

水轮发电机组在线监测与诊断十例

Marc R. Bissonnette, P.Eng. / Jackson Lin, B.A.Sc., MBA
VibroSystM Inc., Longueuil, Quebec, Canada

陶志健 摘译

引言

在线监测的效益早就有人提出，但还很少有人能举出象下面这样的具体实例，来展示在线监测技术在水轮发电机组上应用的实际效益。机组状态的在线监测在水电行业还不很普遍。在数量庞大的水轮发电机组中，只有区区几百台机组装备了在线监测仪器。

水机组的空气间隙是机组状态和动态性能的一个非常恰当的指标。由于气隙位于机组的中心，又是机械力和电力的结合点，机组的大多数毛病都可以在这里查出。其实有时看不到的与看得到的具有同样的重要性。此外，如果能把机组的其他动态静态参数同气隙关联起来，就会增强准确、全面地分析和诊断的能力。

本文介绍的个例分析所用的监测手段是气隙监测系统 (AGMS®) 及扩展的 ZOOM® 机组状态监测系统。这两套系统是对机组作全面监测和诊断的有效手段。在过去的12年间，已有450台以上的水电机组安装了气隙监测系统和 ZOOM 机组状态监测系统。这些系统已多次显示出它们探测机组异常、提供关键信息的能力，帮助我们快速准确作出诊断、积累机组数据以实施状态检修、和预防灾难性事件。

1、开机和停机过程中气隙的性能

1998年初，美国某蓄能电站一台272兆瓦的机组上安装了AGMS。紧接着，4月份便进行了机组动态性能试验。由于蓄能机组一般都以日为周期频繁开机停机，所以，试验特别注意了开机和停机过程中机组的性能。

图1所示为从开机到额定转速的160转中所有磁极的气隙变化过程，单位为“道”(千分之一英寸)。最初，气隙最大(约1155道)。加速过程中，使气隙急剧减小的唯一原因是作用于转子磁轭和磁极上的离心力。转子的设计对转子膨胀有不同的影响，此例的转子为浮动磁轭，因而膨胀幅度大一些。此外，设计对转子圆度的变化也有影响。图1还显示了，在这一过渡工况下，磁轭扩展了75道(7.1%¹)，转子圆度从29道(2.7%)增加到40道(3.8%)。这些数值良好，在总装公差之内。

¹ 本文中，百分数表示相对于参数的静态额定值。

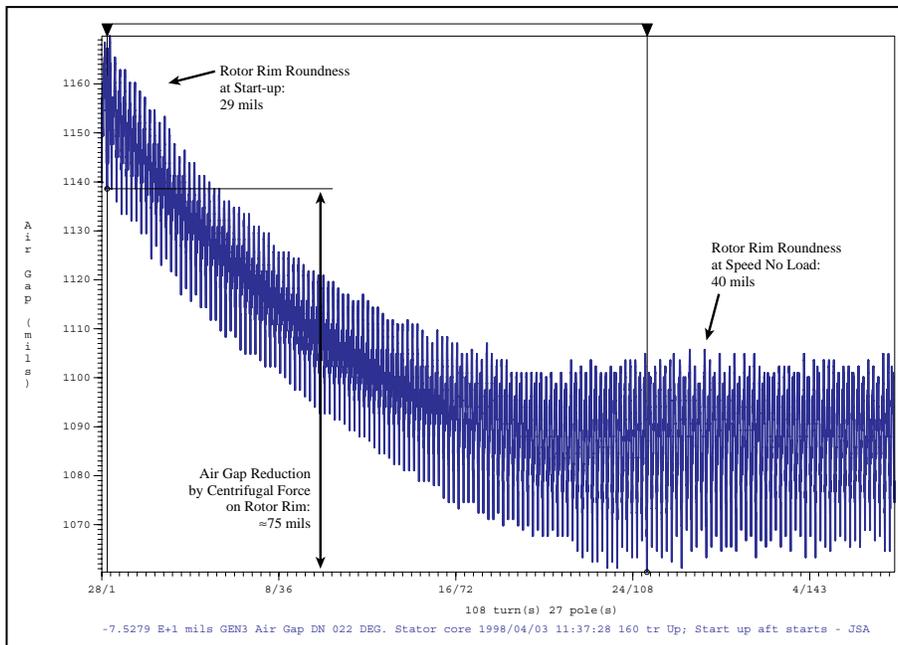


图1 机组开机过程中的气隙变化

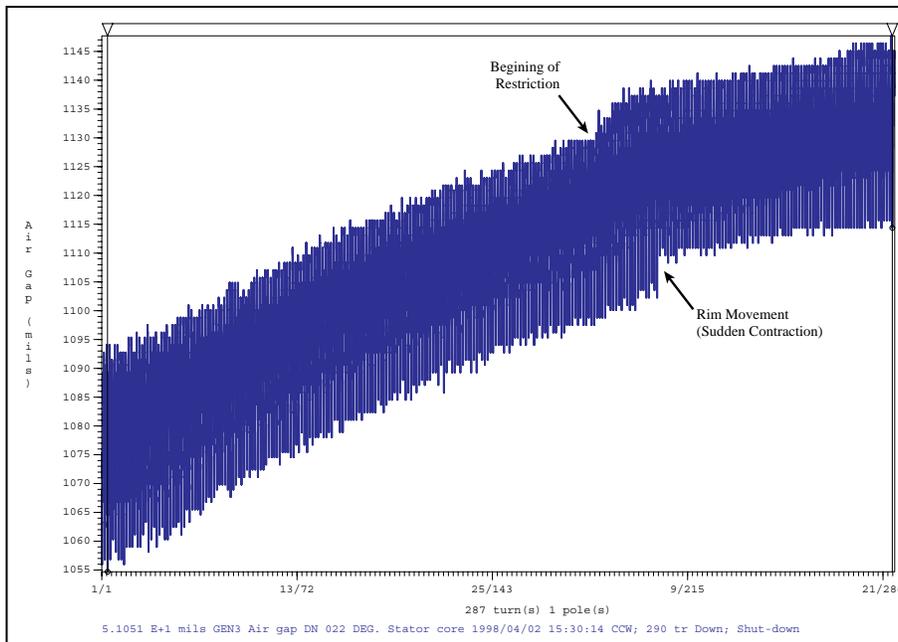


图2 机组停机过程中的气隙变化

图2显示的是机组停机过程中290转之间气隙的变化情况。转子降速的过程中，气隙增加了60道(5.7%)，而圆度从38道(3.6%)变为29道(2.7%)。

此外，图形还揭示了降速过程的一种有趣现象。我们看到，转子并不是沿着一条完全的指数曲线而变化的。所有的传感器都指示出同样的两个突变。第一个突变发生时，20转内圆度提高了4到7道。而后，更为明显的第二个突变显示出磁轭突然活动了一下，使转子圆度突然降低了7道。图3为该活动的细部放大图。

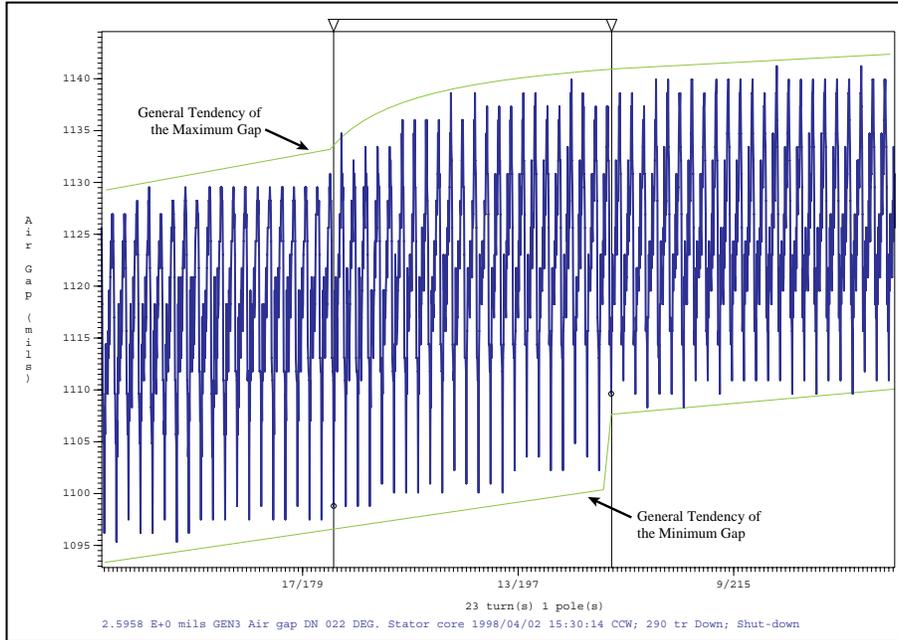


图3 磁轭突变的细部放大图

据分析相信，磁轭叠片底部可能存在有某种限制或摩擦，暂时阻碍了磁轭自由扩展。限制出现在第182转，而在第204转时突然放开。

由于机组频繁停机，建议肉眼检验磁轭支撑和附属部分，注意有无摩擦造成的粉末和裂缝。此外，应严密检查气隙开停机时变化的速率。

应严密监测气隙、转子圆度和定子圆度，并作趋向检查，这样做可以及早发现机组的结构缺陷问题。

2、甩负荷过程中气隙的性能

新机组或改造后的机组交付运行时都要做检验，包括甩负荷试验，目的是检查机组的机械强度和动平衡。试验可以提供机组的安全指标，供保护性停机时参考；它可以揭示转子和定子的强度、大轴轴线和摆度、以及机组的振动性能。

用AGMS或ZOOM记录下试验结果，就可以得到发电机或整个机组的全貌，作为日后机组性能比较的基线。

机组在满负荷时把磁场突然断掉便发生甩负荷。在活动导叶反应之前的这段时间里，水流仍然冲击着水轮机。而失掉磁场阻力的机组加速空转，以致过速，直到导叶关闭，使机组降速到停机。磁场关闭的瞬间，由于不再有磁力向内拉，定子结构便向外移动。同时，任何机械不平衡、转子位移、大轴位移和水轮机位移都可能被认为是非正常振动。

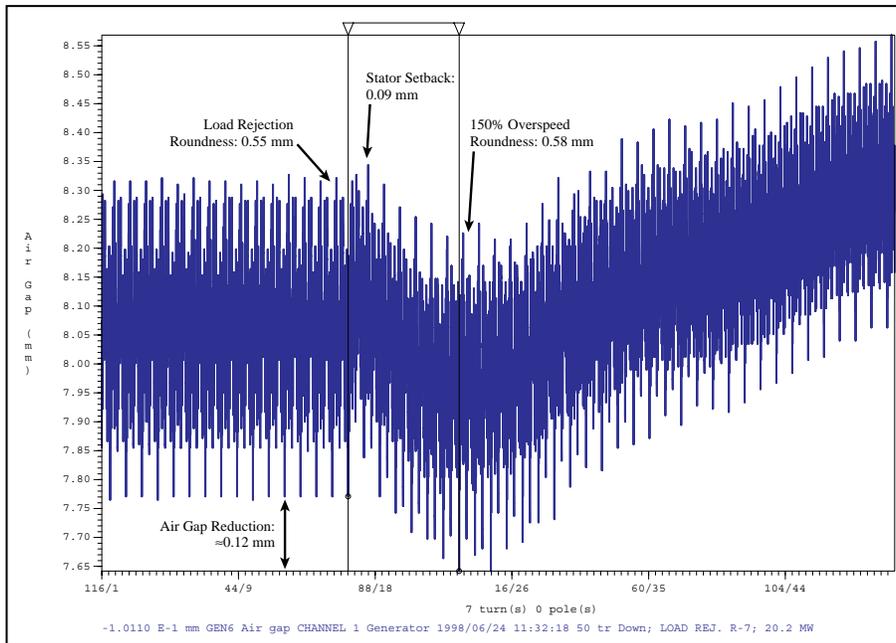


图4 甩负荷试验 - 转子150%过速时的气隙变化过程

图4所示为加拿大一台28兆瓦的机组在甩负荷时气隙变化的过程。所示区间为50转，其中甩负荷开始于第16转。到第17转便可看到气隙有微量增大，这是由于失掉磁力后、定子放松而造成的。由此可了解到这台机组定子强度良好。然后，可以看到，在转子150%过速、离心力发生作用时，转子膨胀，气隙急速减小；直到第23转导叶开始关闭，机组转速开始降下来时，转子持续收缩，气隙才随着增大。

甩负荷前，转子圆度为0.55毫米(5.5%)。在150%过速顶峰时，圆度为0.58毫米(5.8%)。在测量值最后段，圆度降为0.49毫米(4.9%)。总而观之，从第16转到第22转，气隙减小幅度为0.12毫米。所有测值完全符合要求。

此外，我们比较了各气隙传感器所测的同一曲线，发现它们几乎完全一致。这表明转子磁轭未发生松动，因为所有传感器看到的完全一样。假如转速较高时转子磁轭松动，每个传感器的测值和形状就会不同。假如转子轴心发生移动，即发生机械不平衡，则甩负荷后定子退回之时，这些测值就会不同。那样，我们甚至还可以评估转子和轴心的位移及位移角度。

所以，我们得出结论：转子机械强度良好，磁轭紧固，转子平衡良好，未见机械不平衡和电磁不平衡。这台新改造的机组通过了试验。

3、诊断发电机大轴的强振动问题

机组振动的原因有时很难确定，必须通过一系列试验、测量、和分析，采用逐步排除的办法。下面介绍在是美国一台投运两年的50兆瓦机组上所用的诊断强振动的步骤。

这台机组的设计是发电机和水轮机上部各有一导轴承，总装时位置必须精确，才能消除几何错误。ZOOM系统分别在两种不同的工况下对机组作了两组测量。为分析方便起见，选用70号磁极作参考点。这是因为ZOOM系统显示它处于转子几何偏心的轴线上，而且在励磁及各种负荷下都能保持此位。

第一步，判断振动与机组运行之间的关系。图5揭示了振动峰-峰值随着机组转速的上升呈正比例上升，励磁后，稳定下来。这表示有机械不平衡存在。

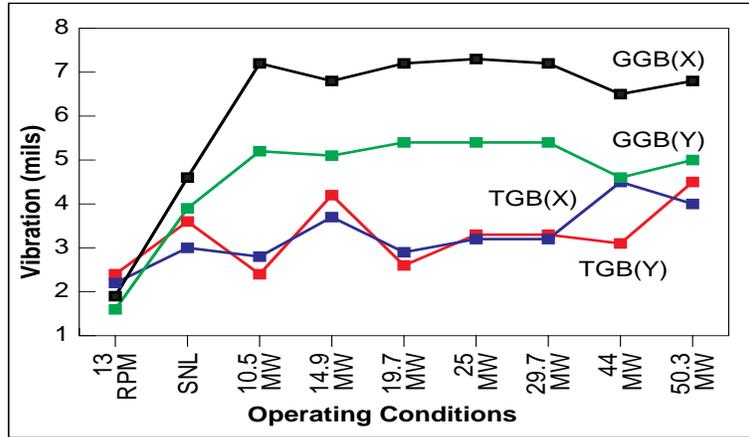


图5 振动与机组运行工况之间的关系

第二步，用ZOOM软件做发电机导轴承和水轮机导轴承的振动低频谱分析。图6显示出与主机旋转频率相吻合的主导频率为1.58赫兹。同时显示出2倍和4倍谐振(水轮机频率)较低。考虑到水轮机导轴承的峰-峰振值也低，可以认为振源不在水轮机层。

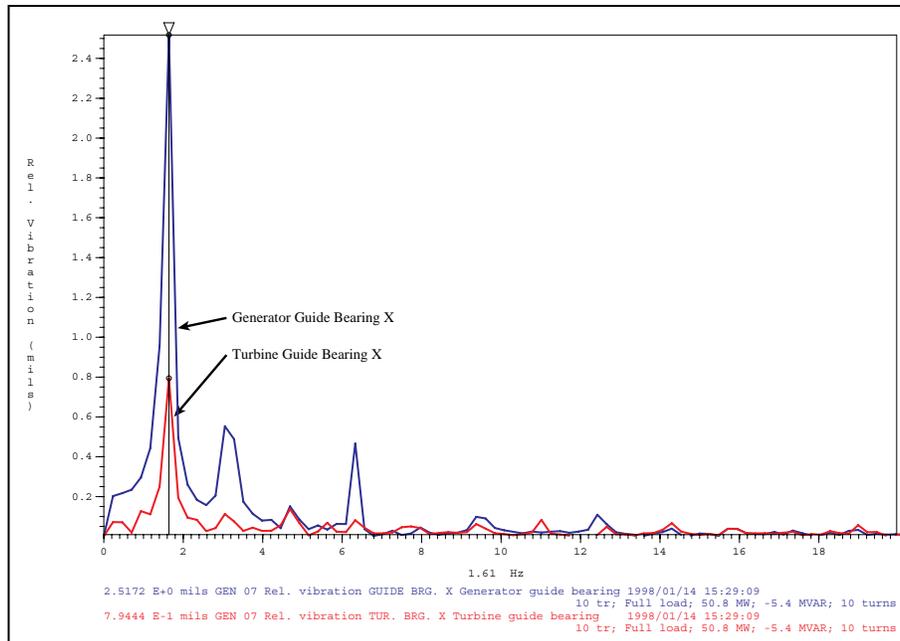


图6 发电机导轴承和水导振动低频谱分析

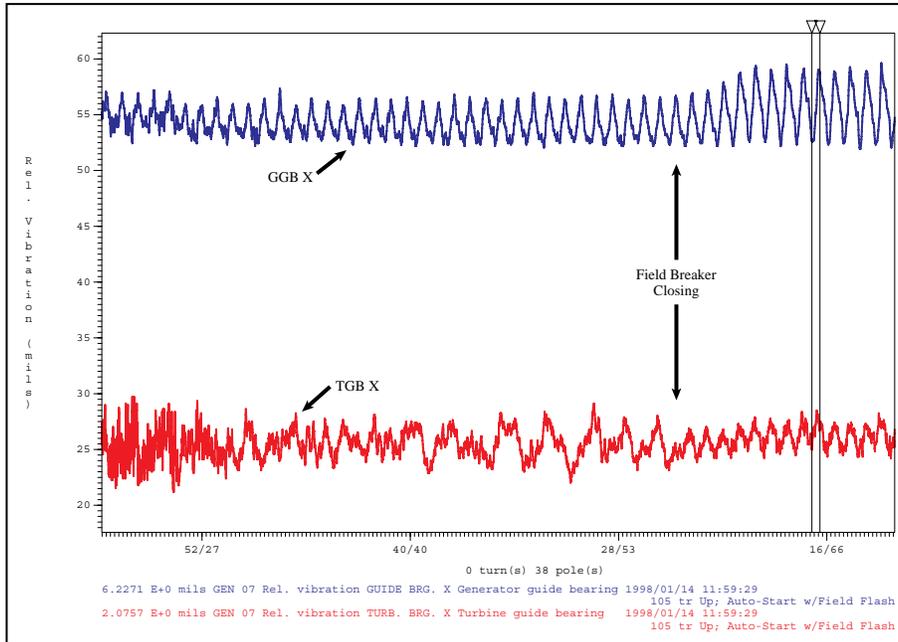


图7 起励试验时导轴承振动变化

第三步，考察各种工况下大轴的摆度情况，以确定有无电磁不平衡。表1说明转子偏心造成的磁拉力足以使大轴的旋转轴发生变化，产生出可察觉到的机械不平衡而引发振动。这一磁效应在图7(导轴承振动相对于磁极/机组旋转)起励试验中得到肯定。

工况	转子参数		
	圆度	同心度	转子偏心角
慢速	24.95 mils / 4.87 %	3.75 mils / 0.73 %	313°
速度无负荷	25.45 mils / 4.97 %	3.94 mils / 0.77 %	335°
10.9 MW	31.42 mils / 6.14 %	5.76 mils / 1.12 %	330°
25 MW	29.43 mils / 5.75 %	5.68 mils / 1.11 %	332°
50 MW	30.32 mils / 5.92 %	5.41 mils / 1.06 %	332°

表 1

最后一步，检查各种工况下转子形状的稳定性的。这是因为圆度的任何变化还会影响到同心度，继而影响振动。表1也显示出形状变化甚微，偏心角保持不变。因而不会增加振动。

最后这几步证明，机组振动来自转子偏心，而电磁不平衡使之增大。由于转子的几何偏心相对较小(<1.2%)而且处于公差范围内，因而判定只需平衡转子便足以校正振动问题。测值解释服务(RIS)报告建议先试加20磅于偏心角(135°)对面，然后重做额定速度测量，以最后确定配重角及配重量。

4、用气隙测值评估定子相对热膨胀

只要转子轴和磁轭不移动，气隙测量值就可以用来评估定子的相对位移。下面用两个例子分别说明定子均匀膨胀和不均匀膨胀的两种情况。

一旦转子的稳定性得到肯定，便可继而评估定子的相对热膨胀。先确定一个参考磁极，取得它在两种工况下每个传感器测得的读数：速度无负荷加励磁和热机满载（运行至少三小时以后）。也可采用第三种工况，即冷机满载，做中间值，作为比较参考。

把每个传感器在两种工况下所测之值加以比较，如果传感器之间的差别微小，则认为膨胀均匀；如果一个值或多个值差别较大，则认为不均匀。这种技术提供的是相对值，即相对于转子旋转轴。由于大轴振动、定子振动以及系统的精度，较小的变化也是正常的。如果发现问题或异常情况，建议在混凝土结构上加用非接触式位移传感器测量定子框架的上部或下部。这样，ZOOM系统便可测量出定子的绝对径向位移并把它同气隙同步化。

第一个是美国一座蓄能电站的发电机/电动机定子均匀膨胀的例子。表2显示最大膨胀差非常优秀。两组比较值采于额定转速加励磁42°C，和85%负载71°C。由于当时工况变化较频，未能取得冷机静态和热机满载工况。尽管如此，所取得的工况仍具有相当的代表性。

测试点	28 号磁极的气隙 (道)			
	传感器 1	传感器 2	传感器 3	传感器 4
额定转速励磁 42 °C	1056.0	900.7	1130.8	919.3
85% 负荷 71 °C	1064.6	913.2	1142.5	935.3
最大相对膨胀	8.6	12.5	11.7	16.0
差	0	+3.9	+3.1	+7.4

表 2

测试点	52 号磁极的气隙 (道)							
	传感器 1	传感器 2	传感器 3	传感器 4	传感器 5	传感器 6	传感器 7	传感器 8
励磁 (46.3 °C)	632.3	605.1	631.9	604.6	566.1	581.2	644.0	646.6
满载 (59.8 °C)	640.1	626.3	635.8	623.2	573.1	602.9	656.1	653.5
满载 (96.2 °C)	663.5	663.5	647.9	655.7	581.7	634.0	670.0	679.0
最大相对膨胀	31.2	58.4	16.0	51.1	15.6	52.8	26.0	32.4
差	+15.6	+42.8	+0.4	+35.5	0	+37.2	+10.4	+16.8

表 3

第二个是不均匀膨胀的例子，那是委内瑞拉一台仍在保修期内的212兆瓦的机组。为了处理热膨胀，机组设12个径向键钢轨垫板，8个传感器中有4个装于4个垫板附近。表3显示偶数号传感器(2、4、6、8)处气隙变化比处于垫板附近的奇数处(1、3、5、7)大得多。建议检查径向键系统，并在每个气隙传感器角加装定子框架位移传感器，做进一步分析。

5、新机组提前老化问题

1995年秋，一台50兆瓦的发电机在美国交付使用。稍后，用ZOOM系统对该机做了一系列测试，目的是检查机组的质量(公差和动态性能)，并把测试结果作为日后参考的基础。

1997年9月，为了对该机组的性能和状态做再评估，并了解机组的早期演变情况，又做了第二次系列测试。

参数	测试结果		公差		
	96年1月	97年9月	总装	标准	临界
气隙变化	11.8%	17.4%	10%	15%	20%
定子圆度	6.9%	11.6%	7%	12%	20%
定子偏心率	1.0%	0.8%	5%	7.5%	10%
转子圆度	4.9%	5.8%	6%	8%	10%
转子偏心率	1.7%	1.0%	1.2%	2.5%	4%
发电机振动 (mils) ⁽¹⁾	1.7	4.7	4.0	6.5	12.0
水轮机振动 (mils) ⁽¹⁾	无数据	2.4	4.0	6.5	12.0
轴向振动 (mils)	0.1	3.8	3.0	4.5	9.0

注： 1、X、Y轴的平均相对振动。

表 4

表4比较了1996年和1997年两次用ZOOM系统测试的结果。经分析，认为机组在短期内是可靠的，但同时指出定子圆度有相当程度的恶化，转子圆度有些许下降，而定子和转子的同心度都有改进，发电机导轴承有较强振动(见例3)。

图8的发电机极视图²中，定子有趋于椭圆的倾向，对于2年新的机组，这是不正常的，超过了运行15年以上机组的公差标准。其圆度退化以使额定气隙偏差值从6.9%升到11.6%。尽管这一测值仍可接受，但退化速率已超出正常情况。问题可能来源于径向键的设计或安装。

² 显示转子形状处于定子形状之中的俯视图。

用一个转子磁极作参照点，对定子的相对热膨胀进行了分析；分析结果确定了上下游轴向的径向扩张较大，达20道。定子椭圆度增大后，每一转都会对转子磁极产生周期性的张力；长此以往，很可能因此而导致转子圆度发生变形。

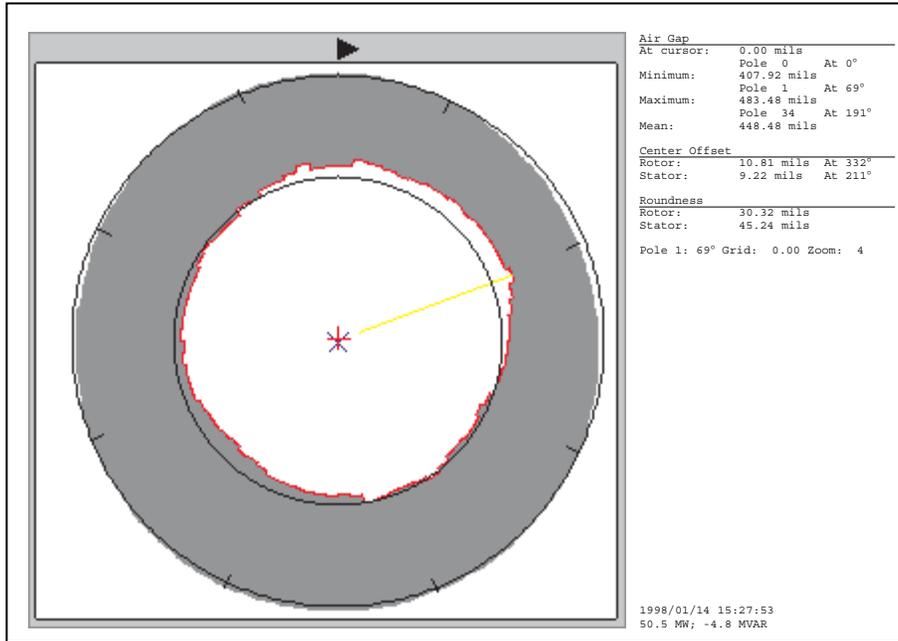


图8 满载时的发电机极视图²

因为这台机组仍在保修期内，所以建议向发电机制造厂家就此问题的提出讨论和研究，并在定子上部与气隙传感器对齐处增加位移传感器，进一步监测并研究这一异常现象。

这个例子说明了在新机组或改造后机组交付运行时做全面测试和分析的重要性，以及此后若干年内重复这一过程，以比较并趋向分析参数变化、动态性能、和机械状态的必要性。如此获得的对机组状态的洞察非常有价值，它可以用来同制造厂家讨论并实施保修条件。这又一次证明了实行状态监测的成本效益。

6. 探测转子浮动磁极上的振动

特征测量是机组一转内测得的每个磁极的最小气隙。通过比较某个传感器所测各种工况下的气隙特征，以及所有传感器所测同一工况下的气隙特征，可以探测到磁极的振动情况。前者针对磁极变形，后者针对磁极振动。

一般来说，坚固的转子，不管哪个传感器测量，其形状都应完全一样。详细考察时，即比较一磁极与相邻磁极的相对位置时，由于大轴振动、定子振动(可忽略)、和系统总体精度³方面的因素，也允许形状有微小的变化。超出这种公差的都应认为是磁极振动。

³ 如例4中所示：0.13mm/5mils.

加拿大有一台85兆瓦的机组，就是磁轭振动和磁轭无振动的例子。图9是在速度无负荷工况下无振动磁轭的绝佳范例，所有图形的总体形状和细部都完全相同。数值显示表明，两个传感器之间的最大差别—光标所示处—是1.3道，仍是可以接受的。

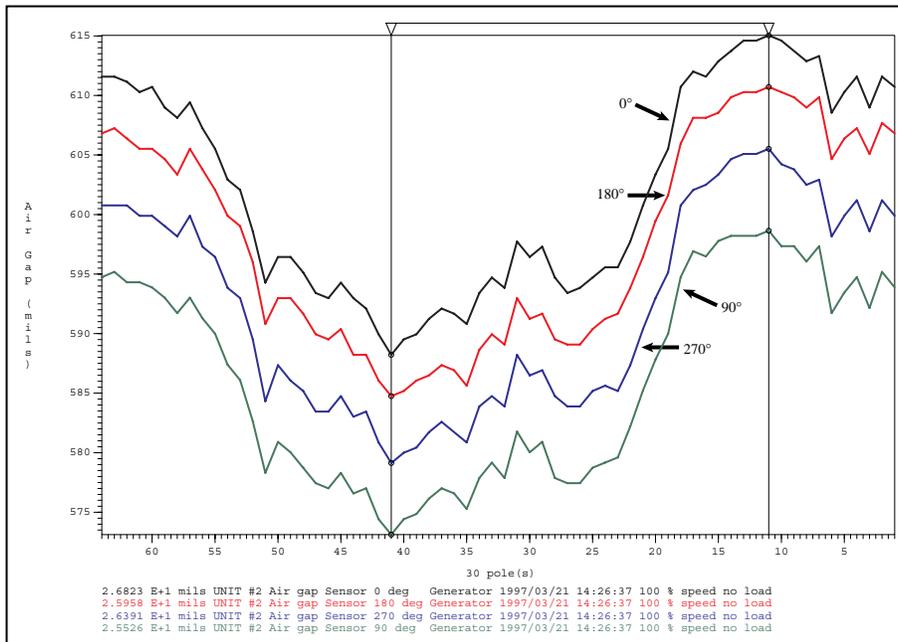


图9 速度无负荷工况下气隙特征曲线 — 磁轭无振动

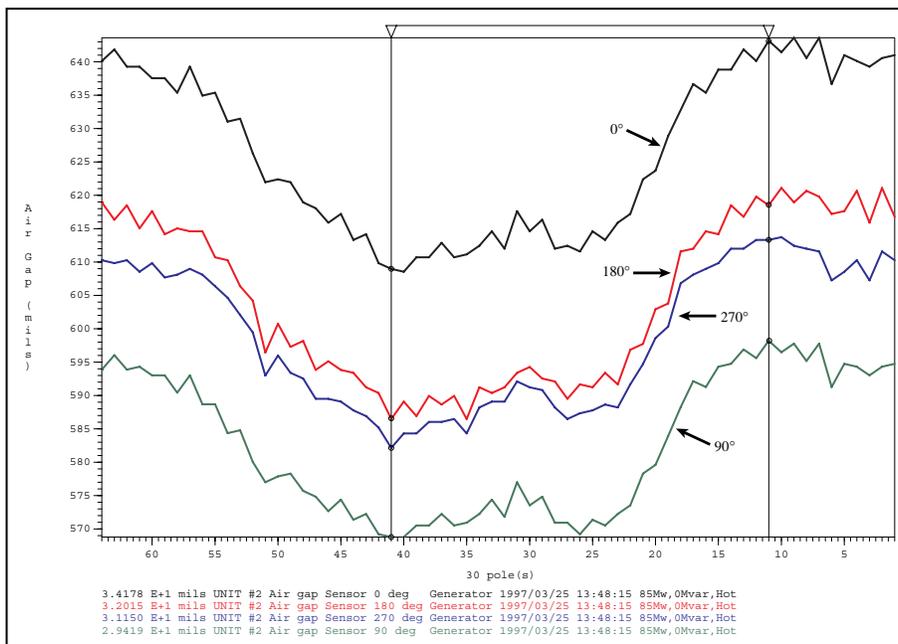


图10 热机满载时的气隙特征曲线 — 磁轭振动

1985年交付运行后不久，发现磁轭键有问题。于是1990年大修时制造厂改造了浮动磁轭装置。1997年安装气隙监测系统并在3月记录了一系列性能测试结果。

经过对测值进行分析，发现装置磁轭圆度及膨胀在不同的工况下表现不同。此外，还发现一经励磁，便发生低周期磁轭振动。这一1.8赫兹的振动与机组基础频率相同。

图10显示的是在热机满载时4个传感器所测的同一数据，这是机组的正常运行工况。虽然转子的总体形状相似，但细查每条曲线，磁轭形状便显出区别来。这里，数值表明0°传感器和90°传感器间最大差值为4.7道。

在同一磁极处，有的气隙曲线呈峰状，有的呈谷状。此磁极同相邻磁极的相对高度在不同的传感器处显示不同。我们还可以对其它磁极作同样的比较。

导致磁轭振动的原因有多种，在这个例子中，怀疑有以下可能：

- 转子磁轭惯性低
- 磁轭键的横向磨损
- 机架支臂强度不够

检查磁轭键并测量键的磨损可以提供重要线索。

这一低频振动暂时不构成危险。由于键子仍会继续磨损，建议定期(四个月一次)监测主要气隙参数的发展趋向。此外，还建议每年检查一次磁轭与机架连接系统。应查清机架支臂底部的裂缝和键子附近的红色粉末。

7、延长带病机组的寿命

自1977年交运以来，加拿大一台28兆瓦的灌流式机组一直有定子严重变形的问題。如图11发电机极视图所示，结构发生永久性的瓢曲，这一瓢曲在第一次加负荷时就出现了。

97到98年之间停机时，安装了气隙监测系统，并于6月份在各种工况下做了一系列试验。表5概括了测量结果。它显示，尽管定子严重变形，圆度和偏心率也大大超出临界公差，但其尺寸的稳定性却奇好。同时，转子圆度和偏心率极为优秀。

参数	公差			
	测试结果	总装	标准	临界
气隙变化	76.2%	13%	20%	30%
定子圆度	70.8%	7%	12%	20%
定子偏心率	23.9%	5%	7.5%	10%
转子圆度	5.4%	6%	8%	10%
转子偏心率	0.3%	1.2%	2.5%	4%

表 5

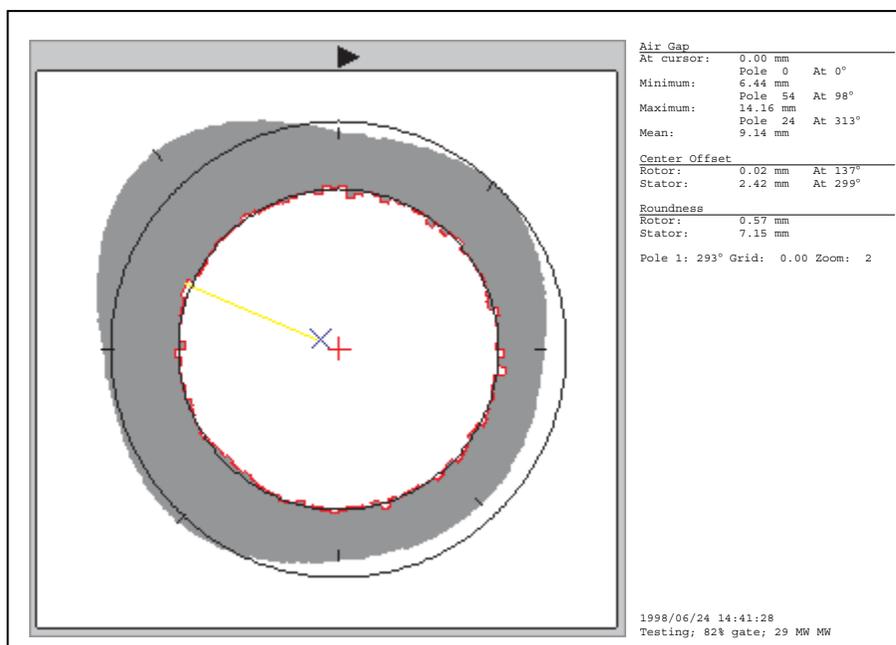


图11 发电机极视图显示定子结构严重变形

建议：尽管定子变形导致气隙严重不均，但各种工况下转子和定子稳定性在短期内还不必担心，因而可以推迟机组改造若干年；同时，对气隙报警做严密监视，特别注意定子圆度和最小气隙。

强烈建议安装定子线棒振动测量系统，每年一次检验定子上部变形处定子线圈和槽契系统。预计5到10年内会出现定子机械强度问题，而导致线圈电气故障。

进一步讲，定子严重变形将会造成线棒槽宽度变化。半径减小使得槽宽缩小而压坏线圈绝缘材料，导致定子线棒的短路。反过来，半径增大使得槽宽扩大而失去径向紧度，使线棒在槽内振动摩擦而损坏其绝缘。

此例说明，虽然发电机机械规格问题严重，但定子转子在各种工况保持稳定，加上每年检验线圈并对气隙警报和定子线棒振动警报做严密监视，可以保持机组相对可靠安全地运行，推迟改造工期。

8、灌流式机组定子下塌问题

对灌流式机组做气隙监测的经验证明，这种机组常易发生定子顶部下塌的问题，原因一般是设计、制造或总装所造成的定子铁心和机架固定系统较弱。由于重力持续作用于定子的上悬部分，定子下塌被认为是一种有渐进性、会逐年加剧的问题。

随着顶部气隙在重力作用下的减小，磁拉力按比例增大。反过来，磁拉力的不平衡对转子产生周期性张力，对定子产生应力，而使问题加剧。在短期或长期内，这种状况会诱发振动、过热、疲劳而影响机组的性能，并造成故障、停机和扫膛的风险。

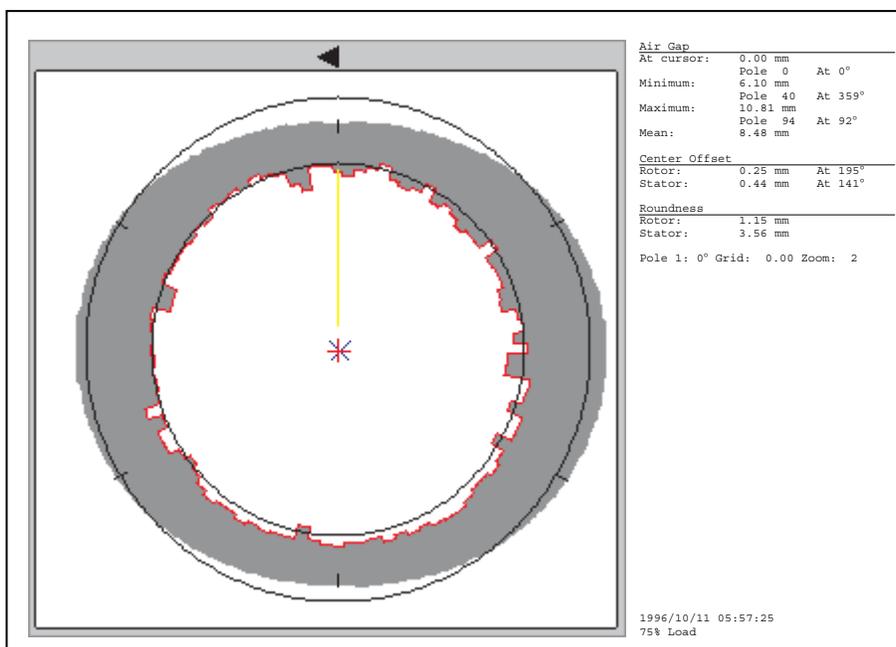


图12 灌流式发电机极视图显示定子顶部下塌

东欧有一台27兆瓦的灌流式机组就是这种情况，如图12所示。交运后短短两年，定子严重变形成椭圆状。相对于额定气隙，其39.55%定子圆度大大超出20%的临界公差，是造成平均气隙值达52.33%的主要原因。

变形的分布很均匀，可见薄弱的根源在设计或制造。支撑系统未能支持定子的顶部，同样它还允许了定子向两边外移。这种松软非常均匀，甚至定子的同心度几乎没有变化，成为能达到总装公差的唯一参数。

定子圆度的变化最主要的是发生在励磁时。顶部的气隙减小0.26毫米(2.9%)，而底部气隙只减小0.08毫米(0.09%)。同时，大轴向平均气隙最小的方向(270°)横向位移。虽然现在还不明显，但每转两次的磁场失衡周期终会诱发大轴或转子磁轭的振动，由机械疲劳而导致故障。

此外，最直接的危险是转子定子相触。定子圆度在各种工况下的变化证明这一问题还在发展，并会随着时间的推移进一步恶化。因而，有必要对主要气隙参数作趋向和警报监测。还需增加低速、满载、冷机、热机等工况之下的测试，以评价定子热膨胀程度，并对发电机状态和性能做全面分析。

9、彻底取消不必要的检修停机

AGMS和ZOOM系统还可用来核实机组现有的可疑情况。有一台76.5兆瓦的机组振动较强烈(发电机推力轴承下面测得大轴径向摆度为0.46毫米),造成发电机顶部电刷和固定装置严重磨损。

随着机组励磁和负载增加,振动逐渐增大。有人认为,定子和(或)转子可能发生椭圆,因而造成发电机磁场不匀,导致振动。校正这一问题的方法是拆除机组,重新校圆找正定子和转子,重新热套转子磁轭,花时耗力,费用昂贵。

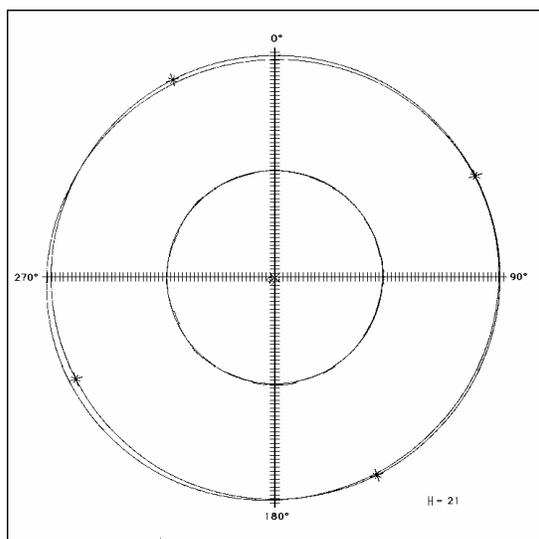


图13 发电机极视图

后决定安装一套气隙监测系统,进行交叉检查。测量结果如图13所示,转子定子的圆度和圆心在各种工况下都良好。这证明振动的原因不在发电机。

电站水机科作了进一步检查,发现固定导叶处有大量积垢。这种情况导致混流式水轮机受水压不均匀,因而产生振动。经铲除积垢后,机组振动恢复到正常低水平(径向0.05毫米)。

在此例中,动态气隙监测系统帮助避免了停机作昂贵而不必要的拆机修理。

10、预防灾难性的故障

1992年,加拿大一座电站所有的60兆瓦发电机都开始发生定子框架,即空气间隙,变形的问題。1989年,16台机组全部安装了气隙监测系统,对气隙做动态监测。正如所料,气隙随着季节温度的变化和混凝土增生等现象而变化。1990年他们开始一项计划,把AGMS系统提升到ZOOM系统。

1991年,一号机触发气隙警报。ZOOM系统提供的气隙测值为200道(额定值为406道)。这时,他们决定停机校正定子圆心,并调整和润滑定子径向键。不到一个月,在用电高峰期到来之前机组便恢复了运行。

在线气隙监测系统对于降低由于气隙减小而造成的扫膛事故的危险起到了巨大的作用。系统所提供的数据帮助电站在扫膛发生之前就决定了定子转子校正性大修的时间和范围,也帮助电站经理确定了16台机组中那台需要优先考虑大修。

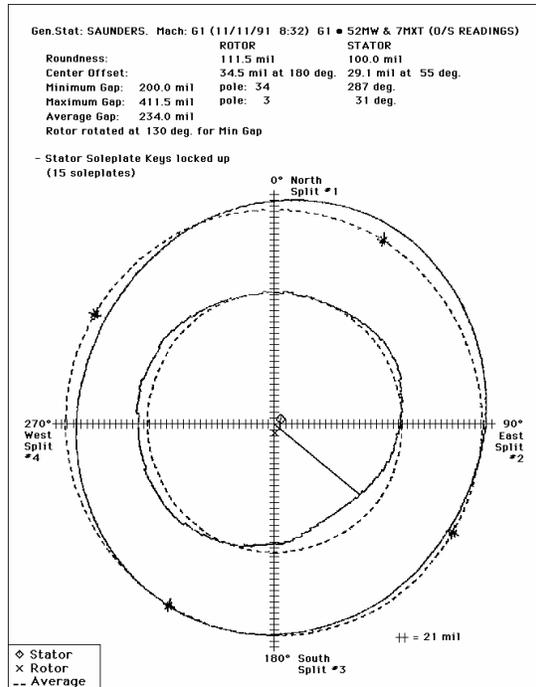


图14 气隙报警时的发电机极视图

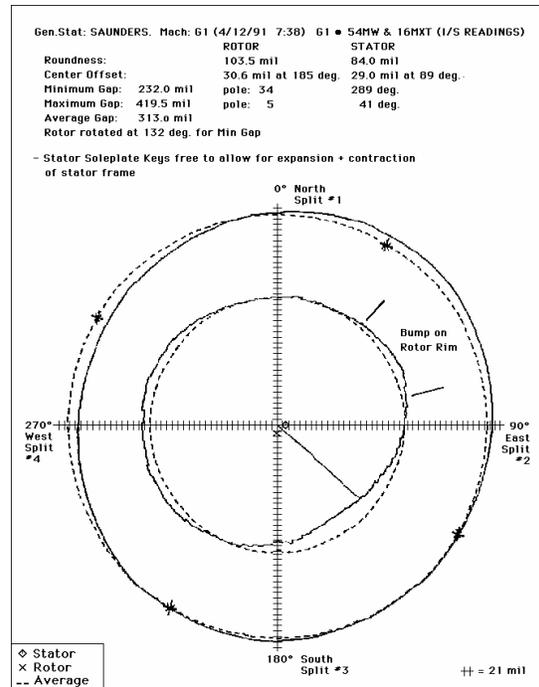


图15 校正后的发电机极视图

结论

这些实例演证了气隙监测在了解机组状态和性能中起着头等重要的作用。同时也展示了用一套机组状态监测系统把各个参数相关联起来，这样可以对机组做全面的考察和研究。

当今竞争日益激烈的世界要求电力公司的管理人员提高水力发电设备的可利用率，而实践证明，维保监测系统公司的在线监测系统可以做出相当大的贡献。在恰当的时机得到恰当的信息，便可做出恰当的决策。

参考文献

- [1] Cloutier, M., Bissonnette, M., "Air Gap Measuring System", 1st Int'l Machinery Monitoring & Diagnostic Conference, Las Vegas NV, USA, May 1989
- [2] Menard, P., Bourgeois, J.-M., "Using Capacitive Sensors for AC Generator Monitoring", CIGRÉ Study Committee 11, Int'l Conference on Large High Voltage Electric Systems, CIGRÉ, Montréal QC, Canada, September 1989
- [3] Pollock, G. B., Lyles, J. F., "Vertical Hydraulic Generators, Experience with Dynamic Air Gap Monitoring", IEEE/PES Winter Meeting, New York NY, USA, January 1992
- [4] Casselman, D., District Electrical Division, "A Success Story", Memorandum Ontario Hydro, Cornwall ON, Canada, December 1992
- [5] Bissonnette, M., "On-line Monitoring & Measurement of Hydrogenerator", IEEE Panel Discussion on Advances in Hydroelectric Machine Condition Monitoring, IEEE Summer Power Meeting, Seattle WA, USA, July 1992
- [2] Bourgeois, J.-M., Bissonnette, M., "Capacitive Sensor Technology: A Key for Better Monitoring of Hydropower Generator", Hydropower '92, Rotterdam, Netherland, 1992