电力设备状态监测技术的研究现状及发展

幸晋渝, 刘 念, 郝江涛, 薄丽雅, 陈 卓

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 电气设备的状态监测技术正日益受到重视,它在电力系统中的应用也越来越广泛。在介绍状态监测基本概念的基础上,全面综述了变压器、发电机、电动机和高压断路器的各种状态监测方法和研究现状,提出了未来状态监测技术的发展方向。文章同时指出了先进的信号处理技术和人工智能技术在发展新型的状态监测系统方面的巨大作用。

关键词: 状态监测; 变压器; 发电机; 电动机; 断路器

中图分类号: TM76 **文献标识码**: A **文章编号**: 1003-4897(2005)01-0080-05

0 引言

上世纪90年代以来,在发电厂中应用状态监测技术以及发展新的状态监测技术已成了发电厂最重要的任务之一。两方面原因促成了这种需要:首先,发电厂电气设备的安全运行非常重要,任何意外故障都可能造成重大事故,停电会带来巨大的经济损失,这在当前竞争日趋激烈的环境下尤为显著,而设备本身是发电厂的贵重资产并消耗大量维护费用。应用状态监测技术可以避免意外停机、最大限度缩短停机时间、减少维护费用、延长机器寿命,它为最优使用机器提供了大量有价值的信息,有很大的经济效益。其次,计算机技术、传感器技术、信号处理技术以及人工智能技术的发展使得对电气设备实施有效的状态监测成为可能。随着状态监测系统在可靠性、智能化和经济性方面的进一步提高,状态监测技术将在电力系统中获得广泛应用。

然而,状态监测在很多方面仍处发展之中,当前的研究工作主要集中在监测系统的灵敏性、可靠性和自动化方面,同时希望系统的成本不致太高。本文全面综述了当前状态监测技术的发展现状,介绍了状态监测的基本概念,阐明了变压器、发电机、电动机、高压断路器的各种状态监测方法,文章的最后给出了状态监测技术的发展趋势。

1 状态监测的基本概念

状态监测可定义为一种监测机器运行特性的技术或过程,通过提取故障特征信号(故障先兆),被监测特性的变化或趋势可用于在严重故障发生前预知维护需要,或者评估机器的"健康"状况。状态监测利用了整个设备或者设备的某些重要部件的寿命特征,开发应用一些具有特殊用途的设备,并通过数据采集以及数据分析来预测设备状态发展的趋势[1]。状态监测是为基于状态的维护(Condition - Based Maintenance, CBM)或预知性维护(Predictive Maintenance, PM)服务的一种技术。在应用状态监测技术以前,一直采用基于时间的维护(Time - Based Maintenance, TBM)策略。基于时间的维护根据检修时间表或运行时间离线检修设备,可以防止许多故障,然而在检修间隔期内仍会发生意外故障。由于没有设备当前状态的任何信息,维护活动的安排具有盲目性,浪费了大量人力、时间和金钱。与此相反,CBM将让运行人员了解许多设备的状态信息,清楚地知道什么时候需要何种维护,从而在确保设备不会意外停机的情况下,减少人力的消耗。借助于状态监测系统提供正确和有用的机器状态信息,CBM将发展成为一种最优维护策略。

表1 状态监测主要问题

Tab.1 General issues of condition monitoring

任务	处理过程	主要技术	特征	输出
获取并分析数据	数据采集(采集量由物理模型分析得出)	传感器、模/数转换、数据通信	在线、连续	原始数据,或经预处理,可能包含噪声
判断有无缺陷	故障检测(模型参考方法或特征提取)	神经网络、信号处理等	预测	报警信号、压缩数据
给出缺陷类型,缺陷位置	模式识别、分类	模糊逻辑、专家系统、神经网络数字分析及计算机技术等	在线、自动处理	故障名、维护建议及其它详细诊断结果
指明故障后果及对策	状态评估、辅助决策			

要构成一个状态监测系统,必须首先考虑监测

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

及诊断对象的故障机理,这有赖于监测对象物理模型的建立。例如,大型发电机的定子温度监测、振动监测,首先要考虑物理模型,由模型分析确定出合适的特征量,为故障检测和诊断提供基础。状态监测系统借助于电气接口,监控运行中的设备,在故障发生前预知维护需要,判定并详细定位故障,甚至估计设备寿命。表1给出了状态监测系统的主要任务及处理过程。

要实现这些功能,一个状态监测系统应包括以下四个部分[2]:

1) 传感器 它用于把物理量转换为电信号,传感器的选择取决于监控方法和设备故障机理的有关知识。通常选用的传感器应适于在线测量。灵敏度,经济性和非侵入性是对传感器的主要要求。

2) 数据获取 数据获取单元用于对来自传感器的信号进行放大和预处理,例如:实现数模转换和传感器误差修正。在这一单元中,需要应用数据通讯技术和微处理器技术。

3) 故障检测 故障检测的主要目的是弄清机器内是否有潜在故障出现,以便给出报警信号并作进一步的分析。当前有两种不同的故障检测方法:模型参考方法和特征提取。模型参考方法通过把测量结果和模型(可以是数学仿真模型或是基于人工智能的模型)预测值比较来检测故障。而特征提取绝大多数采用频域和时域信号处理技术来获取能代表正常和故障参数的特征量。

4) 故障诊断 对检测到的异常信号需要进一步处理以给出明确的维护指示。过去故障诊断通常由专家或离线分析来完成,目前倾向于由计算机在线自动实施。提供给用户的诊断结果应包括故障名称、故障位置、设备状态、维护建议等等。

在状态监测中,先进的信号处理和人工智能技术尤为重要。考虑到状态监测系统越来越重视自动分析和在线诊断,现代的状态监测也可称作智能状态监测(ICM),它具有快速计算、智能分析和低成本的特征。

2　主要电气设备的状态监测

2.1　电力变压器的状态监测

2.1.1　电力变压器故障和监测技术

确保变压器正常运行的主要部件包括:绕组、铁心、绝缘油、冷却器及有载调节器(OLTC)。故障统计表明[3],OLTC故障和绕组故障最常见。因此,监控的关键参数包括OLTC故障、油/纸绝缘(包括绕组和变压器)的老化、负载和运行状态。

1) OLTC的特殊监测:OLTC故障主要由机械故障(轴承、转轴和驱动机构)引起,然后是电气故障,比如触点烧损、转换电阻燃烧和绝缘问题[4]。当前已有一些OLTC在线监控系统,但是机械和电气故障的集成检测器仍在研究之中。OLTC的振动监测是有效的在线监测方法,并且成本适中[4]。关于OLTC的振动监测方法的研究仍在进行之中,目前这方面的报道还很少见。

2) 绝缘问题:绕组绝缘和主绝缘是影响变压器寿命的最大的问题之一,可通过温度、油中气体分析(DGA),局部放电(PD)和湿度分析来监测。热点温度通常由过载或局部过热引起,考虑到绝缘问题,使用光纤传感器似乎成了直接测量热点温度的唯一方法,但这种方法成本很高。通常使用的方法是通过测量油温和负载电流由热模型来计算热点温度。DGA是监测绝缘状态的传统方法。由热老化产生的溶于油中的气体能够较早指示潜在故障。对气体浓度、状态和构成比率进行分析可以判定气体形成原因并给出必须的维护建议。最初只有氢气在线监测器,现在能对整个油中气体监测的仪器已投入商业运行,绝缘系统中,局部放电源的早期检测非常重要。对变压器,广泛使用附着在变压器箱体上的压电声学传感器来探测局部放电信号。

3) 其它有价值的监测量:负载和运行状态的基本信息可通过电压、电流互感器监测。振动监测似乎是检测OLTC故障的最佳方法,在文[5]中给出了一种实用方法,通过加速度计获取变压器铁心和绕组的振动数据,并同电流和热数据一起用于在线确定变压器的运行状态。

2.1.2　电力变压器状态监测的最新动向

利用模糊逻辑,专家系统和神经网络发展变压器智能诊断系统。虽然迄今为止人工智能技术的大多数工作都是建立在DGA分析和诊断上,但实际上它可用于有多种类型传感器信号的整个系统的诊断上。进一步研究运行中的变压器的局部放电检测和定位、标度问题。对绕组松动和OLTC故障实施振动监测,对OLTC的在线监测系统仍在研究之中。

2.2　发电机的状态监测

2.2.1　发电机故障和监测方法

1) 定子绕组故障:包括绝缘故障、绕组导体故障和绕组端部故障。由于大多数定子绕组故障是电气绝缘逐渐劣化的结果,绝缘故障便成了主要关注对象。定子绕组绝缘故障的主要早期特征便是机器

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

内局部放电行为的增加,因此,对局部放电的监测成为实施定子绕组状态监测的主要工具。

2) 转子体故障:它主要由巨大的转子离心力、大的负序暂态电流和转子不同心引起。在转子旋转时由于自身重力的作用,转子材料表面的裂缝将扩散,这将引起灾难性的转子故障。在负序电流作用下,转子涡流损耗会造成过热并导致疲劳裂纹的出现。如果发电机和系统之间满足谐振条件,突然的暂态过程可能导致转子扭振,从而引起转子故障。转子不同心会引起振动,并出现不平衡的磁拉力。对转子体故障的早期检测可通过振动监测和气隙磁密监测来实现[6]。

3) 转子绕组故障:主要是匝间短路故障。匝间短路可能由于发电机在低速启动或停车时,槽中导体表面的污物引起了电弧,或者是巨大的离心力和高温影响了绕组和绕组绝缘。匝间短路故障可引起局部过热甚至导致转子接地。通用的监测方法是采用气隙磁密监测[7],通过探测气隙磁密,可以确定匝间短路的数量和位置。

4) 定子铁心故障:主要是铁心深处的过热问题。热监测技术(包括热成像技术、热模型等)已被用于变压器和电动机定子绕组的监测中,但很少有用于定子铁心监测的报道。

2.2.2 发电机定子绕组的局部放电在线状态监测

定子绕组绝缘劣化一直是大型发电机故障的主要原因之一。定子绕组 PD 监测对发电机的维护来说是不可缺少的,关于 PD 监测的研究已有 40 余年的历史,然而,PD 监测仍是一项发展中的技术。在 PD 监测的研究中,主要涉及两个问题:一是抑制噪声;另一个是 PD 行为的解释。

1) 抑制噪声:在对定子绕组 PD 进行在线测量时,通常会受到来自电机内、外的电气干扰。解决这个问题目前有两种方法:一是改进测量方式和测量仪器;二是利用信号处理技术和神经网络在数据后处理阶段消除 PD 信号中的噪声。信号处理技术是抑制噪声的常用工具。电气噪声可分为窄带(连续周期)噪声和宽带(脉冲)噪声。根据不同的频率特性,引入各种类型的滤波方法,例如自适应滤波器和程控带通滤波器[8],神经网络算法也被用于滤除 PD 信号中的噪声信号,该方法以 PD 模式识别或 PD 脉冲相位分配为基础[9]。

2) PD 行为解释:在线 PD 监测期望达到两个目的,一是判定哪一台机器需要进行定子绕组维护;二是找出故障位置及其成因。经验表明,PD 幅值不能作为故障的绝对指标,因此难以设定一个 PD 门槛值用于报警。定子绕组的绝缘状态最好由一段时间的趋势来判定,或者通过对类似机器采用同样方法的测量结果进行比较来判定。特征提取和模式识别技术被用于建立 PD 的 ΦQ-N 图,在特征提取中采用了分形图像压缩技术[10],而神经网络技术则应用于模式的分类中[11]。

2.3 感应电动机状态监测

2.3.1 感应电动机故障和监测方法

1) 定子故障:感应电动机定子故障主要是由于绝缘破坏引起绕组匝间短路造成的。当前,定子电流信号分析是确定定子绕组故障的常用工具[12],具有成本低、易操作和功能多的优点。感应电动机的定子绕组匝间故障将引起气隙磁密畸变,从而在定子电流中产生谐波,因此定子电流可用于故障的检测。由于电动机和发电机在定子绕组上的相似性,用于发电机的 PD 在线监测也可用于电动机中,它比电流监测能更早地检测到绕组故障。

2) 转子故障:感应电动机转子故障主要有转子导条断裂,这将引起转矩跳动,转速波动,转子振动以及过热等。最常见的检测方法是上面提到的定子电流监测。另外可采用振动和气隙监测方法[13]。

3) 轴承故障:电动机可靠性研究表明,轴承故障占所有机器故障的 40 %以上。潜在的轴承故障通常采用振动和定子电流监测的办法来检测,而定子电流监测具有非侵入式的优点(不需在电机内装设传感器)。

4) 气隙不均匀:气隙不均匀必须控制在一个可接受的水平上,例如 10 %。有两种类型的气隙不均:动态和静态。对静态不均,最小的气隙位置在空间上是固定的;而对于动态气隙不均,转子的中心和旋转中心不一致,因此最小气隙位置是旋转的。气隙不均可通过定子铁心振动监测和定子电流监测来检测。

2.3.2 感应电动机状态监测常用监测技术和最新研究

1) 振动监测和电流监测:有许多方法用于感应电动机的状态监测[14]。在这些方法中,振动和电流监测是实际应用中最流行的两种方法。在电流监测还处于研究中时,振动监测就已投入实际应用。然而,目前的研究主要集中于电流监测的实施上,未来电流监测有可能取代振动监测的地位。

振动监测可以发现机械故障、气隙不均匀、定子绕组或转子故障,三相电源不对称等问题。振动监测的改进依赖于先进的信号处理技术,例如高阶统

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

计分析、非静态的递归滤波器和小波等。

由于电流变化相对较小,电流监测一直被认为难以用来检测故障。然而,这一问题正在被克服。目前的研究表明定子电流监测能提供和振动监测一样多的检测信息[15]。研究发现,对已知的振动频率而言,定子电流的变化直接与振动幅度的变化有关。

2) 基于模型的方法和人工智能:基于模型的故障检测被认为是状态监测技术的另一类型,尽管它不是电动机状态监测的主流,但对于较小的电动机和调速电动机,采用这种方式更为适合一些。在文[16]中建立了鼠笼式异步电动机的数学参考模型,通过比较参考模型和测量模型的输出偏差可检测和定位转子故障。这种方法不需频率分析,因此适于调速电机的监测。

神经网络是建立模型的另一方法。对非线性关系很难甚至根本不可能获得精确的数学表达式。而利用经过大量数据训练的神经网络能很好地反映这种关系。关于神经网络建模的工作主要集中在训练算法和知识表达的研究上。

2.4　高压断路器状态监测

2.4.1　高压断路器故障及监测内容

高压断路器是电力系统中最重要的开关设备,开关状态的好坏直接影响着电力系统的安全运行。高压断路器的故障包括机械故障和电气故障两大类,调查表明,80 %的高压断路器故障是由于机械特性不良造成的,因此对机械特性的监测尤为重要[17]。目前高压断路器的监测主要分为两大类:机械寿命在线监测和触头电寿命监测,监测的内容包括泄漏电流监测、气体密度监测、开断次数监测、累积开断电流监测、振动波型监测、断路器红外成像监测、分合闸线圈电流波型监测等。

2.4.2　高压断路器常用监测技术

1) 断路器机械性能监测及最新进展

断路器机械状态监测主要有行程和速度的监测,操作过程中振动信号的监测等。机械性能稳定的断路器,其分、合闸振动波形的各峰值大小和各峰值间的时间差是相对稳定的。将振动信号监测的波形与该断路器的特征波形"指纹"比较,即可判别断路器机械特性是否正常。文献[18]根据径向基函数网络理论,将健康振动信号和断路器实际振动信号波峰值之差形成的残差以及冲击事件发生的时间作为断路器故障诊断的特征参数,以此判断是否故障及故障类型。除通用的振动监测法外,还有一种评估断路器状态的方法,即跳闸线圈轮廓法(TCP 法),它通过考察断路器动作时,流过跳闸/闭合线圈里的电流波形来获得断路器的状态信息。文[19]介绍了一种断路器状态评估系统,它同时采用了振动监测法和 TCP 法。另外,通过对行程——时间特性的监测可反映动触头的机械特性。

2) 断路器触头电寿命监测

影响真空断路器和某些 SF6 断路器触头寿命的因素,包括灭弧室、灭弧介质和触头三个方面,其中起决定作用的通常是触头的电磨损。目前对触头电磨损的监测普遍采用基于断路器的电寿命曲线(N-I_b)的开断电流加权累积法。由于该方法没有考虑断路器运行时三相之间的差别和燃弧时间的因素,误差会较大。文[20]提出了一种改进的电磨损监测技术,准确性有较大的提高。

3　状态监测的发展趋势

当前,状态监测技术在电力系统中已得到广泛重视。随着社会的发展,用户对电力质量的要求越来越高,电力企业的竞争将越来越激烈,这必将促进状态监测技术的进一步发展和应用。未来电力系统状态监测技术的发展趋势将体现在以下几方面:

1) 由于电力设备状态监测获取的数据量很大,常规的数据处理方法会遇到极大的困难,开发新的数据分析技术和故障诊断软件很有必要,智能状态监测系统将得到进一步研究,尤其是神经网络技术、知识系统、模糊逻辑等会得到更广泛的应用。

2) 对如何根据检测到的数据做出相应的判断,以及对新的更有效的检测项目和检测方法等方面的基础研究将得到进一步加强,专家经验的积累和应用也将得到更多的重视和加强。

3) 多功能、多状态的在线监测系统将得到进一步发展。

4) 设备状态的远程诊断和网络化跟踪。发展远程监测与诊断技术可充分实现诊断知识与数据共享,弥补现场工作人员经验的不足,提高故障诊断的准确性。同时,状态监测系统与继电保护将有机地结合起来,尤其在分布式的监控系统中。

最近十年来的研究表明,在发展新型的状态监测系统方面,先进的信号处理技术和人工智能技术是必不可少的。随着计算机技术和通信技术的快速发展,信号处理和人工智能已成为下一代状态监测系统(具有高灵敏度、高可靠性、高智能性和价廉的特征)的最强有力的工具,其中,小波变换、神经网络和专家系统将得到特别的重视。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参考文献:

[1] Whittington H W, Flynn B W. High Reliability Condition Monitoring Systems[J]. B J Norr-Destruct Testing, 1993, 35(11): 648-654.

[2] Grimmelius H T, Meiler P P, Maas L M M, et al. Three State-of-the-art Methods for Condition Monitoring[J]. IEEE Trans on Ind Electron, 1999, 46: 407-416.

[3] Checksfield M, Westlake A. Experiences with Operating and Monitoring Generator Transformers[A]. Colloquium, London (UK): 1998.

[4] Kay A G. The Monitoring and Protection of on Load Tapchangers[A]. IEE Colloq Condition Monitoring of Large Machines and Power Transformers. 1997.

[5] Booth C, Mcdonald J R. The Use of Artificial Neural Networks for Condition Monitoring of Electrical Power Transformers[J]. Neurocomput, 1998, 23: 97-109.

[6] Bicego V, Lucon E, Rinaldi C, et al. Failure Analysis of a Generator Rotor with a Deep Crack Detected During Operation: Fractographic and Fracture Mechanics Approach[J]. Nucl Eng Design, 1999, 188(2): 173-183.

[7] Albright D R, Albright D J, Albright J D. Flux Probes Provide On-line Detection of Generator Shorted Turns[J]. Power Eng, 1999, 103(9): 28-32.

[8] Kopf U, Feser K. Rejection of Narrow-band Noise and Repetitive Pulses in On-site PD Measurements[J]. IEEE Trans Dielect Elect Insul, 1995, 2: 1180-1191.

[9] Tanaka T. Partial Discharge Pulses Distribution Pattern-analysis[J]. Proc Inst Elect Eng Sci Meas Tech, 1995, 142: 46-50.

[10] Lalitha E M, Satish L. Fractal Image Compression for Classification of PD Sources[J]. IEEE Trans Dielect Elect Insul, 1998, 5: 550-557.

[11] Satish L, Gururaj B I. Partial Discharge Pattern Classification Using Multilayer Neural Networks[J]. Proc Inst Elect Eng A, Sci Meas Tech, 1993, 140: 323-330.

[12] Calis H, Unsworth P J. Fault Diagnosis in Induction Motors by Motor Current Signal Analysis[A]. IEEE Int Sym Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives. Piscataway (NJ): 1999. 237-241.

[13] Hsu J S. Monitoring of Defects in Induction-motors Through Air-gap Torque[J]. IEEE Trans Ind Applicant, 1995, 31: 1016-1021.

[14] Thorsen O V, Dalva M. Methods of Condition Monitoring and Fault Diagnosis for Induction Motors[J]. ETEP, 1998, 8(5).

[15] Schoen R R, Habetler T G, Kamran F, et al. Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring[J]. IEEE Trans Ind Applicant, 1995, 31: 1280-1286.

[16] Wiester R, Kral C, Pirker F. On-line Rotor Cage Monitoring of Inverter-fed Induction Machines by Means of an Improved Method[J]. IEEE Trans Power Electron, 1999, 14: 858-865.

[17] Hoidalen H K, Runde M, Haugland O. Continuous Monitoring of Circuit-breakers Using Vibration Analysis[A]. Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, 1999. 102-106.

[18] 胡晓光,等. 基于振动信号的高压断路器故障诊断的仿真研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001, 33(4): 530-533.

HU Xiao-guang, et al. Fault Diagnosis in High Voltage Breakers by Vibration Signal[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2001, 33(4): 530-533.

[19] Beattie S. Circuit Breaker Condition Assessment by Vibration and Trip Coil Analysis[J]. IEE Proc Sci Meas Tech, 1995, 142(1): 4-10.

[20] 关永刚,黄瑜珑,钱家骊. 真空断路器电磨损监测技术的改进[J]. 高压电器, 2001, 37(4): 1-3.

GUAN Yong-gang, HUANG Yu-long, QIAN Jia-li. On-line Monitoring of the Electrical Wear of High Voltage Circuit Breaker Using an Improvement Method[J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(4): 1-3.

收稿日期: 2004-05-14; **修回日期**: 2004-06-10

作者简介:

幸晋渝(1971-),男,讲师,硕士研究生,研究方向为电气设备运行监测和故障诊断新技术;

刘 念(1956-),男,教授,博士,从事电气设备运行监测和故障诊断新技术研究。

Present situation and development of condition monitoring techniques for electrical equipment

XING Jin-yu, LIU Nian, HAO Jiang-tao, BO Li-ya, CHEN Zhuo

(School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Condition monitoring (CM) techniques have been used widely in power system with increasing attention. After introducing the concepts and functions of CM, this paper describes the popular monitoring methods and research status for transformer, generator, induction motor and high voltage circuit breaker, and points out their development trends. The great benefits are also pointed out through the utilization of advanced signal processing and artificial intelligent techniques in developing novel condition monitoring systems.

Key words: condition monitoring; transformer; generator; motor; circuit breaker

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net