基于在线气体分析的旋转机定子绕组劣化诊断

Online Gas Analysis for Deterioration Diagnosis of Rotating Machinery Stator Winding

中山　昭伸 NAKAYAMA, Akinobu　　**石井　佑一** ISHII, Yuichi

旋转机的定子绕组绝缘会因运行中的电气和机械、热、环境等复合压力而发生经年劣化。特别是一旦定子绕组的绝缘表面发生劣化，就会产生腐蚀性气体，导致旋转机内部的金属部件破损，甚至突发事故。为解决上述问题，富士电机通过简便的测量系统定量测量腐蚀性气体，确立了判断定子绕组绝缘表面劣化程度的方法。通过在该在线（运行中）气体分析中结合传统的离线（停止中）检查，可进行更加多方面、细致的评价诊断，从而及时且准确地掌握绝缘劣化的状态。

The stator winding insulation of rotating machines deteriorates over time due to the composite stress of the electrical, mechanical, thermal and environmental factors during operation. In particular, corrosive gases will be emitted when the insulating surface of the stator winding deteriorates. This can damage the metal parts inside rotating machines, potentially leading to a sudden accident. To solve this problem, Fuji Electric established a method that uses a simple measurement system to quantitatively measure corrosive gases and determine the degree of surface deterioration of stator winding insulation. Combining this online (during operation) gas analysis with conventional offline (during stoppage) inspections can perform more multifaceted and detailed assessments and diagnoses, allowing operators to quickly and accurately understand the state of insulation deterioration.

1　引言

发电机和电动机等旋转机的定子绕组绝缘会因运行时产生的电气、机械、热和环境等复合压力而发生经年劣化。特别是一旦定子绕组的绝缘表面发生劣化，就会因绝缘表面的局部放电产生 O_3（臭氧）和 NO_X（氮氧化物）等腐蚀性气体。而 NO_X 会与空气中的水分结合，产生 HNO_3（硝酸）。结果将导致旋转机内部金属部件腐蚀，从而造成破损。破损的部件在离心力的作用下会发生飞散，有时甚至会撞击旋转机中原本完好的主要部位，造成机械损坏等突发事故。

富士电机的旋转机虽然未因绝缘劣化产生的腐蚀性气体而导致机械损坏等事故，但为了提供可将此类故障和事故防患于未然的最佳维护保全方案，通过使用简易的测量系统在运行过程中对 O_3 和 NO_X 进行定量测量，确立了推测定子绕组绝缘表面劣化程度的方法。

2　特点与测量方法

(1)　特点

以旋转机为例，**图 1** 所示为发电机截面与其定子绕组。传统方式是通过定期检查时的诊断和检查来掌握旋转机的故障和劣化状态。因此，如果定期检查的间隔长或定期检查延长，则检查次数就会减少，导致长时间无法掌握故障情况。

另一方面，基于在线（运行中）气体分析的劣化诊断具有以下特点。

(a)　在运行过程中，可随时进行测量。

(b)　无需传统的用于绝缘诊断的大型器材和大量人员。

(c)　短时间（半天左右）内即可完成测量。

(d)　通过 O_3 和 NO_X 的定量测量，可评价定子绕组绝缘表面的劣化程度。

(e)　如果与停机时和定期检查时的精密诊断和绝缘诊断相结合，则可进行更为全面细致的评价诊断。

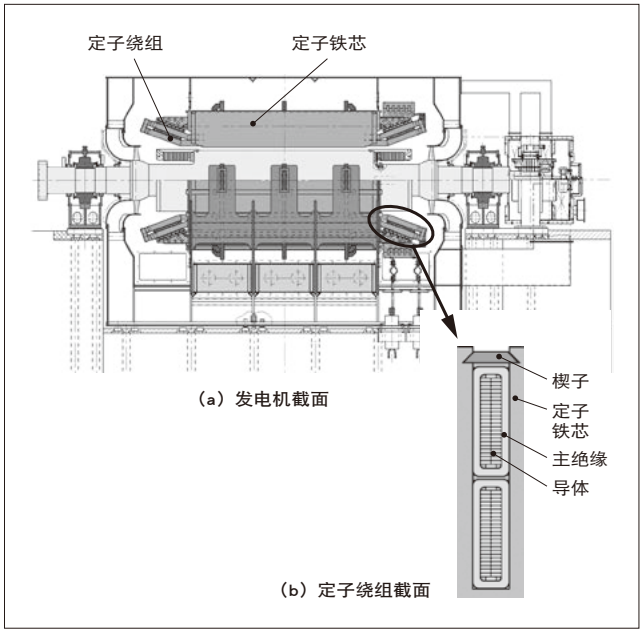

图 1　发电机截面与定子绕组

(2)　测量方法

图 2 所示为发电机在线气体分析的测量例。在旋转机运行过程中，拆下固定定子框架检修盖的螺钉，从螺丝孔中采集机内气体，利用 O_3 和 NO_X 气体检测管测量气体浓度。因产生的气体种类和浓度会随着定子绕组绝缘表面的劣化程度发生变化，所以诊断时可通过测量 O_3、NO_X 气体来评价定子绕组绝缘表面的劣化程度。

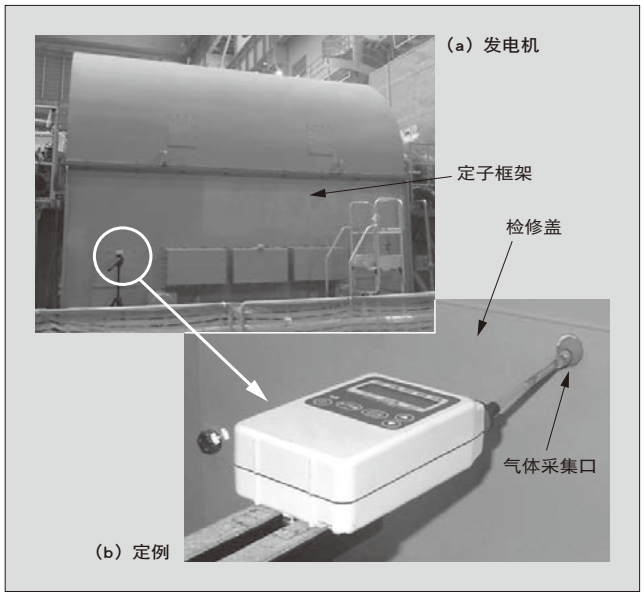

图 2　发电机在线气体分析的测量例

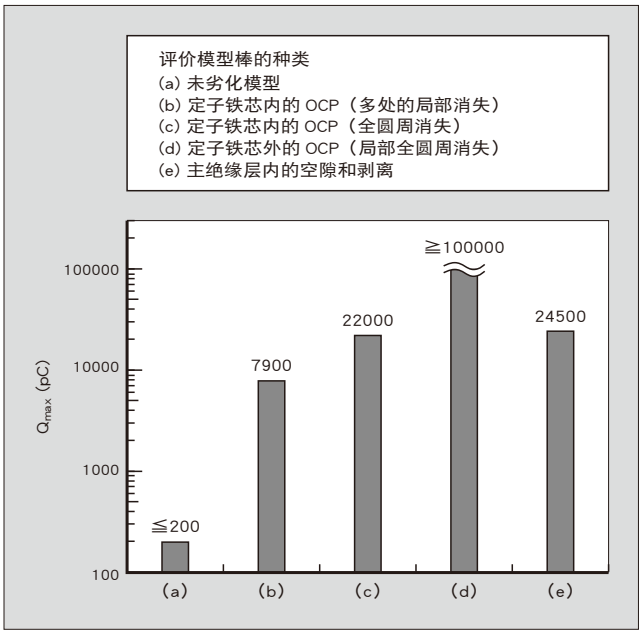

图 3　模型的种类与 Q_{max}

3　开发概要

旋转机的定子绕组在运行过程中会不断产生局部放电，并会随着经年劣化而增加。首先，以局部放电的测量值为基础，求出此时产生的 O_3 和 NO_X 的浓度。

3.1　局部放电与产生气体的关系

使用定子条形线圈（模仿定子绕组的直线状模型线圈），调查了劣化造成的局部放电与 O_3、NO_X 的气体浓度的关系[(1)]。

如**表 1** 所示为准备未劣化的样品和旋转机定子绕组绝缘发生疑似劣化损伤的四种样品。使用上述样品在模拟了旋转机框架的金属壳体中放入模型棒，施加约 3 kV/mm 的电场，用局部放电测量器测量了最大放电电荷量 Qmax。使用气体检测管测量了持续施加 1h 电场后壳体内的 O_3 和 NO_X 的浓度。

测量结果如**图 3**、**图 4** 和**图 5** 所示。铁芯内 OCP 部分消失的模型棒(b)和整个圆周中所有 OCP 消失的模型棒(c)的 Q_{max} 比较高。另外，模型棒(b)和(c)的 O_3 浓度高达 37 ppm 和 280 ppm，但 NO_X 在检出限以下。

此外，假定铁芯出口 OCP 的一部分消失的模型(d)，

表 1　样品的种类

模型棒		备注
a	○未劣化	比较用试样
b	○假定定子铁芯内存在 OCP* 侵蚀 ○模型棒表面的 OCP 部分消失	—
c	○假定定子铁芯内存在 OCP 侵蚀 ○模型棒表面的 OCP 全圆周消失	—
d	○假定铁芯外 （铁芯出口） 存在 OCP* 侵蚀 ○模型棒表面的 OCP 部分全圆周消失	表面存在残留 OCP
e	○主绝缘层内部劣化 （空隙和剥离）	与 OCP 劣化导致的表面放电相比较

★ OCP ： 外部防电晕保护层 （Outer Corona Protection）

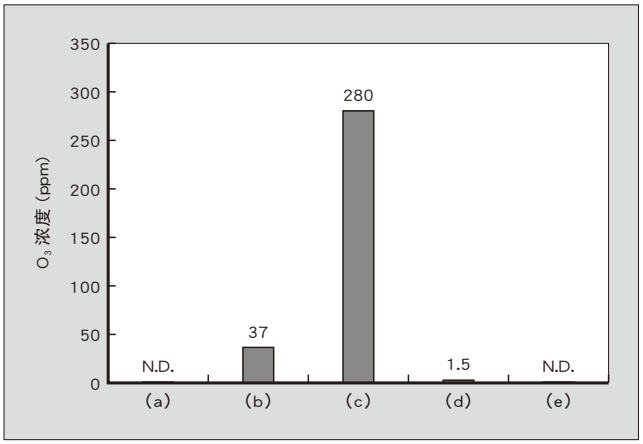

图 4　模型的种类和 O3 浓度

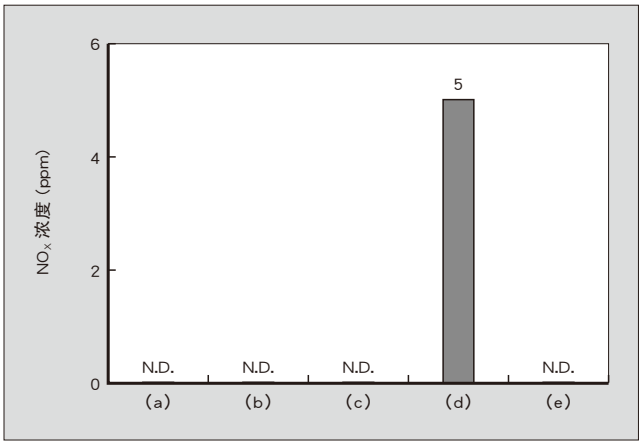

图 5　模型的种类与 NO_X 浓度

Q_{max} 最高，在 100000pC 以上。O_3 为 1.5 ppm，比上述模型棒(b)和(c)少，但检出了 5 ppm 的 NO_X。而假定主绝缘层内部劣化的模型棒(e)，其 Q_{max} 为 24500pC，与铁芯内的 OCP 全面消失的模型棒(c)的 22000pC 大致相同，但

O_3、NO_X 均在检出限以下。

由以上可知，O_3 和 NO_X 的产生主要是由定子棒表面的放电引起，各自的发生量与放电的发生部位和 Q_{max} 的大小有关。

3.2 外部防电晕保护层（OCP）的材质与产生气体的关系

通过 **3.1 节**发现，表面放电引起的最大放电电荷量和气体产生量随着 OCP 的劣化状态而变化。

随后，调查了 OCP 的基材材料（3 种：聚酯类、芳香族聚酰胺类、玻璃类）的依赖性[2]。利用高温高频供电试验装置使模型棒加速劣化，测量了 OCP 劣化时的侵蚀开始时间。之后，将 OCP 侵蚀扩大的模型棒放入玻璃管中，施加约 3 kV/mm 的电压，从一侧通入 100 ml/min 的空气时，利用气体检测管测量了 O_3 浓度。

图 6 所示为不同 OCP 基材的侵蚀开始时间的测量结果。OCP 的材质为聚酯类时，侵蚀开始时间较短，为 100 h 左右，芳香族聚酰胺类为 520 ～ 740 h 左右，玻璃类最长，为 800 h 左右。另外，我们还发现，各材质的腐蚀开始时间均与电场强度关系不大。为了抑制定子绕组表面 OCP 的放电劣化，确保耐久性，所用绝缘材料的选择很重要。

图 7 所示为发生 OCP 侵蚀的模型棒侵蚀面积与产生气体浓度关系的调查结果。可以看出，随着定子绕组表面 OCP 侵蚀的发展，O_3 的发生量增加。

由此可知，OCP 侵蚀开始时间受 OCP 材质的影响极强，侵蚀面积越大，O_3 气体的发生量越多。

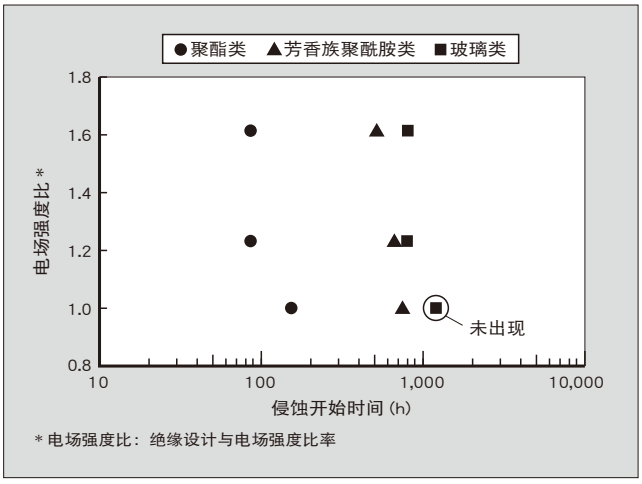

图 6　OCP 不同基材的侵蚀开始时间

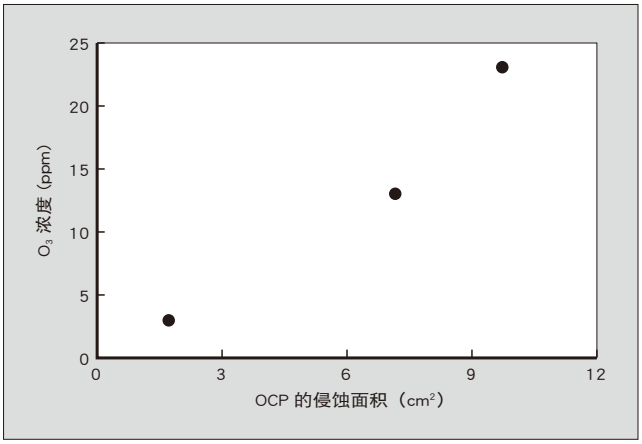

图 7　OCP 的侵蚀面积与 O_3 浓度的关系

4　应用实例

4.1 实机测量

该在线气体分析主要适用的机械为 3.3 kV 以上的空气冷却涡轮发电机。2017 年运行时便开始测量，迄今为止，一直用于日本国内和国外的本公司及其他公司的发电机诊断。

测量结果的概要如**表 2** 所示。除新发电机外，测量对象还包括 36 年前制造的发电机。包括新发电机在内，55% 的 O_3 和 NO_X 都在检出限以下，因此判断定子绕组表面的绝缘没有问题。

在线气体分析的测量推荐频率如**表 3** 所示。持续测量，进行趋势管理，掌握劣化的突变点很重要。对于检测出 O_3 和 NO_X 的发电机，因生成的 HNO_3 形成的酸性环境可能导致金属部件腐蚀劣化等，推荐每半年进行一次在线分析。此外，为了掌握劣化程度，同时获得确凿依据，推荐将离线（停止中）检查时的精密诊断和绝缘诊断与在线分析相结合，详情请见下节。

4.2 在线与离线的结合

旋转机的检查包括简易检查和进行精密检查与电气绝缘诊断等全面检查。如**图 8** 所示，如果将传统的离线诊断服务和该在线气体分析结合起来进行综合评价，则可进行更全面、细致的评价诊断。作为修补和更新的判断依据，可更及时且准确地掌握绝缘老化的状态。

表 2　测量结果概要

O_3 的检测	NO_X 的检测	与总测量数的比例 (%)
未检测	未检测	55
≧ 0.1 ppm	未检测	27
≧ 0.1 ppm	≧ 0.05 ppm	18

表 3　测量的推荐频率

有无检测出腐蚀性气体		推荐频率	备注
O_3	NO_X		
未检测	未检测	约 1 年	—
检测	未检测	约 1 年	—
检测	检测	约半年	精密诊断 （公开检查）和绝缘检查的建议

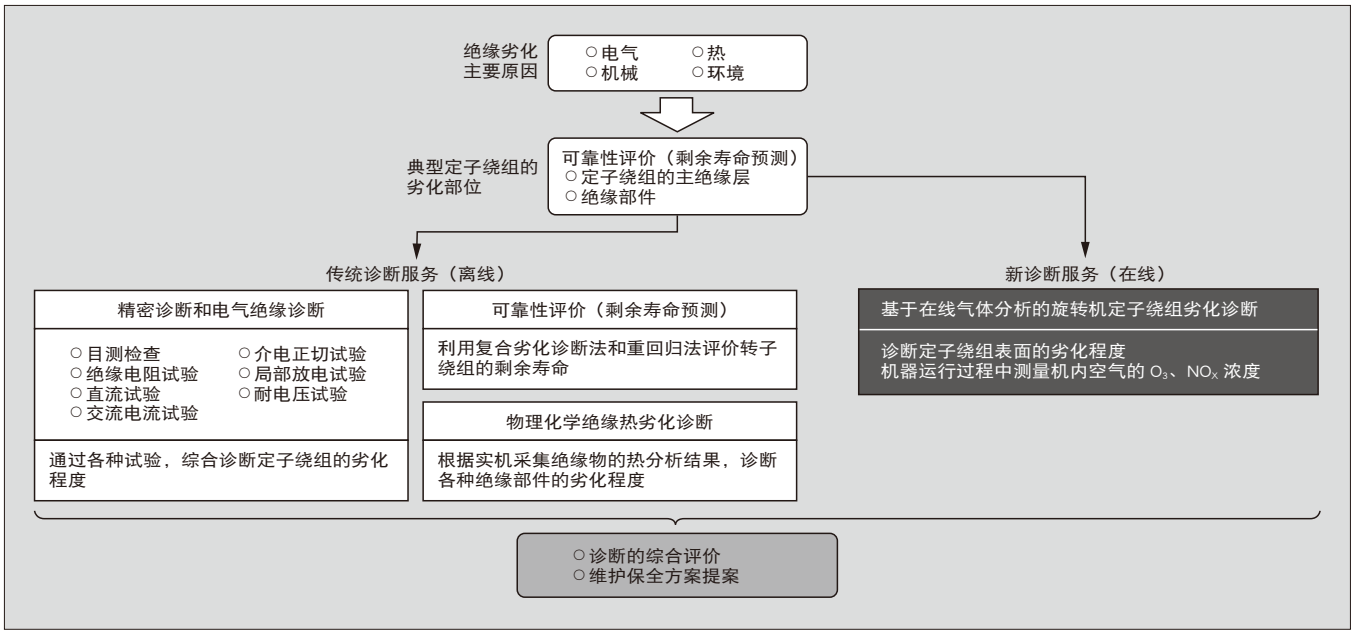

图 8　结合在线气体分析和传统诊断服务的定子绕组综合评价

5　后记

以上对基于在线气体分析的旋转机定子绕组老化诊断进行了说明。

富士电机建议用户通过定期在线分析进行诊断。即使没有故障，通过继续在线分析，也可掌握绕组绝缘表面是否完好或劣化的起点。发现劣化时，可掌握劣化程度的变化情况，得到与使用风险相关的一个指标。

今后，富士电机将结合在线气体分析的测量数据和通过定期检查得到的实际劣化和损伤状态，推进更高效、更高精度的评价。

参考文献

⑴　石井佑一ほか．発電機固定子巻線の部分放電と発生ガス．電気学会全国大会．2-049, 2018.

⑵　石井佑一ほか．発電機固定子巻線における外部コロナ防止層の浸食と発生ガス．電気学会全国大会．2-053, 2019.

中山　昭伸

从事旋转机绝缘的开发，涡轮发电机的结构设计。现为富士电机株式会社发电成套设备事业本部服务统括部火力地热服务技术部主任。

石井　佑一

旋转机绝缘的开发。现就职于富士电机株式会社发电成套设备事业本部川崎工厂旋转机械部。电气学会会员。

富士电机

Fuji Electric

＊本刊记载的公司名称及产品，有可能是各相关公司的商标或注册商标。