式,在操作中只需要通过电流传

感器采集定子电流信号,硬件结构简单,采集数据方便。而且定子电流中转子故障的特征较明显,所以基于定子电流信号分析的感应电机转子故障诊断方法是研究最为普遍的方法。而在基于定子电流信号分析的诊断方法中,基于定子电流频谱分析的方法应用最多。

理想的感应电机的定子电流中含有基波和5次、7次等高次谐波,当转子回路出现断条故障时,转子的对称性被破坏,产生频率为 $-sf_1$ 的负序旋转磁场,在定子电流中感应出频率为 $(1-2s)f_1$ 的故障特征频率分量,这一故障特征频率分量与气隙磁通相互作用,使转矩发生波动,引起转子转速的波动,最后导致基频两侧产生了转子故障特征边频带($f_b = (1 \pm 2ks)f_1$)。对电机定子电流进行Fourier变换,分析定子电流频谱中是否有该特征分量及其幅值的大小就可以判断电机是否存在转子故障。但是,转子故障特征量在故障初期相对于基

频分量的幅值很小,且电机稳态运行时转差率 s 很小,导致故障特征分量和基频分量的频率十分接近,由于 Fourier 分析频谱泄漏的影响,转子故障特征频率分量常常被基频和环境噪声淹没而难以识别,这也成为电机转子故障诊断长期以来的一大“瓶颈”。

2 提取故障特征的主要方法

近年来,随着信号分析技术以及各种智能算法的飞速发展,人们尝试用各种方法来解决这一难题,主要有以下这些方法。

2.1 基频分量抑制法

这一类方法采用各种手段将基频分量从定子电流中削弱或消去,从而使被它掩盖的故障特征分量显现出来。Cruz et al.^[4]提出扩展 Park's 矢量方法,通过分析三相电流 Park's 矢量模平方信号的频谱来检测故障,在电流 Park's 矢量模平方信号中,电流的基频分量被变换为直流分量从频谱图中消去,故障特征分量变换为 $2ksf_1$ 的低频分量。侯新国等^[5]利用 MUSIC 方法对 Park's 矢量模平方信号进行频谱分析来检测故障特征频率分量,可以实现短数据条件下的故障检测。刘振兴等^[6]对单相电流进行 Hilbert 变换,并构成电流 Hilbert 模量,原来的基波电流将对应模量中的直流分量,而转子故障特征分量对应 $2sf_1$ 和 $4sf_1$ 等低频分量,其效果和相关文献相当。由于 Hilbert 模量和 Park 矢量模都要进行平方运算,存在频谱复杂化的问题。特别是在复合型故障的情况下,一些交叉频率的出现将增大故障识别的难度。而且在求解这些模量的过程中,将转子故障的左右边频分量混合在一起,不利于对故障状态的估计。此外,这些模量还存在物理意义不清晰的问题。为了克服这一问题,有文献提出基于坐标变换的方法把基波分量转换成直流分量,同时将转子故障特征分量转换成低频分量^[7-8],但是这种方法要求精确知道基波频率,对基波频率值很敏感,对于供电品质不好的情况实用性较差。梁霖等^[9]对单相电流进行连续小波变换,把得到的系数矩阵进行奇异值分解,削弱基频分量后进行信号的重构,从而提取故障特征。刘振兴等^[10]将 Relax 频谱分析方法应用于定子电流信号,通过选择阈值将基波滤除。黄进等^[11-12]利用电压电流同频率的原理提出双 PQ 变换坐标的同步旋转,将基波分量转换成直流分量,在 PQ 平面上得到一个与转子故障对应的椭圆,并以椭圆的长轴及其修正量来衡量故

障的严重程度。

2.2 非平稳信号分析方法

在电机的起动和停车过程中,电机的转差率在 $[0,1]$ 之间连续变化,所以转子的故障特征分量的频率在这一过程中是变化的,不会一直靠近强大的基波。利用具有非平稳信号分析能力的新颖的现代信号处理技术对这些过程进行分析,可以完全避开基于 Fourier 频谱分析时基频分量泄漏的影响。邱阿瑞^[13]通过分析起动过程的时变频谱诊断转子故障。牛发亮等^[14-17]以起动过程中的转矩为分析对象,利用 Hilbert-huang 变换、复解析小波变换以及小波脊能量谱分析等时频信号处理方法提取转子故障特征。马宏忠等和 Cupertino et al.^[18]对断电后的失电残余电压信号进行分析,该信号中的故障特征不受电源波动和负载的影响。这类方法以非平稳信号分析为工具,分析电机的暂态过程,可以克服负荷及电网频率波动的影响。但是缺点是只能在启动或断电时分析电机的信号,不能随时进行在线的监测。

2.3 人工智能的方法

人工智能方法^[19-23]如模糊逻辑、神经网络、模式识别、专家系统、数据融合等,是近年来随着人工智能分析方法的迅速发展而逐渐发展起来的。这些方法的特点是:以大量的历史正常与故障数据为基础,建立相应的输入/输出映射关系,进而实现电机故障的判断和分类。这些方法在一定的程度上具有新颖的特点,但是都还只是实验室探索。原因主要是训练机的获取和对系统性能评估缺乏相应的确定的工具。

2.4 基于模型的方法

该方法的基本思想是通过建立故障的数学模型,利用模型参数的变化来检测故障。例如 Bangura et al.^[24]和 Deng et al.^[25]采用有限元方法首先建立电机的精确模型,然后用时间步进耦合有限元状态空间的方法模拟出很多的故障模型中的数据,将实测数据与故障模型下的数据进行比较,从而实现电机故障的识别。Ma et al.^[26]在电机多回路理论的基础上建立电机故障的模型,通过电压、电流和转速的数据对模型参数进行辨识,根据转子电阻值的变化来检测故障。Kral et al.^[27]提出的 Vienna 检测方法,对电机建立正常运行状态下各种参数的电流和电压空间矢量参考模型,然后对实际被监测的各种参数进行分析和计算,实测数

与参考模型之间的差值就表示了该电动机内部出现了何种类型的故障。此外,部分文献^[28-30]也是通过模型参数的辨识来诊断转子断条故障的。这些方法的模型都是针对某一具体的故障建立的,受环境条件和电机负载等诸多因素的影响。而实际电机精确模型的建立很困难,模型不精确,可能会导致判断错误。

2.5 基于瞬时功率的频谱分析法

用瞬时功率信号替代电流信号作为研究对象,在瞬时功率信号中,电流的基波成分被变成直流分量,断条故障特征频率变为 $2ksf_1$ 的低频分量,与扩展 Park's 矢量信号中类似^[31-34]。这种方法要用到电压信号来求瞬时功率,由于供电电压的谐波的存在,与扩展 Park's 矢量法一样,它也存在频谱复杂化的问题。

2.6 高分辨率频谱估计方法

高分辨率频谱估计方法是一类基于信号的自相关矩阵的特征分析的方法。顾名思义,其频率分辨率与传统的 FFT 技术相比要高得多。多重信号分类 (Multiple Signal Classification, MUSIC) 是其中比较有代表性的方法。但是对于同样长度的输入数据,与 FFT 相比,该算法需要较大的存储空间和较长的计算时间,因此实时性较差,真正用于工程实践的不多。Kia et al.^[35-36]将它应用于转子断条故障的检测,并通过数据预处理改进了诊断的效果,提高了诊断的速度,使它的实用性大大增强。

除了基于电流信号的分析方法之外,还有一些其他的方法来诊断转子故障^[37-38],如利用振动信号分析,寻找故障特征频率,从而检测出故障。同定子故障检测一样,也有利用在轴向安装感应线圈来检测轴向磁通中与转子断条故障对应的频谱分量,达到故障诊断的目的^[39]。此外,转子断条引起转矩波动从而导致转速以特定的频率波动,检测出这一特定的波动就可以诊断转子的故障^[40]。Pires et al.^[41]利用信号自相关矩阵的特征值的波动频率和大小来检测转子故障。Mirafzal 等^[42-43]分析转子断条后磁场的振荡规律,并将它作为故障诊断的特征量。

3 存在的主要问题

随着电子、计算机以及各种智能信息处理技术的飞速发展,结合研究人员在各种工业现场逐步积累起来的经验,转子断条故障诊断技术发展

至今,已经取得了丰硕的成果。但是,还存在如下问题和不足:

1) 由于电机故障特征频率受电机负载及供电品质的影响,以及 FFT 技术本身的局限性(频率分辨率低,频谱泄漏等问题),在某些故障条件下很难准确提取故障特征频率。

2) Fourier 分析是长期以来广泛运用的方法,但它是建立在信号平稳的假设之上的,并不适用于非平稳过程,如对电机的起动/停车过程的分析,而借助于 FFT 算法实现的信号处理方法如频谱分析、相关分析、细化谱分析、高阶谱分析、包络分析、倒谱分析等的应用也就大打折扣。小波变换以及人工智能等是近年来逐渐应用到电机故障诊断领域的新型处理方法,已显示出明显的优越性,但与之相应的各种算法还有待进一步的研究。

3) 感应电机在很多情况下是由功率电子器件驱动的,这类电动机的电压和电流都是脉宽调制的方波脉冲,含有非常复杂的谐波,给这类电动机的早期故障的检测带来了新的困难和问题。目前,这类电动机早期故障检测的研究文献较少,还需大量努力。

4) 对故障特征的定性检测研究较多,而对故障严重程度的定量评估研究不够。

4 结束语

总之,由于定子电流易于采集,简单实用,因此基于电流信号分析的诊断方法应用最为广泛^[44-46]。特别是随着近年来信号处理技术及人工智能技术的飞速发展,涌现了大量基于定子电流信号的转子断条故障诊断新方法,取得了良好的效果。但是,基于电压和电流分析的方法仍存在不足,需要在故障特征的提取以及故障的严重程度评估方面作进一步的工作。此外,在复合故障出现时,各故障之间可能会相互影响,这时如何提取故障特征也有待深入地研究。

参考文献:

- [1] BONNET A H, SOUKUP G C. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1992, 28(4): 921-937.
- [2] 谢颖, 李伟力, 李守法. 异步电动机转子断条故障演化及相关因素分析[J]. 电工技术学报, 2007, 22(3): 41-48.
- [3] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [4] CRUZ S M A, CARDOSO A J M. Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors using extended Park's

- vector approach [J]. *Electric Machines and Power Systems*, 2000, 28(3): 289-299.
- [5] 侯新国, 吴正国, 夏立. 基于 Park 矢量模平方函数的异步电机转子故障诊断方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(9): 137-140.
- [6] 刘振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于 Hilbert 模量频谱分析的异步电动机转子故障在线监测与诊断方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(7): 158-161.
- [7] 刘振兴, 张哲, 尹项根, 等. 一种新型的笼型异步电动机转子故障在线检测和诊断方法 [J]. *电工技术学报*, 2002, 17(4): 89-92.
- [8] CRUZ S M A, CARDOSO A J M, TOLYAT H A. Diagnosis of stator, rotor and airgap eccentricity faults in three-phase induction motors based on the multiple reference frames theory [C]//Conference Record of The 2003 IEEE Industry Applications Society Annual meeting, 2003, 2: 1340-1346.
- [9] 梁霖, 徐光华, 刘弹, 等. 小波-奇异值分解在异步电机转子故障特征提取中的应用 [J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(19): 111-115.
- [10] 黄进, 牛发亮, 杨家强. 基于双 PQ 变换的感应电机转子故障诊断[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(13): 135-140.
- [11] 刘振兴, 尉宇, 赵敏, 等. 基于 RELAX 频谱分析方法的鼠笼式异步电动机转子故障诊断方法[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(22): 146-150.
- [12] 黄进, 牛发亮, 杨家强. 考虑负荷及惯量影响的感应电机转子故障诊断 [J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(14): 120-125.
- [13] 邱阿瑞. 利用启动电流的时变频谱诊断鼠笼异步电机转子故障 [J]. *中国电机工程学报*, 1995, 15(4): 267-273.
- [14] 牛发亮, 黄进, 杨家强, 等. 基于感应电机启动电磁转矩 Hilbert-Huang 变换的转子断条故障诊断[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(11): 107-112.
- [15] 牛发亮, 黄进, 杨家强, 等. 基于电磁转矩小波变换的感应电机转子断条故障诊断 [J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(11): 107-112.
- [16] NIU F, HUANG J. Rotor broken bars fault diagnosis for induction machines based on the wavelet ridge energy spectrum [C]//Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2005), 2005, III: 2274-2277.
- [17] 马宏忠, 李训铭, 方瑞明, 等. 利用失电残余电压诊断异步电机转子绕组故障[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(7): 183-187.
- [18] CUPERTINO F, VANNA E D, SALVATORE L, et al. Analysis technique for detection of IM broken rotor bars after supply disconnection [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2004, 40(2): 526-533.
- [19] FILIPPETTI F, FRANCESCHINI G, TASSONI C. Neural networks aided on-line diagnostics of induction motor rotor faults[J]. *IEEE Transactions on Industry Application*, 1995, 31(4): 892-899.
- [20] HAJI M, TOLYAT H A. Pattern recognition—a technique for induction machines rotor broken bar detection [J]. *IEEE Transaction On Energy Conversion*, 2001, 16(4): 312-317.
- [21] ALTUG S, CHOW M Y, TRUSSELL H J. Fuzzy inference systems implemented on neural architectures for motor fault detection and diagnosis [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1999, 46(6): 1069-1079.
- [22] LI B, CHOW M Y, TIPSUWAN Y, et al. Neural-network based motor rolling bearing fault diagnosis [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2000, 47(5): 1060-1069.
- [23] FILIPPETTI F, FRANCESCHINI G, TASSONI C, et al. Recent developments of induction motor drives fault diagnosis using AI techniques [J]. *IEEE Transactions on Industry Electronics*, 2000, 47: 994-1003.
- [24] BANGURA J F, DEMERDASH N A. Diagnosis and characterization of effects of broken rotor bars and connectors in squirrel-cage induction motors by a time-stepping coupled finite element-state space modeling approach [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1999, 14(3): 994-1003.
- [25] DENG X, PALKO S, JOKINEN T, et al. Rotor fault analysis of induction motors by dynamic model and finite element method [C]//Proceedings of IEEE Power Technique Conference, 1995: 126-135.
- [26] MA H Z, NI X R, DING Y Y, et al. Parameter identification and its application in fault diagnosis of asynchronous motor [C]//Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems, 2007: 1824-1828.
- [27] KRAL C, WIESER R S, PIRKER F, et al. Model-based detection of rotor faults without rotor position sensor—the sensorless Vienna monitoring method [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, 41(3): 784-789.
- [28] LI J J, SHENG J B. The research of asynchronous motor stator and rotor parameter identification method [J]. *Electrician Technique Transaction*, 2006, 21(1): 70-74.
- [29] BACHIR S, TNANI S, CHAMPENOIS G, et al. Induction motor modelling of broken rotor bars and fault detection by parameter estimation [C]//In Proceeding of IEEE SDEMPED, Gorizia, 145-149 Sep, Italy, 2001.
- [30] 宁玉泉. 笼型异步电机转子断条和端环开裂的故障诊断和参数计算 [J]. *中国电机工程学报*, 2002, 22(10): 97-103.
- [31] LIU Z, YIN Z, CHEN D, et al. Online rotor mixed fault diagnosis way based on spectrum analysis of instantaneous power in squirrel cage induction motors [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2004, 19(3): 485-490.
- [32] DIDIER G, RAZIK H, CASPARY O, et al. Rotor cage fault detection in induction motor using global modulation index on the instantaneous power spectrum. in Proceeding

- of Symposium Diagnostics Electric Machines [J]. Power Electronics and Drives(SDEMPED),2003: 104-109.
- [33] DIDIER G,TERNISIEN E,CASPARY O,et al. Fault detection of broken rotor bars in induction motor using a global fault index[J]. IEEE Transaction on Industry Applications,2006,42(1):79-88.
- [34] LEGOWSKI S,ULA A S,TRZYNADLOWSKI A. Instantaneous power as a medium for the signature analysis of induction motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1996,32(4):904-909.
- [35] KIA S H,HENAO H,CAPOLINO G. A High-resolution frequency estimation method for three-phase induction machine fault detection[J]. IEEE Transaction on Industry Electronics,2007,54(4):2305-2314.
- [36] KIA S H, HENAO H, CAPOLINO G. Zoom-music frequency estimation method for three-phase induction machine fault detection [C]//Proceeding of IECON 2005, 2005:2603-2608
- [37] SADOUGHI A,EBRAHIMI M,RWZAEI E. A new approach for induction motor broken bar diagnosis by using vibration spectrum [C]//SICE-ICASE International Joint Conference, 2006:4715-4720.
- [38] RILEY C M, HABETLER T G, KAMRAN F,et al. A method for sensorless on-line vibration monitoring of induction machines [J]. IEEE Transaction on Industry Electronics,1998,9(2):1240-1245.
- [39] MENZHI L E, SAAD A. Induction motor fault diagnosis using voltage spectrum of an auxiliary winding[C]//Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems 2007,Oct. 8-11,Soul,Korea. 2007: 1028-1033.
- [40] KLIMAN G B,STEIN J. Methods of motor currents circuit defects by speed fluctuation measurements signature analysis[J]. Electric Machines and Power Systems,1992: 463-474.
- [41] PIRES V F,MARTINS J F,PIRES A J. On-line diagnosis of three-phase induction motor using an eigenvalue $\alpha\beta$ -vector approach [C]//IEEE ISIE 2005, Pubrovník, Croatia,2005:863-866.
- [42] MIRAFZAL B,DEMERDASH N A O. Induction machine broken-bar fault diagnosis using the rotor magnetic field space-vector orientation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2004,40(2):534-542.
- [43] MIRAFZAL B,DEMERDASH N A O. Effects of load magnitude on diagnosing broken bar faults in induction motors using the pendulous oscillation of the rotor magnetic field orientation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2005,41(3):771-783.
- [44] NANDI S,TOLIYIAT H A. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines-A review [C]//In conference record IEEE-IAS. Annual meeting,Phoenix, AZ,1999,1:197-204.
- [45] NANDI S. Fault analysis for condition monitoring of induction motors [D]. PhD Dissertation. Texas A&M University,2000.
- [46] BENBOUZID M E H, KLIMAN G B. What stator current processing based technique to use for induction motor rotor faults diagnosis[C]//IEEE Power Engineering Review, August 2002.