

利用电气特征分析对电动机进行状态监测

常英杰

(北京普迪美科技有限公司)

摘要：电动机电流是一个检测电动机故障的非常好的状态监测参数，在不影响电动机运行的条件下对电流和电压信号进行频谱分析可检测各种故障，包括：转子损坏，机械不对中和不平衡，基础松动，静态和动态偏心，铁心损坏，绕组松动，匝间短路，和轴承故障。

关键词：电动机，状态监测，故障诊断

1 引言

出于可靠性需要，美国 70 年代提出了对位于核反应堆内部的电动机进行状态监测的需求，后续的研究表明电动机的电流总是被其内部的故障状态所影响或调制，并且研制出了新的电流和电压信号调理技术，用于对信号的分析 and 确定故障的性质。

电气特征分析的概念是，采集电动机的电流和电压信号，进行信号调理并分析调理的信号从而识别各种故障。三相信号的采集可以直接从一次回路（低压电动机）或通过 CT 在二次回路（高压电动机），因此可在控制中心测试。

2 原理

理想的电动机电流信号是一个纯 50Hz 正弦波，在频谱上应当只有一个峰值存在。但实际情形是，电动机的信号频谱中表现出很多峰值包括工频及其谐波，这就是电流特征，对这些特征的分析可识别故障。

某些谐波随电源而来，这些一般不太重要，重要的是由于各种机械和电气故障产生的谐波；各种故障引起电动机内部磁通的分布发生变化，从而产生谐波。注意这些谐波是一些中间谐波，标准的谐波分析仪并不能检测到。由于电动机故障产生的谐波只在电流频谱中出现，而不在电压中出现，电流和电压频谱的比较可很容易区分它们。

3 电动机故障的特征识别

3.1 转子断条

在电流特征中，电动机极通过频率 PPF（滑差 $\times$ 极数）表现为工频的边带，在 $FL \pm PPF$ 处可看到峰值。工频峰值和极通过频率边带峰值的幅值差是转子条健康的状态指标。研究表明这个差大于 60dB 指示转子条状态为优。

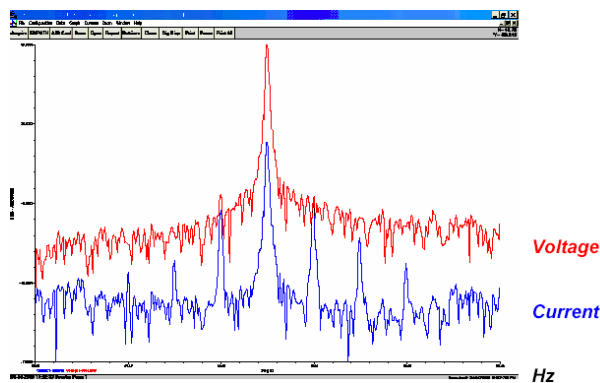


图 1，电动机严重断条的典型频谱

随着转子条的劣化（即存在高阻接点或裂纹开始产生），转子阻抗升高，从而 PPF 电流升高，导致电流频谱的 PPF 峰值增加。48dB 的差值指示高阻接点的存在，35dB 将指示多个断条发生，大部分情况是处于期间某个状态，其严重性等级按表 1 评估。

表 1 电动机电流分析严重等级和推荐的行动表

CAT No.	FL/Fp dB	FL/Fp 比率	Fp/FL 百分比%	转子状态评估	推荐的行动
1	>60dB	>1000	<0.10	优	无
2	54-60	501-1000	0.10-0.20	良	无
3	48-54	251-501	0.20-0.40	一般	继续监测，只看趋势
4	42-48	126-251	0.40-0.79	转子条裂纹可能在发展或高阻节点问题	缩短监测间隔，密集趋势
5	36-42	63-126	0.79-1.58	两个条裂纹或断条和高阻节点问题	进行振动测试确认原因和等级
6	30-36	32-63	1.58-3.16	多个条裂或断和端环问题指示；滑环和节点问题	尽快检修
7	<30dB	<32	>3.16%	多个断条和端环开裂；严重问题很多	尽快检修或更换

3.2 不对中和不平衡

识别这些故障需要对电流信号完成另一种信号调理，称为 RMS 解调，目的是为了消除工频。

在解调频谱中，电动机转速表现为一个峰值，我们可以根据其幅值大小判断不平衡和不对中。在正常电动机的解调特征中，转速峰几乎没有，而当电动机存在机械不平衡和不对中时，将出现转速峰及其谐频峰。

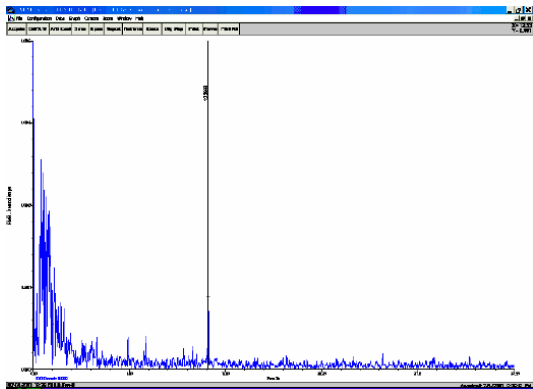


图 2，对中良好的电动机的 RMS 解调频谱

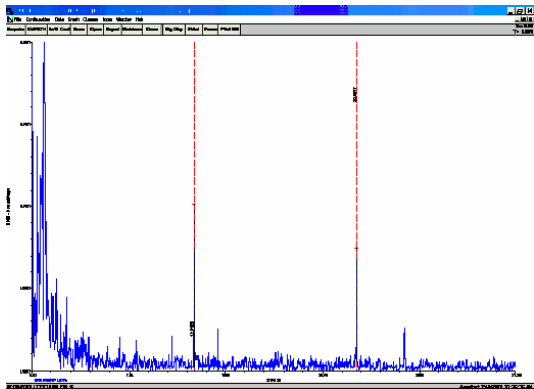


图 3，不对中电动机的 RMS 解调频谱

3.3 基础松动

在 RMS 解调频谱中，基础松动表现为电动机转速的半频。

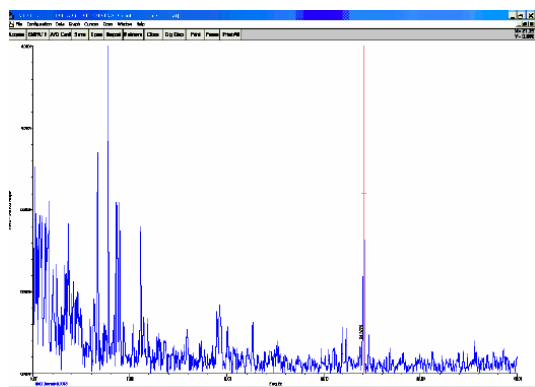


图 4，基础松动电动机的 RMS 解调频谱

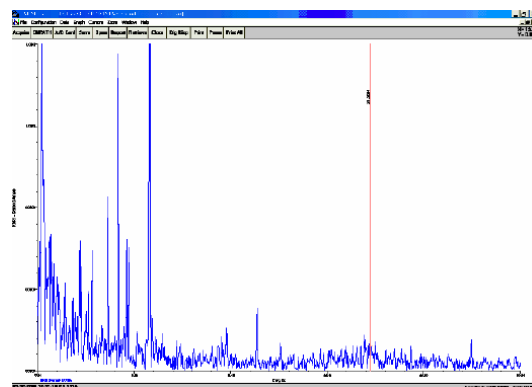


图 5，同一台电动机基础紧固后 RMS 频谱

3.4 静态偏心

静态偏心是定转子气隙不均衡的现象，一般由柔性基础，轴承松动，或滑动轴承气隙调整不当引起。在电流频谱中，它表现为条通过频率的工频边带。

静态偏心 = $RB(\text{条数}) \times RS(\text{转速}) \pm n FL$ ， n 为奇数。

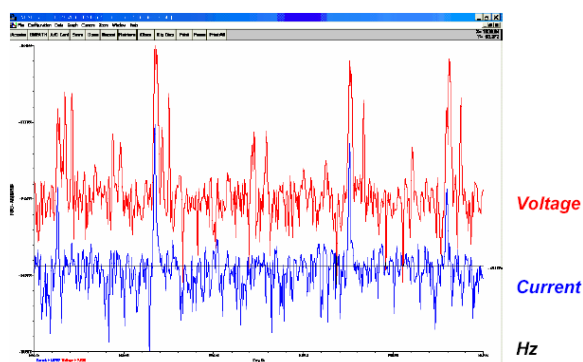


图 6，静态偏心的电动机的典型频谱

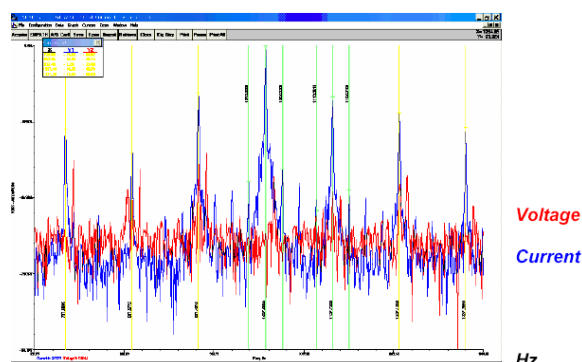


图 7，动态偏心的电动机的典型频谱

3.5 动态偏心

动态偏心是存在变化的定转子气隙的现象，一般由轴承座或端盖磨损引起。这是一个严重问题，它可迅速损坏轴承和轴承座，最终导致转子摩擦定子。

建议密切监视这个状态。在电流频谱中它表现为条通过频率工频边带上的转速边带。

动态偏心 = $RB \times RS \pm n FL \pm RS$

3.6 定子机械故障

绕组松动损坏线圈的绝缘，侵蚀线圈导线的绝缘漆，导致电晕发生，从而破坏电动机绝缘。

铁芯损坏导致矽钢片短路，引起局部涡流和发热，从而损坏电动机绝缘。

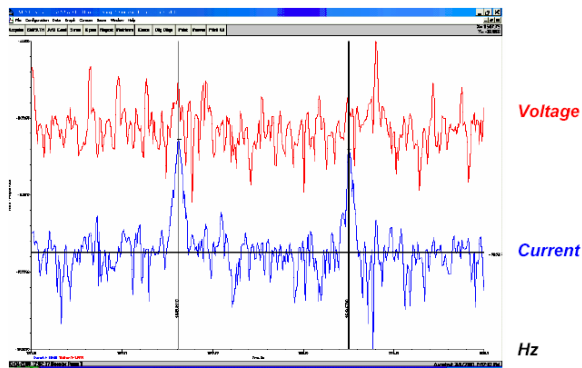


图 8，定子铁芯损坏的电动机的典型频谱

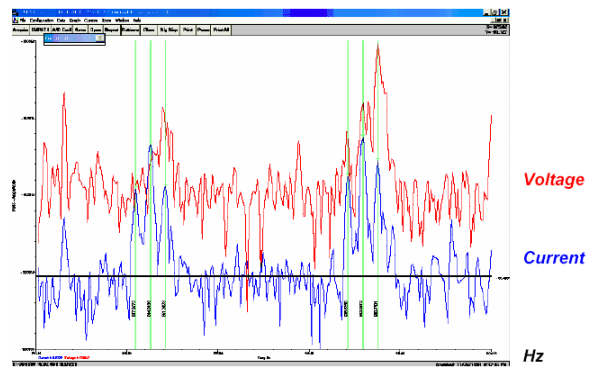


图 9，定子线圈匝间绝缘劣化的典型频谱

3.7 匝间短路

匝间短路导致定子线圈过热和电流不平衡，从而引起局部和不均衡发热，降低出力并最终导致接地故障，电流频谱可检测匝间短路和匝间绝缘劣化。

3.8 轴承问题

轴承故障有一组独特的故障频率，据此可识别轴承问题。在电流频谱中这些故障频率峰值的存在指示轴承故障（内圈、外圈、滚动体或保持架），劣化的程度根据这些峰的幅值大小评估。

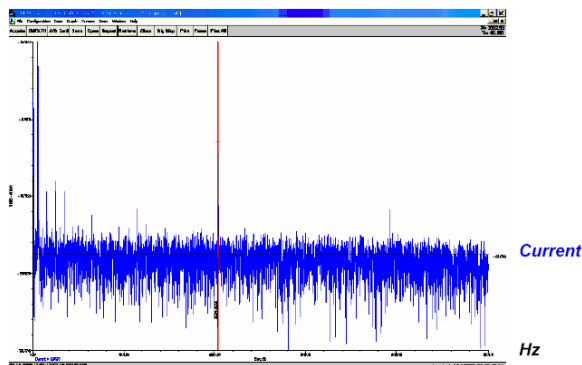


图 10，电动机轴承劣化的典型频谱

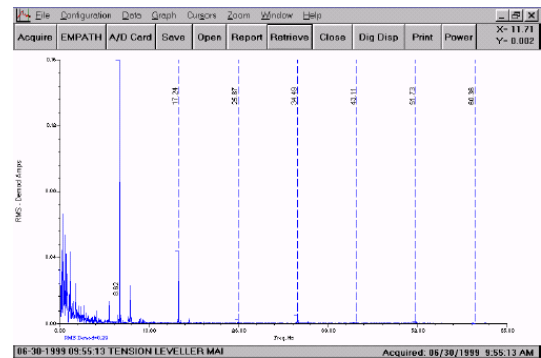


图 11，VFD 电动机解调电流频谱示出皮带通过谱峰，转速和叶片通过频率

3.9 其他应用

电动机电流被任何引起负荷波动或冲击的因素所调制，因此电流频谱分析也可用于检测被驱动设备问题，典型的问题包括：风机叶片损坏，皮带松动，齿轮齿损坏，齿轮轴不平衡，等等；在电动机驱动阀的诊断方面得到非常广泛的应用。

虽然本文主要讨论的交流感应电动机，这些分析技术可同样应用于发电机，同步电动机，变频驱动电动机和直流电动机。

4 结论

目前主要的诊断可由仪器和专家系统软件实现全自动诊断，这项技术提供对电动机的全面地分析和诊断，并得到了实际检验。工厂不用停机就可以进行测试，准确确定电动机设备的状态、问题的根源及其严重性，从而被认为是状态监测技术的重大进展。