# 变电设备小型化的最新设计与分析技术

## Latest Design and Analysis Technologies for Miniaturizing Substation Equipment

彦坂　知行 HIKOSAKA, Tomoyuki　　林田　广和 HAYASHIDA, Hirokazu　　榎并　义晶 ENAMI, Yoshiaki

为满足变压器和开关装置等变电设备的小型化需求，确立了比传统变电设备缩小 30% 以上的设计与分析技术。变压器则确立了三维电场分析技术、磁场分析技术、热流体分析技术，与各验证模型的实测结果对比发现，新开发的出口型 50 MVA 变压器容积减少 30%。开关装置利用电路、电磁场、热流体耦合分析技术，电场、热流体耦合分析技术等，以求改善品质。最终，成功开发出了安装面积减少 30%、重量减少 35% 的 145 kV 新型 GIS。

To meet the need of miniaturization for substation equipment, including transformers and switchgear, Fuji Electric has developed design and analysis technologies capable of miniaturizing conventional substation equipment by 30% or more. We have developed a 50-MVA transformer for overseas markets that achieves a 30% reduction in volume. This downsizing was achieved by collating the measurement results from verification models created with three-dimensional electric field analysis, magnetic field analysis, and thermal fluid analysis technologies that we have established. We have also developed a new 145-kV GIS that achieves installation space savings of 30% and mass reduction of 35% by utilizing coupled analysis technologies for electric circuits, electromagnetic fields and thermal fluids, as well as coupled analysis technologies for electric fields and thermal fluids.



## 1　引言

变压器和开关装置等变电设备是构成变电站这一电力基础设施建设核心的主要设备。一旦发生故障，对社会造成的影响大，因此对变电设备的品质和可靠性有很高的要求。另一方面，在城市地区变电站用地的获取愈发紧张，即使征得到，面积也极其狭小。为此，变电设备小型化需求日益增高。

富士电机拥有半个世纪以上的变压器和开关装置开发生产实绩，产品遍布全球。在维持原有装置可靠性的同时，确立了比传统变电设备体积缩小了 30% 以上的设计与分析技术。本文将对该最新设计与分析技术进行论述。

## 2　变压器最新设计与分析技术

根据客户的规格要求，变压器按单个产品进行设计、制作。

为实现高电压化、小型化和低损耗，开发时重视现象和原理的阐明、各种参数变化引起的现象变化、分析与实绩的整合等，花费大量时间进行了大规模分析。另一方面，在设计时，需兼顾交货期和品质，进行大规模分析时有时间上的限制。因此，以前是通过以开发时所用的分析技术为基础编辑的简易计算程序和二维分析等来缩短计算时间。

近年来，随着三维 CAD 和计算机硬件及软件的发展，设计时可进行高精度的三维分析。因此，富士电机也积极地将三维分析应用于设计，以提高电力用变压器的小型化和可靠性。其中，作为最新的三维分析技术，介绍电场分析技术、磁场分析技术、热流体分析技术，并论述其技术成果在产品中的应用情况。

### 2.1　电场分析技术

连接变压器绕组和衬套的引线为三维配置。因此，三维电场分析对决定引线与油箱间的绝缘距离方面有效。

**图 1** 所示，为引线绝缘验证模型。以绝缘距离、引线导体的直径和绝缘纸的厚度为参数，测定了相对于正弦波电压施加条件和脉冲电压施加条件的绝缘击穿电压。根据其测定值，通过如**图 2** 所示的三维电场分析，确认了需要绝缘破坏

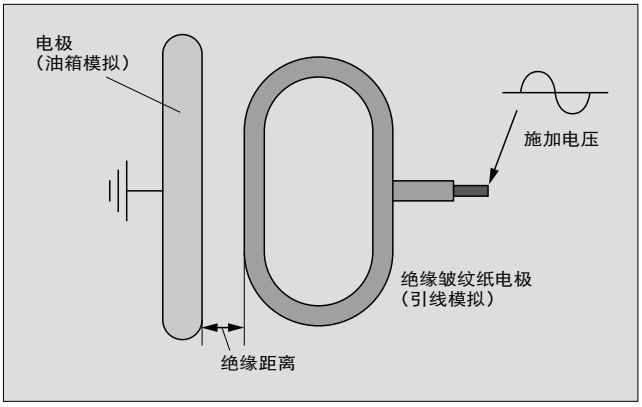


图 1　引线绝缘验证模型

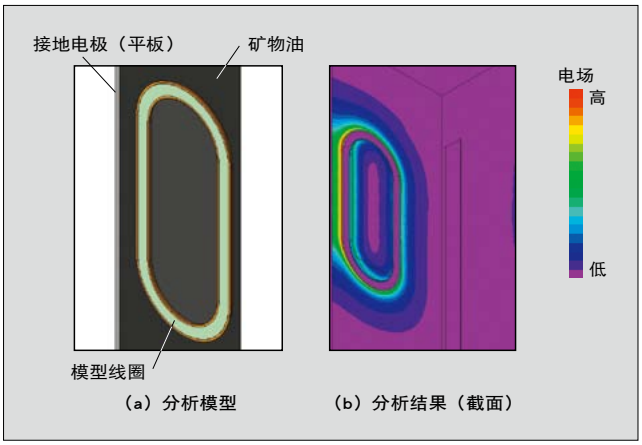


图 2　引线绝缘验证模型的电场分析结果例

电场。随后，还验证了以往对照二维电场分析结果和实测结果决定的引线与油箱间绝缘距离设计基准的妥当性。其结果表明，引线与油箱间的绝缘距离可比以前缩小约 15%。

### 2.2 磁场分析技术

正确把握变压器油箱和框架中所用的普通钢和高张力钢等结构材料的磁特性，对评估变压器内磁通引起的负载杂散损耗〈注 1〉而言非常重要。

为掌握一般结构用轧钢 SS400 的涡流引起的杂散负载损耗，制作了切成外径 $\phi$60 mm、内径 $\phi$48 mm 的环状样品，测定了磁通在结构材料的板面内流动时的损耗。另外，还制作了如**图 3** 所示的 30 mm 见方的测定模型，测定了磁通在板面的垂直方向（堆积方向）上流动时的损耗。**图 4** 所示为**图 3** 板面垂直磁通测定模型的三维磁场分析结果示例。**图 5** 所示为传统方法的分析结果、新导入等效电导率〈注 2〉的分析结果与实测值的比较。通过导入等效电导率，特别是在磁通密度大的领域，其计算精度得到了提高[1]。

### 2.3 热流体分析技术

以前，热流体的三维分析计算规模大，需要很长时间。

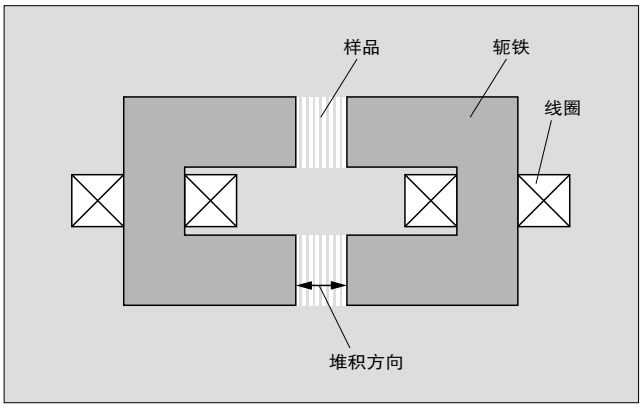


图 3　板面垂直磁通测定模型

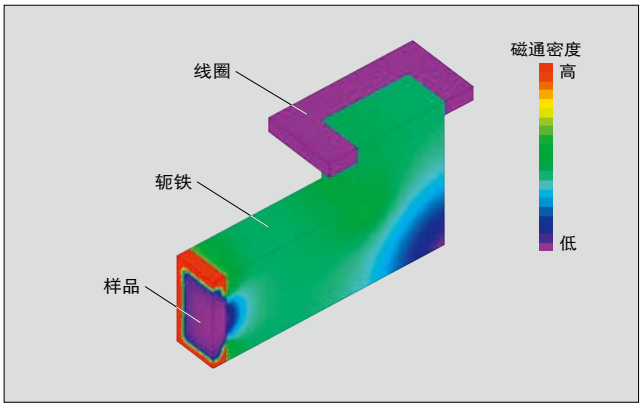


图 4　三维磁场分析例

〈注 1〉杂散负载损耗：来自绕组的漏磁通与结构材料交链而产生涡电流，由该涡电流产生的损失

〈注 2〉等效电导率：为正确评估负载杂散损耗而导入的、考虑到了趋肤效应的电导率

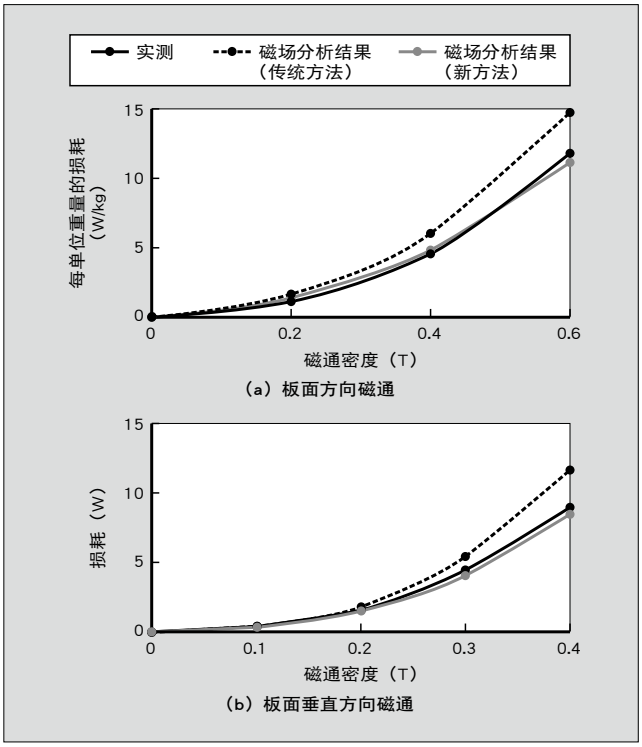


图 5　传统方法与考虑到了等效电导率的新方法的比较

但近年来，随着计算技术的发展，对**图 6** 所示计算规模大的全系统模型的计算也已成为可能。

为提高绕组内的冷却效率，按照实际尺寸制作了内部结构不同的以下 3 种绕组，测定了绕组内部的温升。

- ○ 案例 1：管流绕组
- ○ 案例 2：Z 型流绕组（改进型）
- ○ 案例 3：Z 型流绕组（传统型）

**图 7** 所示为通过三维热流体分析计算出的绕组内温度分布与绝缘油的速度分布。另外，如**图 8** 所示，在绕组内的 5 处实测的温度与**图 7** 的分析值基本一致。

利用这种三维热流体分析，实现了绕组结构的优化，促进了变压器的小型化。

### 2.4 成果应用

将这样确立的三维电场、磁场、热流体的分析技术应用

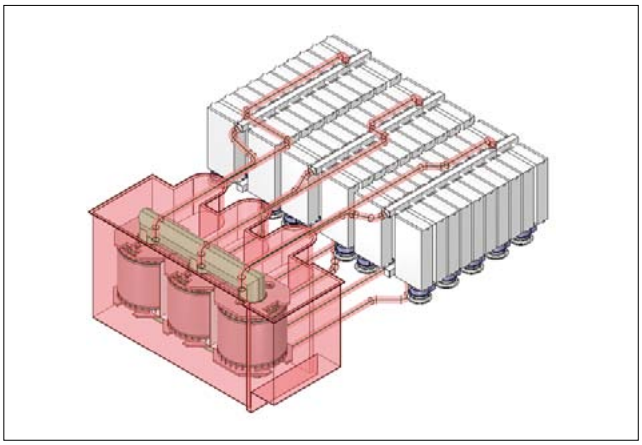

图 6　全系统（绕组、铁芯、冷却器）热流体分析模型

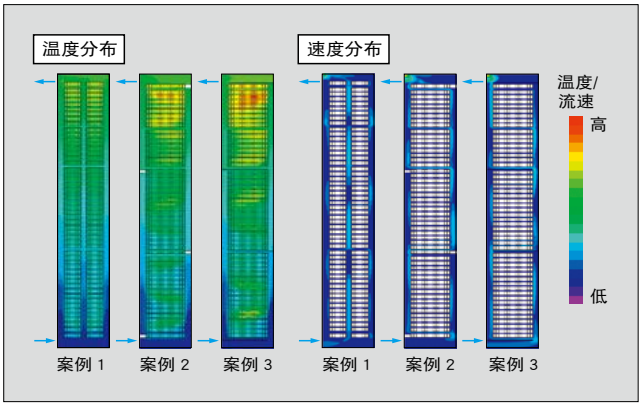


图 7　绕组温度分布与绝缘油速度分布的分析结果

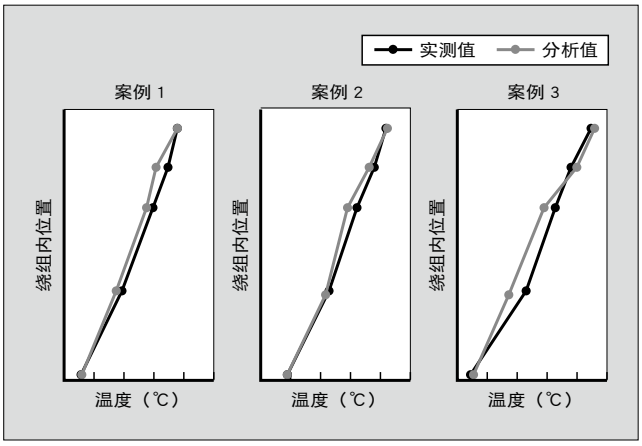


图 8　绕组温度分布的实测与分析结果的比较

图 9　缩小型变压器

于**图 9** 所示的出口型 50 MVA 级变压器的开发，与传统产品相比体积缩小了 30%。

## 3　开关装置的最新设计与分析技术

### 3.1　耦合分析技术

为推进气体绝缘开关装置（GIS）的小型化与轻量化，富士电机按照**图 10** 所示的耦合分析流程，对气体断路器（GCB）的电流切断性能进行了评估。

电路分析单元将 GCB 触点间电弧电流的计算结果传给

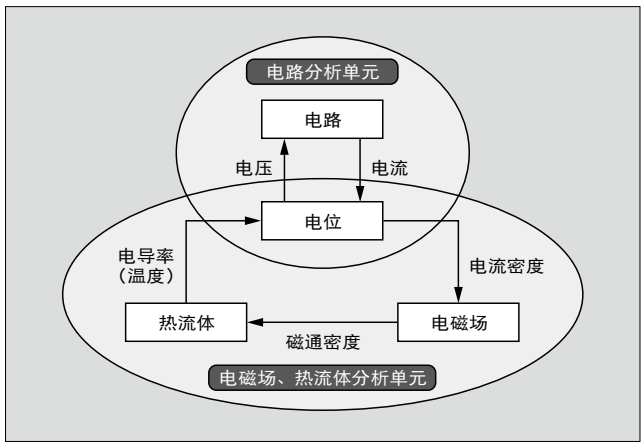


图 10　耦合分析流程

电磁场、热流体分析单元。另一方面，从将自制的电磁场分析程序编入了流体分析软件的用户代码中的电磁场、热流体分析单元接收电弧电压的计算结果。电磁场、热流体分析单元计算电弧的温度和电导率。

### 3.2　电流切断分析技术

为求出电流切断后的绝缘性能，按照**图 11** 所示的顺序进行了分析。因电流切断时产生的高温而膨胀的热气体从灭弧室向三相导体的相间以及油箱处流出。将用热流体分析求得的热气密度分布的时间变化传递给电场分析。电场分析求出热气对电场强度的影响，评估绝缘恢复性能[2]。

因灭弧室是轴对称的，故电流切断分析采用考虑了动触头的移动、喷嘴的烧蚀造成的气体、辐射传热的二维轴对称分析模型，以缩短分析时间。另外，为兼顾计算速度和精度，自动调整网格尺寸和计算时间，在切断之前缩短时间刻度，同时使电弧存在部分的网格分割变细，从而捕捉到电弧形状的变化。

额定电压为 145 kV 的 GIS，在电流 36 kA、频率 50 Hz、90%SLF（Short Line Fault：相邻线路故障）的条件下，电弧发生后经过 12.0 ms 和 19.4 ms 时的电流零点时（电流切断时，从电弧产生开始到变成电流零点为止的时间）的温度分布分析结果如**图 12** 所示。

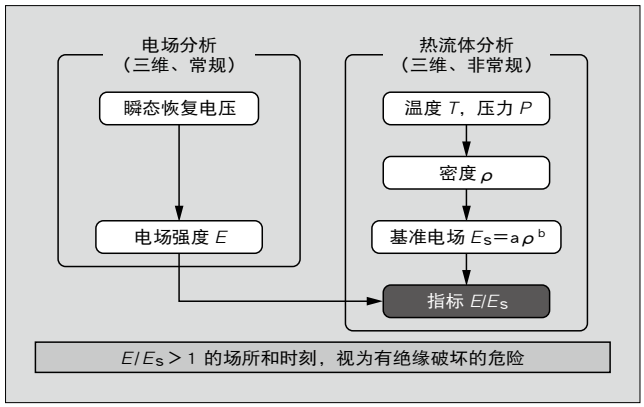


图 11　绝缘恢复分析流程

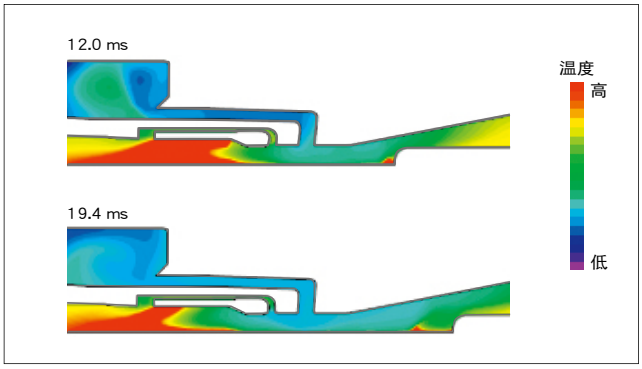


图 12　灭弧室温度分布分析示例



### 3．3　绝缘恢复分析技术

通常，$SF_6$ 气体的绝缘破坏电场 $E_s$ 与密度的乘方成正比，因此通过利用热流体分析求出的气体密度来计算绝缘破坏电场。

首先，按照**图 13**(a)所示的形状进行电场分析，求出各部分的电场强度 $E$。接着，将通过热流体分析计算出的从各相的灭弧室流出的热气体流量和温度给予**图 13**(b)的热气体流出面，求出在评估绝缘性能的导体表面上的气体密度分布的时间变化，比较绝缘破坏电场强度 $E_s$ 和电流切断时随时间变化的气体密度所引起的电场强度 $E$。如**图 11** 所示，作为实际评价指标，在所有的时刻和场所均使用两者之比 $E/E_s$。

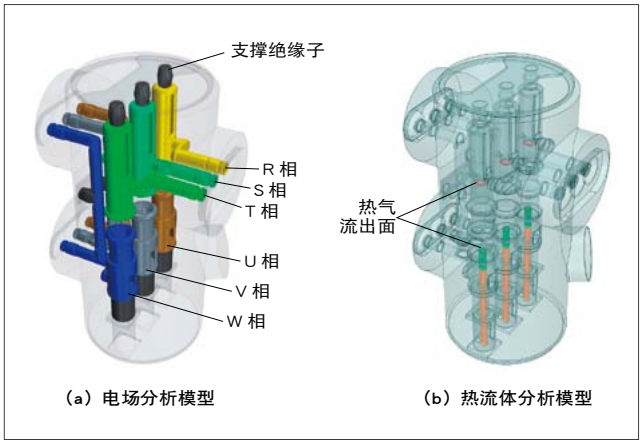


图 13　绝缘性能分析模型

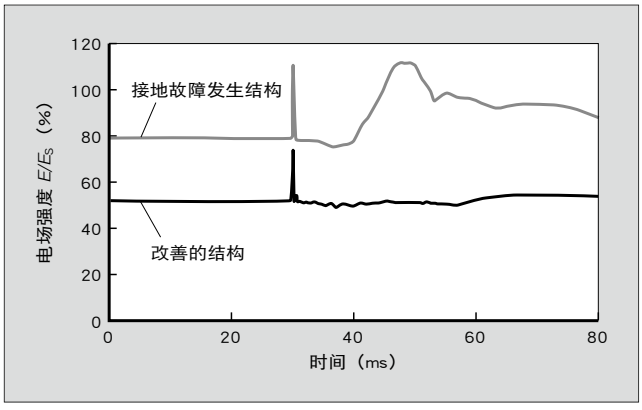


图 14　基于形状改善的绝缘性能提升例

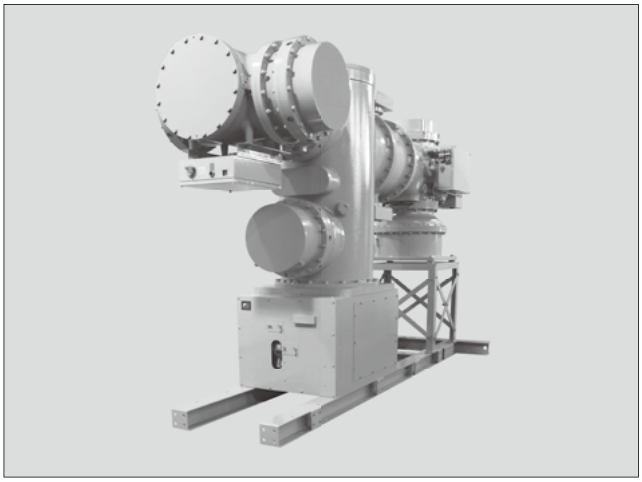

图 15　145 kV 缩小型 GIS 外观

利用该方法计算出的 $E/E_s$ 的时间变化结果如**图 14** 所示。在发生接地故障的结构中，$E/E_s$ 超过 100%，与此相对，在改进后的结构中，降至 80% 以下，确认了可防止接地故障的发生[3]。

### 3．4　成果应用

为利用以上的耦合分析技术等改善品质，开发了如**图 15** 所示的缩小型 GIS，安装面积降低了 30%，重量降低了 35%。

## 4　后记

本文论述了变电设备小型化的最新设计与分析技术。

从全球范围来看，预计今后电力基础设施建设的需求会愈加旺盛。预测变电设备的小型化需求也将继续高涨。

作为变电设备的领先制造商，富士电机今后也将在考虑环保的同时，致力于变压器及开关装置的小型化和品质的提高。今后，富士电机仍将脚踏实地，提高设计与分析技术，提供符合客户需求的变电设备。

**参考文献**

(1)　今盛聡ほか. 変圧器用構造材の渦電流損特性. 平成 31 年電気学会全国大会. 2019, no.5-154, p.266-267.

(2)　榎並義晶ほか. ガス遮断器の回路 - 電磁場 - 熱流体連成解析. 平成 30 年電気学会全国大会. 2018, no.6-048, p.61-62.

(3)　榎並義晶ほか. ガス絶縁開閉装置の電流遮断時の絶縁性能解析. 平成 31 年電気学会全国大会. 2019, no.6-010, p.12-13.

**彦坂　知行**

从事高电压设备的开发、新事业开发、变压器开发、工程业务。现为富士电机株式会社电力电子系统能源应用事业本部能源管理事业部电力变电技术部主审。电气学会会员。CIGRE 会员。IEEE 会员。

**林田　广和**

从事油浸式变压器的开发、设计。现就职于富士电机株式会社电力电子系统能源事业本部千叶工厂设计第一部。电气学会会员。

**榎并　义晶**

从事固体高分子型燃料电池的开发和热流体仿真的研究业务。现为富士电机株式会社技术开发本部数字创新研究所平台中心数字工程部主审。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。