

基于 MCA 测试技术的电机故障诊断研究

李 庐¹ 王 鑫² 牛志钧³

- (1. 国铁事业部检修车间,山西 永济 044502
2. 工业电传动事业部修配公司,山西 永济 044502
3. 安全与环境保护部,山西 永济 044502)

摘 要 目前电机匝间短路检测方法仅高频浪涌波形测试一种方法,存在过度灵敏且不便携带的缺点,于是引入便携的 MCA 测试技术,MCA 测试技术将电机看作一个电感、电阻、电容的复杂等效电路,通过 ALL - TEST IVPro 电机故障检测仪对电机施加一个高频正弦波,产生阻抗、倍频值、相位角三个核心参数,从而有效的判断电机匝间短路、鼠笼转子导条断裂等故障,提高电机故障诊断准确率。

关键词 MCA 电感 阻抗 倍频值 相位角 匝间短路 导条断裂

0 引言

电机故障分为电气故障和机械故障,根据美国电力研究学会(EPRI)对电机故障的研究表明:机械故障占比 53%,如轴承故障、不平衡、松动等,电气故障占比 47%,其中 10% 源于转子,如铸造缺陷导致的不平衡气隙、导条断裂等,37% 源于定子绕组,定子故障主要是绝缘故障,绝缘故障分为接地和匝间短路,接地指电机带电部位与不带电部位短路连接,匝间短路指电机不同带电部位短路连接。随着电机检测技术的不断发展,接地故障的预防性试验项目由原来的绝缘电阻、工频耐压等一两个项目发展为绝缘电阻、极化指数与吸收比、工频耐压、直流泄露电流、介质损失角正切值五个检测试验项目,在电机新造和检修中,电机通过这五个试验项目,证明是可以长期可靠运行的。但近年来电机匝间短路的预防性试验项目仅由原来的中频电源法发展为高频浪涌波形测试,优点是灵敏度非常高,实践证明通过高频浪涌波形测试的电机是可以长期可靠运行的。缺点是设备笨重,波形复杂,分析难度大,过度灵敏,存在较高的误判率。为了解决这一问题,我们在高频浪涌波形测试的基础上,又引入 MCA 测试技术,判断交流电动机定子匝间短路和鼠笼转子导条断裂,提高电机故障诊断准确率,取得了良好效果。

1 利用 MCA 测试技术提高电机故障诊断准确率实例

高频浪涌波形测试原理是仪器给电机绕组施加一个高频脉冲,测试电流的衰减。假如三相交流电

动机的电磁参数不完全相同,如匝数不等,磁路不通、形状不同,则放电波形就会有差异。2015 年我们对某地铁公司交流牵引电机检修过程中,在对定子做三相绕组浪涌波形测试时,发现批量定子三相浪涌波形轻度不重合,如图 1,给我们造成了一定的困扰,因为这批电机检修之前是正常运行的,下线后送我公司仅正常清洗、保养、更换轴承,定子三相绕组浪涌波形不重合,意味着定子绕组存在匝短问题,需要大修,即全部更换定子线圈。

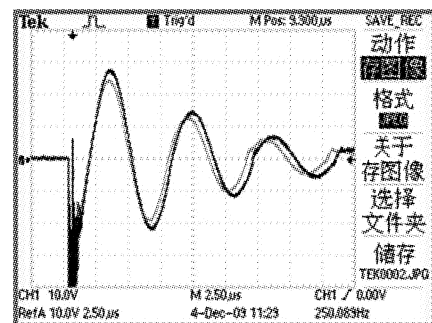


图 1 定子三相浪涌测试轻度不重合

依据多年检修经验,我们分析判断:定子三相浪涌测试如果波形重合,那么定子绕组匝间绝缘是合格的,这是肯定的。如果定子三相浪涌测试波形轻度不重合,定子绕组则不一定匝短,因为浪涌测试非常灵敏,定子内部的一些非对称铁磁材料对波形有一定的影响。

为了进一步判断定子绕组是否匝短,于是我们用基于 MCA 测试技术原理的美国 ALL - TEST IVPro 电机故障检测仪对电机定子进行三相测试,以其中一台电机测试结果为例,如表 1,

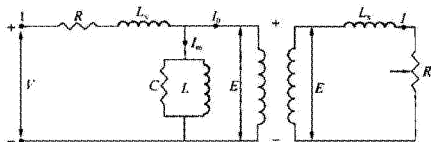
表 1 MCA 技术三相测试结果

	阻抗(Ω)	相位角($^\circ$)	倍频值(%)
U 相	19	78 $^\circ$	- 49%
V 相	19	78 $^\circ$	- 49%
W 相	19	78 $^\circ$	- 49%

MCA 测试技术显示定子三相阻抗、相位角、倍频值完全一致,定子无匝短现象,于是我们将定子检修处理,然后电机总装,试验,试验结果显示三相电压、电流完全平衡,该电机检修完后于 2015 年 10 月上线运行,至今已经四年,运行良好。

2 MCA 测试技术

MCA 全称 Motor Circuit Analysis 即电机电路分析技术,基本原理是将电机看成是一个包含电阻、电感、电容的复杂电路,如图 2。利用停电离线状态下电机的电磁性能和高频电流进行相位测试和分析,从而发现电机电路中存在的缺陷。MCA 测试技术的实现依靠美国 ALL - TEST IV Pro 电机故障检测仪,具有便携可充电优点,如图 3,它能够提供 100HZ ~ 800HZ 的高频正弦波,完全静态模拟电机的运行状态,可以测量电机的绝缘电阻、直流电阻、电感 L、阻抗 Z、相位角 Fi、倍频值 IF、电容七种参数,进而准确评估绕组品质。



其中: R 表示电阻
L 表示电感
C 表示电容

图 2 交流电动机等效电路



图 3 ALL - TEST IV Pro 电机故障检测仪

2.1 MCA 技术测试参数及 ALL - TEST IV Pro 电机故障检测仪功能介绍

(1) 绝缘电阻 R_m ALL - TEST IV Pro 可以对电机绝缘电阻进行基本测量,判断电机是否接地,量程:0V ~ 500V,0M Ω ~ 99M Ω ;500V - 1000V,0M Ω ~ 99M Ω 。

(2) 直流电阻 R ALL - TEST IV Pro 可以测量电机直流电阻,在电机三相绕组阻抗、相位角、倍频值平衡的前提下,通过三相交流电动机直流电阻是否平衡,判断电机接头是否松动,量程:0.001 Ω ~ 1600 Ω 。

(3) 电感 L ALL - TEST IV Pro 可以测量电机电感,量程:50mH ~ 2.5H。

(4) 阻抗 Z MCA 测试技术的核心,电机相当于一个纯电感电路,ALL - TEST IV Pro 给电机施加一个 100HZ ~ 800HZ 的高频正弦波电流,测出的电机阻抗是相应电感的 $2\pi f$ 倍,即 628(100HZ) ~ 5024(800HZ) 倍,较传统的 LCR 测试,测量精度最高可放大五千倍,如果交流电机三相阻抗是平衡的,那么电感无疑也是平衡的,量程:3 Ω ~ 1660 Ω 。

(5) 倍频值 I/F MCA 测试技术的核心,倍频值 I/F 即频率加倍后,电流的变化量,给绕组施加两次电压,第二次输入电压频率是第一次的 2 倍,如下所示:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (2\pi f L - 1/2\pi f C)^2}} \quad (2-1)$$

$$I_2 = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (2\omega L - 1/2\omega C)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (4\pi f L - 1/4\pi f C)^2}} \quad (2-2)$$

$$I/F = \frac{\Delta I}{I} = \frac{I_2 - I}{I} \times 100\% \quad (2-3)$$

对于纯电感电路 $R \approx 0, C \approx 0, I/F = 50\%$,电机相当于一个纯电感电路,对于纯电阻电路 $I/F = 0$,最初无匝间短路发生, $\omega L \gg R$,类似“纯电感电路”, I/F 趋近于 -50% ,最后,匝间短路严重,L 失效,仅剩少量 R,类似“纯电阻电路”: I/F 趋近于 -0% 。

量程: $-50\% \sim +50\%$

(6) 相角 Fi 相角: 又称“相位”、“周相”、“位相”,MCA 测试技术的核心,电机定子绕组无论星形连接还是三角形连接,相间阻抗是一个矢量,存在相角,相角以度为单位,量程:0 $^\circ$ ~ 90 $^\circ$ 。

(7) 电容: 量程 0.01 μ F ~ 200 μ F

MCA 测量参数中特有的,最核心的参数是阻抗 Z、相位角 Fi、倍频值 I/F, MCA 认为电机三相平衡不是直流电阻平衡,而是阻抗 Z、相角 Fi、倍频值 I/F

平衡。

2.2 MCA 测试技术的标准

不平衡率 = (最大 - 最小) / 最大

表 2 IEEE 电机三相平衡评判标准

测试项目	良好	缺陷	故障
电感 L(mH)	5%	10%	15%
阻抗 Z(Ω)	2%	3%	5%
倍频 I/F(%)	0	2	> 3
相角 Fi(°)	0	1	2

表 3 IEEE 变压器测试标准

测试项目	合格标准
电阻 R(Ω)	5% (> 0.250Ω) 7.5% (< 0.250Ω)
阻抗 Z(Ω)	5%
电感 L(mH)	5%
倍频 I/F(%)	±1
相角 Fi(°)	±2

阻抗测试较直阻 R 的测试更精确, I/F 用于评估故障源于定子还是转子, 且能够诊断早期匝间短路等故障。如今这一标准已成为美能源部推荐的电机质量评判依据。

3 MCA 技术在电机故障诊断中的技术优势及应用案例

3.1 MCA 技术在电机故障诊断的技术优势在于

(1) MCA 测试技术是无损检测, 不仅能检测电机, 还可以检测变压器;

(2) MCA 技术阻抗测试能够判断出绕组的初期匝间短路, 初期匝间短路导致的电阻值的变化微乎其微, 难以检测, 但由此产生的电感失效, 可以通过施加高频电流从而放大数千倍的阻抗测试检测出来;

(3) 能够快速判断匝短类型: 同绕组匝间短路、层间短路、相间短路;

Fi 与 I/F > +/- 2 —— 同相、同绕组的匝间短路

Fi > +/- 1, I/F 平衡 —— 同相绕组中线圈间短路(层间短路)

Fi 平衡, I/F > +/- 2 —— 相间短路

(4) 能够快速判断定子故障还是转子故障;

转子故障: 电感 L 与阻抗 Z “平行”(同时大同时小);

定子线圈污染或过热: L 与 Z 不“平行”

(5) 能够判断铸造转子缺陷和鼠笼转子断条;

(6) 能够判断对直流电动机转子匝短;

(7) 便携易用、可充电, 牵引电机不用从车上拆下来即可离线断电检测, 对故障分析判断, 弥补浪涌测试仪器笨重、移动性差的缺点。

3.2 MCA 技术应用案例

MCA 技术应用广泛, 我们选几个多发的、有代表性的案例进行分析, 分别是交流电机定子绕组匝短, 交流电动机鼠笼转子导条断裂, 直流电动机转子匝间短路。

3.2.1 交流电机定子绕组匝间短路

以某地铁牵引电机定子为例, 用户反映电压电流平衡, 对地绝缘良好, 但 V 相温度高出其他两相 42K, 送我公司查找故障原因, 电机在未解体状态下 MCA 测试, 用 ALL - TEST IVPro 电机故障检测仪对定子进行三相阻抗、相位角、倍频值测试, 发现 V 相与其他两相不平衡, 如图 4、表 4。

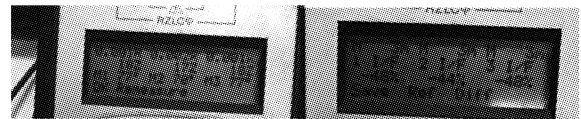


图 4 ALL - TEST IVPro 电机故障检测仪测量结果

表 4 MCA 技术测试定子结果

部位	三相	阻抗 Z(Ω)	相位角 Fi(°)	倍频值 I/F(%)
定子	U1 - U2	18	77°	- 48%
	V1 - V2	16	70°	- 44%
	W1 - W2	18	77°	- 48%

于是我们判断定子 V 相有明显的匝短现象, 导致 V 相温度高出其他两相 42K, 根据 3.1(3) 的判断标准, Fi 与 I/F > +/- 2, 我们迅速判断定子匝间短路的故障类型为同相、同绕组的匝间短路, 该电机定子为硬绕组, 并联支路数为 1, 每条支路 4 个极相组串联, 由于四个极相组在定子 360 度空间对称分布, 如图 5, 于是将四个极相组断开, 分别进行 MCA 测试, 发现一个极相组与其他三组阻抗、相位角、倍频值明显不同, 系匝极相组, 如图 6, 对该极相组进行换新, 重新 MCA 测试, 四个线圈组 MCA 平衡, 于是将四个线圈组重新串联起来, V 相恢复, 再次进行三相 MCA 测试, 定子三相平衡, 电机总装、试验, 合格交出并安全运行, V 相温度高故障消除。

通过上述案例, MCA 技术不仅能够帮助我们快速判断哪一相匝间短路、短路类型, 并且能够帮助我

们找到匝短线圈,进行局部更换,避免全部更换定子绕组,大幅降低维修成本。

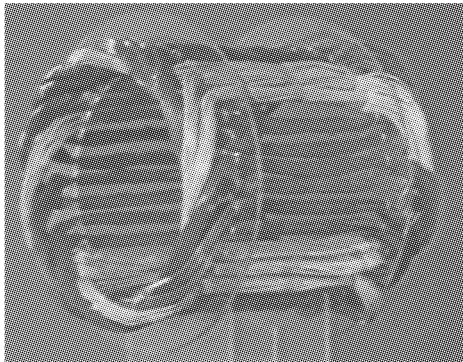


图 5 三相对称交流绕组模型

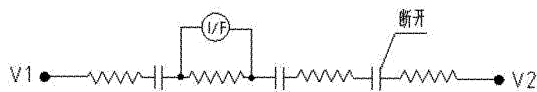


图 6 MCA 技术查找 V 相匝短线圈

3.2.2 交流电动机鼠笼转子导条断裂

交流鼠笼转子导条断裂是交流电动机多发的、常见的故障,断裂部位主要在导条与端环根部,如图 7。其主要原因是导条伸出部分不受约束,在导条和端环离心力作用下根部应力集中,疲劳断裂。

鼠笼转子导条断裂的检测方法通常为磁粉探伤和渗透探伤,如图 7,缺点是如果裂纹在导条侧面或者内部,受空间限制,则无法检测出来。容易漏检,如图 8。

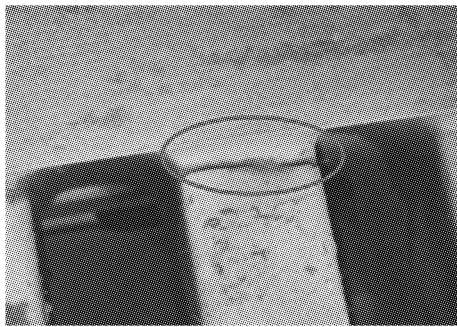


图 7 鼠笼转子导条表面断裂



图 8 导条侧面裂纹无法检测

MCA 技术将电机等同于一个包含电阻、电感、电容的复杂电路,用 ALL-TEST IV Pro 给电机定子施加一个高频正弦波,将转子进行 12 等分,即每转 30°测量一下定子的电感值,如果转子导条正常没有断裂,定子三相电感值呈有规律的正弦分布,每相相差 120°,如图 9。

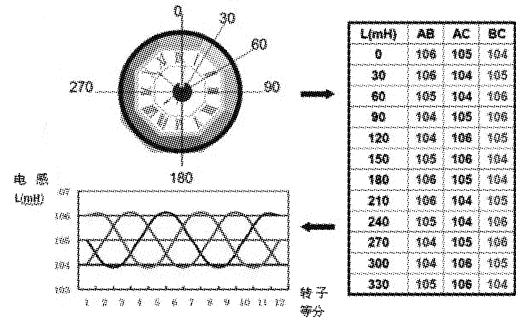


图 9 导条正常(无断裂)定子 MCA 电感波形

如果转子导条断裂,则转子的对称性被破坏,断裂的导条不能形成回路,定子三相电感值呈有规律的正弦分布也会发生较大的变化。以某高铁牵引电机为例,由于部分导条断裂开路,转动转子不同的角度,在定子感应出来的电感、阻抗、必然不同,这样可以找到断裂的导条。将转子进行 12 等分,每转 30 度测量一下定子的电感值,做出如下图形,如图 10,可以看出定子三相电感不对称分布,在 150° ~ 240° 定子电感波形明显发生异常,证明这个区域存在导条断裂故障,做好标记后对电机解体,进一步查找断条故障。

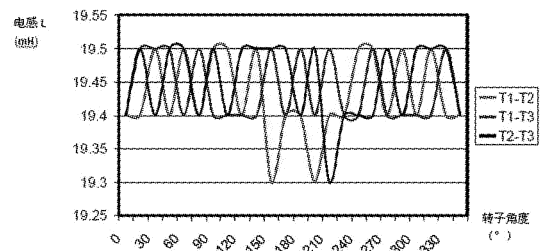


图 10 导条断裂定子 MCA 电感波形

3.2.3 快速判断定子还是转子故障

对于一台交流电动机,在电机未解体状态下,我们如何根据 MCA 数据判断定子还是转子故障,因为定子匝短和转子鼠笼断条都会引起定子阻抗、电感不平衡。电机是一个对称的整体,将转子三等分,即每转 120 度测量一下定子的电感值和阻抗值,如果是转子故障,特征是 L 和 Z 同时变大或变小,趋势是“平行”的,如图 11,如果是定子故障,L 和 Z 不同时变大或变小,趋势是“不平行”的,如图 12。

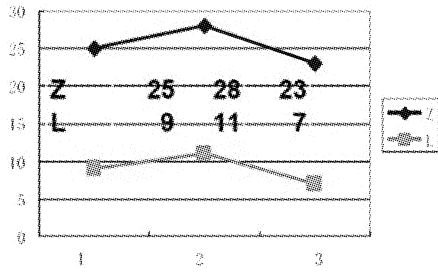


图 11 转子故障(L,Z 平行)

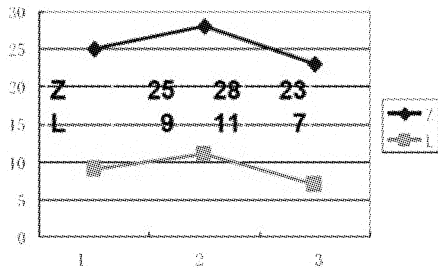


图 12 定子故障(L,Z 不平行)

3.2.4 直流电机匝间短路故障诊断

直流电机分为励磁绕组和电枢绕组,非解体状态下,励磁绕组和电枢绕组的阻抗等 MCA 参数分别进行测试,与新造电机参数比较,或者多台横向比较,如果阻抗等参数基本一致,则认为是合格的,如果不一致,说明有匝间短路现象。

以铁路 410KW 直流牵引电机为例,绝缘测试,励磁回路测试一次,电枢回路测试两次,两次测试结果比较、与早期数据或新电机数据比较,如表 5。

表 5 三台状态不同 410KW 直流牵引电机 MCA 参数对比

电机编号	测试参数	励磁回路	电枢回路		状态
			第一次测试	第二次测试	
785 264	电阻 R(Ω)	0.05	0.055	0.053	新电机
	阻抗 Z(Ω)	3	9	9	
	倍频 L/F(%) -25%	-25%	-45%	-45%	
	相角 Fi(°)	26°	63°	63°	
	绝缘(MΩ)	≥99	0.1		
856 123	电阻 R(Ω)	0.017	0.472	0.630	电枢 污染
	阻抗 Z(Ω)	3	4	4	
	倍频 L/F(%) -25%	-25%	-31%	-36%	
	相角 Fi(°)	26°	33°	30°	
	绝缘(MΩ)	99	0.1		
956 320	电阻 R(Ω)	0.011	1.94	1.93	转子匝 间短路
	阻抗 Z(Ω)	3	3	3	
	倍频 L/F(%) -25%	-25%	-7%	-7%	
	相角 Fi(°)	26°	8°	8°	
	绝缘(MΩ)	≥99	≥99		

从表 5 可以看出,第二台编号 856123 电机转子 MCA 参数与新造出厂的有差别,同时伴有绝缘电阻低,我们判断为电机污染,待清洗烘潮后重新测试。

第三台编号 956320 电机绝缘电阻是好的,但 MCA 参数与新造有较大差别,我们分析判断电机存在匝间短路现象,需要解体进一步测试。

对于电枢绕组匝间短路的进一步检测,在不解体状态下,可以用电刷的片间测量分析法。测量时,仅保留间隔 90°的两组电刷,将其他各组抬起,保证电刷 90% 的接触面和换向片的良好接触,如图 13,将转子按 15 等分旋转电枢,分别测试多组角度下的结果;测量并记录下阻抗数值,旋转电枢直至转满一周为止。如果转子测试的多数读数平衡且数值接近,则转子状况是合格的,一旦 L、Z、Fi、L/F 有变化,都应视为故障的发生。如图 14 中,7 点左右的测量数值发生变化,说明电枢绕组可能存在问题。

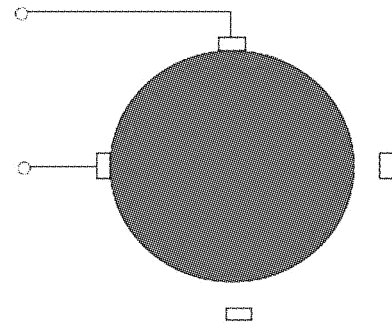


图 13 电刷剩一组

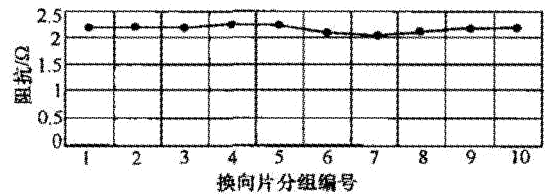


图 14 电枢 15 等分的阻抗值

在解体状态下,对于转子匝间短路故障的定位,也可以用上述方法进行,将转子按圆周以一定数量等分,分别测试阻抗 Z,对其电枢绕组也可以通过趋势分析和片间阻抗对比的方法,阻抗偏差较大的地方就是转子匝短的部位,如图 15。

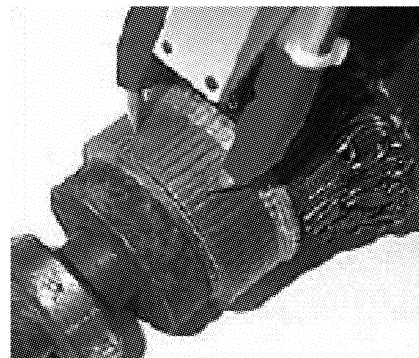


图 15 直流转子 MCA 测试

