

汽轮发电机定子线棒的温度验证

佐竹，服部，高桥

日立公司.日本

译：INDIGO PRECISION Co., LTD®

(COPY RIGHT)

摘要

本文描述了汽轮发电机组定子绕组线棒温度测量的试验结果和问题分析。嵌入定子绕组线棒之间的电阻温度传感器（RTD），通常是检测定子绕组温度的唯一方法，但它并不能准确地显示定子线棒导体的真实温度。虽然导致绝缘系统损坏的临界温度是线棒导体的温度，但目前检测这个温度是非常困难的。

自 2004 年以来的报道，我们开发了可以预测定子线棒温度分布的计算工具。此外，通过对真实发电机定子线棒直接测量温度，在汽轮发电机的开发上，我们获得很多有价值的数据，并建立了数据库。现在是发布这些发电机定子线棒的测量结果的时候了。

由于哪些回路端部温度最高，是取决于发电机不同的设计，为测量定子线棒温度，传感器被安置在线棒两端和线棒插槽中，为了验证这些现象，我们制造了几种定子试验模型，测试结果：实测测量值和计算出的数据是正相关的。最后，本文发布了通常不会被测量到的定子线棒导体的实际温度。现在，更精确的温度计算工具和测量技术正在被不断地开发出来，并不断进步。

关键字

Turbine generator--汽轮发电机

Stator coil—定子绕组

Stator strands—定子线棒

Temperature distribution—温度分布

RTD--电阻温度传感器

当今，发电机的设计要求大容量、高集成度和绿色环保，并且构造简单。此外，许多客户需要发电机的构造兼有高效能和部件的长期可靠性，并有对用户友好的操作界面。随着发电机发热量的增加，温度问题变得越来越严重。为减少温度上升，通常采用的 540 度换位技术和 ICVS（内冷却器通风系统）[1]，这样能够使发电机损耗最小化、提高冷却性能、降低机组最高温度。同时，发电机可以在确保高效率的同时，尽可能减少损耗。我们已经开发了空冷发电机达 300MVA 级，现在已投产了，这些发电机用 ICVS 优化冷却并配置增强空气流构造的更好的冷却定子绕组，我们的试验改进了各种设计工具的精度，从此设计工具有了不断的发展。现在，通过使用此工具我们已能够预测详细的定子绕组线棒的温度分布[2]。

2 发电机的温度测量

如图 1 所示，一般是把 RTD 嵌入定子线棒顶部和底部之间来测量定子绕组温度的，过去认为在这个位置用 RTD 的测出的温度是顶部和底部的绕组的平均温度，其实，真实的情况是这个温度通常比顶部和底部的绕组温度低，用 RTD 是无法检测出定子绕组线棒本身的温度，重要的是要用可靠地方法检测出定子线棒的温度或者准确预测定子绕组线棒的温度。只要我们能够知道定子绕组的温度和 RTD 温度之间的关系，通过用 RTD 测量的温度来得到定子绕组线棒的温度的一些信息。

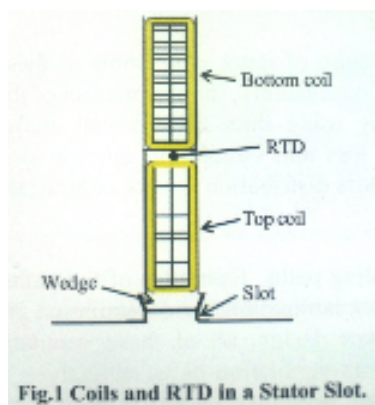


图 1 定子线棒和 RTD 在定子线槽中

换句话说，如果我们知道如何从 RTD 的测量值来估算线棒温度，我们就可以证明发电机的可靠性，然而，定子绕组线棒的温度是不容易被直接测量的，因为它有 10 到 30kv 的高压，并且高磁场也妨碍测量。为了测量定子绕组线棒的温度，我们在定子绕组线棒中安装了通常不用的光纤温度传感器，现在光纤温度传感器在发电机行业的应用还不普及，我们对线棒的温度分布进行了测量，并对温度的计算结果进行评估，我们比较了测量值。图 2 显示了安装的光纤温度传感器的位置，虽然测量的数据结果没有披露，但本报告给出了定子绕组温度的分布测量结论，这在通常情况下是不容易得到的。

另外转子的绕组温度是用比较电阻值来估算的。先从旋转试验测量中，从磁场电流和磁场电压得到电阻，再用电阻来估算转子绕组温度，不过，这种方法只能得到平均温度，不能得到最高温度。因为发电机的高速旋转和高离心力，应该有一个特别的方案来测量转子绕组温度，但这不在本文讨论的范围。

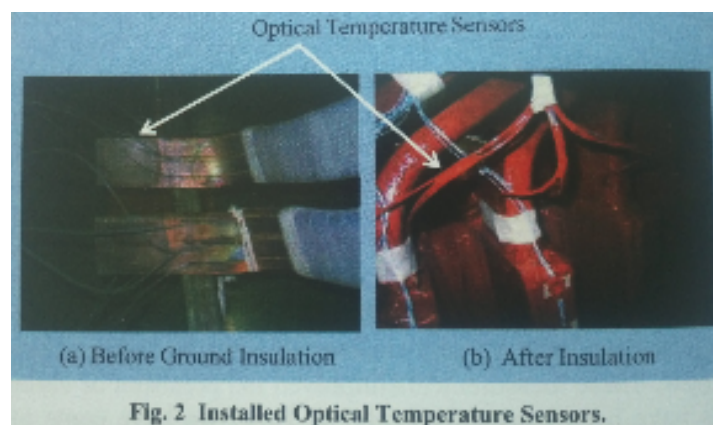


图 2 光纤传感器安装

3. 对温度有影响的组件和如何设计发电机

3.1 发电机热源

温度是由发热和冷却的量值决定的。本小节讨论温度上升的起因或热源，或者换句话说，是讨论每个部分的损耗，影响发电机温度的损耗如下所示：

- (1) 机械和通风的损耗
- (2) 铁损
- (3) 转子 I^2R 损耗
- (4) 磁场损耗
- (5) 其它负载损耗

所有这些损耗影响定子绕组的温度，一些损耗容易被估计，而其余的则非常复杂，因此，求总损耗是非常困难的。可通过使用三维分析 [3] 详细计算这些损耗，这种计算考虑了转子 I^2R 损耗、涡流损耗和环流损耗。此外，计算还要考虑到绕组线棒换位。由于损耗分布是非常复杂的，所以温度的分布也是非常复杂的。

3.2 通风

发电机都设计了冷却的通路，通路种类有定子和转子之间的缝隙、铁心叠层之间的空气管道气隙和转子导线的通风槽或径向通风孔等等。对于发电机的设计，所有这些通风通路都要作空气阻力估算和总通路的阻力的通风网络分析 [4]，并估算发电机内总空气流量和各个分部的空气流量。但是，使用三维流分析方法，对这种气流进行详细的计算是非常复杂的。计算分析的结果再回馈到通风网络分析。

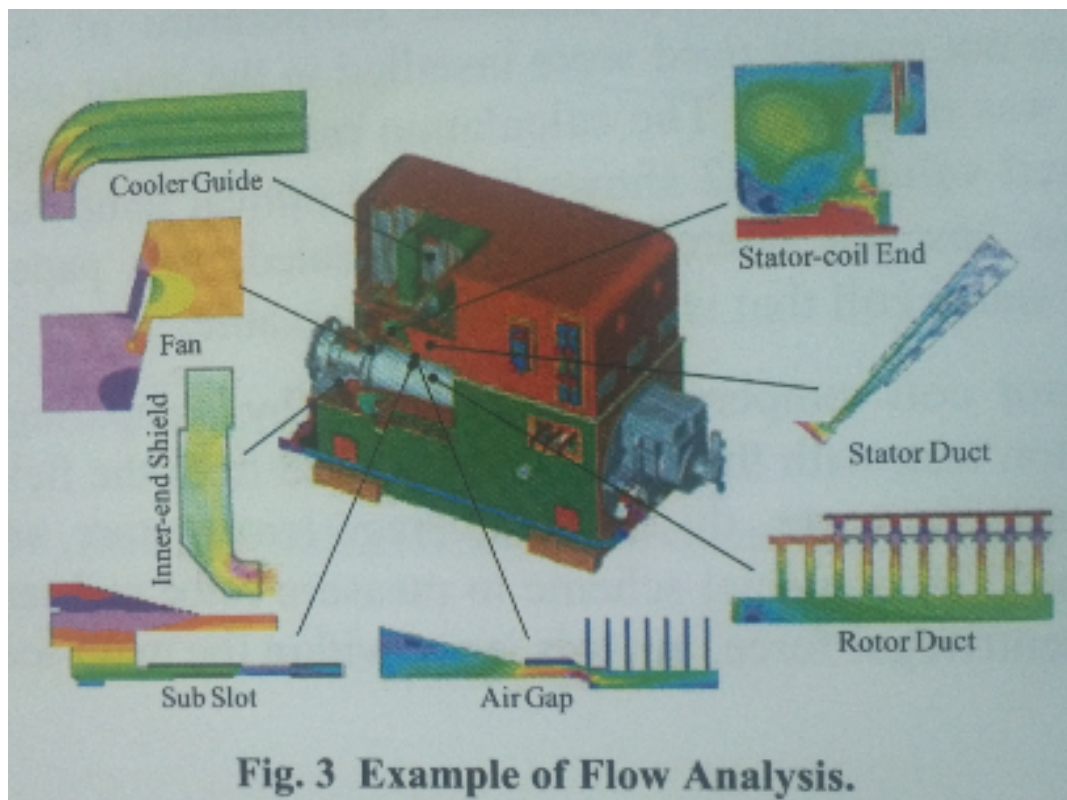


图 3 显示三维流分析的示例。

3.3 定子绕组的温度计算

网络分析计算定子绕组的温度 [2]，图 4 显示了一个发电机的热网络的例子，计算的开头用了系列连接组件，并向中轴方向的中心点扩展。这种热网络模式考虑到定子绕组、核心、气隙、定子管道和所有其他组件，包括定子楔形和波纹弹簧。我们分析了图 5 所示的插槽区域线棒换位的实际构造，利用发电机的所有损耗，可以计算出温度分布。

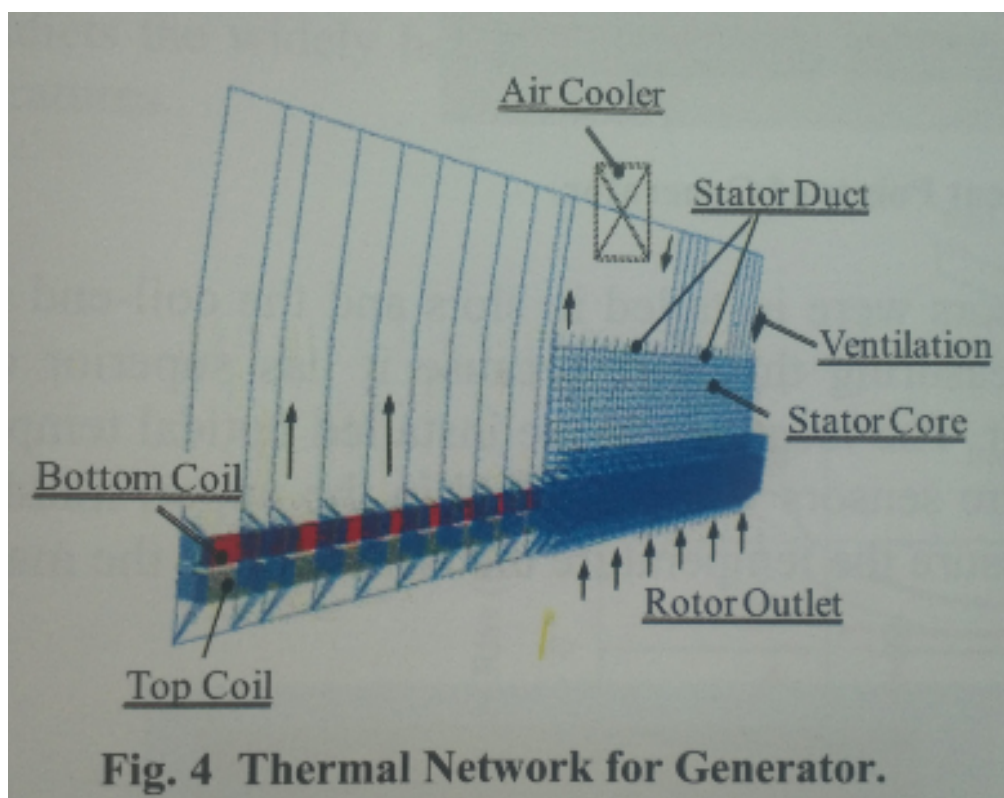


图 4 发电机的热网络



图 5 定子线棒换位

虽然定子温度受转子温度的影响似乎不是那么重要，但是因为转子有时还会产生 10%-20% 的总损耗，转子的通风口有时 would 超过 100 摄氏度，它还是会一定程度地影响定子的温度，因此，计算定子绕组温度，要涉及所有部件，并且也要包括转子的所有损耗。

4 验证测试

我们对一个 250MVA 级别的风冷发电机做了试验，计算出的定子绕组的温度已在测量中得到验证。这种类型的发电机详细说明列在表 1 中，发电机中安装了超过 1000 个以上温度和通风传感器，包括直接测量转子和定子绕组线棒的传感器。根据计算结果，温度传感器以集中的方式被安置，尤其是在定子绕组温度极高的地方，这些传感器的位置如图 6 所示。

Item	Specifieations
输出功率	250MVA
电压	20/18kV
短路电流比	0.5
功率因数	0.85/0.90
极数	2
转速	3600/3000min
绝缘等级	Class F
温升等级	Class B
效率	98.80%
冷却方法	全封闭

表 1 250MVA 发电机组参数

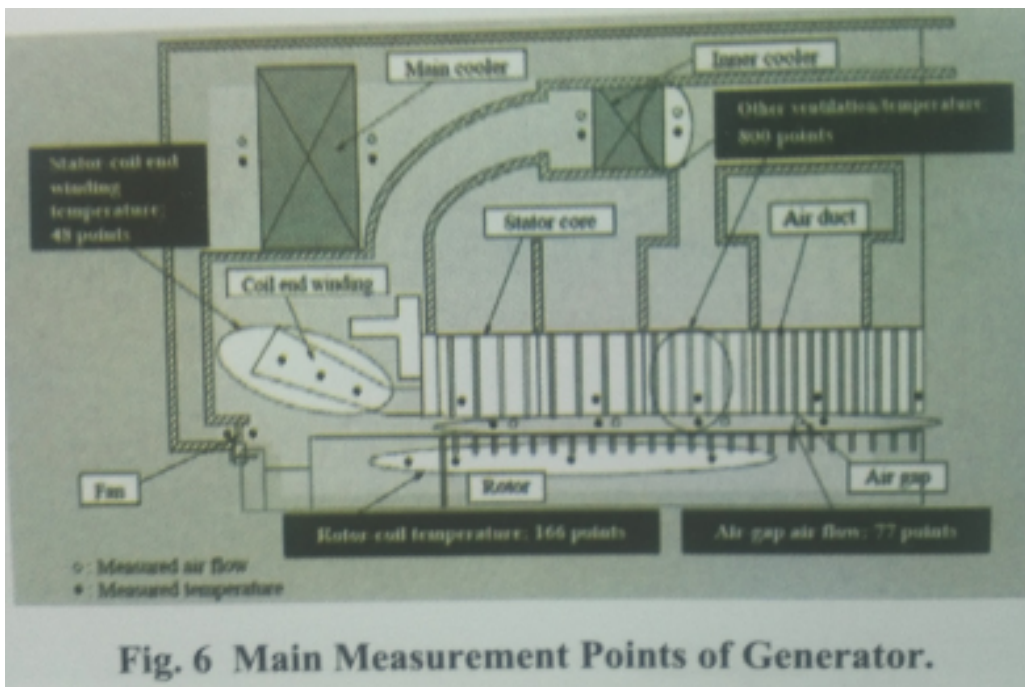


图 6 发电机的主要测量点

在定子绕组的线棒的插槽和绕组端部都安装了光纤温度传感器，光纤温度传感器具有的耐高压、抗电磁干扰和耐高温的特性，能够适用于这种测量。已安装光纤温度传感器的位置如图 7 所示，光纤温度传感器安装在定子绕组线棒的上、中和下部，用来测量温度分布和定子绕组线棒中的最高温度。

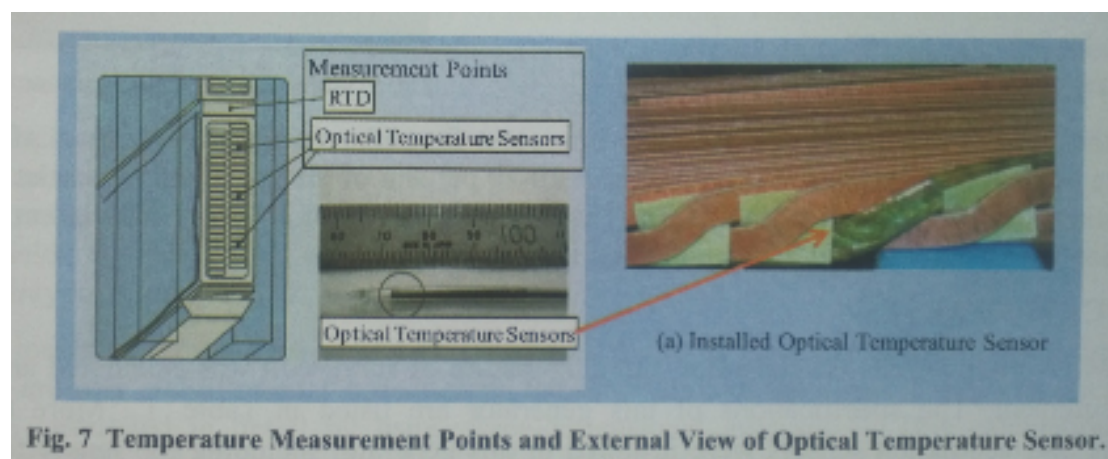


图 7 温度测量点和光纤温度传感器的外观视图

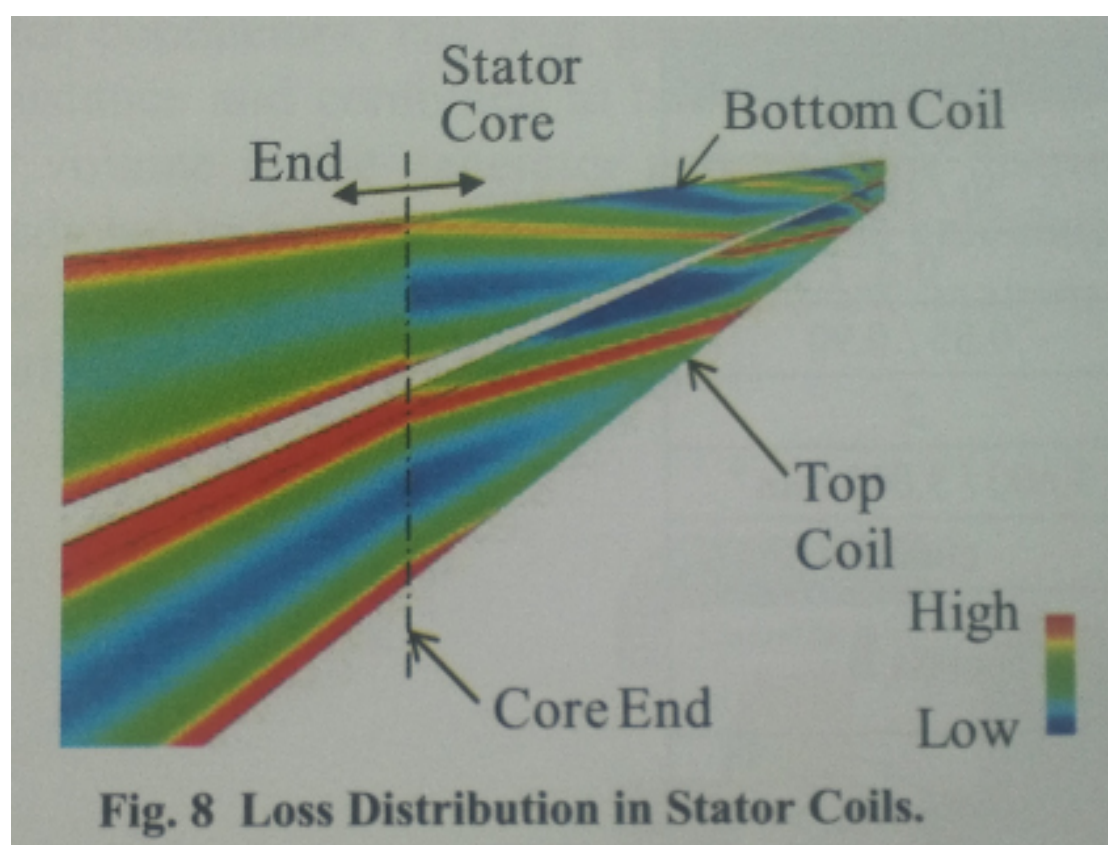


图 8 定子线棒损耗分布

图 8 显示了计算出的定子绕组损耗的轮廓，此计算包括转子 I^2R 损耗、涡流损耗和环流损耗，因为计算要考虑到实际的线棒换位的配置，一些地方线棒密度高，而另一些则密度低。

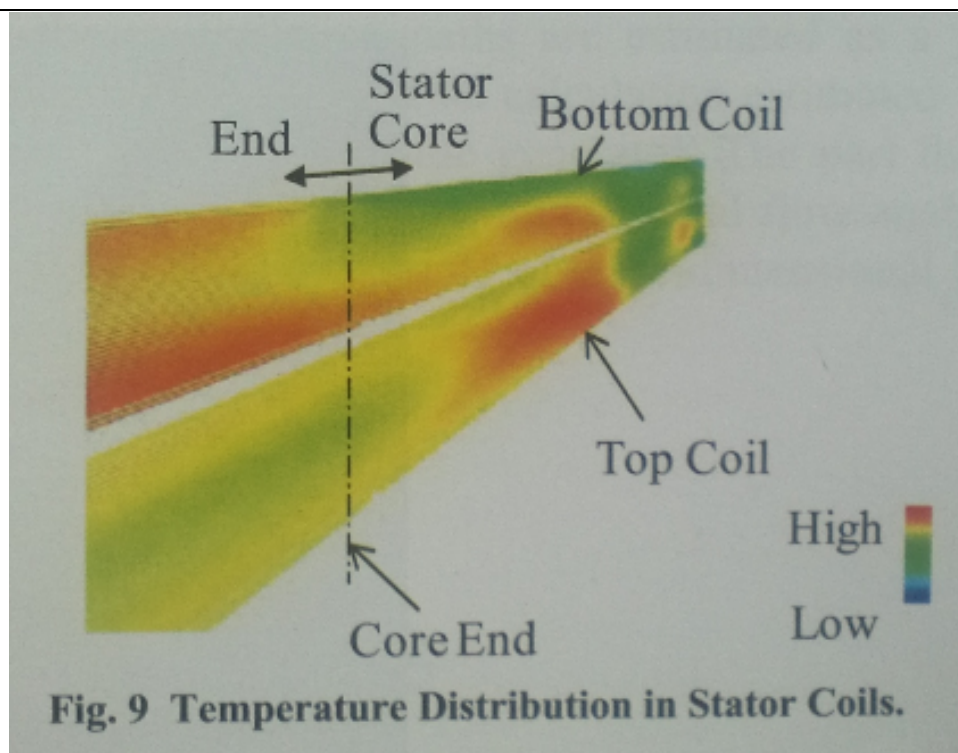


图 9 定子绕组的温度分布

图 9 显示了计算出的定子绕组线棒的温度的轮廓。温度分布的反差不像损耗分布那么强。

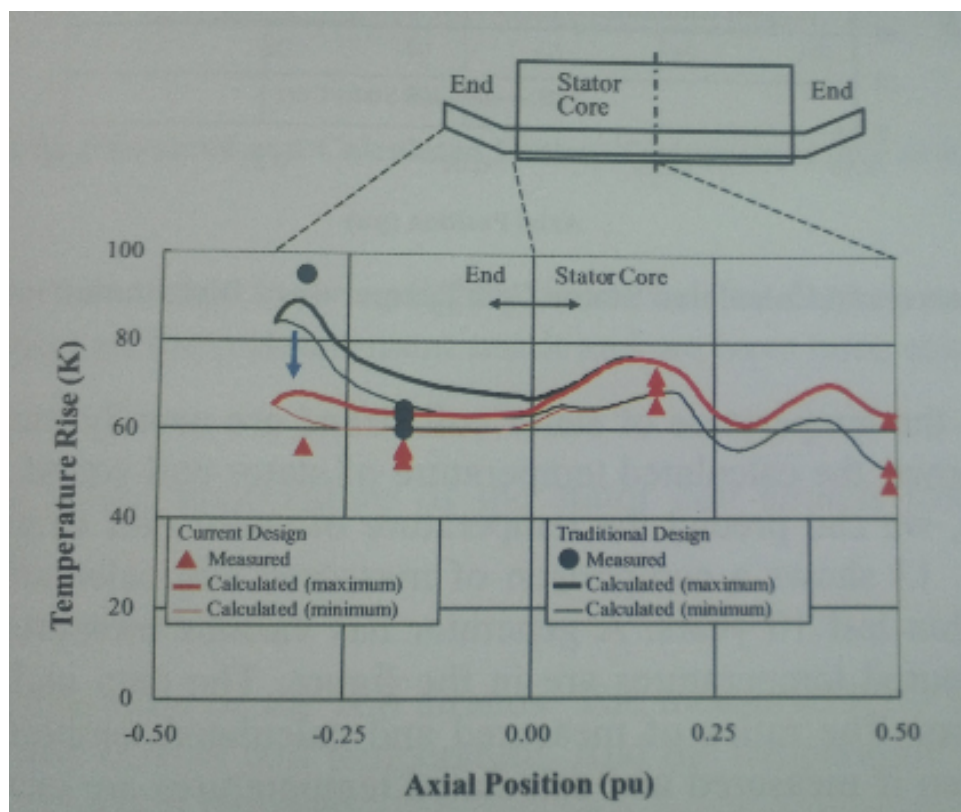


图 10 250MVA 空冷发电机组实际测量和计算的上层线棒温度分布

图 10 显示了定子绕组铜损耗温度效应的轴向分布，图中的水平轴代表发电机轴向位置，值 0.0 pu 指示了 定子铁芯边缘的位置，值 0.5 pu 代表发电机的中心位置，计算出的温度分布结果和测量出的结果完全吻合。此外，我们还测量了使用不同绝缘方法时定子绕组端部的温度，一个模型是采用新的绝缘设计方法，而另一个是用传统的方法设计的，计算表明绝缘方法对定子绕组端的温度有很大影响，它在实际测量中也得到了验证。

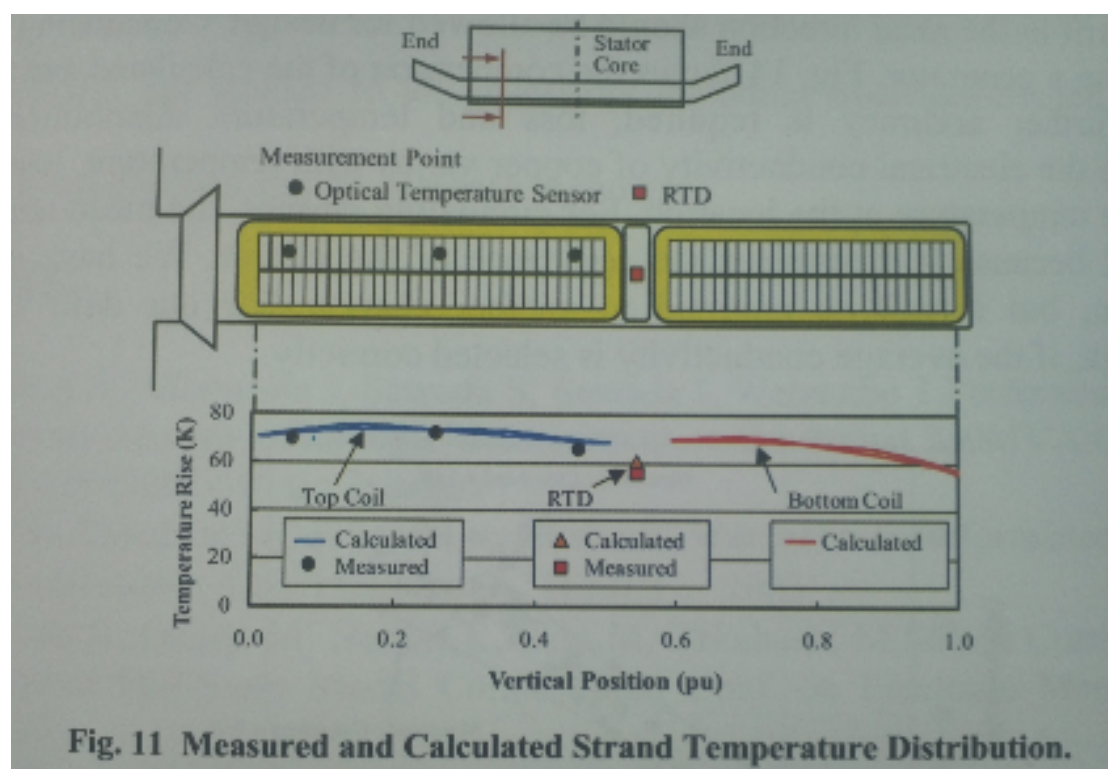


图 11 计算的线棒温度分布和测量数据

图 11 比较了图 10 中 0.2 pu 周围的上层绕组线棒温度的计算和实测数据，在水平轴值 0.0 pu 指示插槽中线棒最内层的温度，计算的温度分布也和测量完全一致。此时最高温度是剖面中顶部绕组的中心，从结果看，我们可以看到定子绕组的最高温度不一定会在顶部绕组最上面的位置。此外，如图 11 所示，RTD 的温度是小于底部绕组线棒的温度，这一结果与普遍认为的 RTD 温度是顶部和底部的绕组温度平均温度是有矛盾的。

一个客户给了我们一个机会，让我们在现场对另一个发电机的线棒温度进行了测量。我们在这个发电机上安装了 12 个串联的光纤温度传感器，在满负荷状态进行了温度测量。图 12 比较了定子绕组的实测和计算温度，如图所示，RTD 和串联的光纤温度传感器测量的温度是正相关的。请注意此发电机的温升设计为是 F 级的，两组数值都是设计值，并且没有对增加光纤测温进行修正。

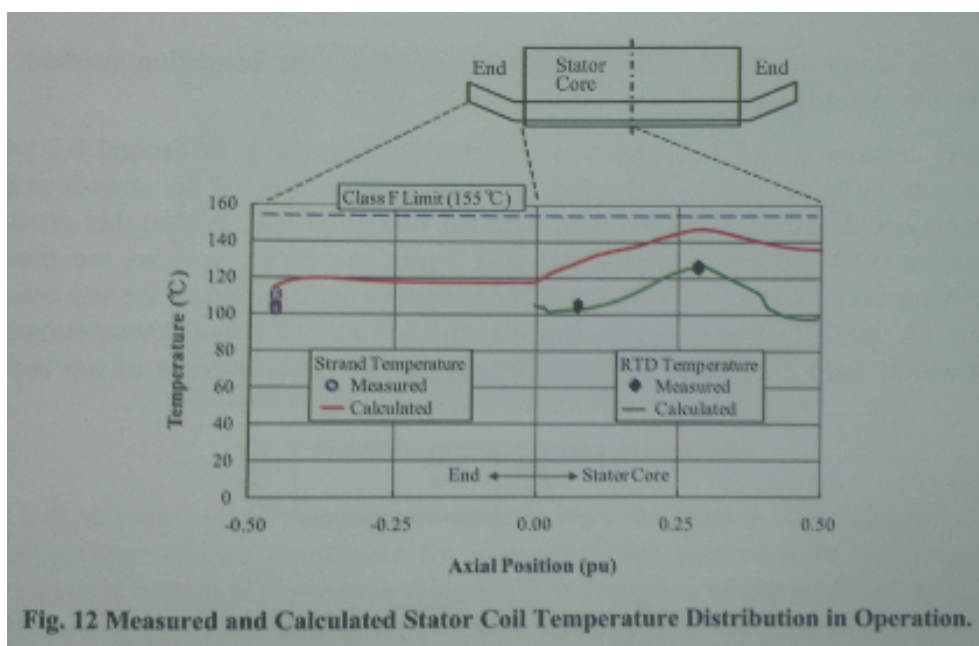


图 12 运行中测量的数据和计算的定子绕组的温度分布比较

正如我们前面提到，定子绕组线棒的温度通常只用 RTD 测量，由图 11 和图 12 所示，由计算得到的定子绕组线棒温度和 RTD 实测温度是正相关的，于是，我们可以通过 RTD 工具来预测的定子绕组线棒的温度。图 13 显示了过去 10 年中用 RTD 对发电机温度进行实测的和计算的数据比较。在图中显示了发电机在轴向方向有各种测量点和所得到的测量温度，数据包括风冷和氢冷发电机。实测和计算温度上升的比率在 0.76 到 1.08 的范围内。即使测量和计算温度是完全相同，当温度分布在轴向方向改变时，比率就超出了 1.0，低于或高于 1.0，但设计应当允许轴方向的漂移。

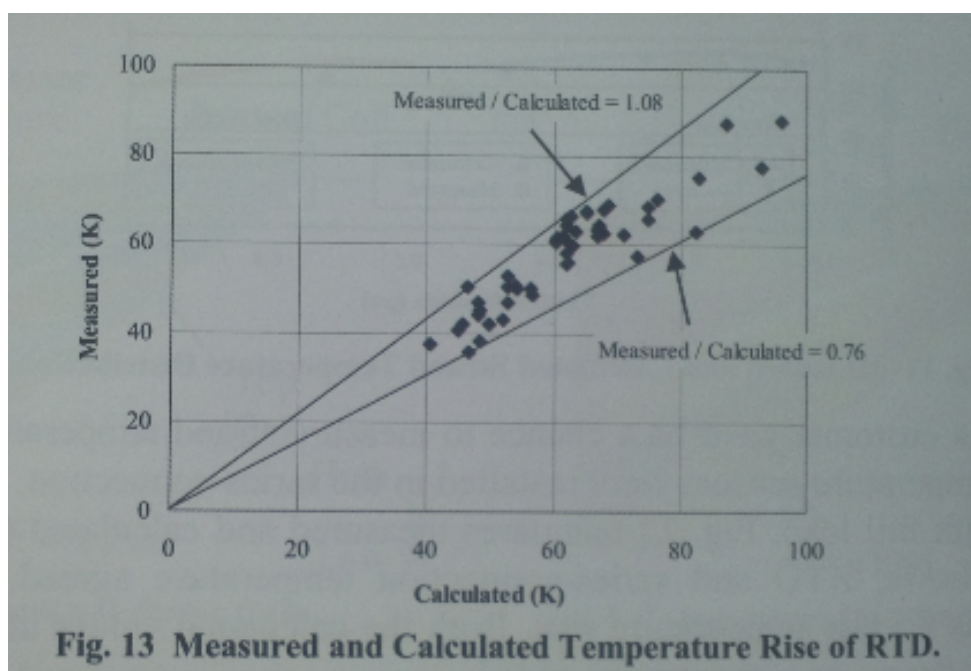


图 13 实测与计算的 RTD 温升

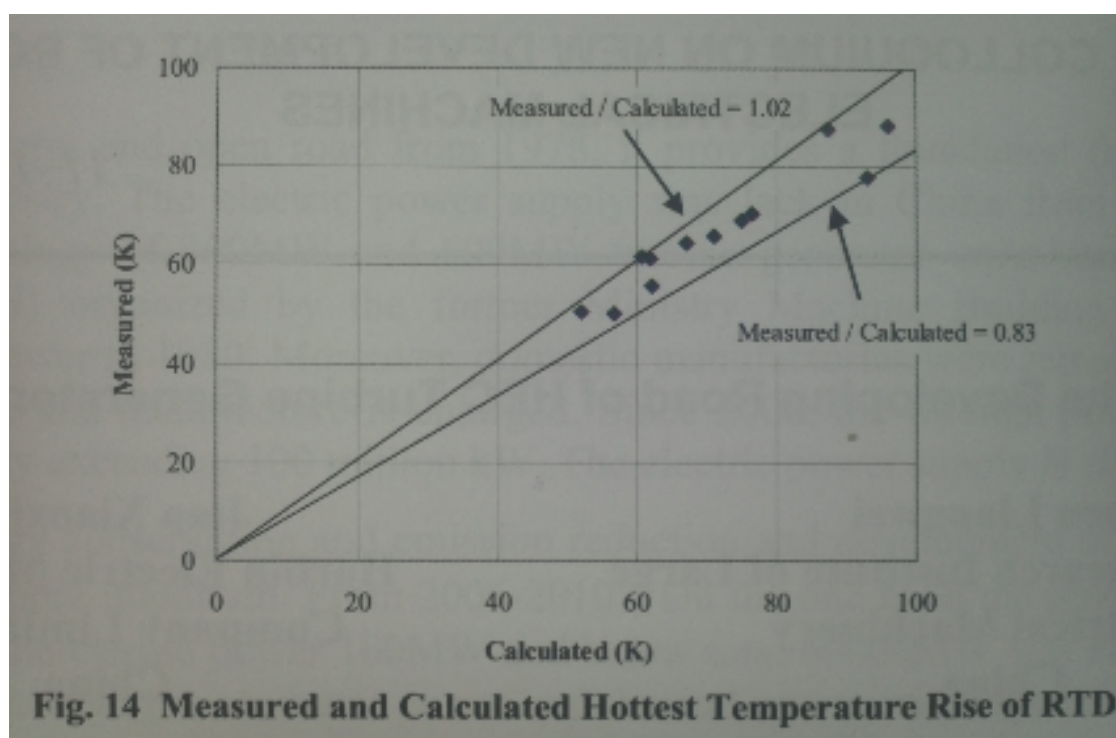


图 14 实测和计算的 RTD 的最高温升

考虑到这种改变，我们用图 14 给出我们设计的一个发电机，图 14 显示了计算与实测的最高温度的比较，如果需要进一步提高准确性，则需要反复计算损耗和温度分布。因为铜导电率随温度变化，在每个位置的损耗也随温度的变化而变化。对循环电流，每个线棒的平均温度是很重要的，因为它决定了电路中的电阻。我们已有迭代计算的经验和，我们将在以后的报告中给出。如果正确选择了平均导电率，我们在平常使用非迭代计算就够了。

每次测量后，为进一步提高精度需要稍微调整一下设计工具，设计工具在实际测量的基础上开发得更加完善，我们一直在为积累这方面的一手数据做出努力。

5 结论

这篇论文介绍的发电机定子绕组线棒的真实温度，在发电机上通常是不测量的。

归纳出以下结论：

- 我们测量了绕组线棒的温度，但测出的 RTD 温度与顶部和底部的绕组的平均温度是不同的，温度分布也是不同于平常我们想象的。
- 我们开发了精确的温度计算工具，该工具还在不断改进中。
- 这些技术可以被应用到所有的发电机，包括氢冷和水冷发电机。
- 通过一个温度设计数据库的实例给出了证明。

参考书

- [1] 冈部 H, 服部 K, 美哉 I, 泽田.S, 泽田.I, 渡边.T 《通过实时监测对 250MVA 类水轮发电机组进行性能评估》 IEE 日本分会, RM-02-129 (2002-10) (日语)
- [2] 服部 K, Ide K, 高桥 K, 小林 K.敬 H, 渡边 T 《对 250MVA 空冷汽轮发电机组的效率考证研究》 IEMDC 2003
- [3] 高桥 K, Ide K, 小野田 M, 服部 K, 佐藤 M, 高桥 M 《汽轮发电机绞线电流分布的全比例模型线圈》 [C] // int. Conf.on 电机、 论文 139, 2002
- [4] 渡边 T, 高桥 K, Ide K., 服部 K 《涡轮发电机进展与高度精确的分析设计》 IEE 日本分会, RM-04-143 (2004-10) (日语)
- [5] 森喜朗 H, 盐原 R, 服部 K 《平行轴旋转矩形通道的传热特性》 日本机械学会报 B, 2000-10:66 (650) (日语)

BIBLIOGRAPHY

- [1] Okabe H, Hattori K, Miyasashita I, Sawada S. Sawada I, Watanabe T. Performance Evaluation of a Turbine Generator through a thorough Measurement on the Actual 250MVA-Class Machine, IEE Japan, RM-02-129 (2002-1 (in Japanese)
- [2] Hattori K, Ide K, Takahashi K. Kobashi K. Okabe H, Watanabe T. Performance Assessment Study of a 250MVA Air-cooled Turbo Generator, IEMDC, 2003
- [3] Takahashi K, Ide K. Onoda M. Hattori K, Sato M, Takahashi M. Strand Current Distributions of Turbine Generator Full-Scale Model Coil[C]// Int. Conf.on Electrical Machines, Proceedings paper 139, 2002
- [4] Watanabe T, Takahashi K. Ide K. Hattori K. Turbine Generators Progress with Highly precise Analysis Design. IEE Japan, RM-04-143 (2004-10) (in Japanese)
- [5] Mori H, Shiobara R, Hattori K. Heat transler Characteristic of Rectangular channel Rotating on a Parallel Axis, JSME B, 2000-10 : 66 (650) (in Japanese)