基础和前沿技术

基础技术
前沿技术

展望

为创造更多的顾客价值，富士电机倾注全力，在力求开发强大的组件、系统及解决方案的同时，也致力于支持这种开发的基础技术和实现差异化尖端技术的研究开发。

在材料技术方面，致力于实现差异化的研究开发，例如应用计算科学设计替代 SF_6 的绝缘气体等。为实现高电压设备的小型化，正在推进利用填料优化介电常数，开发绝缘材料，以及利用计算科学设计新型材料等。

富士电机为了实现 SiC（碳化硅）器件的低电阻和高可靠性，运用最先进的分析解析技术和计算科学，在掌握机理的同时积极推进研究工作。开发了分析反应引起的材料分子结构变化的分子仿真技术，可用于 SiC-MOSFET 的栅极氧化膜界面的缺陷分析，确定影响性能的缺陷结构。

在 SiC 的下一代功率器件方面，富士电机正在开发使用了 GaN（氮化镓）的立式 MOSFET。其重点是通过离子注入形成 p 型和控制 MOS 界面。确立了在 p 型（Mg）注入层上形成原子层级平坦 MOS 界面的技术，在 GaN 基板上仅通过离子注入即可形成立式 MOSFET 结构，成功地进行了常闭 FET 动作。

作为搭载了 SiC 器件的电力电子设备，开发了搭载了 3.3 kV 耐压 SiC 功率器件的 MMC（Modular Multilevel Converter）。该装置可在没有连接变压器的情况下与 6.6 kV 电力系统相连接，在达到 98.5% 效率的同时，也可通过独立的单相变频器直流电压均衡控制，进行反相功率补偿。

另外，富士电机也在推进提高高压设备可靠性的技术开发。探明了粉尘在汇流条间的放电机理，建立了可进行适当绝缘设计的设计技术。

在热能技术方面，开发了使用两阶段压缩的压缩机的高效 150 ℃高温蒸汽发生装置，实施了可有效利用低温排热的现场试验。

随着可再生能源的普及，大规模风力发电站受雷电浪涌的影响令人担忧。利用一般财团法人电力中央研究所开发的浪涌分析程序，把握风车和配电网的详细浪涌特性，通过电力系统分析程序将其特性模型化。通过上述方式，确立了可高精度地分析大规模风力发电系统浪涌的技术。

在控制技术方面，开发了可通过边缘元件执行利用成套设备模型的预测来控制的模型预测控制技术。以前需要高速计算机，但是通过应用公式处理技术，实现了高速化，并搭载在可编程控制器（PLC）“MICREX-SX”上。

为提高开发效率，从开发初期开始即对开发对象进行了模型化，正在推进引入利用详细仿真方式的模型基础开发方法。例如，对所有伺服系统的控制放大器、电动机、机械负载制作详细模型，将基于模拟环境下虚拟试验结果的控制放大器模型应用于产品的控制程序。

进展显著的人工智能（AI）技术的应用也在推进。目前正在开发使用了 AI 的图像识别技术，该技术可通过正常产品的图像数据学习特征，并可阶段性 的对具有不同特征的图像进行分类。以依赖于检查员官能的外观检查自动化为目标，预定将其用于公司内部检查生产线。

AI 在异常诊断中的应用正在推进。为明确判断为异常的根据，正在开发可将异常的影响度进行数字化，并可说明其原因的 AI。

IoT（Internet of Things）技术的应用正在扩大，富士电机也将“Small, Quick Start & Spiral-Up”作为关键词，以丰富的现场元件和富有特色的高级分析技术为武器，不断扩大解决方案。为此，富士电机正在开发必不可少的嵌入式设备安全对策技术。另外，为应对无线网络应用范围的扩大，富士电机也正在开发可高效地向无线设备发送内置固件的自动更新技术。

在软件开发技术方面，微服务备受关注。以适应能力强，可迅速且保质地使用新服务为目标，由多个独立性强的系统构成，为实现这一目标，富士电机正在开发所需的轻便、高速的容器虚拟化技术。

如上所述，富士电机通过挑战前沿技术，全面强化支持产品开发的基础技术，提供实现安全安心、可持续发展社会所需的解决方案。

基础技术

1 高压设备粉尘污损的验证与设计技术

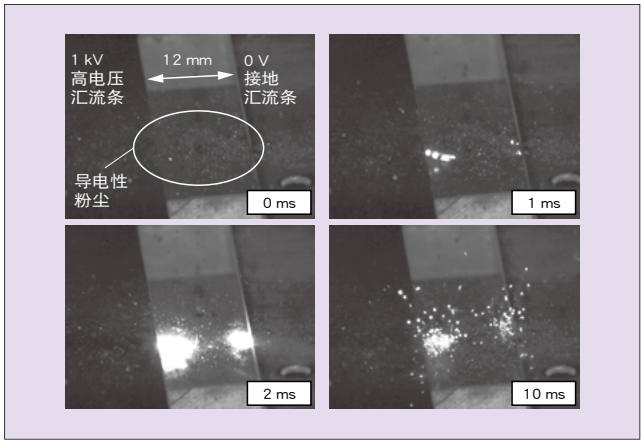
耐污损设计一直以来都是设想了因水溶性污损导致结露时的放电问题，以交流受配电设备的盐侵蚀研究为基础。为提高粉尘环境中使用的电力电子设备的可靠性，建立了检验汇流条间粉尘污损，根据粉尘的性质设置适当绝缘距离，提供安全电力电子设备的设计技术。

⑴ 开关时即使粉尘在汇流条之间完全没有桥接，粉尘颗粒之间或汇流条之间也会产生放电电弧。

⑵ 粉尘在干燥状态下耐压也会明显降低。

⑶ 开关时绝缘沿面的电压分担在污损部和非污损部发生较大变化，任意一处均可能因超过阈值而产生放电。

图1 汇流条间绝缘沿面粉尘污损时直流放电高速观察例

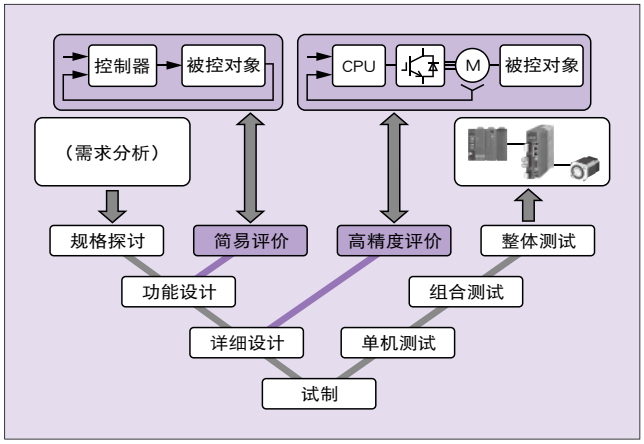


2 基于模型开发方法进行的产品开发

从开发初期开始，将产品及适用对象模型化，进行详细仿真，推进产品开发，这种基于模型的开发方法不断扩大，富士电机在产品开发中也积极引进。

例如，在伺服系统中，针对控制放大器、电动机、机械负载，全部准备了包含运作时间在内的详细模型，在各种模拟环境下进行了虚拟试验。通过将进行过试验的控制放大器模型用于产品的控制程序，提高开发与验证的效率。对于伺服系统以外的机械驱动系统，也引进了同样的开发方法。

图2 使用基于模型的开发方法进行的产品开发与改良举措

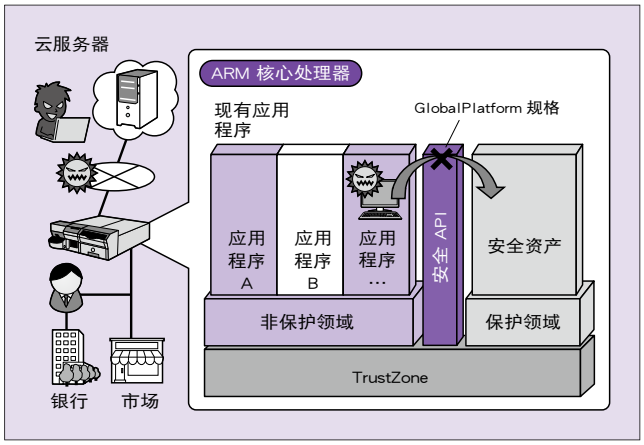


3 针对嵌入式设备的资产保护技术

随着 IoT 的普及，嵌入式设备的安全对策要求比以往更加严格。在用于嵌入式设备的资产保护技术中，利用 ARM 核心处理器的功能 TrustZone，将存储器分为保护区和非保护区，从而保证设备所保存的数据和程序的真实性，提供安全的执行环境。

同时，区域间的通信接口采用了标准化团体 GlobalPlatform 定义的 Trusted Execution Environment 的 API。因此，安全结构设计更加简单，同时也实现了基于功能选择的轻量化。

图3 保护信息资产的执行环境



基础技术

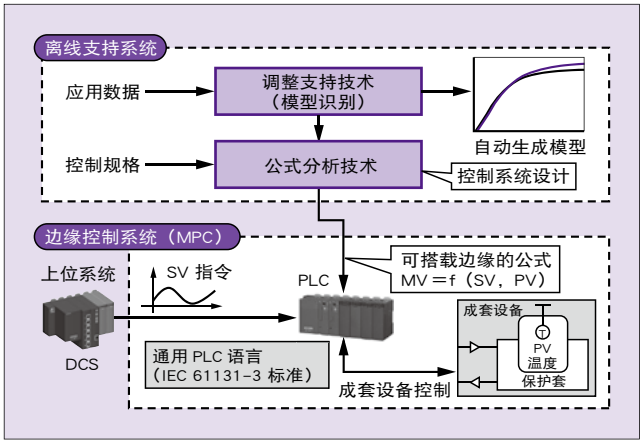
4 可安装在通用控制器中的边缘型模型预测控制

模型预测控制（MPC）是利用成套设备模型预测未来的行为，同时可进行高精度控制的卓越控制方式。但是，以往需要高速计算机。这次，应用公式处理技术实现高速化，使用符合国际标准 IEC 61131-3 的通用 PLC 语言搭载在 PLC“MICREX-SX”上，即使在廉价的边缘元件上也能运行 MPC。通过以下技术，客户成套设备的高精度控制可在有实际使用业绩的控制系统上以低成本实现。

⑴ 根据运行数据制作成套设备模型的“调整支持技术”

⑵ 基于控制规范和成套设备模型，通过公式处理生成最佳控制公式的“公式分析技术”

图4 边缘型模型预测控制的构成例

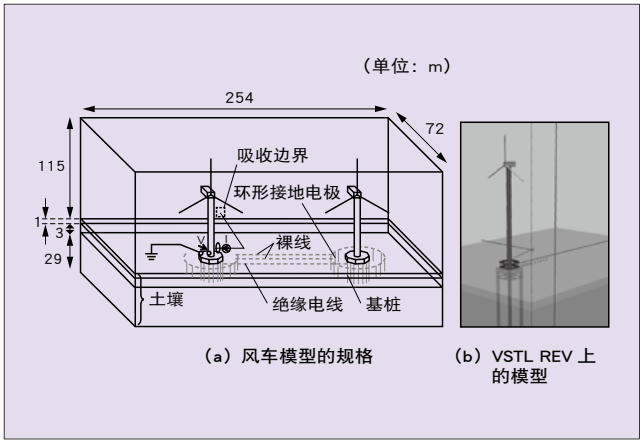


5 大规模风力发电系统的雷电浪涌分析技术

预计风力发电设备将作为主力电源实现大规模化，并被大量引进。人们担心因雷击引起的雷电浪涌导致风力发电设备受损，所以包括输配电网在内的风力发电系统雷电浪涌分析显得越来越重要。

为分析大规模风力发电系统的雷电浪涌，富士电机正在确立使用了一般财团法人电力中央研究所开发的浪涌解析程序 VSTL REV 和电力系统解析程序 EMTP 的仿真技术。使用该技术，通过在 EMTP 上对 VSTL REV 所掌握的风车和配电网的详细浪涌特性进行简易模型化，可对大规模风力发电系统的浪涌进行高精度分析。由此，可进行基于详细预估雷电过电压的绝缘设计。

图5 大规模风力发电系统的仿真模型例



6 无线固件更新技术

随着 IoT 的普及，使用无线网络的业务和产品正在扩大。作为功能改良和故障对策，在更新无线设备中内置的固件时，出现了保养费用增加、保养期间拖长的新问题。

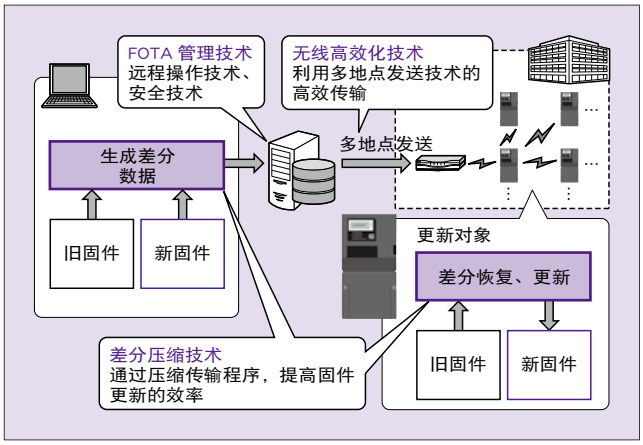
因此，我们正在开发高效发送无线设备固件并进行自动更新的技术（FOTA：Firmware On The Air）。其主要特点如下：

⑴ 利用多地点通信技术，可进行高效数据传输

⑵ 通过差分压缩技术可以削减发送数据量，缩短更新时间

今后，计划将 FOTA 平台化应用于各种业务领域的产品。

图6 通过无线更新固件的系统构成



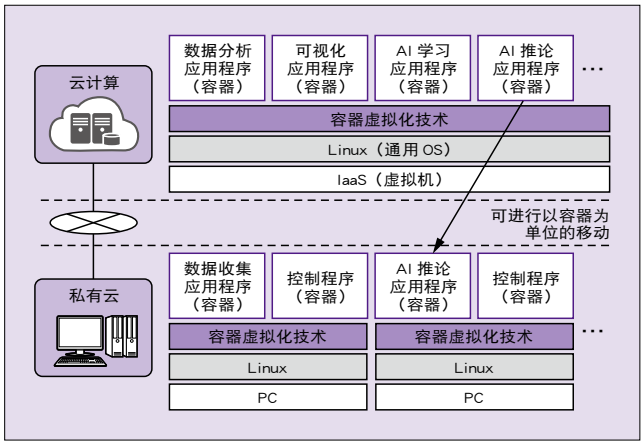
基础技术

7 实现微服务的容器虚拟化技术

在软件开发中，为迅速且优质地提供能应对顾客需求变化的新服务，由独立性较高的多个服务构成系统的微服务化正在兴起。作为实现微服务的手段，使用了轻便（CPU、存储器、磁盘的资源消耗量少）且高速（启动快、附加程序少）的容器虚拟化技术。

容器虚拟化技术可迅速应对包括提供私有云在内的云服务，以及嵌入式设备在内的系统边缘密集化。同时，容器单位的无缝移动和软件的再利用也变得简单。

图7　使用容器虚拟化技术的系统例



8 使用了图像识别 AI 的自动外观检查技术

以往在工业产品的外观检查中，是由图像处理的专家反复进行试验，建立了专门针对对象产品的检查算法。此外，在正常品和异常品差异模糊，难以进行规则化的情况下，必须依靠检查员进行官能检验，这是一个难题。

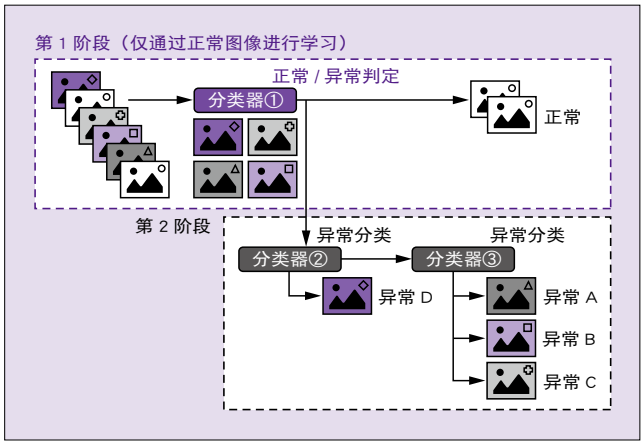
因此，为使该官能检查自动化，富士电机正在开发按照以下顺序使用 AI 的图像识别技术。

⑴　通过 AI 从正常产品的外观图像中学习特征

⑵　分阶段地对具有与学习结果不同特征的图像进行分类

这样，在自动化的外观检查中可得到稳定的检查结果。今后，计划将本技术应用于公司内部检查生产线。

图8　图像识别 AI 检测流程例

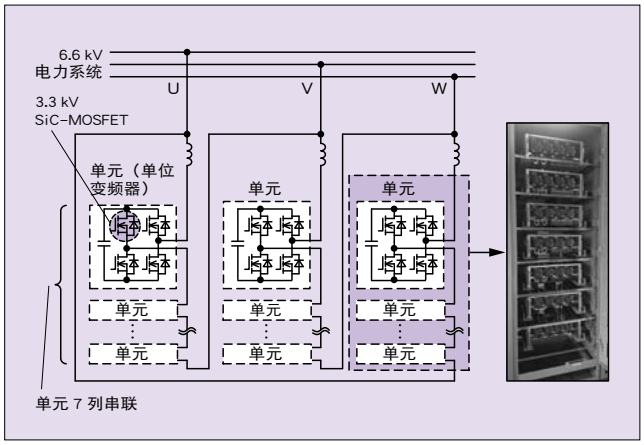


前沿技术

1 6.6 kV 连接用无变压器功率转换装置

富士电机参与了内阁府综合科学技术创新会议的战略性创新创造方案（SIP）“下一代功率电子学”，开发了无需连接用变压器便可直接连至 6.6 kV 电力系统的 MMC（Modular Multilevel Converter）方式功率转换装置。2018 年度，在公司内部使用 200 kVA 试验装置进行的实证试验，达到了目标效率 98.5%（损失为原有产品的 1/2 以下）。本装置搭载了 3.3 kV 耐压 SiC 功率器件，实现了高效率。此外，通过富士电机独特的单元（单相变频器）直流电压均衡化控制，不仅可进行进相、迟相无功功率补偿，还可进行反相功率补偿。今后，本技术预计将应用于数 10 MVA 级的无功功率补偿装置、闪烁补偿装置。

图9　MMC 实证试验装置的整体电路构成和单相的外观



前沿技术

[2] 未利用废热回收型高温蒸汽输出热泵

富士电机正在开发业界首台可实现 150℃蒸汽输出的高温蒸汽输出热泵。从 2015 年开始参与 NEDO 的项目，如今在山梨工厂进行现场试验。其主要特点如下：

⑴ 回收迄今为止再利用迟迟没有进展的 100℃以下的废热，可通过热泵高效地生成 150℃的饱和蒸汽。

⑵ 通过 1 台可进行 2 级压缩的涡旋式压缩机，实现了业界最高级别的能效比 COP3.4。

⑶ 考虑到了环保需要，使用了地球变暖系数（GWP）为 2 的新型制冷剂。

图10 现场试验中的热泵蒸汽发生装置

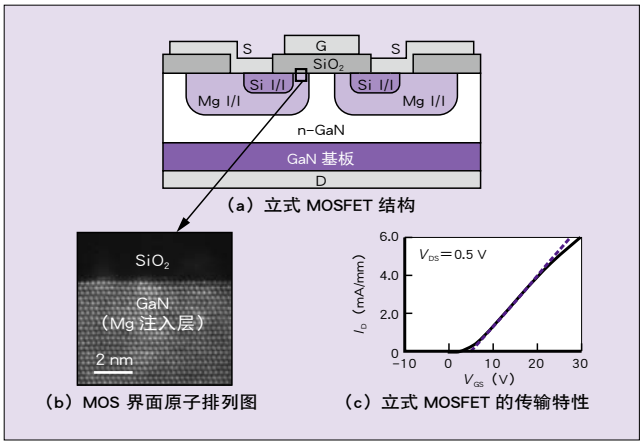
[3] 离子注入的立式 GaN-MOSFET

作为比碳化硅（SiC）损耗更低的下一代功率开关器件，使用了氮化镓（GaN）的立式 MOSFET（图（a））备受期待。从成本和可靠性的观点出发，为实现 GaN 元件，基于离子注入（I/I）的 p 型形成和 MOS 界面控制很重要。

富士电机确立了在 p 型（Mg）注入层上形成原子层级平坦的 MOS 界面的技术（图（b）），可控制通道特性（阈值 >3 V，迁移率 >100 cm^2/Vs）。此外，利用该技术，在 GaN 自立基板上通过离子注入形成立式 GaN-MOSFET 结构，成功实现了常闭 FET 动作（图（c））。

为实现超过 SiC-MOSFET 的元件特性，今后将继续改善性能。

图11 立式 GaN-MOSFET 的结构和电气特性



（a）立式 MOSFET 结构

（b）MOS 界面原子排列图

（c）立式 MOSFET 的传输特性

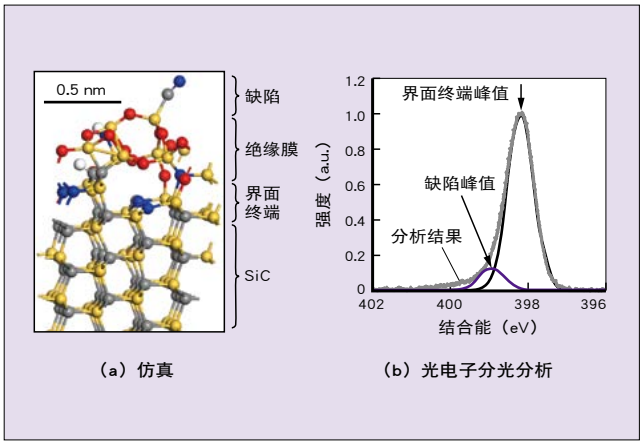
[4] 基于分子级计算的 SiC-MOSFET 界面反应分析技术

元件性能低下的主要原因之一是材料表面和界面的反应。为弄清这一问题，开发了分子仿真技术，分析反应引起的材料分子结构变化。本技术适用于 SiC-MOSFET 迁移率低下的主要原因——栅极氧化膜界面的缺陷分析。

通过 SiC 和工艺气体的反应计算求出栅极氧化膜的形成时，成功地再现了通过光电子分光分析得到的界面末端和缺陷结构。

通过详细分析，可确定迁移率低下原因——缺陷结构。今后，为提高 SiC-MOSFET 的迁移率，将致力于探索避免缺陷结构的气体条件等。此外，该技术还可用于金属和树脂等其他材料。

图12 分析 SiC 与工艺气体的反应仿真及分析



（a）仿真

（b）光电子分光分析

前沿技术

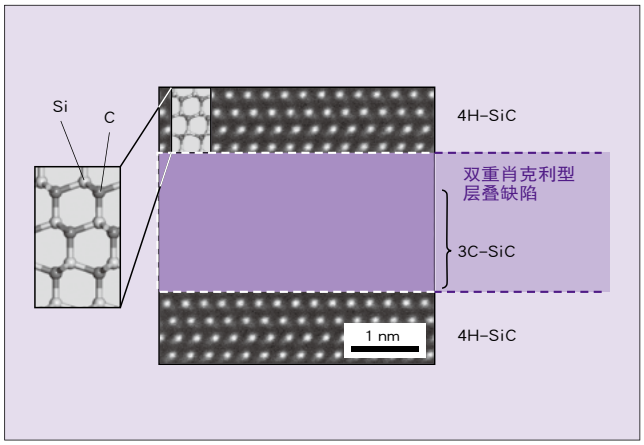
5 4H-SiC 基板层叠缺陷的结构评价技术

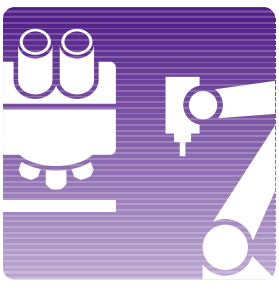
为提高 SiC-MOSFET 的可靠性，有必要详细评估 SiC 基板中结晶缺陷的结构，弄清缺陷生成机理。

富士电机使用具有原子级空间分辨率的球差校正扫描透射电子显微镜法（Cs 校正 STEM）等各种分析手法，开发了在原子级评估 SiC 基板结晶缺陷结构的分析技术。

SiC-MOSFET 使用结晶结构为 4H 结构的 SiC 基板。在某种制造条件下，在 SiC 基板中会产生含有 3C 结构、被称为双重肖克利型层叠缺陷的结晶缺陷，会对电气特性造成影响。将获知的情况用于改善制造条件后，提高了 SiC-MOSFET 的可靠性。

图13　SiC 层叠缺陷截面的原子级扫描透射电子显微镜像





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。