基于高灵敏漏电流测量技术的电动机绝缘自动测量系统研究

王树国[1]，朱述友[2]

（中国石化工程建设有限公司，北京 100101；北京中瑞和电气有限公司，北京 101301）

摘要：电动机作为工业生产中重要驱动设备，其稳定运行至关重要。然而，作为工业场所中的电动机经常受到过负荷、电应力、脏污、振动和热辐射等来自使用过程中或者环境中各种因素的影响。尤其是高压电动机的定子绕组承受着交变应力和热、水汽等因素的影响，其绝缘很容易热老化甚至劣化。绝缘弱化以后，发展速度通常较机械故障的发展速度快很多，从几秒到几十小时不等。绝缘缺陷一旦发展成绝缘故障，就会导致放电、击穿，严重时导致电动机烧损。电动机的突然停机会造成生产中断，带来直接经济损失甚至更严重的后果。提出的一种基于高灵敏漏电流互感器的测量技术和直流绝缘电阻测量技术，既能在线监测电动机的绝缘状态，也能在电动机停机时自动测量绝缘电阻，真正实现了电动机绝缘水平的实时监测。

关键词：高压电动机；绝缘；监测；漏电流；自动测量系统

Research on an automatic measurement system for motor insulation based on high sensitivity leakage current measurement technology

WANG Shuguo[1], ZHU Shuyou[2]

(1. Sinopec Engineering Incorporation, Beijing 100101, China;
2. Beijing Zhongruihe Electric Co., Ltd., Beijing 101301, China)

Abstract: As an important driving equipment in industrial production, the stable operation of the motor is very important. However, as a motor in an industrial place, it is often affected by various factors such as overload, electrical stress, dirt, vibration, and thermal radiation from the use process or the environment. In particular, the stator winding of high voltage motor is affected by alternating stress and heat, water vapor and other factors, and its insulation is easily subjected to thermal aging and even deterioration. After the insulation is weakened, the development rate is usually much faster than the development rate of mechanical failure, ranging from a few seconds to dozens of hours, once the insulation defect develops into an insulation fault, it will lead to discharge, breakdown, and serious motor burning. The sudden shutdown of the motor will cause production interruption, and bring direct economic losses or even more serious consequences. A measuring technology based on highly sensitive leakage current transformer and DC insulation resistance is presented, which can not only monitor the insulation status of the motor online, but also measure the insulation resistance automatically when the motor is shut down, and realize the real time monitoring of the motor insulation level.

Key words: high voltage motor; insulation; monitoring; leakage current; automatic measurement system

0 引言

电动机作为工业生产中重要驱动设备，其稳定运行至关重要。然而，作为工业场所中的电动机经常受到过负荷、电应力、脏污、振动和热辐射等来自使用过程中或者环境中各种因素的影响。尤其是高压电动机的定子绕组承受着交变应力和热、水汽等因素的影响，其绝缘很容易热老化甚至劣化。据统计，对于6 kV及以上的高压电动机，绝缘故障尤其是定子绕组绝缘故障，已经占到了全部故障的50%～70%[1]。

对于大型重要负荷的高压电动机，虽然在送电之前进行绝缘测量或者定期检修测量绝缘，但是，电动机在实际运行中，由于工况变化，对绝缘的损坏一直在进行。如果在两次检测之间，不能及时发现绝缘劣化，同时绝缘弱化的发展速度通常较机械故障的发展速度快很多，从几秒到几十小时不等，因此绝缘缺陷一旦发展成绝缘故障，就会导致放电、击穿，严重时导致电动机烧损。电动机的突然停机造成生产的中断，带来直接的经济损失甚至更严重的后果。因此，有必要建立有效的在线监测系统，及时发现绝缘故障，避免重大事故的发生。

1 传统的绝缘测量方法及其局限性

目前，常用的一些绝缘测量方法主要有离线和在线两种方式。其中，离线状态下，也就是电动机安装调试好了以后，送电之前要做绝缘测试；在线测试主要是局部放电测试、电能质量测试和谐波分析等方法。离线状态的绝缘测试主要包括三种方法：①绝缘电阻测试；②耐压试验；③离线局部放电试验。

（1）绝缘电阻测试

包含极化指数测试，是应用广泛、传统的绝缘测量方式。测量时采用绝缘电阻表。绝缘电阻表有220 V供电数字型和手摇指针型；根据被测对象可选择不同的输出电压。该方法的显著特征是当设备（电动机）停电后，由人工操作，打开开关柜门，连接测量装置。因此也造成了固有限制，需要人工解开设备连接，不能自动远程测量，且由于电动机离线测量状态与其运行状态的绝缘数值不同，运行期间和停电期间状况不一样，因此停机下的绝缘水平并不能完全反映设备运行时绝缘的真实状态，势必造成一定的电动机安全隐患。

（2）耐压试验

耐压试验是电动机离线试验常见的试验方式，鉴于直流绝缘电阻表存在一些固有不足，对于一些重要负荷电动机，也定期做绝缘耐压试验。耐压试验包括工频绝缘耐压试验、电气绝缘强度测试和介质强度测试等，是针对各种电气装置、绝缘材料和绝缘结构的耐受电压能力所进行的一种测试。其原理是将一个高于正常工作的电压加在被测设备的绝缘体上，并保持一定的时间，当绝缘性足够好时，加在上面的电压只产生很小的漏电流。当绝缘体被破坏时，漏电流急速增加，发生放电甚至击穿，失去防护作用。因此，如果一个被测设备绝缘体在规定电压下保持一定时间，其漏电电流保持在规定的范围内，绝缘未被击穿，就可以确定这个被测设备可以在正常的运行条件下安全运行。耐压试验必须在绝缘电阻试验合格的前提下进行，且由于试验做所加载的电压较高，对绝缘有破坏作用，因此该类试验要慎做。

（3）离线局部放电试验

主要是采集绝缘材料在局部放电过程中所发出的电信号特征量，进行放电特性和频域阻抗特性的分析，可以对绝缘老化、绝缘分层和缺陷位置等进行诊断，是一种广泛应用的试验方法。但由于其离线特性，无法及时准确反映出在运行状态下的绝缘水平，因此根据其使用特性和局部放电特性衍生出了在线的局部放电测量方案。

2 传统在线局部放电测量的优缺点分析

在线局部放电测量实时反馈绝缘缺陷导致的各种放电，并据此对绝缘缺陷进行定位和诊断。但由于现场环境的复杂性，局部放电信号很容易被干扰，虽然现在一般采用超高频测量技术，但

由于超高频只占局部放电信号很小部分，不能完全反映局部放电的真实完整的特征。加之局部放电分析要跟所建立的模型进行比对，因此具有很大的主观性，给绝缘缺陷的判断带来不确定性，一般只能作为参考。而且，绝缘的劣化并不只是电晕放电导致的，绝缘劣化是一系列因素综合作用的结果。

除此之外，在线监测方法还有谐波法、振动监测法、直流叠加法和系统母线分析法等。

（1）谐波法

主要是通过采集电流电压，分析电流电压的谐波成分，比较各种不平衡，寻找对应的故障特征，对模型进行比较，进而判断故障类型，谐波法对绝缘的判断是间接的，只能作为参考。

（2）振动监测法

通过振动传感器采集电动机或轴承的振动信息、温度信息，并进行频谱分析，找出其故障特征，跟模型比对，从而判断故障类型。振动监测是一种应用广泛和成熟的技术，主要针对的是机械类型的监测，无法对电气绝缘的监测作出判断。

（3）直流叠加法

该方法基于直流绝缘电阻表技术，将DC1 500 V直流通过绝缘隔离电阻直接加载到运行中的母线系统，通过对地构成回路，测量整个系统的绝缘电阻，包括各回路的绝缘。该方法能够直接测量绝缘电阻，将直流绝缘电阻表技术用在了在线监测，是一种技术创新，具有一定的应用价值。但是由于叠加的直流电压为1 500 V，会对正在运行的电动机构成一定的安全隐患，且其结果有一定局限性，只能作为参考。同时，由于直流是叠加在母线系统，因此对系统接地方式和PT接地点都提出了挑战：对于消弧线圈或者小电阻接地系统，需要在中性点接地处增加隔直电容；在PT接地侧，需要接入隔直电容和消谐装置；隔直电容的增加，改变了系统的接地方式，增加了阻抗，带来了谐振的风险。

（4）系统母线分析法

该方法是近年来出现的一种称之为母线绝缘在线分析系统的方案，该方法的主要工作原理与直流叠加法大致相同：即在母线开关柜出线侧，叠加一个1 500 V的直流到10 kV系统，然后在每回支路上增设直流互感器，用直流互感器测得的直流泄漏电流作为对系统绝缘状态的一个反馈量，通过计算折算出对应的绝缘电阻值，系统接线图如图1所示。

该方法在本质上与直流叠加法没有区别。因此，直流叠加法所有的缺点，该方法同样存

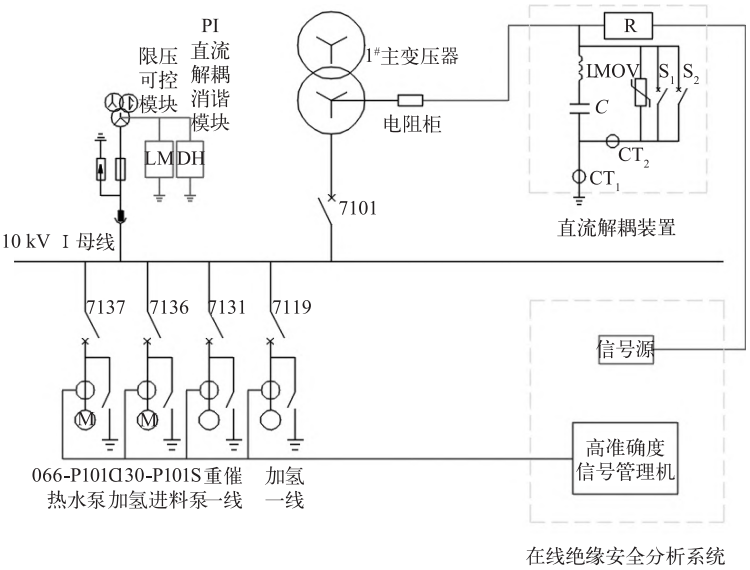


图 1 系统母线分析法接线示意图

Fig. 1 Schematic diagram of system bus analysis method wiring

在。跟直流叠加法不同的地方在于，将接地隔直电容，改成非线性电阻接地装置，一定程度上改善隔直电容的缺点，但是却改变了系统接地方式，增加了系统的不确定性。如果原来的接地方式为小电阻接地，现在改成了非线性电阻接地，非线性电阻一旦出现故障，系统将由小电阻接地变成不接地方式，无疑对系统造成很大的安全隐患。该方法输出的是DC 1 500 V，对于一个10 kV系统来讲，该电压条件下产生的泄漏电流数值必然非常微弱，尤其是对于带电运行的10 kV系统。微弱的直流泄漏电流信号被系统的大电流产生的干扰磁场掩盖，难以测量到所需要的直流泄漏电流。另外，对于带变频器的电动机系统，由于变频器对直流的隔离作用，直流信号被阻挡在变频器外侧，因此不能测量变频系统的高压电动机绝缘状况。

3 基于漏电流测量及直流绝缘电阻表技术自动化绝缘测量方案

通过综合分析以上针对高压电动机绝缘各种测量方法的优缺点，本文提出了一种全新的电动机绝缘监测方案：电动机运行时通过采集泄漏电流来反映电动机的实时绝缘状态，停机时，系统自动转为绝缘电阻测量。

（1）电动机泄漏电流分析

在10 kV交流系统中，泄漏电流的存在是客观的。泄漏电流随着绝缘劣化的加深而逐渐增加。通过对泄漏电流的监测，尤其是对早期漏电流的监测，可以提早发现绝缘劣化的趋势，为判断绝缘状态提供可靠的依据。

电动机绝缘系统的等效电路图如图2所示。一般情况下，系统存在着容性的绝缘电容电流和阻性的绝缘电导电流，如图3所示。在系统绝缘状态良好时，系统的容抗远低于系统的阻抗，因此，容性电流远大于阻性电流。

随着绝缘劣化（或老化）的演进，阻性成分的泄漏电流越来越大，最后绝缘完全劣化时，就变成了纯阻性的绝缘电导电流，如图4所示[2]。因此，通过泄漏电流的变化趋势就可以反映绝缘状态的变化，为绝缘寿命判断提供依据。

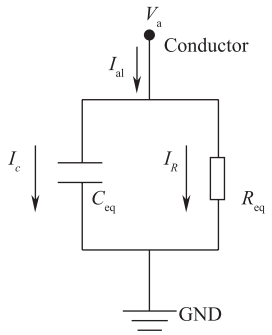


图 2 绝缘系统等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of insulation system

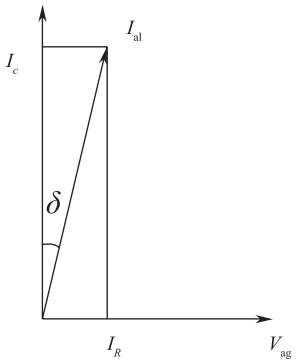


图 3 绝缘漏电流矢量图

Fig. 3 Insulation leakage current vector diagram

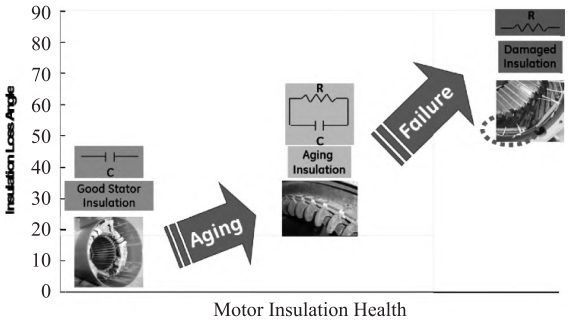


图 4 绝缘劣化演进过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of insulation degradation evolution process

（2）泄漏电流的测量方案

电动机绝缘泄漏电流的测量可以采用两种方式实现。

1）采集单相泄漏电流。其原理是对于采用了差动保护的电动机，接线盒一般有6个抽头，即每一相有一进一出两根电缆。同时，用电流传感器穿过每一相的两根电缆；正常情况下，泄漏

电流为零，互感器输出也为零；如果发生了泄漏电流I_{a1}，进出电流之差不为零，如图5所示。此时漏电流互感器输出值即为泄漏电流。单相漏电流监测示意图如图5所示。

$$I_{a1}= I_{a1} - I_{a2} \quad (1)$$

式中，I_{a1}为泄漏电流；I_{a1}为流入电动机绕组的电流；I_{a2}为流出电动机绕组的电流。

在此意义上，泄漏电流互感器与差动保护的互感器测量原理是一样的，不同在于，漏电流互感器可以采集更微小的泄漏电流，可以在绝缘劣化的早期及其发展过程中累计泄漏电流，形成绝缘变化趋势，便于早发现绝缘缺陷，为预知维修提供决策依据，避免了重大缺陷的发生。这是采用绝缘漏电流监测的主要意义所在。

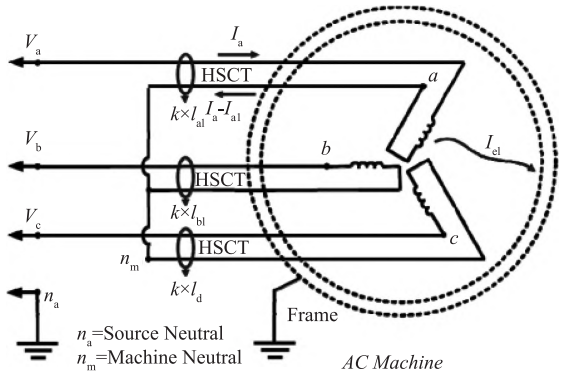


图 5 单相漏电流监测示意图

Fig. 5 Schematic diagram of single-phase leakage current monitoring

2）采集三相共模泄漏电流。对于没有差动保护的电动机，一般只有三个抽头，这种情况就无法测量单相泄漏电流，但可以将互感器穿过三相电缆，采集三相共模泄漏电流，如图6所示。

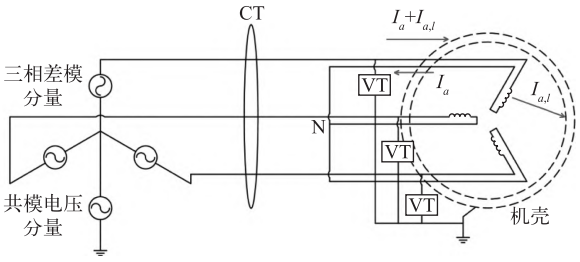


图 6 三相共模回路漏电流采集示意图

Fig. 6 Schematic diagram of leakage current collection in three-phase common mode circuit

（3）一种专用的高灵敏泄漏电流传感器

泄漏电流采集的方法，其原理和可行性是显而易见的。难点在于，泄漏电流在发展过程中，是逐步增加的，尤其在初始阶段是很微弱的。目前零序互感器以及绝大多数的保护措施都是基于绝缘故障已经发生，产生了很大的故障电流，从而引起保护动作，其作用是防止事故扩大。因此，该类技术并不具备早期预警功能，也不能早发现绝缘故障。绝缘监测的意义不仅仅是防止事故扩大，更重要的是能够提前发现绝缘劣化的过程，提前采取措施，防止出现绝缘故障。本论文中引入的是一种高灵敏、高抗干扰的微电流传感器技术，能够实现对大电流的干扰，精准测量微弱的泄漏电流。下表为两种类型的互感器，在500 A负载电流条件下的实验对比。由此可以看出，新型微弱泄漏电流传感器技术对大电流屏蔽效果很好，完全可以用于工业电动机的在线绝缘泄漏电流监测。

表 两种类型互感器泄漏电流值测量对比

Tab. Comparison of leakage current measurement between two types of transformers

负载电流 /A	泄漏电流 / mA	普通零序互感器 / mA	高准确度泄漏电流互感器 /mA
8	7	7.31	7.0
100	7	79.35	7.9
200	7	111.51	7.9
300	7	134.04	7.95
400	7	151.53	8.24
500	7	166.86	8.45

（3）远程绝缘电阻表技术方案

如前所述，直流绝缘电阻表是测量绝缘电阻常用和可靠的方法之一，但是需要停机和依靠人工测量，因此不能满足电动机绝缘监测的自动化要求。本方案基于直流绝缘电阻表技术，由专用仪表ZJC绝缘测量仪表，输出DC 2 500 V，通过隔离绝缘电阻，加载到电动机回路中，对地构成回路，测量电动机绕组绝缘电阻值，如图7、图8所示。绝缘测量仪表输出电压为DC 2 500 V，满足规程规定[3-4]，故该方法测量出的绝缘电阻

值与人工绝缘电阻表所获得的绝缘电阻值是一致的，可以作为判断绝缘优劣的决策依据。

（4）直流绝缘电阻表与泄漏电流测量整合

该方法创新将远程直流绝缘电阻表方案与泄漏电流测量技术整合在一起，可以实现对高压电动机（改变输出测量电压，低压电动机也可以）的绝缘状态的在线自动化测量，接线原理图如图9所示。

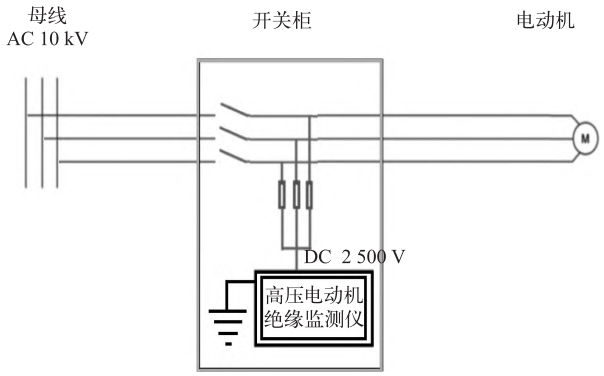
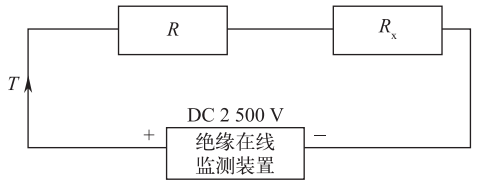


图 7 自动摇表测量接线示意图

Fig. 7 Schematic diagram of automatic tramegger measurement wiring



绝缘电阻：R_x=2 500/I−R

图 8 绝缘电阻测量原理图

Fig. 8 Schematic diagram of insulation resistance measurement

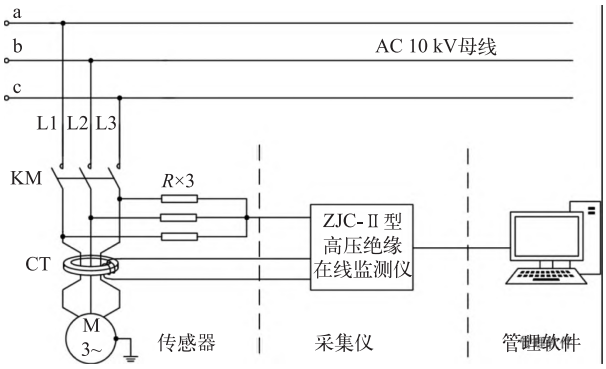


图 9 绝缘在线监测接线原理示意图

Fig. 9 Schematic diagram of insulation online monitoring wiring principle

该方案可以实现以下功能：电动机停机时，远程自动测量电动机定子绝缘电阻，极化指数；电动机运转时，自动切换，测量泄漏电流。上述两项功能，通过RS 485可以实现远程通信，与上位机相连，并组网、管理多台高压电动机。并且所有测量数据可以累积，形成趋势曲线，便于判断绝缘变化，形成绝缘维修方案，有利于发现早期的绝缘故障，也有利于实现远程绝缘电阻和极化指数的自动测量。

4 基于漏电流测量及直流绝缘电阻表技术自动化绝缘测量方案的应用案例

某大型石化项目工艺装置的大型压缩机电动机为5 500 kW，其电动机增设了采用本技术的绝缘在线监测系统，一次接线图如图10所示，开关柜显示面板如图11所示。经过多年的实际运行，其电动机在线绝缘监测的电动机电阻值及泄漏电流值均与实际测量相符，为大型电动机的安全可靠运行提供了安全保障。

图 10 电动机绝缘在线监测装置一次接线

Fig. 10 Primary wiring of online monitoring device for motor insulation

图 11 电动机绝缘在线监测装置开关柜显示面板图

Fig. 11 Switch cabinet display panel diagram of online monitoring device for motor insulation

6 结束语

良好的绝缘对于电动机稳定运行非常重要，对微弱泄漏电流的监测，有助于发现早期的绝缘缺陷，防止绝缘缺陷发展成重大绝缘故障，降低停机的重大风险。同时结合了远程直流绝缘电阻表技术，实现了绝缘电阻的在线自动测量，补齐电动机安全管理短板，为实现电动机全生命周期管理提供了有效解决方案。

参考文献

[1] O DONNELL P. Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations, part II[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 21(4): 865-872.

[2] SANG BIN LEE, KAKIM YOUNSI, GERALD B, et al. An online technique for monitoring the insulation condition of AC machine stator windings[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(4): 737-745.

[3] 旋转电机 绕组绝缘 第4部分：绝缘电阻和极化指数测量：GB/T 20833.4—2021[S] .

[4] 旋转电机绝缘电阻测试：GB/T 20160—2006[S].

作者简介

王树国（1968—），男，教授级高工，首席专家，研究方向为工业领域供配电，发输电等。

（收稿日期：2023-07-22）