富士电机技术期刊

FUJI ELECTRIC JOURNAL

2025 Vol.C17 No. 2

专辑：有助于实现能源稳定供应、优化和稳定化的能源系统

富士电机 Fuji Electric

Innovating Energy Technology

富士电机技术期刊
FUJI ELECTRIC JOURNAL

2025
Vol.C17 No. 2

专辑：有助于实现能源稳定供应、优化和稳定化的能源系统

在能源系统领域，为了实现无碳社会，富士电机正在积极推动和扩大可再生能源的应用、能源供应的稳定化以及节能等多项举措。

在本期专辑中，将介绍富士电机推出的成套设备、系统、组件产品（设备）及支持这些产品的核心技术，为实现能源的稳定供应、优化、稳定化作出贡献。

封面照片

①陶波地热发电站
② 360kW 级氢燃料电池系统
③应用酯类绝缘油的变压器（电力系统用）
④电池串型 PCS、蓄电系统用 PCS

目录

专辑：有助于实现能源稳定供应、优化和稳定化的能源系统

[专辑寄语] 对实现“生命闪耀未来社会”的能源技术的期待与挑战 47（3）
石亀　笃司

有助于能源稳定供应、优化和稳定化的能源系统 48（4）
河野　正志　·　外山 健太郎　·　广濑　　顺

有助于减少温室气体排放的发电系统 53（9）
服部　康之　·　山崎　竹伸

有助于实现无碳社会的新型氢燃料电池系统 58（14）
冈本　良一

有助于电力系统稳定运行且具备伪惯性控制功能的蓄电池 PCS 63（19）
冈　　直哉　·　上村　浩文　·　山田　　真

有助于电炉设备稳定运行的无功功率补偿装置 68（24）
大宫　和树　·　筱原　　博　·　冈崎　洋平

有助于降低环境负荷的绝缘油变压器 74（30）
千叶 公一郎

有助于提升变电设备开发效率的干叶工厂短路试验设备 78（34）
藤城　　智　·　水本　贵之　·　阿部　直贵

缩略语 82（38）

富士电机技术期刊
FUJI ELECTRIC JOURNAL
2025
Vol.C17 No. 2

Contents

Energy Systems That Contribute to the Stable Supply, Optimization, and Stabilization of Energy

[Preface] Expectations and Challenges for Energy Technologies to Realize a Future Society for Our Lives 47 (3)
ISHIGAME, Atsushi

Energy Systems That Contribute to the Stable Supply, Optimization, and Stabilization of Energy 48 (4)
KAWANO, Masashi　TOYAMA, Kentaro　HIROSE, Jun

Power Generation Systems That Contribute to Reductions in Greenhouse Gas Emissions 53 (9)
HATTORI, Yasuyuki　YAMASAKI, Takenobu

New Hydrogen Fuel Cell System That Contributes to the Realization of a Carbon–Free Society 58 (14)
OKAMOTO, Ryoichi

An Emulated Inertia Control Function–Equipped PCS for Battery Energy Storage Systems That Contributes to the Stable Operation of the Power Grid 63 (19)
OKA, Naoya　UEMURA, Hirofumi　YAMADA, Makoto

Static Var Compensators That Contribute to the Stable Operation of Electric Furnaces 68 (24)
OMIYA, Kazuki　SHINOHARA, Hiroshi　OKAZAKI, Yohei

Ester Transformers That Contribute to Reductions in Environmental Impact 74 (30)
CHIBA, Koichiro

Chiba Factory Short–Circuit Test Equipment That Contributes to More Efficient Development of Substation Equipment 78 (34)
FUJISHIRO, Satoshi　MIZUMOTO, Takayuki　ABE, Naoki

Abbreviations 82 (38)

专辑寄语

对实现“生命闪耀未来社会”的能源技术的期待与挑战

Expectations and Challenges for Energy Technologies to Realize a Future Society for Our Lives

石亀　笃司 ISHIGAME, Atsushi
大阪公立大学　教授　博士（工学）

2025 年大阪・关西世博会的主题是“生命闪耀未来社会的设计”。旨在推动国际社会共创可持续社会，同时也是首次以“什么是幸福的生活方式”为主题的世博会。

为了实现“生命闪耀未来社会”，创新技术极为重要。当前，全世界都在研讨能源供应的稳定性，特别是能源技术与能够高速处理海量数据的人工智能（AI）联动，可能蕴含着开创新时代的巨大潜力。

在不久的将来，AI 将在提高可再生能源效率、优化能源消耗、提升电力供应稳定性等多个领域发挥关键作用，有望在提升可持续性的同时降低环境负荷。然而，引入 AI 也面临着诸如安全问题、人机对立、暴走失控等必须克服的挑战。识别型 AI 能够代替人类进行判断，生成型 AI 能够自主学习关联性并导出创意。随着这两种技术的不断进步，伦理问题和法规的重要性也在增加，但如果二者能协同合作，则可以创造出巨大的新价值。将来，AI 有望与人类协作工作并实现自主运行，支持、参与研究开发的构思与决策，进一步提高人类的工作效率。AI 的进化也许将远远超越技术奇点，获得超级智能，甚至可能在未来主宰人类。

关注尖端的创新核心技术，例如钙钛矿太阳能电池、全固态电池、氢能与热能利用技术等，有望推动电力的地产地消，带动离网系统等分布式数字化需求侧系统的革命性变革，成为“游戏规则改变者”。

具备高能量密度、安全性和长寿命等特点的全固态电池，有助于推动能源的稳定供应和电动车的普及。目前，我校优势之一的“全固态电池研究所”也在加快相关研究。此外，日本 NITE（产品评估技术基础机构）也设立了专门委员会，探讨强化日本蓄电池系统产业竞争力的课题和对策。同时，还构建了针对全固态电池实施全面安全性验证的试验体系。为避免日本的电池系统技术重蹈“电子立国日本”的覆辙，希望能发展出重视速度的技术革新、积极进军全球市场、培育人才，以及不畏失败、勇于试错的文化。在绿色氢气制备方面，预计将以光催化技术和水电解技术为核心继续发展。伴随着技术革新和高效氢气运输、储存技术及供应网络的完善，氢能的重要性预计将进一步提升。同时，期待热泵与化学蓄热等高效利用热能的蓄热系统技术能进一步发展。岩石蓄热的最大特点是可借助现有火力发电设备，将热能再次转化为电能，预计该方式将为可再生能源的主力化发展作出贡献。

在电力稳定供应方面，具有多用途、多端子的直流送电网络化的海上风力发电系统预计将通过如“主计划”等网络强化措施，催生出直交混合的新型广域主干电力系统。此外，在电网与交通网络等融合的“部门耦合”系统中，数据联动机制对能源系统的效率化至关重要，EV 在行驶中的供电等技术也将发挥重要作用。将上述尖端核心技术有机融合的“微电网即服务”（Microgrid as a Service）模式也有望在市场上快速扩张，成为企业和个人实现更高效、可持续能源供应的有力手段。

电气学会 B 部门在“Vision 2030 beyond”中描绘了未来社会的蓝图。能源技术的发展不仅是技术层面的问题，更将推动整个社会的变革。特别是亟需具备研发与社会实施能力的复合型人才，同时也需要市民意识的转变。

在大阪・关西世博会上，将设立碳循环工厂，对 DAC（Direct Air Capture）、甲烷化等新技术进行实证主题展示。今后，希望有更多技术研发型人才不断涌现，为未来社会做出贡献。同时，希望通过最尖端的能源技术和行为变革，共同打造和谐美好的未来社会，使更多生命绽放光彩，实现可持续发展。

现状与展望

有助于能源稳定供应、优化和稳定化的能源系统

Energy Systems That Contribute to the Stable Supply, Optimization, and Stabilization of Energy

河野　正志 KAWANO, Masashi　　外山　健太郎 TOYAMA, Kentaro　　广濑　顺 HIROSE, Jun

1　引言

在现代社会中，能源的稳定供应对于维持和提升经济活动、生活基础至关重要。为了实现电力的稳定供应，电力系统的优化和稳定化成为重要课题。近年来，随着可再生能源的迅速普及，需要导入比以往更先进的能源管理系统。

2025 年 2 月 18 日，内阁正式批准了第 7 次能源基本计划[1]。本计划与同期修订的 GX2040 愿景[2]中提出的温室气体排放量控制目标（到 2040 年度比 2013 年度实绩减少 73%）保持一致，制定时设定了极具挑战性的目标。富士电机能源事业本部将在能源的“生产”“输送”和“储存”各阶段提供系统解决方案，为实现该计划作出贡献。

图 1 所示为能源事业本部的能源、环境业务的整体图。本文，将介绍富士电机能源系统事业在各领域的最新动向和今后的展望。

2　支持能源稳定供应、优化和稳定化的技术

2.1　发电成套设备领域

对于发电成套设备而言，不仅需要维持电力供需平衡以确保稳定供应，还必须以削减温室气体排放量为目标，有计划地将以煤炭等化石燃料为主的发电设备转换为新型系统，推动老旧、低效率发电设备的再生能源转换，进一步提高效率。为了满足这些需求，需要引进最先进的燃气轮机联合循环发电系统（GTCC：Gas Turbine Combined Cycle），更新老旧设备并实现更高效率的发电技术。此外，以与地区共生为前提的地热发电、水力发电，以及实现碳循环的生物质发电的导入也在积极导入之中。同时，预计从化石燃料向氨、氢等新型燃料的转型也

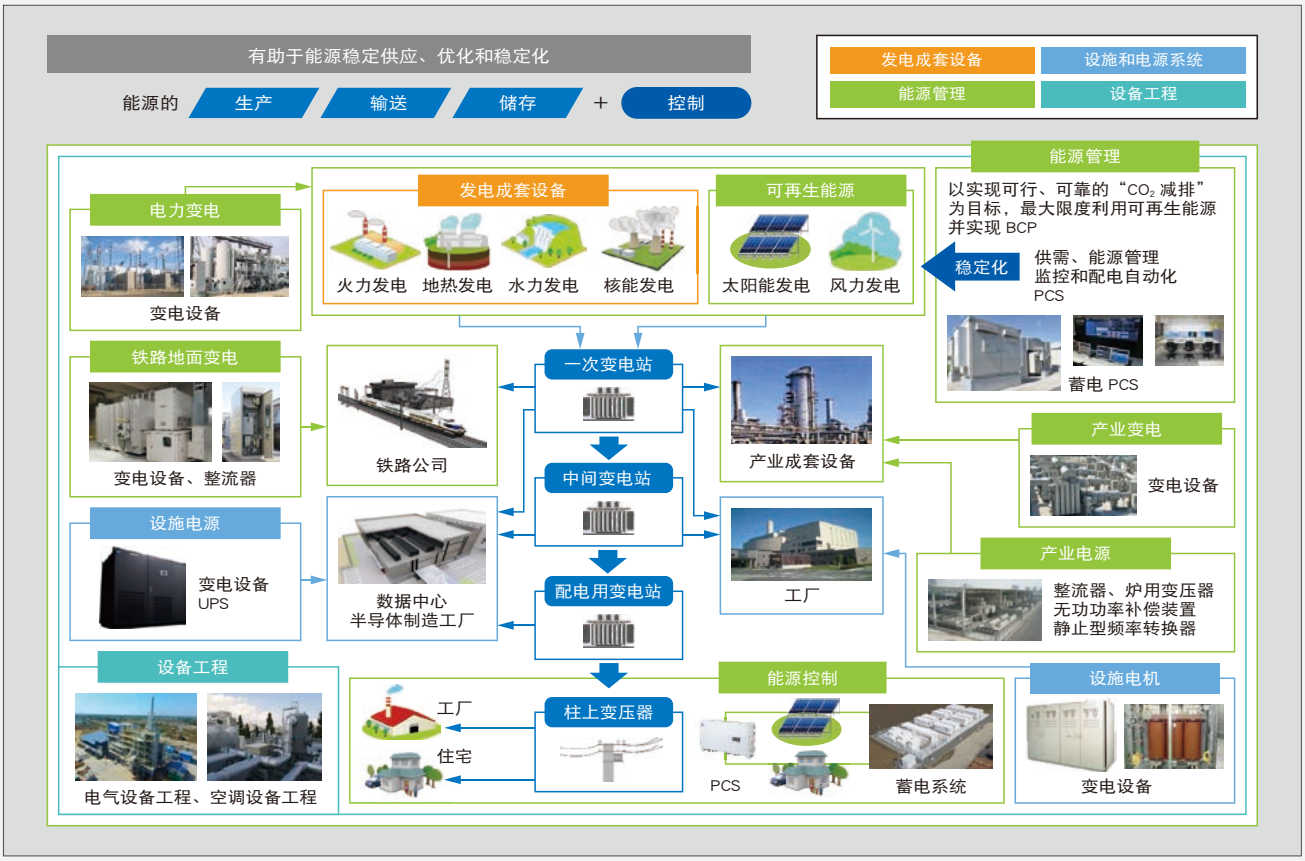


图 1　能源事业本部的能源、环境事业整体图

将持续推进，利用这些燃料的发电设备的实用化也成为重要课题。

此外，伴随着太阳能、风能等受天气影响较大的变动型再生能源的增加，电力系统的稳定性保障成为一大课题，需要扩展因供需平衡限制的输出控制范围，开发有效利用再生能源剩余电力的技术。

针对这些不断变化的多样化需求，富士电机的发电成套设备正在持续强化以下方面的举措。

⑴ 火力地热领域

通过以下举措，致力于解决包括削减温室气体排放量在内的多项课题。

(a) 采用最先进的 GTCC、地热发电设备，强化对多样化需求的应对能力，提升整个成套设备系统的综合管理技术

(b) 通过改善蒸汽轮机和发电机的效率、基于寿命诊断延长使用寿命并提升维护效率。通过更新和优化附属设备，提升整体效率、延长使用寿命

(c) 针对火力发电中生物质等燃料种类和热源变化的问题，开展适应相应运用方式和范围变化的系统优化

(d) 在地热发电领域，持续提升适用于高温热源的闪蒸循环和可应用于低温热源的有机朗肯循环（ORC：Organic Rankine Cycle）的效率。通过探索新一代发电方式（如高温、高压系统）的相关技术，实现与环境共生、延长设备使用寿命、优化维护。（参考第 53 页，“有助于减少温室气体排放的发电系统”）

⑵ 水力领域

继续推进日本国内老旧设备的更新和改造，同时致力于获取改善电力供需调节功能的相关技术。

⑶ 燃料电池

作为实现氢能社会的分散电源，推进燃料电池发电系统的实证工作。除了维持长期、高性能的控制技术外，还在推进电气控制电路的简化、削减占地面积，以及新一代模块搭载等方面的商业化合理化进程，从而实现系统优化。（参考第 58 页，“有助于实现无碳社会的新型氢燃料电池系统”）。

除了上述以发电为基础的对应措施外，为了对应今后的需求，还致力于实现面向使用蒸汽的用户，利用再生能源剩余电力的蓄电系统，以及可向电网系统提供无效功率和惯性力的设备等有助于脱化石燃料和系统稳定化的产品。

⑷ 核能

致力于确保日本首座 MOX 燃料工厂的顺利竣工，同时着眼于 GX（绿色转型）带来的核能市场扩大，提供以核燃料循环、报废处理及新一代创新核反应堆为对象的安全、安心的核能设备与服务。

在提高现有安全设计能力、成套设备工程能力的同时，以研究开发反应堆（高温气冷反应堆、高速反应堆），以及在核燃料循环事业中积累的技术和实绩为轴心，推进向新一代创新核反应堆的推广和商品化。

2.2 能源管理领域

根据第 7 次能源基本计划，到 2040 年度为止，再生能源在总发电量中的比率目标定为 40 ～ 50%。当大量太阳能和风力发电与系统并网连接时，电网系统的不稳定性增加，系统停电的风险变大。因此，根据再生能源输出波动能够灵活进行充放电、可降低停电风险的蓄电系统显得日益重要。针对电网系统用蓄电池的导入，政府通过导入补贴政策、长期无碳电源拍卖制度，以及通过完善各市场机制扩大收益等制度性支持，使导入数量显著增加。此外，以电网系统用蓄电池为核心，进行市场交易的聚合商数量也在增加。自 2022 年 4 月开始，日本启动

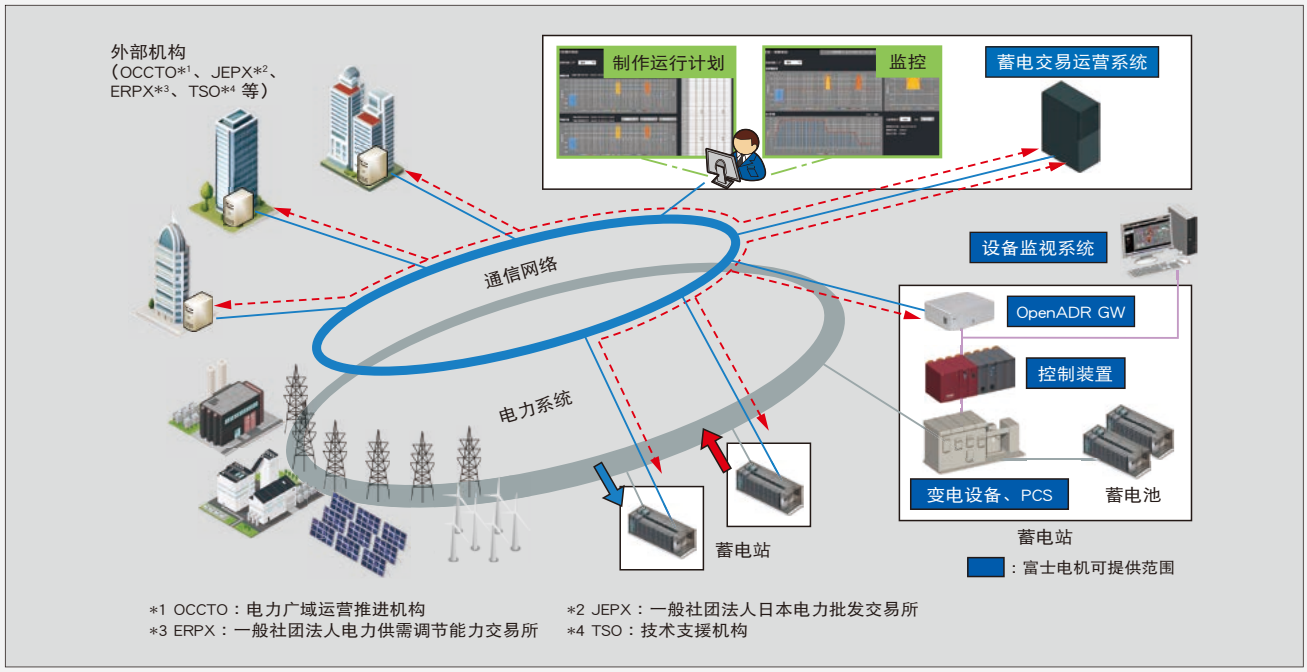


图 2 电网系统用蓄电池系统和蓄电交易运营系统

了作为再生能源交易新制度的 FIP（Feed-in Premium）制度。在以往的定价收购制度（FIT：Feed-in Tariff）时，每 1 kWh 的售电单价是固定的；而 FIP 制度则以市场价格为基础决定售电价格。由于还需要满足“计划值同时同量”的要求，近年来越来越多的百万瓦级太阳能运营商引入了与可再生能源设施配套的蓄电系统并转向 FIP 制度[3]。

针对上述需求，富士电机基于在各类实证事业中积累的预测和优化技术、蓄电池控制稳定化技术，计划提供**图 2** 所示的“蓄电交易运营系统”。该系统可通过蓄电池充放电在多个电力市场（电力批发市场、供需调节市场、容量市场）中进行组合交易，实现最优运营。此外，从设备监视系统到构成现场蓄电系统的变电设备、功率调节器（PCS：Power Conditioning System）、控制装置，以及采用国际标准协议 OpenADR[4] 的装置间通信网关（GW），富士电机不仅备有完整的产品线，而且还在持续强化产品功能。同时，还提供用于预测蓄电交易运营系统收益的运营仿真服务，从而支持运营商制定的设备导入计划。

今后，随着再生能源等非同步电源的增加和具备机械惯性的火力发电减少，电力系统的惯性力下降将成为新的问题。如**图 3** 所示，惯性力可抑制因电力供需失衡引起的频率波动，但如果惯性力不足导致频率波动扩大，发电机保护功能会启动，继而发生连锁反应，使发电机相继从系统脱网，甚至造成大范围停电。

为避免此类情况发生，被称为“电网成形型（GFM：Grid Forming）”的新一代变频器因具备模拟惯性力等功能，作为可实现再生能源普及的技术备受期待。除了开发和验证试制机外，富士电机还参与了电网系统连接领域的国际标准制定活动，并在日本国内参与电网系统连接技术要求（即电网规范，Grid Code）的制定，致力于推进符合未来电网规范的 PCS 开发。（参考第 63 页，“有助于电力系统稳定运行且具备伪惯性控制功能的蓄电池 PCS”）。**图 4** 所示为本文所述各类 PCS 的外观。

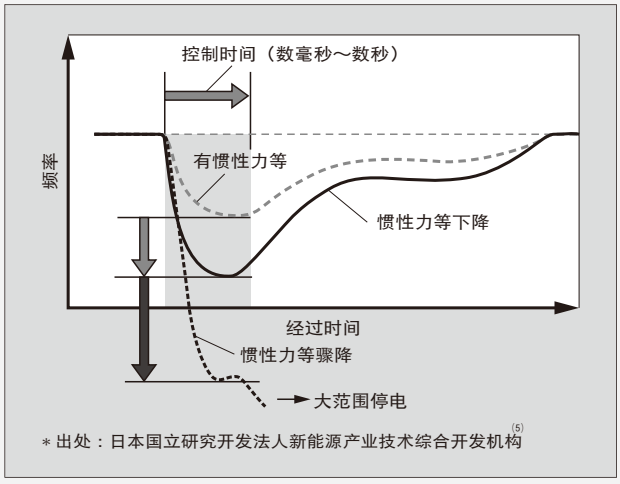


图 3　惯性力下降对频率波动的影响（示意图）

图 4　各类 PCS 的外观

2．3　设施和电源系统领域

近年来，互联网数据中心（IDC：Internet Data Center）的需求急剧增长。特别是在亚太地区，东京、首尔、香港、新加坡等城市的超大规模数据中心 IDC 的建设热度高涨，基础设施投资持续扩大。对 IDC 运营商而言，快速构建设备是形成竞争力的重要因素，但随着建设项目的集中进行，确保现场施工人员成为难题。针对这个问题，越来越多的企业开始导入机组一体化系统（Skid System），即将不间断电源装置（UPS：Uninterruptible Power System）、配电变压器和低压柜等设备在工厂预装于通用金属架台上，完成各设备间配线后，再整体运输至现场安装。**图 5** 所示为传统方式与机组一体化系统的比较。此外，为机组一体化系统加装外壳、形成室外型电气设备的集装箱型系统也日益普及。

目前，富士电机正在积极推进面向 IDC 的数据中心系统的机组一体化方案。通过该举措，不仅可以提高工程、设计、试验效率，缩短工厂制造和现场施工调试时间、缓解人力短缺，还能通过推进标准化确保施工质量。

同时，为了节省变电设备的配线，实现维护智能化，符合国际标准规格 IEC 61850 的数字化要求正不断提高。富士电机正推进和确立符合该标准的技术，开发标准化软件，从而增强市场竞争力。

随着推动 IDC 成长的数字化和生成式 AI 应用的迅猛发展，以及交通移动电动化进程的加快，半导体需求急剧增加，半导体制造业的相关投资持续活跃。半导体制造行业不仅面临现有电机设备维护压力，还需考虑未来设备扩张后的长期维护负担。因此，实现设备维护的省力化、省人化已成为迫切需要解决的课题。

面向半导体制造工厂，富士电机开发了装置使用寿命超过 20 年、具备良好维护性的 UPS。同时，应用 IoT（Internet of Things）技术开发了 UPS 监视系统，提供省人化功能和智能维护服务，通过大幅缩短维护时间和提高操作便捷性，可显著减轻客户的维护负担。

2．4　支撑电源系统的受变电设备

近年来，受变电设备的需求持续旺盛。主要原因包

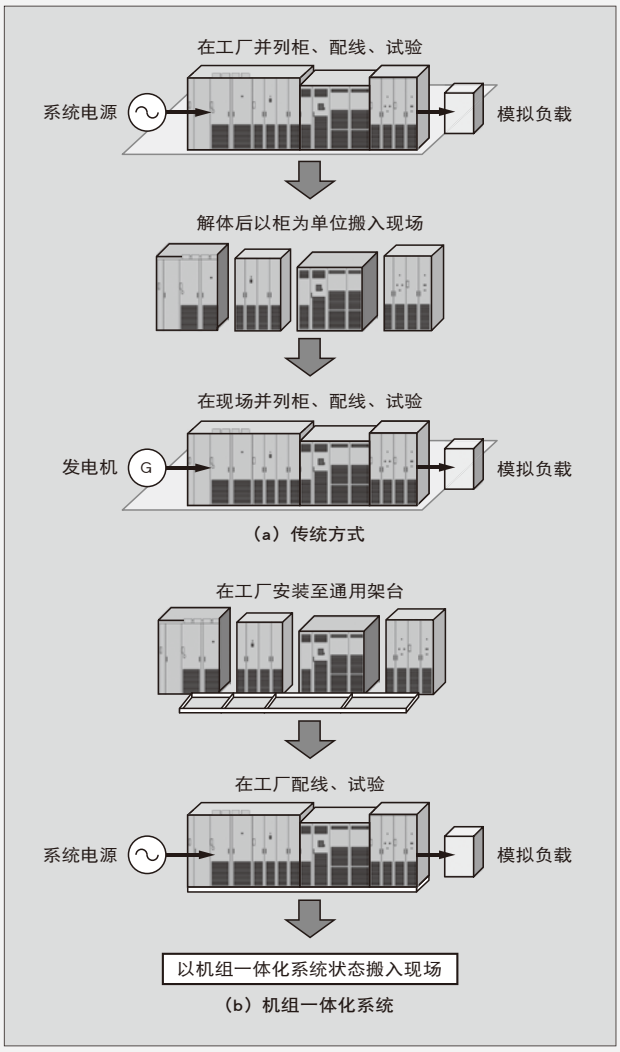


图 5　传统方式与机组一体化系统的比较

括：全球范围内 AI 技术快速发展所带来的数据中心设备、海上风力及太阳能发电等可再生能源发电站的新建需求，以及日本国内在 1970～1980 年代建造，现已使用 40～50 年的设备集中进入更新期，更新需求大幅增加。

此外，为了应对全球气候变暖问题，无碳化趋势也对受变电设备产生了重大影响。在钢铁行业，与使用化石燃料焦炭的高炉相比，能够抑制 CO_2 排放量的电炉应用正在推进，为电炉设备稳定运行提供支持的无功功率补偿装置需求正在不断上升。富士电机可提供他励式、自励式，以及**图 6** 所示的结合上述两种方式的混合式无功功率补偿装置，高效改善了电炉闪变状况。在实时仿真器中构建电力系统模型、负载模型、闪变补偿装置模型等，通过对负载的实际运行状态模拟仿真进行事前验证，从而提供最符合客户规格要求的无功功率补偿装置（参考第 68 页，“有助于电炉设备稳定运行的无功功率补偿装置”）。

目前，用于电力系统的变压器中，约有九成是采用矿物油作为绝缘和冷却介质的油浸式变压器。矿物油魚毒性且生物降解性较低，一旦泄漏至土壤或河川中，将造成长期污染风险。此外，由于其闪点低，火灾风险较高，在变压器废弃时必须抽出矿物油并进行焚烧处理，因此还存

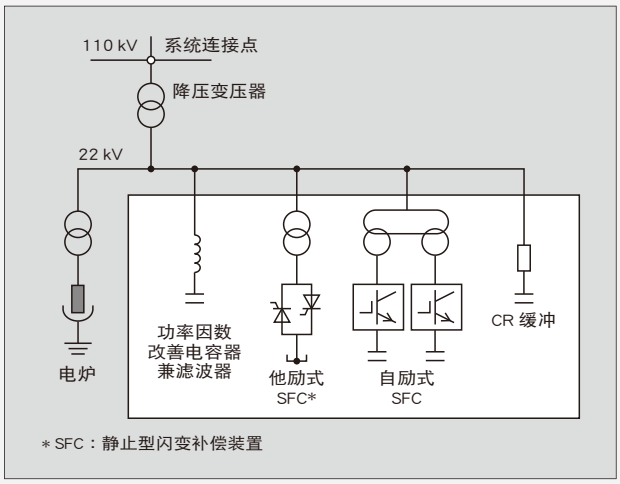


图 6　混合式无功功率补偿装置实例

在 CO_2 排放问题。为了解决这些问题，以植物油为基础的电气绝缘油应用于变压器的技术正迅速普及。目前，全球已投入运行的植物油变压器超过了 300 万台[6]。这一数量几乎相当于目前日本国内正在运行的全部油浸式变压器总和[7]。2008 年，富士电机开发并向市场投放了以棕榈油为原料的棕榈油脂肪酸酯绝缘油变压器，目前已有超过 200 台正在运行。与矿物油相比，棕榈油脂肪酸酯具有粘度更低、冷却性能优异的特点，可实现变压器的小型化设计。2022 年，富士电机又将以大豆油为原料的天然绝缘油变压器纳入产品阵容，目前已有超过 60 台正在运行。大豆油的闪点比矿物油高，火灾风险较低，因此在日本《消防法》中被归类为指定可燃物。随着 2023 年《消防法》的修订，大豆油变压器在室内安装时，在灭火设备满足特定条件的情况下，可使用大型灭火器进行替代[8]。因此，在数据中心变电设备中的需求急剧上升（参考第 74 页，“有助于降低环境负荷的绝缘油变压器”）。

此外，在富士电机千叶工厂，以往利用电容组进行断路性能验证的试验中，导入了短路发电机，因此能够在商用频率 50 Hz 及 60 Hz 条件下进行试验。通过应用该设备，有望提高气体绝缘开关装置、配电柜、真空断路器等受变电设备的开发试验效率（参考第 78 页，“有助于提升变电设备开发效率的千叶工厂短路试验设备”）。

3　后记

本文对富士电机在能源稳定供应、优化、系统稳定化方面的举措及其成果进行了介绍。随着技术进步和市场需求的变化，能源系统正日益趋于高度化，今后，将会承担更加重要的角色。富士电机将持续致力于技术革新，洞察市场趋势并及时展开市场布局，以实际行动为实现可持续社会作出贡献。

参考文献

(1)　経済産業省. “エネルギー基本計画”. https://www.meti.go.jp/press/2024/02/20250218001/20250218001-1.

pdf, (参照 2025-02-18) .
⑵ 経済産業省. “GX2040 ビジョン～脱炭素成長型経済構造移行推進戦略 改訂～”. https://www.meti.go.jp/press/2024/02/20250218004/20250218004-1.pdf, (参照 2025-02-18) .
⑶ 資源エネルギー庁. “系統用蓄電池の現状と課題”. https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/062_05_00.pdf, (参照 2025-05-29) .
⑷ 富士電機株式会社. “仮想発電所「VPP」を徹底解説! ピーク電力を上手く制御するには?”. https://www.fujielectric.co.jp/about/column/detail/energy_ctrl_mng.html, (参照 2021-10-06) .
⑸ 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 .“再生可能エネルギーの主力電源化に向けた次々世代電力ネットワーク安定化技術開発(STREAM プロジェクト)”. https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100236.html, (参照 2025-02-20) .
⑹ Experiences in service with new insulating liquids CIGRE Working Group A2-35. https://www.cigre.org/GB/publications/technical-brochures, (参照 2025-05-29) .
⑺ 資源エネルギー庁. “変圧器の現状について”. https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/sho_energy/transformer_wg/pdf/001_03_00.pdf, (参照 2022-09-07) .
⑻ 一般社団法人日本電気協会発変電専門部会. “変電所等における防火対策指針. JEAG 5002-2020. 2024 年追補版”. https://www.jesc.gr.jp/jesc-assent/pdf/private/e0012_2020amd1.pdf, (参照 2025-05-29) .

河野　正志
富士电机株式会社 董事兼专务执行董事。能源事业本部长。

外山 健太郎
从事电力电子系统、变电设备、发电设备的研究开发工作。现为富士电机株式会社能源事业本部开发统括部长。日本机械学会会员、日本 AEM 学会会员。

广濑　　顺
从事电力供应设备的设计、开发和商品企划工作。现为富士电机株式会社能源事业本部事业统括部能源企划部长。

有助于减少温室气体排放的发电系统

Power Generation Systems That Contribute to Reductions in Greenhouse Gas Emissions

服部　康之 HATTORI, Yasuyuki　　山崎　竹伸 YAMASAKI, Takenobu

在第 7 次能源基本计划中，在提出要扩大地热发电等可再生能源比例的同时，也计划维持火力发电约 30 ～ 40% 的比率。在地热发电和火力发电两个领域，富士电机均积极致力于减少温室气体的排放。在地热发电领域，开发了在汽轮机叶片上施加 DLC 涂层以防止硅垢附着的技术，从而降低汽轮机叶片的清洗频率并保持较高的发电输出。在火力发电领域，则开发了通过改造汽轮机来适应氢气、氨气、生物质等无碳燃料的高混烧率以及专烧的技术。

While the 7th Strategic Energy Plan calls for an increase in the ratio of renewable energy sources such as geothermal power generation, thermal power generation is still expected to make up roughly 30% to 40% of the energy supply. Fuji Electric is working to reduce greenhouse gas emissions in both the geothermal and thermal power generation sectors. In the field of geothermal power generation, we have developed a technology to apply diamond-like carbon coating to turbine blades, preventing silica scale adhesion. This reduces cleaning frequency and allows the turbine blades to maintain high power generation output. In addition, in the thermal power sector, we have developed a technology that improves the co-firing rate of carbon-free fuels such as hydrogen, ammonia, and biomass, and enables exclusive firing of these fuels through turbine modifications.

1　引言

由于地热发电属于不受天气等自然条件的影响，可以实现稳定的发电方式，因此在可再生能源中，被定位为基础负载电源，在日本国内外正在开展众多开发计划。2022 年度，在日本国内的电源结构中地热发电仅占 0.3%，但如**表 1** 所示，第 7 次能源基本计划中提出到 2040 年度将其提高至 1～2% 的目标[(1)]。

在火力发电方面，使用传统化石燃料的新建发电站已大幅减少，对于现有设备中发电效率较低的煤炭火力发电站，其逐步废止的趋势正在加速。然而，如**表 1** 所示，到 2040 年度火力发电的比例仍将维持在约 30 ～ 40%，预计将继续在电力稳定供应方面发挥重要作用。为此，在火力发电中也必须减少 CO_2 排放量，确立和推广低碳化技术，例如氢气、氨气、生物质等无碳燃料的混烧化及提高混烧比例，以及专烧化等。采用混烧的火力发电，或转为氢气、氨气专烧的火力发电，被定位为“无碳火力”；转为生物质专烧，则被归类为“可再生能源”。包括由火力发电转型的部分在内，预计到 2040 年度，生物质发电的比例将增加到 5～6%。

本文将对富士电机在地热发电和火力发电两个领域中，有助于减少温室气体排放的发电系统进行介绍。

表 1　2040 年度的能源供需预测

项目	2013 年度（实绩）	2022 年度（实绩）	2040 年度（预测）
可再生能源	10.9%	21.8%	40 ～ 50% 左右
太阳能	1.2%	9.2%	23 ～ 29% 左右
风力	0.5%	0.9%	4 ～ 8% 左右
水力	7.3%	7.7%	8 ～ 10% 左右
地热	0.2%	0.3%	1 ～ 2% 左右
生物质	1.6%	3.7%	5 ～ 6% 左右
核能	0.9%	5.6%	20% 左右
火力	88.3%	72.6%	30 ～ 40% 左右
发电电能	1.08 兆 kWh	1.00 兆 kWh	1.1 ～ 1.2 兆 kWh

出处：日本经济产业省[(1)]（富士电机整理）

2　地热发电的相关举措

2. 1　概要

地热发电主要有闪蒸方式和双循环方式这两种方式。闪蒸方式是将地热蒸汽直接输送至汽轮机作为动力源；而双循环方式则利用地热蒸汽或地热热水作为热源，使烃类或替代氟利昂等低沸点工作介质蒸发，从而驱动发电。**图 1** 所示为地热双循环发电的构成。双循环方式的最大优点是能够利用闪蒸方式无法利用的低压、低温地热蒸汽或热水。因此，可以利用原本闪蒸方式无法使用的生产井，以及现有地热发电站排出的地热热水。为了有效利用地热资源，近年来双循环方式已在许多国家和地区采用，导入数量持续增加。

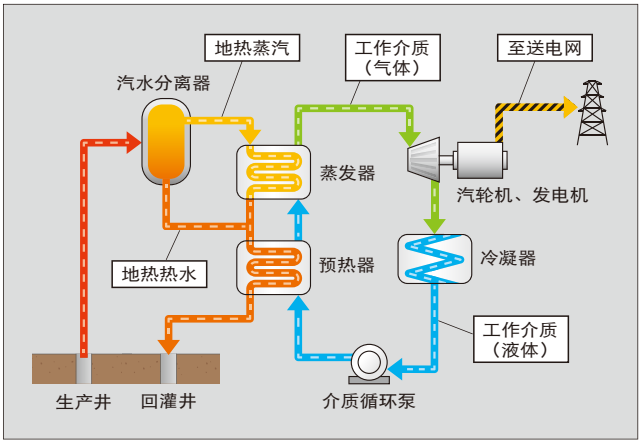


图 1　地热双循环发电的构成

图 2　陶波地热发电站

富士电机可供应上述两种方式的发电设备。在闪蒸方式方面，迄今为止已在日本国内交付 10 台（设备容量 45.5 MW），在国外交付 79 台（设备容量 3764 MW），并于 2024 年 6 月完成了全球最大、装机容量达 184 MW 的陶波地热发电站（**图 2**）。针对闪蒸方式无法适应的小容量发电设备，富士电机提供双循环方式设备，目前已有两台 5 MW 级发电设备的交付实绩。

2. 2　硅垢的附着及其对策

⑴　硅垢

在闪蒸方式的地热发电中，由于地热蒸汽被直接导入汽轮机，伴随设备运行，地热蒸汽中的成分会以水垢形式析出并固着在汽轮机叶片上。从地热生产井中提取的地热流体中含有多种成分，其中最为突出的问题是二氧化硅。**图 3** 所示为附着在汽轮机叶片上的二氧化硅沉积物（硅垢）。当硅垢发生堆积时，蒸汽流路会变窄，导致发电输出下降。为了恢复发电输出，必须去除硅垢。虽然在定期检修时会开启汽轮机并清洗叶片以去除硅垢，但这会增加维护成本、延长工期。此外，由于只能在成套设备停机时进行叶片清洗，无法频繁实施。在硅垢附着速度较快的成套设备中，运行过程中发电输出会逐渐下降。作为对策，富士电机开发了在蒸汽轮机叶片上应用的 DLC（Diamond-Like Carbon）膜涂层。该技术用于防止硅垢附着，现已投入实用[2][3]。

⑵　DLC 涂层

DLC 膜以碳为主要成分，是同时含有金刚石结构和石墨结构的非晶质薄膜。根据成膜方法不同，可分为通过物理真空蒸镀法（PVD：Physical Vapor Deposition）形成的无氢 DLC 膜，以及通过使用烃类气体的化学气相沉积法（CVD：Chemical Vapor Deposition）形成的含氢 DLC 膜。众所周知，DLC 膜的物性会因金刚石结构与石墨结构的比率以及氢含量的不同而发生变化。

在地热蒸汽中，二氧化硅带负电，而表面带正电的汽轮机翼材，即 13%Cr 钢（JIS 号：SUS420J1）会快速吸附二氧化硅。但如果在汽轮机翼表面施加 DLC 涂层，由于 DLC 膜表面带负电，二氧化硅的吸附速度会减慢。然而，如果吸附在 DLC 膜上的二氧化硅与其发生化学键合，硅垢的附着则会更加严重。因此，为了通过 DLC 涂层防止硅垢附着，必须形成不易与二氧化硅发生化学键合的 DLC 膜。

图 4 所示为采用 PVD 方法改变金刚石结构与石墨结构比率，在 13%Cr 钢上施加 DLC 涂层后硅垢附着量的对比结果。硅垢的附着量通过使用硅酸（$Si(OH)_4$）过饱和溶液作为地热发电模拟热水进行评估。随着石墨结构比率的降低，硅垢的附着量减少。当比率降低至 12% 时，其附着量相较于实施涂层前降低至仅 2%。根据这一结果可知，DLC 膜中石墨结构所存在的碳的悬空键是与二氧化硅形成化学键合的部位。通过减少石墨结构，可以减少化学键合部位，从而形成不易与二氧化硅结合的 DLC 膜，防止硅垢附着。

此外，在采用 CVD 方法制备的含氢 DLC 膜中，即使石墨结构比率高达 26%，通过增加氢的含量，也能使模拟热水中的硅垢附着量相较于涂层前减少至 2%。由该结果可知，通过氢原子中止作为硅垢化学键合位点的悬空键，可以防止与二氧化硅的化学键合，避免硅垢附着。

在汽轮机叶片应用 DLC 涂层时，由于 DLC 膜与 13%Cr 钢的物性差异较大，考虑到运行中因应力作用可能导致膜层剥离。但通过对汽轮机叶片表面进行适当的底层处理，成功防止了 DLC 膜的剥离。

⑶　应用效果

将难以附着硅垢的 DLC 膜涂覆在汽轮机叶片上，并对其效果进行了验证。**图 5** 所示为在实际地热蒸汽环境中暴露 5 个月的汽轮机叶片试验片外观。未实施涂层的试验片整体

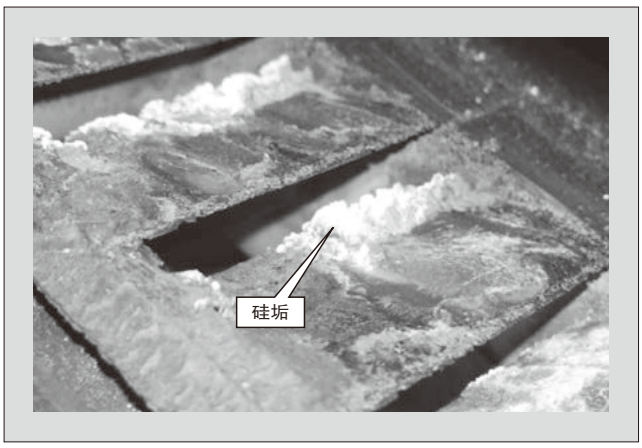


图 3　附着在汽轮机叶片上的二氧化硅沉积物（硅垢）

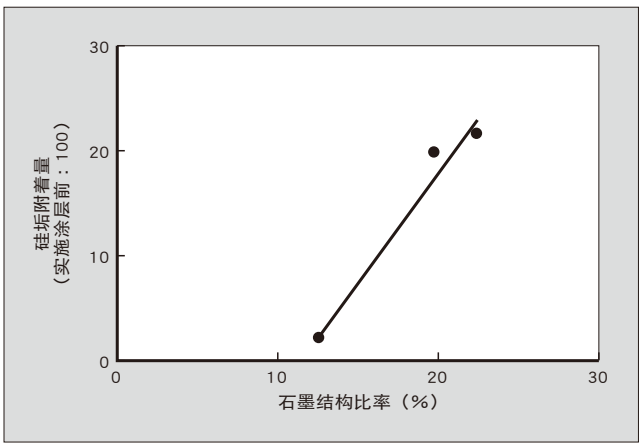


图 4　石墨结构比率和硅垢附着量

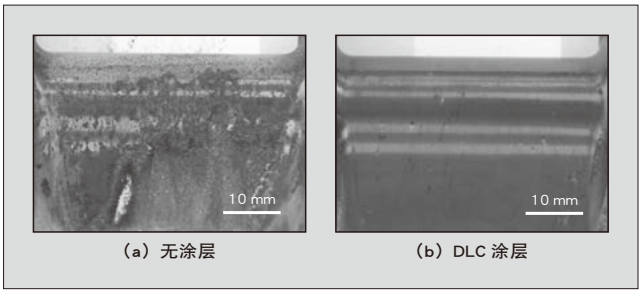


图 5　试验片外观

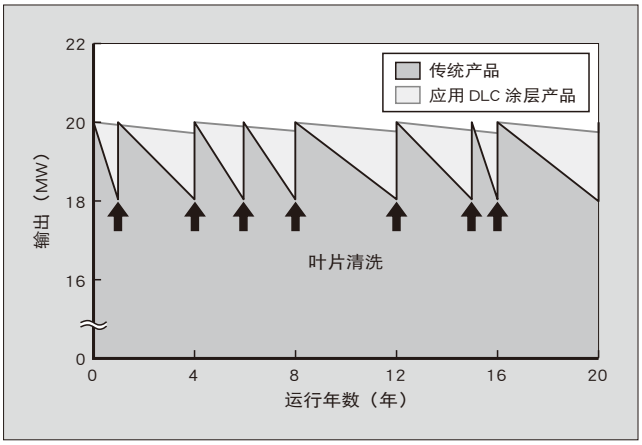


图 6　发电输出随时间变化的示意图

上出现了明显的硅垢沉积，而施加 DLC 涂层的试验片则保持了光泽，硅垢附着极少。

图 6 所示为发电输出随时间变化的示意图。在传统蒸汽轮机中，即使叶片清洗后发电量能够恢复，随着运行的持续，输出也会再次反复下降。同时，通过应用 DLC 涂层，可以防止汽轮机叶片上附着硅垢，在维持高水平发电输出的同时，还能减少清洗频率。

除了汽轮机叶片外，配管、阀门以及双循环发电中使用的热交换器等设备同样存在硅垢问题。为此，富士电机在持续推进针对这些设备的涂层技术开发。

3　火力发电的相关举措

3.1　火力发电的低碳化

火力发电设备在确保电力稳定供应的同时，还必须减少温室气体排放量。在 2023 年施行的《能源使用合理化及向非化石能源转型等相关法律》(修订节能法）中，规定了推动无碳燃料混烧，以及在发电效率计算中提供支持的配套措施。无碳燃料的混烧有助于减少温室气体排放，但由于无碳燃料的发热量低于煤炭，发电输出较低。为了维持与混烧前相同的输出，需要投入更多燃料，同时也会造成发电效率下降。但作为配套措施，允许在计算发电效率时不将无碳燃料计入投入能量。因此，通过提高混烧率，在计算时可以提升发电效率。同时，对于新建时计划采用煤炭与生物质混烧的发电设备，正在转向提高生物质混烧率，甚至改为专烧生物质的情况日益增多。在转为专烧时，该电站可被认定为可再生能源电源，有资格享受 FIP（Feed-in Premium）制度等多种优惠措施，因此从政策层面也在推动生物质燃料专烧的转型。

针对发电站的核心设备汽轮机，为了适应无碳燃料混烧率的提高和专烧化，富士电机不仅提出了汽轮机整机更换为能适应蒸汽压力、温度等变化的方案，还提出了通过最小限度改造即可实现混烧率提升和专烧化的方案。通过改造进行应对，可以抑制成本，缩短成套设备停机时间，从而将停机带来的发电损失降至最低。

3.2　应对无碳燃料混烧率提高和专烧化

通过提高无碳燃料混烧率、实现专烧化，汽轮机入口的蒸汽压力、温度和流量等蒸汽条件会发生变化。例如，在生物质燃料专烧的情况下，主蒸汽温度、再热温度以及流量都会降低，导致汽轮机输出功率减少。此外，由于处于部分负载运行状态，汽轮机入口的能量损失增加，发电效率降低。为此，如**图 7** 所示，提出了通过汽轮机改造来改善输出功率下降的方案。

(1)　叶栅更新（输出增加效果：1.8%）

汽轮机内部配置的叶片列（叶栅）被设计为在 100% 负

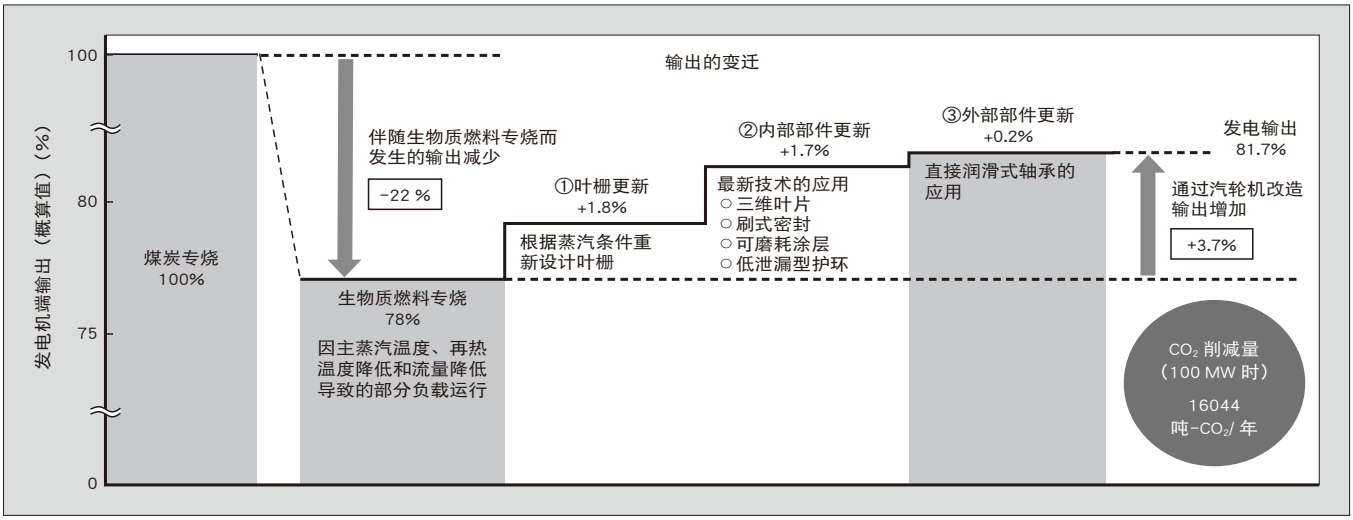


图 7　生物质燃料专烧对汽轮机输出的影响及其对策

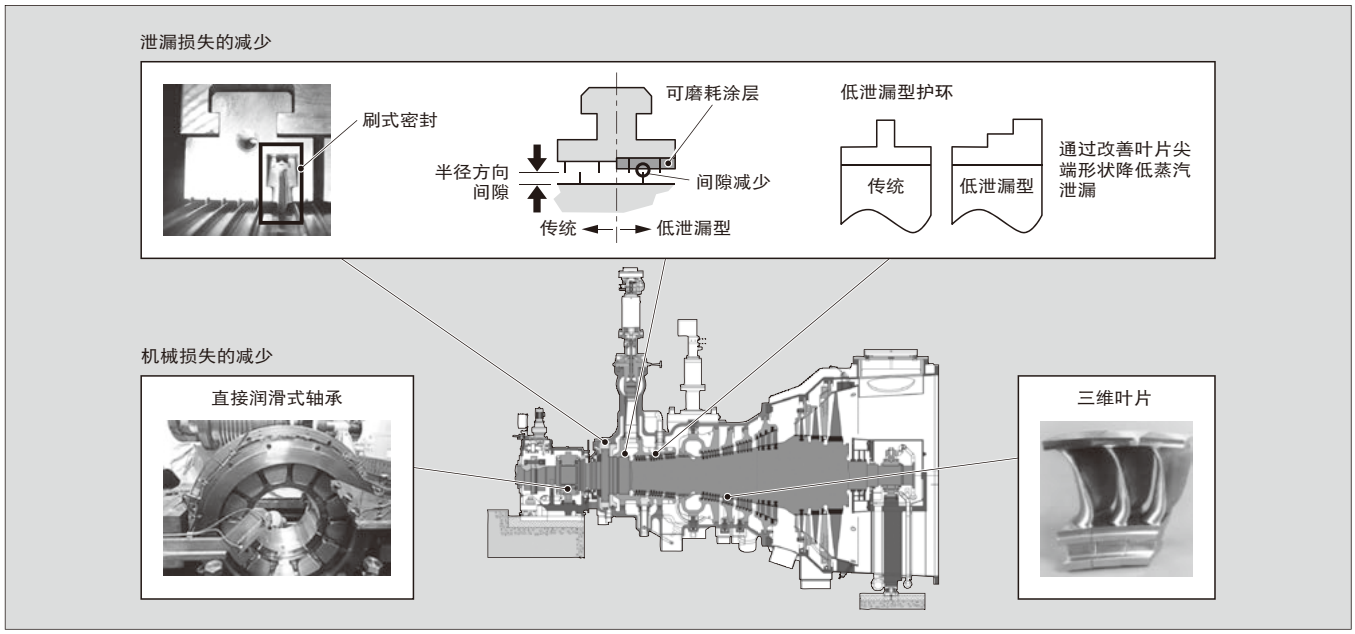


图 8　为改善汽轮机输出的部件更新

载下能以最高效率将蒸汽能量转化为旋转能量。因此，在部分负载运行时效率会下降，但如果根据蒸汽条件的变化对叶栅进行重新设计和更新，则可以增加输出。

⑵　内部部件更新（输出增加效果：1.7%）

除了更新汽轮机的叶栅外，通过更新**图 8** 所示的汽轮机部件，也可以增加输出。

(a)　三维叶片的应用

传统的汽轮机叶片仅对翼的截面形状进行了优化设计，属于二维翼；而目前已经开发出了对翼的整体形状进行三维优化的三维叶片。根据负荷情况，该翼从流体力学和热力学角度对整体形状进行了优化，从而实现高效率运行。在叶栅更新时采用三维叶片，可以进一步提高输出功率。

(b)　蒸汽的泄漏对策

由于汽轮机由转子等旋转部件和定子、壳体等静止部件组合而成，在其接合部，高温高压蒸汽可能泄漏至大气，进而减少输出。因此，通过减少蒸汽泄漏可以增加输出。目前，正在推进以下防止泄漏的对策。

① 刷式密封

该方式将刷状金属或非金属细丝束构成的刷式密封应用于汽轮机的转动部与静止部之间。与传统的迷宫密封等封闭方式相比，可以减少蒸汽泄漏。

②　可磨耗涂层

可磨耗涂层是一种施加在高速旋转汽轮机部件上的特殊表面处理，又称为“可磨损涂层”。当机械部件相互接触或摩擦时，涂层会被磨损以维持所需间隙。应用这种涂层可减少半径方向的间隙，降低蒸汽泄漏。

③ 低泄漏型护环

该护环是一种覆盖汽轮机叶片尖端的结构部件，在叶片高速旋转时可发挥防止蒸汽泄漏的作用。低泄漏型护环通过改善叶片尖端形状，将蒸汽泄漏降至最低。应用该结构后，可以有效减少蒸汽泄漏。

⑶　外部部件更新（输出增加效果：0.2%）

通过将汽轮机外部部件的轴承更换为直接润滑式轴承（能够将润滑油直接供应给轴承部位），可以增加输出。该轴承可以直接向轴承部位所有发生摩擦的表面供应润滑油，从而降低摩擦与磨损，减少机械损失。

通过上述 1～3 项的改造，总体输出可提升 3.7%。应用该对策，汽轮机壳体、发电机、配管与阀门、辅机、电气和控制系统、汽轮机机厂房以及汽轮机发电机的基础等均可沿用现有设备，因此可以降低费用，在较短的停机时间内改善输出。

此外，增加 3.7% 的输出，相当于在 100 MW 级别的发电站每年减少 16044 吨的 CO_2。

4　后记

本文对在地热发电和火力发电中减少温室气体排放的举措进行了介绍。

富士电机的发电业务正从扩大可再生能源的导入和推动火力发电低碳化两方面，积极致力于减少温室气体排放。富士电机将继续发挥迄今积累的技术优势，为解决社会课题作出贡献。

参考文献

⑴　経済産業省. “2040 年度におけるエネルギー需給の見通し(関連資料)”. 資源エネルギー庁. 2024. https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/opinion/data/2024_02.pdf, (参照 2025-01-24).

⑵　Nakashima, Y. et al. Carbon-based coatings for suppression of silica adhesion in geothermal power generation. Tribology International, 2023, vol.177.

⑶　中島悠也. Diamond-Like Carbon (DLC) による地熱発電におけるシリカスケールの付着抑制. 月刊トライボロジー, 2025-02, no.450, pp.46-49.

服部　康之

从事火力地热发电成套设备的机械、配管、工艺工程业务。现就职于富士电机株式会社能源事业本部发电成套设备事业部火力地热成套设备技术部。

山崎　竹伸

从事火力地热发电成套设备的项目管理业务。现就职于富士电机株式会社能源事业本部发电成套设备事业部火力地热成套设备服务部。

有助于实现无碳社会的新型氢燃料电池系统

New Hydrogen Fuel Cell System That Contributes to the Realization of a Carbon-Free Society

冈本　良一　OKAMOTO, Ryoichi

为实现无碳社会，氢燃料电池作为以氢为燃料、在发电与供热过程中不排放 CO_2 的装置，被寄予厚望，成为有效利用氢的关键所在。富士电机开发了额定输出为 180 kW，可轻松扩展至 360 kW 的固定式氢燃料电池系统。燃料电池模块采用了启动时间短的车载型固体高分子燃料电池。通过自主的运行控制技术，实现了长时间连续运行和高耐久性能。同时，还配备了可应对急剧负载变化的自主运行功能，可作为紧急用发电设备使用。

As part of efforts to realize a carbon-free society, hydrogen fuel cells that use hydrogen as fuel to generate electricity and heat without emitting CO_2 are expected to serve as a key technology for the effective use of hydrogen. Fuji Electric has developed a stationary hydrogen fuel cell system with a rated output of 180 kW, which can easily be expanded to 360 kW. For the fuel cell module, we adopted an in-vehicle polymer electrolyte fuel cell with a short start-up time, along with our proprietary operation control technology, achieving extended continuous operation and high durability. The system is equipped with an isolated operation function that can respond to rapid load changes and serve as a private power generator for emergency use.

1　引言

为实现无碳社会，可以由多种资源制造、使用时不排放 CO_2 的氢能利用备受关注。为实现将氢作为二次能源使用的氢能社会，氢燃料电池作为以氢为燃料的发电和供热装置，被寄予厚望，成为有效利用氢的关键所在。本文将对在氢燃料电池系统方面的举措进行介绍。

2　与燃料电池相关的社会和市场动向

作为实现无碳社会的关键，氢气的需求预计将持续扩大（如**图 1** 所示）。同时，各国对氢能产业的支持也正逐步从技术开发转向社会应用。除了发电站和交通移动领域，氢在工业用途中作为在工厂和建筑中进行发电的固定式燃料电池的燃料也被寄予厚望。在氢需求扩大和技术开发不断推进的背景下，日本政府于 2017 年率先在全球制定了氢能国家战略，即《氢能基本战略》。此外，为了推动氢能利用，日本还在 2024 年 5 月颁布了《促进低碳氢等的供应及利用以顺利实现无碳成长型经济结构转型相关法律》（《氢能社会推进法》）。该法律旨在促进全球范围内日益扩大的低碳氢（在生产过程中排放的 CO_2 较少的氢）等的利用。日本政府针对以下三个阶段分别设立目标，力图加速推进氢能社会的实现。

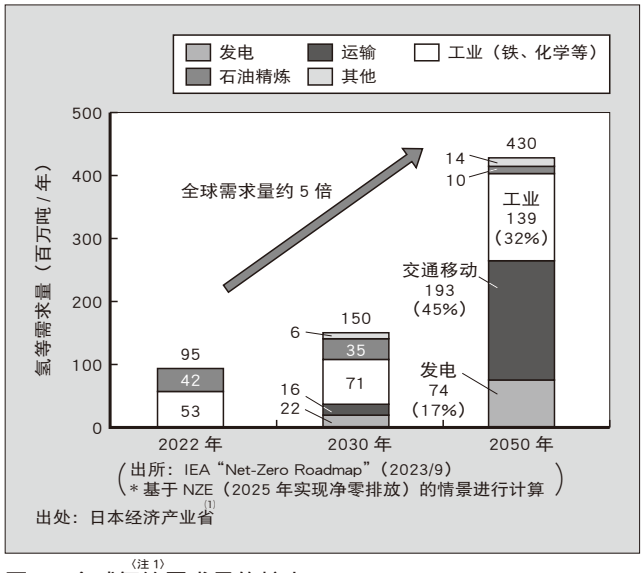


图 1　全球氢等〈注 1〉需求量的扩大

⑴　阶段 1（～ 2030 年）

通过差价补贴制度〈注 2〉，在启动商用级氢气的日本国内生产与进口的同时，推动钢铁、运输、发电等主要部门的需求启动

目标值：氢能导入量 300 万吨 / 年

成本 30 日元 /Nm^3

⑵　阶段 2（～ 2040 年）

扩大从可再生能源丰富地区进口低碳氢等产品的同时，在钢铁领域实现氢气的全面应用

目标值：氢能导入量 1200 万吨 / 年

⑶　阶段 3（～ 2050 年）

以商用车为中心的需求扩大和专烧技术的加速导入

目标值：氢能导入量 2000 万吨 / 年

成本 20 日元 /Nm^3

伴随氢能应用的扩大，以氢为燃料的燃料电池发电系统被视为实现无碳社会的重要手段之一。特别是在工业用途方面，燃料电池可充分发挥其作为分散型电源的特点，分散配置在电力用户区，适用于热电联产和自然灾害时的紧急用发电设备等用途。

〈注 1〉氢等：指氢气及由氢气合成的氨气、合成甲烷等

〈注 2〉差价补贴制度：为使低碳燃料与传统燃料价格持平，通过补贴弥补差价的制度（2024 年后，预算规模为 5 年 4570 亿日元，15 年 3 兆日元）

3 富士电机燃料电池的实绩与课题

3.1 磷酸型燃料电池系统的举措

富士电机从 1961 年开始从事燃料电池研究开发，至今已持续 60 余年。**表 1** 所示为富士电机的多种燃料电池的开发与产业化举措。

特别是在磷酸型燃料电池（PAFC：Phosphoric Acid Fuel Cell）方面，自 20 世纪 70 年代起，富士电机参与了日本国家项目“月光计划”并展开了全面展开研发，于 1998 年将 100 kW 的现场型 PAFC 系统商品化。自 2010 年起，如**表 2** 所示，除了使用天然气作为燃料的机型外，还增加了生物气和纯氢机型。

截至 2023 年末，富士电机已在包括欧洲、韩国在内的海外市场累计交付 137 台。截至 2024 年，有 75 台 PAFC 系统通过计划性维护保持着稳定运行。其中，有些系统的使用已超过 15 年设计寿命，现已持续运行超过 20 年。

3.2 PAFC 系统的课题

相较于同等输出功率的发电机等，PAFC 效率更高，但由于多以天然气为燃料，因此其发电过程中的 CO_2 排放量并非为零。此外，已实现商品化的 100 kW 机型在以下方面仍需改善：

⑴ 由于采用了设备整套打包配置，难以灵活满足客户的多样化容量需求。

⑵ 由于启动需要约 4 小时，应用于业务持续计划（BCP：Business Continuity Plan）时，需要在运用方式上进一步改进，或与其他电源结合使用。

4 新型氢燃料电池系统的开发

4.1 概要

为响应上述需求，富士电机采用了启动时间短的固体高分子燃料电池（PEFC：Polymer Electrolyte Fuel Cell），开发面向工业用途的氢燃料固定式发电系统。其开发规格如**表 3** 所示。

对燃料电池部分，采用了可靠性已获验证的车载用燃料电池模块。同时，与富士电机自制的功率调节器（PCS：Power Conditioning System）及控制设备相结合构成系统。通过运用在家庭用 PEFC 系统开发和实证试验中的经验，以及在 PAFC 系统产品化与工程化过程中积累的知识，富士电机力求实现寿命长且运行稳定的发电系统。

4.2 特点

⑴ 发电容量的可选择性

图 2 所示为 180 kW 级氢燃料电池系统外观，**图 3** 为其构成。在该发电系统中，构成设备按功能集成，包括用于容纳燃料电池模块的 FC（Fuel Cell）柜，集成控制功能的 FC 接口柜（FC-I/F 柜），搭载变频器等电力转换装置的 AC 接口柜（AC-I/F 柜），以及冷却设备与氮气设备。

表 1 燃料电池的种类

项目	固体高分子型燃料电池（PEFC）	磷酸型燃料电池（PAFC）	熔融碳酸盐型燃料电池（MCFC）	固体氧化物型燃料电池（SOFC）
燃料	天然气、LPG*1、甲醇、纯氢	天然气、生物气、纯氢	天然气、LPG、煤气、石脑油	天然气、LPG、煤气、石脑油
电解质	高分子离子交换膜	磷酸	熔融碳酸盐	陶瓷
运行温度	80～120 ℃	190～200 ℃	600～700 ℃	600～1000 ℃
发电容量	700 W～100 kW	100 kW～400 kW	250 kW～数 MW	1 kW～1 MW
发电效率（LHV*2）	33～44%	40～48%	44～66%	45～60%

*1 LPG： Liquefied Petroleum Gas
*2 LHV： Lower Heating Value

表 2 PAFC 的规格

项目	天然气	生物气	纯氢气
额定输出	105 kW（发电端）		
输出电压、频率	210 V、50/60 Hz		
发电效率（发电端）	42%（LHV）	40%（LHV）	48%（LHV）
热输出	123 kW	116 kW	99 kW
综合效率	91%（LHV）	84%（LHV）	93%（LHV）
废气	NO_X：5 ppm 以下 SO_X、粉尘：低于检测极限		NO_X、SO_X、粉尘：无
启动时间	4 小时		
外形尺寸	W2.2×L5.5×H3.4（m）		
重量	14.0 吨		13.5 吨

表 3 180 kW 的开发规格

项目	180 kW 机（开发中）
方式	PEFC
燃料	纯氢（ISO 14687） 压力：0.8 MPaG、流量：144 Nm^3/h
额定输出	180 kW（送电端）
输出电压、频率	AC3φ210 V、50/60 Hz
发电效率（发电端）	49%（LHV）（额定运行时）
热输出（可选项）	60 ℃（温水）
运行方法	全自动运行 / 系统并网运行 / 自主运行 可切换
启动时间	5 分以内
外形尺寸（基本构成）	W2.4×L3.6×H2.6（m）
总重量	10 吨以下 （包含附带设备）

在**图 2** 与**图 3** 的示例中，由两个 FC 柜构成 180 kW 的发电容量。如**图 3** 所示，燃料电池模块运行所需的进气压缩机等辅助设备均收放于各 FC 柜中，因此只需再增加两个 FC 柜，即可构成如**图 4** 所示的 360 kW 发电系统。由此，可以根据需求轻松构建适合的额定容量发电系统。

⑵ 高耐久性和长寿命化

此次采用的燃料电池模块基于车载用途，已实现商品化，因此具有连续运行超过一天时输出电压下降的特性。如果要将其应用于工业用途，需要提升连续运行时的输出稳定性。为此，利用迄今积累的 PEFC 相关知识，富士电机开发了抑制电压下降的运行控制技术[2]。通过组合多个燃料电池模块并进行运行控制，实现了系统整体在稳定输出状态下的连续运行。现已确认，该系统能够连续运行数千小时而不发生显著的输出功率下降。

⑶ 安全性的确保

在 PAFC 系统中，富士电机曾获得对安全性要求较高的《消防法》中的“应急电源”认证，并已取得面向欧洲市场的 CE 标志。通过运用这些经验，此次的氢燃料电池发电系统在设计上不仅符合《电气事业法》、消防法等日本国内法规，同时也符合固定式燃料电池安全性的国际标准 IEC 62282-3-100 及日本国内标准 JIS C 62282-3-100。

例如，作为针对氢气的安全措施，在处理氢气的 FC 柜内安装了换气扇和可燃性气体检测器。**图 5** 所示为 FC 柜的内部结构。FC 柜内的燃料电池模块的排气与换气扇的持续换气混合，设计时将排气中可燃性气体浓度控制在燃烧下限的 1/4 以下。稀释后的废气通过排气口排放至大气。此外，FC 柜内部通过持续换气保持低于大气压的状态，从而避免氢气从排气口以外的场所泄漏。此外，当泄漏的氢气超过换气量导致 FC 柜内氢气浓度上升至标准值以上时，可燃性气体检测器会检测到该状况并停止氢气供应。此外，在 FC 柜内的上部及排气口还安装了温度计，用于监控是否因局部氢气泄漏而发生燃烧。

⑷ 维护作业的简易化

如**图 2**、**图 3**、**图 4** 所示，FC 柜与 FC-I/F 柜的内部设

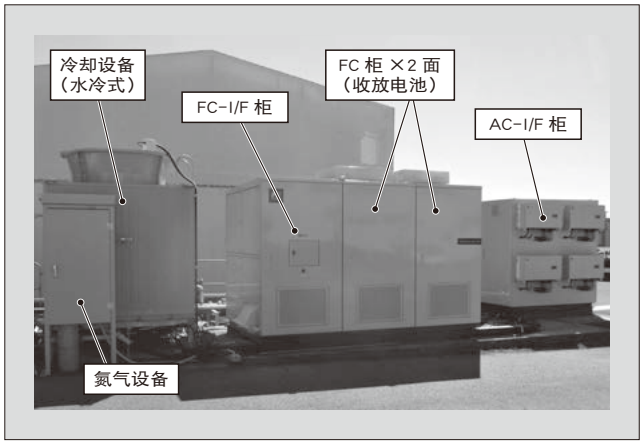


图 2　180 kW 级氢燃料电池系统外观

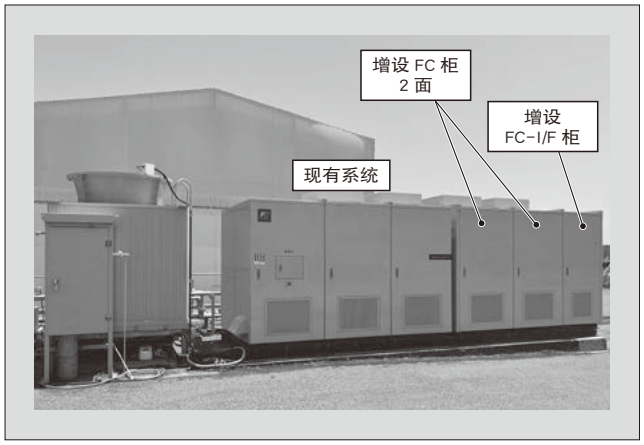


图 4　360 kW 级氢燃料电池系统外观

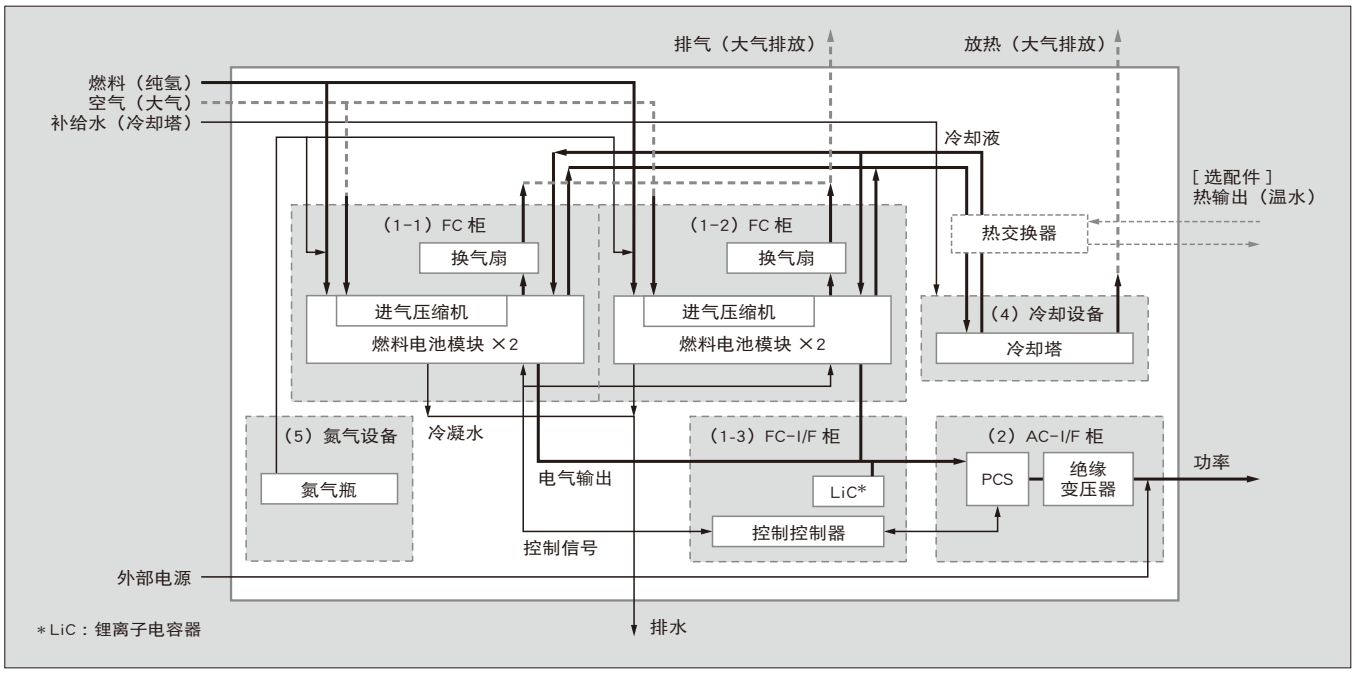


图 3　180 kW 级氢燃料电池系统构成

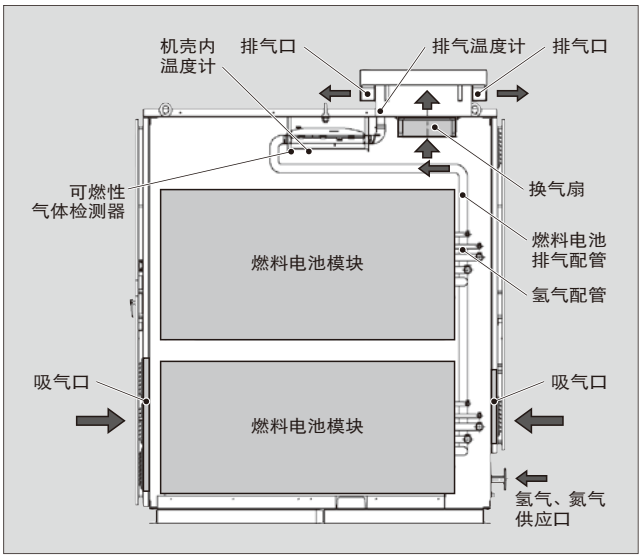


图 5　FC 柜的内部结构（截面图）

备均布置为可从正面或背面进行维护的结构。同时，由于无需从侧面进行操作，可将侧面互相连接，横向一列紧凑安装。此外，采用的燃料电池模块中除了燃料电池堆，还集成了空气压缩机、氢气喷射器、氢气循环鼓风机、冷却水泵、电力转换装置以及控制设备等部件，因此需要进行维护。因此，系统采用了可轻松将燃料电池模块从 FC 柜中抽出的结构。同时，正在准备采取相应措施，实现燃料电池模块内部部件的现场更换。

⑸　自主运行

与蓄电池相比，氢气没有自放电造成能量损失的问题，适合长期储存，因此燃料电池作为停电时的紧急用发电设备受到关注。同时，由于氢燃料电池在发电时不排放，属于清洁发电方式且运行安静，因此，作为灾害时能够长期运行的发电设备，正在工厂、医院和公共设施等领域被积极考虑导入，有望对 BCP（业务持续计划）作出贡献。

为了应用于上述用途，要求电力系统必须具备能够脱离电网，向特定负载自主运行供电的能力。本发电系统采用了具备自主运行功能、富士电机自制的 PCS，通过利用车载燃料电池模块能够快速调整输出的特性，实现了可应对急剧负载变化的自主运行。**图 6** 所示为氢燃料电池系统的控制系统。在燃料电池模块与 PCS 之间集成锂离子电容器，通过对直流电压进行补偿控制，能够应对电力需求的急剧变化。此外，作为标准功能，系统具备并网运行和自主运行 2 种运行模式，并可进行相互切换。

⑹　副生氢的应用

从氢能应用的扩大和资源有效利用的角度而言，作为工业副产物产生的副生氢气正受到关注。特别是在烧碱制造过程中，产生的副生氢纯度高达 99.9% 以上，具有应用潜力。然而，用于燃料电池汽车的氢气，其纯度需符合国际标准 ISO 14687（即≥ 99.97%），即使是微量杂质也会影响燃料电池模块的性能。因此，要将副生氢应用于氢燃料电池系统，必须进一步去除杂质。此外，氢燃料电池系统需要从周围空气中摄取氧气，因此也必须去除空气中的杂质。

现在，正在推进在烧碱工厂对氢燃料电池系统进行实机验证的计划，分析用于验证的副生氢和实证现场空气中含有的杂质，并基于结果，研究包括安装过滤器在内的必要对策。以空气中的 SO_2 为例，**表 4** 展示了过滤器结构与去除率的研究结果。通过采用活性炭薄片和活性炭颗粒的 2 级过滤

表 4　过滤器结构与 SO_2 去除率

过滤器结构	SO_2 去除率
活性炭薄片	去除率：71% ○入口 0.7 ppm ○出口 0.2 ppm
活性炭颗粒	去除率：82% ○入口 0.7 ppm ○出口 0.125 ppm
活性炭薄片 + 活性炭颗粒	去除率：约 100% ○入口 0.7 ppm ○出口 0.006 ppm 以下

* ISO 14687 规格：0.004 ppm 以下

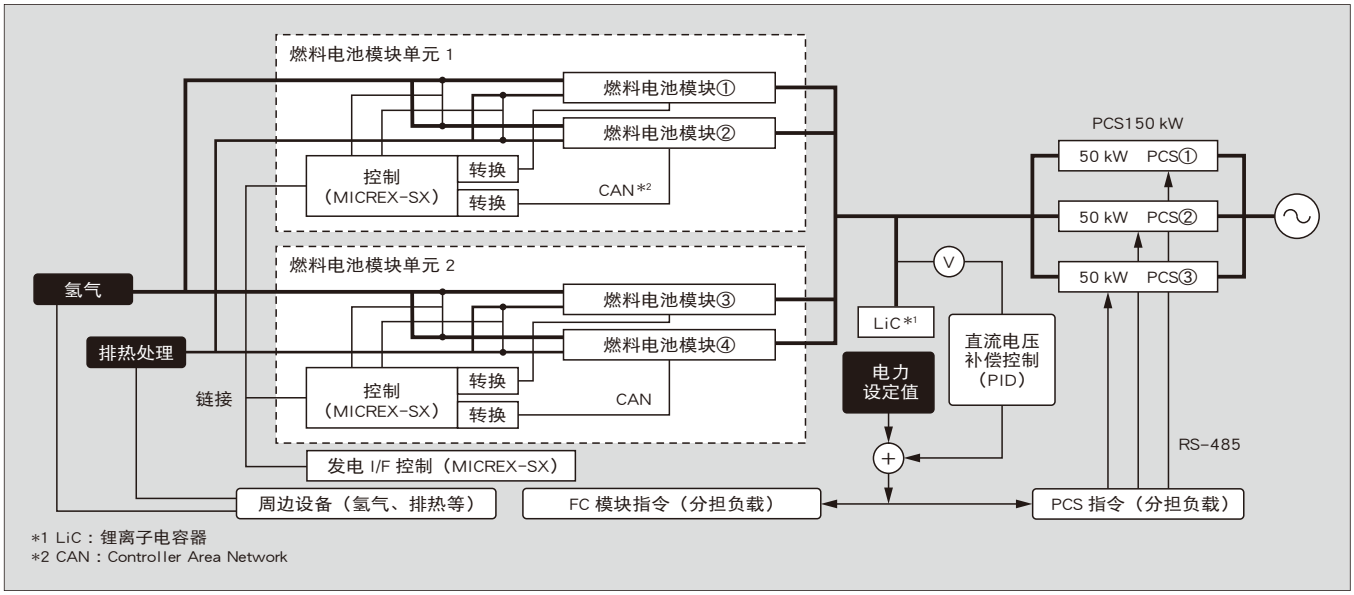


图 6　氢燃料电池系统的控制系统

结构，即使空气中 SO_2 浓度一度升高至 0.7 ppm，也能够基本满足 ISO 14687 规定的允许值。

5 后记

本文对有助于实现无碳社会的新型氢燃料电池系统进行了介绍。

富士电机计划通过与拥有副生氢资源的企业合作，启动氢燃料电池系统的导入。今后，将提供满足无碳社会多样化氢能利用需求的固定式氢燃料电池系统。

参考文献

⑴ 経済産業省. “水素を取り巻く国内外情勢と水素政策の現状について”. 資源エネルギー庁. 2024. https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/024_04_00.pdf, (参照 2025-03-31) .

⑵ 高野洋. 有助于实现氢能社会的燃料电池解决方案. 富士电机技术期刊. 2023, vol.C15, no.4, pp.188-191.

冈本　良一

从事纯氢燃料电池系统的开发业务。现为富士电机株式会社能源事业本部开发统括部发电设备开发中心经理。

有助于电力系统稳定运行且具备伪惯性控制功能的蓄电池 PCS

An Emulated Inertia Control Function-Equipped PCS for Battery Energy Storage Systems That Contributes to the Stable Operation of the Power Grid

冈　直哉 OKA, Naoya　　上村　浩文 UEMURA, Hirofumi　　山田　真 YAMADA, Makoto

近年来，为了实现无碳社会，可再生能源的导入不断扩大。由于电力系统中具备频率维持能力的同步发电机减少，导致在发生系统事故或供需平衡骤变时，频率波动骤变的风险增加。为了应对这个问题，富士电机开发了具备伪惯性控制功能的蓄电池 PCS。该蓄电池能够模拟惯性力（同步发电机的频率调节能力），且具备在数秒内发挥作用的频率调节能力，即一次调节力（调速器控制）。通过搭载该功能，蓄电池 PCS 能够在负载波动时瞬时发挥惯性力以抑制频率波动，从而维持电力系统的稳定性。目前，该性能已通过小规模模型验证。

In recent years, the adoption of renewable energy has been expanding as part of efforts to realize a carbon-free society. As the number of synchronous generators capable of maintaining grid frequency declines, frequency fluctuations may increase in the event of grid failures or sudden imbalances between supply and demand. To address this problem, Fuji Electric is developing an emulated inertia control function-equipped PCS for battery energy storage systems, which emulates two frequency maintenance capabilities: inertial response, which serves as a frequency maintenance mechanism as same as synchronous generators, and frequency response as primary reserve (governor control), which respond within a few seconds to support frequency. We used a miniature model to verify that developed function allows a PCS for battery energy storage systems to instantaneously supply power as inertial response to load fluctuations to suppress frequency fluctuations, thereby maintaining the stability of the grid.

1　引言

近年来，为了实现无碳社会，太阳能发电（PV：Photovoltaic）和风力发电等可再生能源的导入量正在迅速增加。日本也设定了到 2035 年度，比 2013 年度减少温室气体排放 60%，2040 年度减少 73%，到 2050 年实现碳中和的目标。为了实现上述目标，正在积极推动可再生能源的导入[1]。在可再生能源中，PV 与风力发电等能源通过功率调节器（PCS：Power Conditioning System）接入电力系统。电力系统中，利用 PCS 的发电系统连接数量在迅速增加，而旨在减少 CO_2 排放量、配备机械旋转体的火力发电站等同步发电机（SG：Synchronous Generator）连接数量却在减少。伴随上述现象，在供需平衡波动或发生系统事故时，电力系统的频率波动加剧，成为大规模导入可再生能源时必须面对的问题[2]。

富士电机正在推进电力控制技术和设备的开发，努力确保在大量导入可再生能源的情况下，也能维持电力系统的稳定。本文将对有助于电力系统稳定运行且具备伪惯性控制功能的蓄电池 PCS 进行介绍。

2　电力系统的稳定化

为了在电力系统中实现稳定的电力供应，必须始终保持电力需求与发电量一致。只有这样，电力系统的频率才能维持在恒定值。如**图 1** 所示，当发电量小于需求时，电力不足将导致频率下降；而当发电量大于需求时，电力剩余将导致频率上升。如果频率的波动超出允许范围，发电机的保护功能会使其逐一与电力系统脱离，进而引发大规模停电[3]。

为了在供需平衡发生变化时保持频率恒定，如**图 2**（a）所示，电力系统的发电输出响应中包括惯性力、一次调节能力、二次调节能力。其中，惯性力和一次调节能力（调速器控制）由同步发电机负责承担。电力系统中的惯性力，指在供需平衡发生变化时维持频率的能力[4]。当电力系统中发生急剧供需波动时，通过将旋转体的惯性作为能量来源，抑制过渡的频率波动。一次调节能力（即调速器控制），则通过发电机中搭载的调速器实现。根据电力系统频率的变化，调速器会自动调节燃料的供应量或水轮机阀门的开度，通过增加或减少发电输出来恢复频率。此外，一次调节能力在惯性力的初期响应之后，将进一步主动调节频率。由于调速器控制为比例控制，会保留稳态偏差，因此作为二次调节能力，将由中央供电指令所执行负载频率控制（LFC：Load Frequency Control），使频率恢复至额定值[5]。

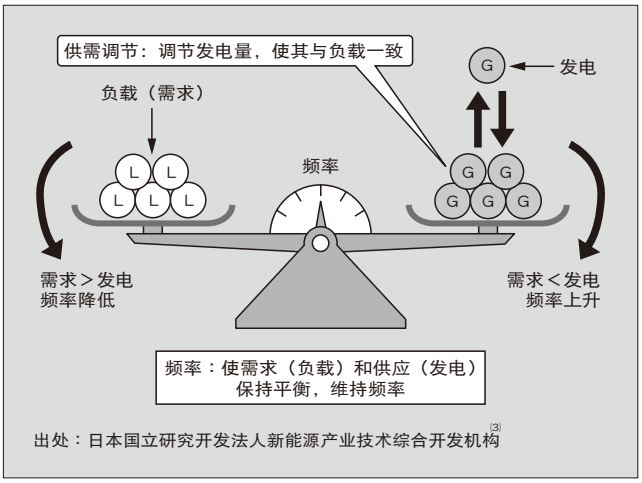


图 1　需求与发电调节示意图

图 2（b）、**图 2**（c）所示为可再生能源导入对惯性力的影响。**图 2**（b）所示为仅由具有相同程度惯性的同步发电机构成的电力系统。当发生较大负载波动时，多个同步发电机凭借其惯

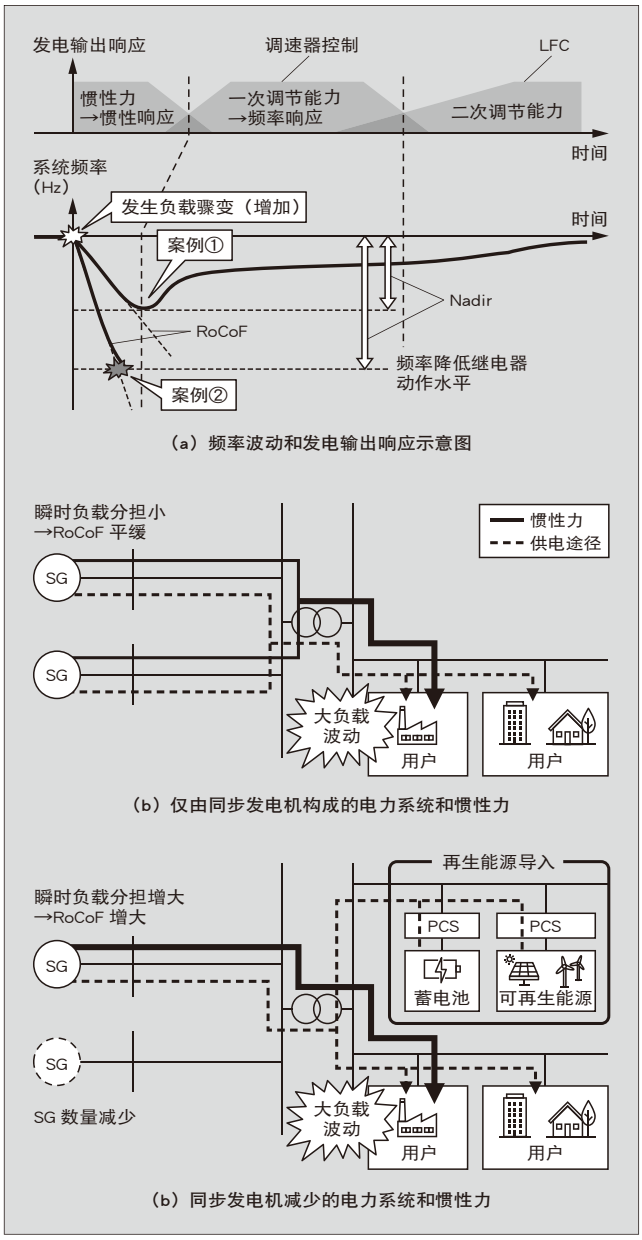


图 2　抑制频率波动的同步发电机的作用

性力瞬时分担负载骤变。其结果如**图 2**(a)的案例①所示，频率变化率（RoCoF：Rate of Change of Frequency）保持在较为平缓的水平。随后，通过一次调节能力使频率恢复，维持了电力系统的稳定。此时，由于频率最大偏差（Nadir）未达到频率下降继电器和负载切断继电器的动作水平，系统可以在不中断供电的情况下继续运行。

图 2(c)所示为通过 PCS 导入不具备惯性力的可再生能源和蓄电池、同时减少同步发电机数量的电力系统结构。系统并网的可再生能源和蓄电池由于不具备惯性力，在发生大负载波动时，具备惯性力的同步发电机需要承担更多的瞬时负载。其结果如**图 2**(a)案例②的频率变化率所示，RoCoF 会增大。因此，在一次调节能力响应之前，由于频率偏差过大，进而触发频率下降继电器或负载切断继电器等系统保护功能，可能导致大规模停电。

为解决此类问题，富士电机开发了用于蓄电池 PCS 的伪惯性控制功能。该功能可以在 PCS 中模拟惯性力和一次调节能力（调速器控制）。

3　调速器控制功能及伪惯性控制功能

3.1　调速器控制功能

调速器控制指调速器保持同步发电机机械旋转体转速恒定的能力。从电网系统侧看，其电气行为表现为跟随电网系统频率偏差，按照频率调节率（与频率变化对应的输出变化比例）调节有效功率。在 PCS 中，对其进行模拟的功能即为调速器控制功能。由于需要根据系统电网频率偏差增加或减少输出有效功率，因此在直流侧需要具备蓄电池等可充放电的电力缓冲装置。**图 3** 所示为利用蓄电池 PCS 实现调速器控制功能的控制框图。与传统蓄电池 PCS 相同，采用相位同步电路（PLL：Phase-Locked Loop）使输入信号相位与输出信号相位同步，从而计算与系统电压同步的相位信息 θ_{PLL}。通过该方式，作为基准相位执行高速电流控制，从而对蓄电池 PCS 输出的有效功率和无效功率进行控制。在此基础上，为了测量系统电压频率 f_g，增加了频率测量功能，并计算其与系统电网额定频率 f_n（西日本为 60 Hz，东日本为 50 Hz）的差值，即系统电网频率偏差 Δf。随后，通过将该值乘以作为频率调节率的倒数的调速器增益 K_{GOV}，并据此调节蓄电池 PCS 输出的有效功率输出设定值 P_{set}，从而实现调速器控制功能。在电力恒定控制中计算电流指令值，使输出达到设定的有效功率。同时，基于用于通过瞬时电流控制来控制电抗器电流 i_L 的瞬时电压指令值以及输出端电压 v_{out}，计算出变频器电路应输出的目标电压指令值 v^*_{PWM}，进行 PWM（Pulse Width Modulation）转换，并将其作为开关脉冲指令发送到变频器电路。

3.2　伪惯性控制功能

伪惯性控制功能指在 PCS 中模拟同步发电机所具备的惯性力和调速器控制的功能。**图 4** 所示为利用蓄电池 PCS 实现伪惯性控制功能的控制框图。以往，蓄电池 PCS 通过

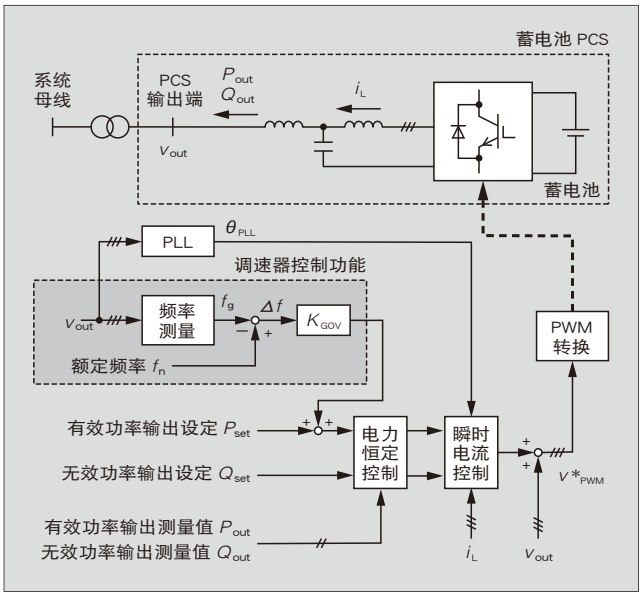


图 3　利用蓄电池 PCS 实现调速器控制功能的控制框图

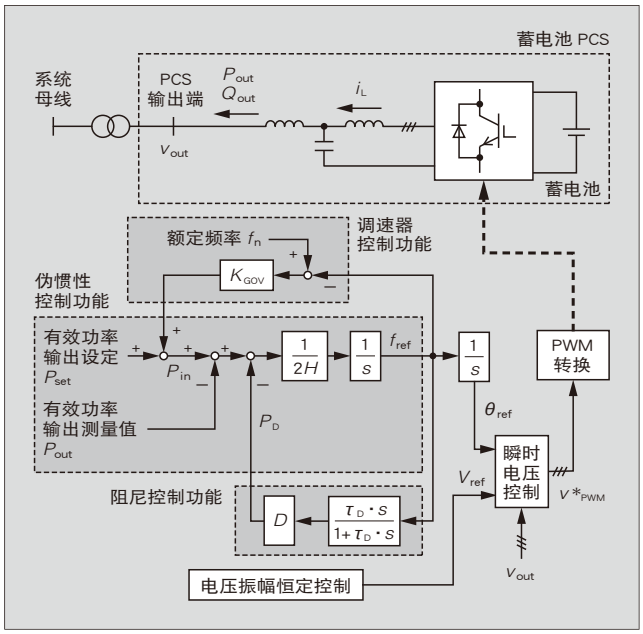


图 4　利用蓄电池 PCS 实现伪惯性控制功能的控制框图

搭载 PLL 来控制输出电流，而具备伪惯性控制功能的蓄电池 PCS 则通过控制输出电压的频率来模拟同步发电机的动态和特性。该控制方法也称为虚拟同步发电机（VSG：Virtual Synchronous Generator）控制。利用同步发电机机械旋转体运动特性建模的摆动方程式(1)，计算包含调速器控制功能增减量的有效功率指令值 P_{in} 和 PCS 实际输出有效功率测量值 P_{out} 的差分，再除以单位惯性常数 H 并进行积分，从而求得自身的频率指令值 f_{ref}。

$$\frac{df_{ref}}{dt} = \frac{1}{2H}\{P_{in} - P_{out} - P_D + K_{GOV}(f_n - f_{ref})\} \cdots\cdots(1)$$

此处，由阻尼控制功能输出的 P_D 值可通过公式(2)计算得出。

$$P_D = \frac{D \cdot \tau_D \cdot s}{1+\tau_D \cdot s} \cdot f_{ref} \cdots\cdots(2)$$

伪惯性控制不仅具备用于衰减频率摆动或振荡的阻尼控制功能（阻尼增益 D），还具备调速器控制功能（调速器增益 K_{GOV}）。在使用了蓄电池 PCS 的调速器控制功能中，需要使用 PLL 和系统电压的频率测量功能。但在伪惯性控制中，可以基于自身的频率指令值 f_{ref} 计算基准相位 θ_{ref} 并实现调速器控制功能，因此无需 PLL 和系统电压频率测量功能。除了调速器控制功能带来的频率响应外，还需要通过响应性更快的惯性响应对有效功率输出进行过渡性的增减，因此在直流侧必须具备蓄电池等能够高速充放电的电力缓冲设备。

4　控制功能的验证

4.1　验证时使用的试验环境

通过小型模型实验，对仅具备调速器控制功能的蓄电池 PCS 和具备伪惯性控制功能的蓄电池 PCS 在过渡负载分担能力和系统电网频率稳定效果方面进行了验证。**图 5** 所示为

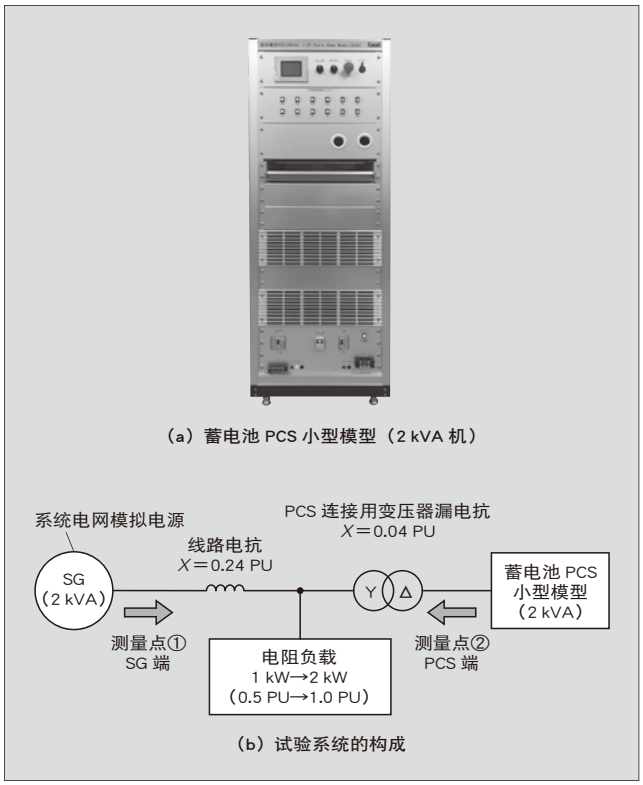


图 5　小型模型试验环境的构成

小型模型试验环境的构成。将额定容量为 2 kVA 的蓄电池 PCS 通过连接用变压器及线路电抗连接到系统电网模拟电源。系统电网模拟电源模拟同步发电机动作，容量设定为与蓄电池 PCS 相同的 2 kVA。在此接入电阻负载，并将负载从 1 kW（0.5 PU）骤变至 2 kW（1.0 PU），从而引发在下降方向的频率波动。同时，在 SG 端和 PCS 端测量频率和有效功率的变化。此处，PU 表示以额定容量标准化的负载量。

4.2　验证结果

首先，仅具备调速器控制功能的 PCS 在各测量点的频率和有效功率变化情况如**图 6** 所示。在 SG 端，频率变化情况为 RoCoF 约为 −2 Hz/s，Nadir 约为 −1 Hz，均为较大值。其原因，是由于 PCS 不具备作为瞬时发电输出响应的惯性响应能力，导致仅由 SG 承担瞬时及过渡负载分担，结果造成了频率波动更快且幅度更大。此外，SG 端的有效功率输出随负载骤变瞬时增加约 0.5 PU。该数值与负载的骤变量相同。此外，在 PCS 端，还观测到在负载骤变时，相位变化表现为频率骤变。同时，有效功率输出时未观察到瞬时变化，因此确认其不具备惯性响应能力。另一方面，降低后的频率在 1 秒后开始恢复，同时有效功率的增加也得到缓解，确认了调速器控制功能的频率响应能力可有效发挥作用。

其次，具备伪惯性控制功能的 PCS 在各测量点的频率和有效功率变化情况如**图 7** 所示。在 SG 端，频率变化情况为 RoCoF 约 −1 Hz/s，Nadir 约 −0.6 Hz，与仅有调速器控制的情况相比降低了一半。这是由于具备伪惯性控制功能的蓄电池 PCS 具有惯性响应能力，因此可以减轻 SG 在瞬时与过渡阶段的负载分担，结果使频率波动得以缓和。随负载骤变而产生的 SG 有效功率输出变化也减少一半，缓和至

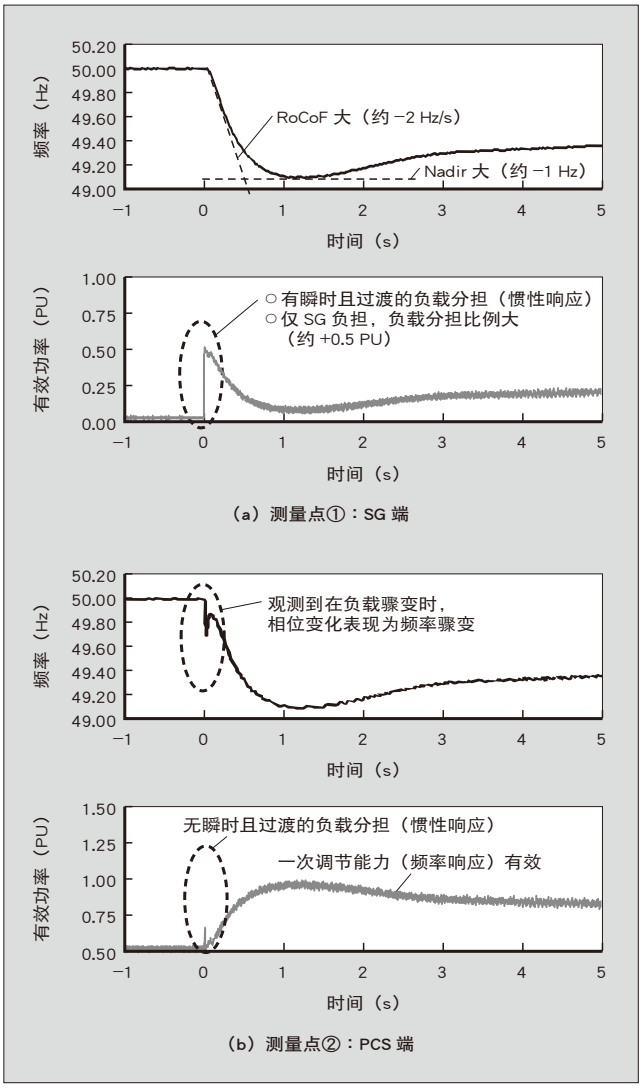


图 6　仅具备调速器控制功能的 PCS 在各测量点的频率和有效功率变化情况

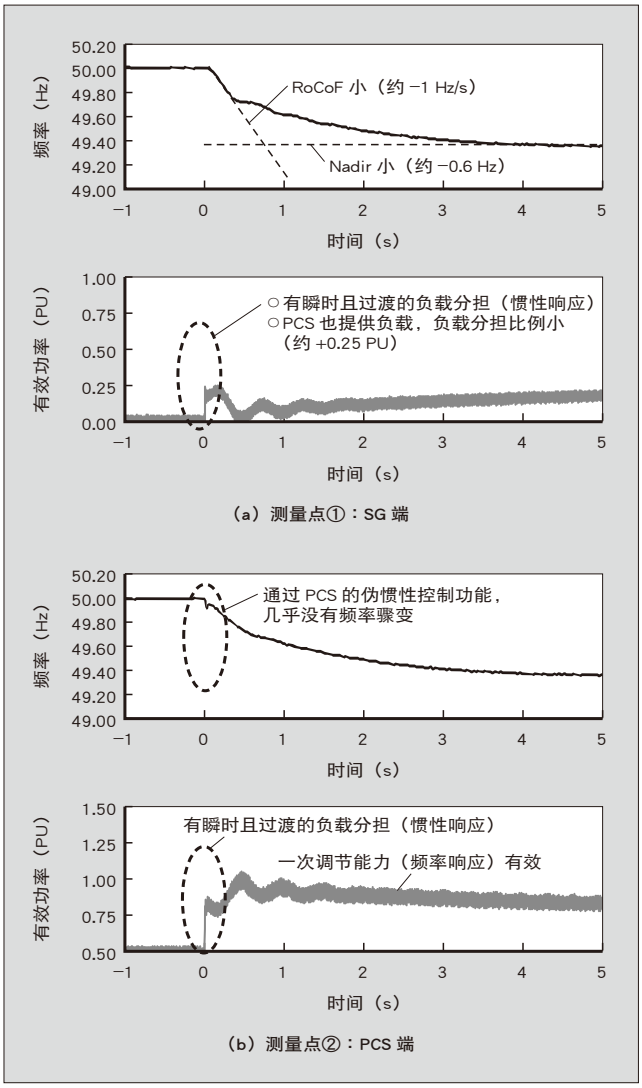


图 7　具备伪惯性控制功能的 PCS 在各测量点的频率和有效功率变化情况

0.25 PU。此外，在 PCS 端未观察到频率的急剧变化。同时，PCS 端的有效功率输出随负载骤变瞬时增加，可确认其具备惯性响应能力。另一方面，增加的有效功率在 1 秒后得到缓解，确认了调速器控制功能的频率响应能力可有效发挥作用。

5　后记

本文对有助于电力系统稳定运行且具备伪惯性控制功能的蓄电池 PCS 进行了介绍。针对大规模导入可再生能源时所面临的电力系统低惯性化引发的频率波动问题，在蓄电池 PCS 中搭载伪惯性控制功能是一种有效的对策。此次开发的伪惯性控制功能，目的是应用于正在产品化推广的中容量到大容量的蓄电池 PCS。为将其导入市场，需要开发能够满足系统电网并联系统规程所要求的事故时持续运行（FRT：Fault Ride Through）条件，以及可以和防止单独运行对策相协调的伪惯性控制功能。目前，相关开发仍在持续推进。

随着可再生能源的持续导入和主电源化，具备伪惯性控制功能的蓄电池 PCS 的需求预计将进一步增加。富士电机今后将继续关注未来动向，开发并提供符合市场需求的技术和产品，为电力的稳定供应和电力系统的可持续、稳定运行作出贡献。

参考文献

⑴　経済産業省. エネルギー基本計画. https://www.meti.go.jp/press/2024/02/20250218001/20250218001-1.pdf,（参照 2025-04-21）.

⑵　上村浩文，原田慈.“対策装置となる慣性低下対策 PCS の開発および標準化に向けた取り組み”. 電気学会誌. 2023, vol.143, no.4, pp.196-199.

⑶　NEDO 再生可能エネルギー技術白書. 第 2 版. https://www.nedo.go.jp/content/100544824.pdf,（参照 2025-04-21）.

⑷　一般社団法人日本電機工業会. 用語解説. 慣性力. https://www.jema-net.or.jp/engineering/dispersed/evefa20000001du1-att/k11.pdf,（参照 2025-06-11）.

⑸ 天野博之.“用語解説 第 81 回テーマ：ガバナフリー制御”.
https://www.iee.jp/pes/termb_081/,（参照 2025-06-11）.

冈　　直哉

从事电力系统仿真器的工程工作。现就职于富士电机株式会社能源事业本部能源管理事业部电力流通技术部。

山田　　真

从事电力流通领域的控制、保护、分析装置的工程工作。现为富士电机株式会社电力电子系统能源事业本部能源管理事业部电力流通技术部课长。技术士（电气电子部门）。电气学会会员。

上村　浩文

从事系统并网变频器、PCS 的控制技术开发工作。现为富士电机株式会社技术开发本部数字创新研究所系统控制研究部课长助理。博士（理学、工学）。

有助于电炉设备稳定运行的无功功率补偿装置

Static Var Compensators That Contribute to the Stable Operation of Electric Furnaces

大宫　和树 OMIYA, Kazuki　　筱原　博 SHINOHARA, Hiroshi　　冈崎　洋平 OKAZAKI, Yohei

近年来，伴随着全球的无碳化发展，高炉钢铁行业也在推进向可抑制 CO_2 排放量的电炉转型。在电炉中，由于短路等原因，电弧电阻会发生骤变，从而引发系统电压下降或周期性电压波动（闪变故障）。因此，用于补偿无效功率波动的装置不可或缺。自 20 世纪 70 年代初期开始，富士电机将无功功率补偿装置产品化。目前，富士电机可提供三种产品类型：采用闸流管（可承载大电流，适合大容量化）的他励式，采用 IGBT 等器件（可实现高补偿性能）的自励式，以及结合他励式与自励式两种方式的混合式。

In recent years, in line with the global trend toward a decarbonized society, the blast furnace steel industry has been shifting toward electric furnaces that can reduce CO_2 emissions. In electric furnaces, short circuits and other faults can cause sudden changes in arc resistance, resulting in voltage drops on the grid, as well as periodic voltage fluctuations (flicker failure). Therefore, equipment that compensates for reactive power fluctuations is indispensable. Fuji Electric has been manufacturing and selling static var compensators since the early 1970s. At present, we offer the following three types: a separately-excited type that uses thyristors as devices to handle large currents, making it suitable for increasing capacity; a self-excited type that uses devices such as IGBTs to achieve high compensation performance; and a hybrid type that combines the separately-excited and self-excited types.

1　引言

伴随着全球的无碳化发展，高炉钢铁行业也正在推进从使用化石燃料焦炭的高炉向可降低 CO_2 排放量的电炉转型。在电炉中，通过在电极与待熔物，即废钢之间产生电弧，将电能转换为热能，实现废钢的快速熔化。根据熔化状况，电弧会发生波动，进而导致无效功率波动，引发系统电压下降或周期性电压波动（闪变故障）。此外，电炉作为单一波动负载，其设备容量通常在数十 MVA 以上，对电源系统有很大影响。因此，用于补偿无效功率波动的装置不可或缺。

本文将介绍富士电机提供的无效功率补偿装置（SVC：Static Var Compensator）的各类方式的特点及未来的发展动向。

2　电炉的无效功率补偿

2.1　电炉中无效功率补偿的必要性

图 1 所示为用于炼钢的电炉等效电路。为了实现电弧稳定，需要根据自身容量配置 30～60% 的电抗 X，但该电抗 X 产生的无效功率会导致电源系统波动。

在电炉运行过程中，废钢熔落会造成短路或电弧熄灭，因此发生电弧阻抗骤变，进而引起有效功率和无效功率的巨大波动。

图 2 所示为电炉运行图表实例。电炉的无效功率波动会在几个周期内发生，进而引起电源系统的电压下降和周期性闪变故障。

为抑制这种闪变故障，需要将电源系统的短路容量设定为电炉容量的 50～80 倍。但是，由于电炉作为单一波动负载，其设备容量通常在数十 MVA 以上，因此无效功率补偿装置不可或缺。

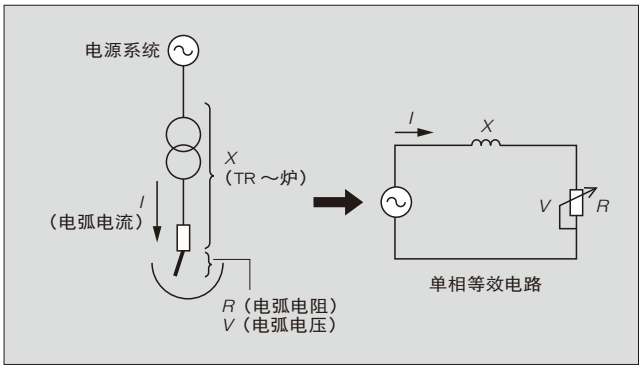


图 1　用于炼钢的电炉等效电路

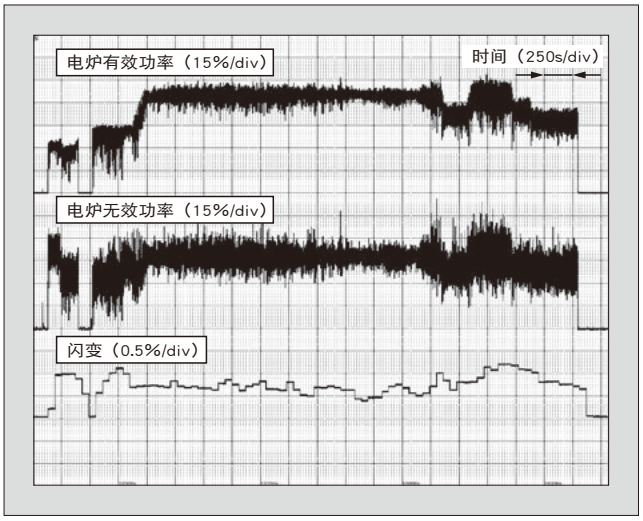


图 2　电炉运行图表实例

2.2　各种方式的特点

SVC 具有多种方式，富士电机自 20 世纪 70 年代前

期开始已实现产品化，目前可提供“他励式”、“自励式”以及两者结合的“混合式”。

其中，他励式采用闸流管作为器件，相比自我消弧型器件可承载更大电流，因此适用于大容量化。关于各方式的结构和工作原理，将在**第3章**以后进行介绍。自励式采用IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）等自我消弧型器件，在瞬时电流水平进行补偿，相比他励式具有更高的补偿性能。

混合式则结合了高性能自励式与适合大容量的他励式的特点，主要用于改善现有设备的补偿性能或应用于大容量电炉。

3 无功功率补偿装置

3.1 他励式 SVC

如**图 3** 所示，他励式 SVC 由串联闸流管的电抗器与功率因数改善电容器并联电路构成，能够连续控制滞后无效功率。针对电炉负载产生的滞后无效功率波动 Q_L，通过控制闸流管的引弧角来使电抗器导通或关断，以控制滞后无效功率，从而使系统提供的无效功率 Q_S 保持最小且稳定。由于电抗器仅输出滞后无效功率的部分，因此需要配置功率因数改善电容器和高次谐波滤波器以进行功率因数补偿和高次谐波补偿。

他励式 SVC 由于采用的闸流管相较于自我消弧型器件能承载更大电流，因此多用于 60～70 MVA 以上的大容量应用场景。

图 4 所示为他励式 SVC 的控制框图。本控制装置实现了富士电机独有的无效功率补偿技术，例如利用预测运算方法与无效功率运算方法的“闪变成分提取运算功能”，以及可根据电炉特点自动调整控制常数至最佳值的“自整定功能”。通过上述功能，可将电炉产生的闪变最多降低约 60%。

如后续内容所述，富士电机的他励式 SVC 有两种结构：一种是采用低压闸流管元件和高阻抗变压器的“低压方式”；另一种是采用高压闸流管元件和串联电抗器的“高压方式”。

(1) 低压方式

图 5 所示为低压方式的装置构成。低压方式通过低压闸流管装置的开关操作控制高阻抗变压器的电流，从而实现无效功率补偿。装置容量可通过并联闸流管元件的数量进行灵活调节。

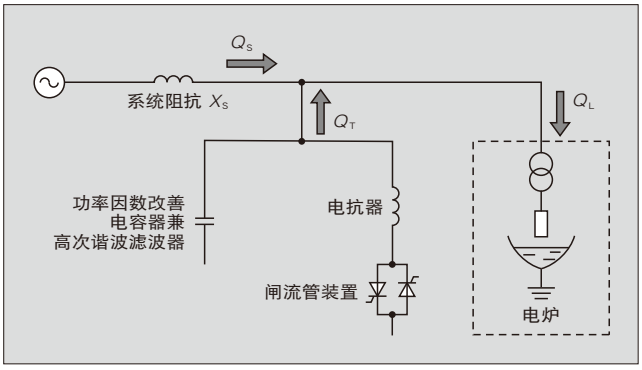


图 3 他励式 SVC 的原理构成图

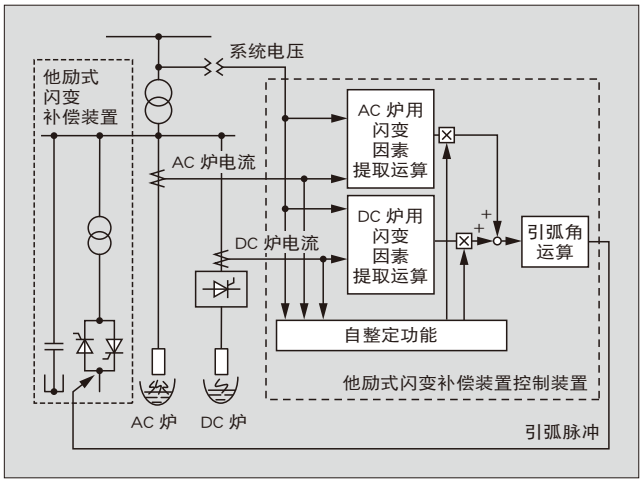


图 4 他励式 SVC 的控制框图

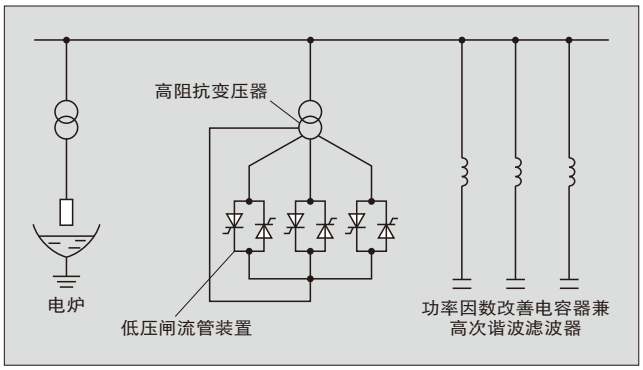


图 5 低压方式的装置构成

(a) 高阻抗变压器

高阻抗变压器在将电压降至适合低压闸流管装置使用水平的同时，还具备产生滞后无效功率所需的电抗。此外，通过将一次绕组接成三角形（Δ接线），抑制了低压闸流管装置产生的三次高次谐波成分流入系统电网。

随着变压器阻抗的增加，一次与二次绕组间的漏磁通也随之增大，可能导致变压器绕组和周边结构（固定架、油箱等）的局部过热。针对该问题，富士电机产品会先分析漏磁通分布，并根据需要采取**图 6** 所示的对策。

① 为降低绕组内的涡流损耗，在变压器绕组中使用换位导线

② 为避免磁通集中，在框架材料中使用非磁性材料

③ 为避免磁通集中在油箱上，在内部设置油箱屏蔽

(b) 低压闸流管装置

低压方式是应用了闸流管整流器技术的低压大电流装置。根据元件间电流不平衡情况，决定了闸流管堆栈的并联原件数量。**图 7** 所示为低压闸流管堆栈的外观。从结构而言，闸流管元件与熔断器分别安装在导体之上，两者之间通过薄铜排相连。该铜排为减小施加至熔断器的机械力，设计成厚度 5 mm 的薄板，并在内部形成水路进行水冷，从而实现大电流化。此外，为了防止通流电流产生的磁通导致导体周围局部过热，富士电机还采用了在其大容量整流器“S-Former”中积累的磁场抑制技术，实现了高可靠性。

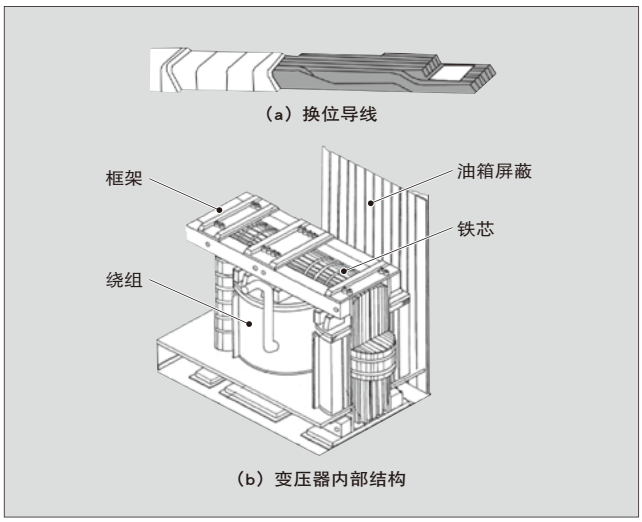


图 6　漏磁通对策说明图

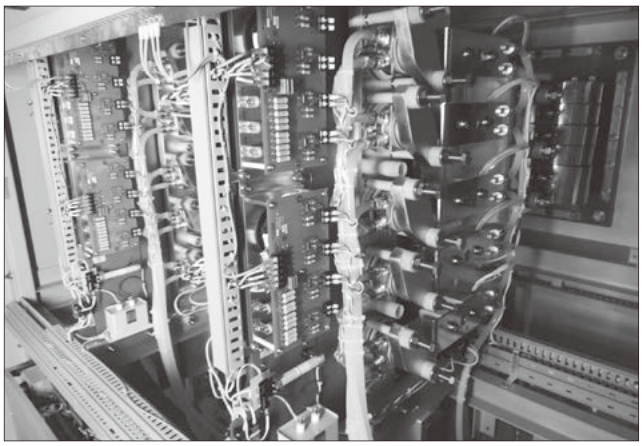


图 7　低压闸流管堆栈的外观

⑵　高压方式

图 8 所示为高压方式的装置构成。高压方式的结构采用了将数十个闸流管元件多级串联的高压闸流管装置，与串联电抗器组成Δ接线。这种方式无需使用变压器即可直接与系统连接，与低压方式相比，可实现小型化和轻量化。此外，通过增加闸流管多级串联中的冗余数量，即使万一在运行中某个闸流管发生故障，只要在冗余范围内，也能立即恢复运行。

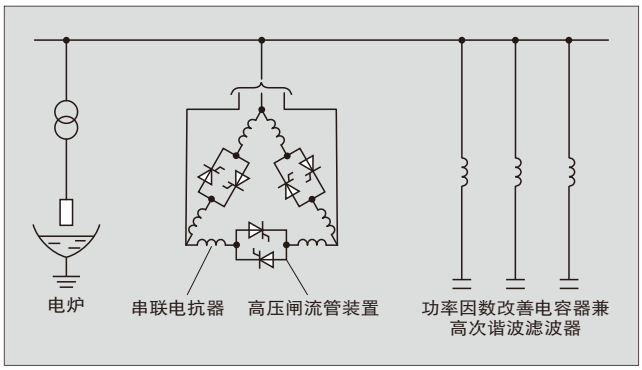


图 8　高压方式的装置构成

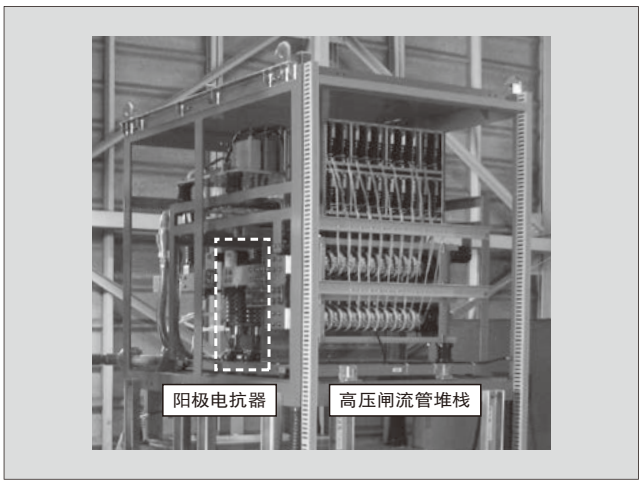


图 9　高压闸流管堆栈的外观

⑻　串联电抗器

串联电抗器的容量与高次谐波滤波器的容量之间存在权衡关系。降低串联电抗器的容量会减小电抗器的尺寸和重量，但会导致高压闸流管装置的额定控制角增大。其结果，是产生的高次谐波增多，需要增大高次谐波滤波器的容量。富士电机产品综合考虑了补偿装置整体的成本优化来选择串联电抗器与高次谐波滤波器的容量。此外，为了降低对地杂散电容，在铁芯饱和导致事故电流增大时减轻高压闸流管装置的电流负担，串联电抗器通常采用空心结构。

⑼　高压闸流管装置

图 9 所示为高压闸流管堆栈的外观。

大容量闸流管元件在正反向与冷却体堆叠，形成反向并联的网格式连接结构，提高了空间利用率。以 30 MVA 的高压闸流管堆栈为单元，根据电压规格将单元串联，构成装置整体。在单元连接中，为了缓解闸流管元件引弧时的电压、电流负荷，并抑制浪涌电压，通常使用被称为阳极电抗器的电抗器进行连接。通过这种单元模块化设计，使得维护和部件更换非常方便。

为了实现小型化，闸流管堆栈采用了直接水冷方式。冷却水采用冷却效果好、绝缘性能优异的纯水。除了器件本身以外，缓冲电阻、串联的各闸流管堆栈分压电阻以及阳极电抗器也都采用了水冷，实现整体堆栈的小型化。

3. 2　自励式 SVC

如**图 10** 所示，自励式 SVC 由电流平滑电抗器和变频器构成。变频器使用自我消弧型器件 IGBT，通过脉冲宽度调制（PWM：Pulse Width Modulation）实现瞬时电流控制。因此，它不仅能够输出超前、滞后两种极性的无效功率，还能补偿不平衡成分和高次谐波成分等多种电流成分，相比他励式具有更高的电压波动补偿性能。

图 11 所示为自励式 SVC 的控制框图。

在闪变因素提取运算部分，基于坐标变换理论的高速运算功能将电炉电流波形分离并提取为正相无效电流成分、逆相电流成分和高次谐波电流成分。此外，由于具备选择各提取成分作为补偿对象的功能，可以根据电炉负载特性和运行

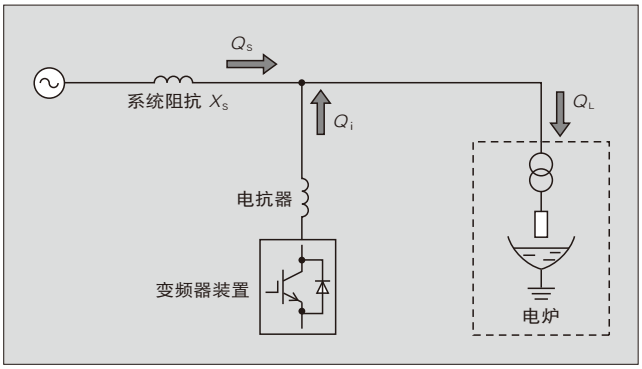


图 10　自励式 SVC 的原理构成图

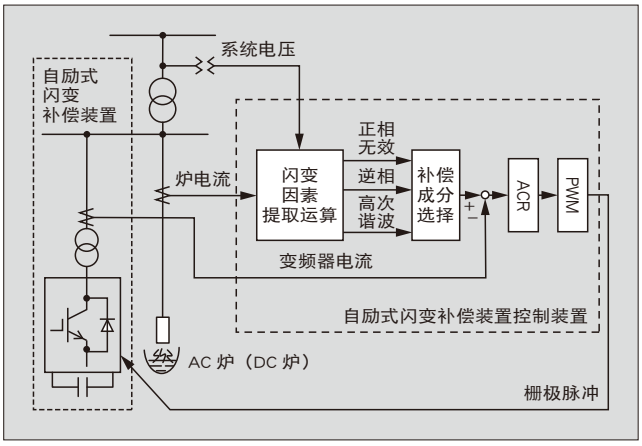


图 11　自励式 SVC 的控制框图

情况进行补偿优化。例如，可限制逆相电流成分（不平衡补偿成分）和高次谐波电流成分，仅以对闪变影响最大的正相无效电流成分为主体进行补偿。其结果，可将电炉产生的闪变最多降低约 80%。

富士电机的自励式 SVC 包括以下两种结构：“多重变压器方式”和“模块化多电平转换（MMC：Modular Multilevel Converter）方式”。

⑴　多重变压器方式

图 12 所示为多重变压器方式的装置构成。本构成方式通过多重变压器将变频器装置与电网连接。通过变压器实现变频器输出的多重化，从而等效提高开关频率，实现高速响应性。

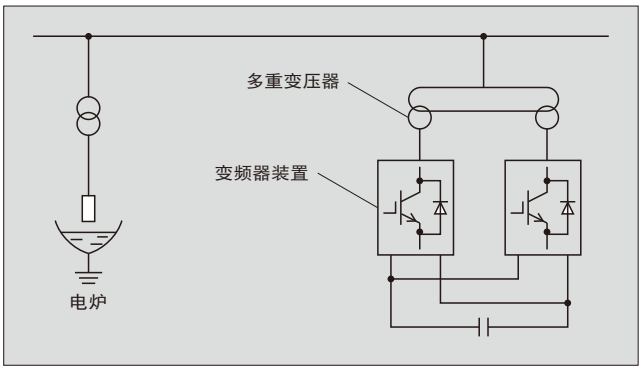


图 12　多重变压器方式的装置构成

(a)　多重变压器

用于 SVC 的多重变压器，由于变频器施加的是方波形 PWM 电压，与普通变压器相比，励磁损耗增加 20～30%。此外，由于电流波形包含高次谐波，导致铁损和铜损增加。因此，在富士电机的产品中，会结合 SVC 超前运行时的过励磁条件与偏磁控制精度，设计为最佳磁通密度，从而同时实现装置的可靠性和小型化。过去，为了将励磁电流作为控制电流使用，采用了带间隙铁芯结构。但近年来，随着电流检测电路的高精度化，已改为无间隙铁芯结构，实现了变压器的低噪音化和小型化。

(b)　变频器装置

图 13 所示为变频器单元电路。

富士电机产品采用的变频器单元通过将两只 4.5 kV 模块型 IGBT 并联以实现大容量化，因此元件间均衡分担电流成为一大课题。

作为相应对策，采取了优化包括直流电容器在内的元件布局。同时，还使用了叠层式导体，使主电路配线低电感化，从而抑制因配线导致的电流不平衡。另外，由于 IGBT 的特性会随温度发生变化，为了实现 2 只并联 IGBT 的电流分担和损耗均衡，将 2 只并联 IGBT 布置在散热器上，使其外壳温度保持均衡。

⑵　MMC 方式

图 14 所示为 MMC 方式的装置构成。本方式通过多级串联变频器单元实现高压化，无需使用变压器即可连接系统并网，因此能实现装置的小型化、轻量化、低成本化和低损耗化。此外，由于采用多级串联变频器单元结构，即使运行中某个变频器单元故障，也能通过对输出端子实施短路继续运行，因此可缩短装置停机时间。

图 15 所示为变频器单元的电路构成。

变频器单元采用高耐压 4.5 kV IGBT 构成全桥结构，最大限度地减少了单元串联段数。例如，用于 33 kV 连接系统并网时需要 21～27 级串联，用于 22 kV 连接系统并网时需要 14～18 级串联。此外，变频器单元内安装的 IGBT 栅极电源采用自供电方式，由变频器单元内直流电压提供所需的栅极驱动电源。

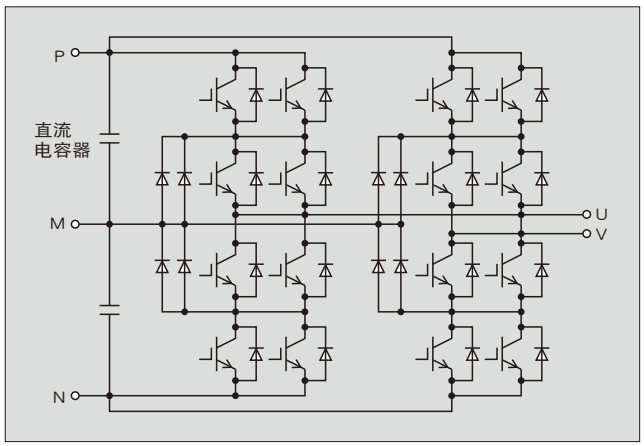


图 13　变频器单元电路

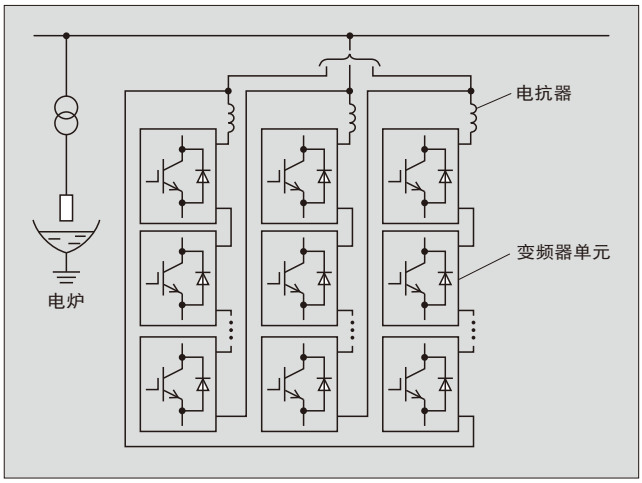


图 14　MMC 方式的装置构成

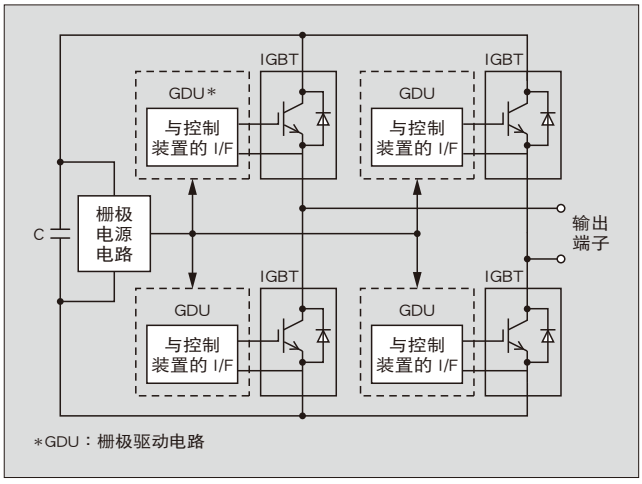


图 15　变频器单元的电路构成图

3.3　混合方式

随着电炉设备的扩建和更新，近年来，大容量化不断推进。同时，对电压波动抑制的要求也越来越高。为应对上述需求，富士电机提供了一种混合方式，该方式同时具备了高性能自励式和适合大容量的他励式的特点。**图 16** 所示为混合方式的构成示例。该结构主要由他励式补偿装置负责补偿无效功率，自励式补偿装置负责补偿不平衡成分和高次谐波成分。

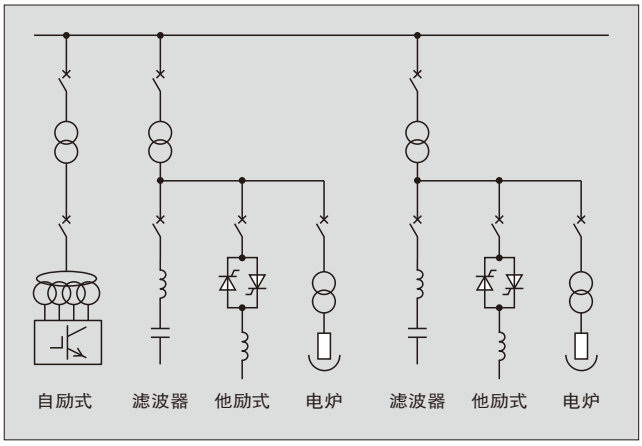


图 16　混合方式的构成示例

混合方式的典型应用有以下两种场景：

⑴　在已采用他励式补偿装置的现有系统中，为了提升无效功率补偿性能，可以在现有设备上增设自励式装置，从而进一步增强补偿性能。在这种情况下，为了适配混合方式，虽然需要对现有他励式的控制进行调整，但可以实现与自励式相当的无效功率补偿效果。

⑵　需要数百 MVA 级大容量 SVC 时，可以将他励式补偿容量设定为 60～80% 左右，用于补偿无效功率的基准成分。剩余部分则由自励式补偿，用于补偿无效功率的波动成分。通过这种方式，可高效实现相当于全自励式的大容量无效功率补偿。

4　闪变补偿分析仿真

为提供符合客户规格的 SVC，富士电机在设计阶段即实施必要的仿真验证。仿真验证采用了**图 17** 所示的实时仿真器。

通过在实时仿真器内构建电力系统模型、负载模型、补偿装置模型等，模拟负载的实际使用状态。随后，将实机控制装置接入仿真器，对仿真器内的补偿装置进行实时控制。由于电炉负载会因废钢投入量和熔解状况发生变化，将客户提供的实际数据或基于历史实绩的负载数据反映到模型负载中，即可模拟整个实际运行状态。通过这种方式，可优化闪变补偿装置的容量、控制方式和控制常数。

作为闪变补偿装置的控制验证示例，**图 18** 展示了由电炉电流引起的闪变改善性能的仿真结果。电炉电流导致了监测点的闪变增加（图中“无补偿”部分），但通过闪变补偿装置，可确认到闪变被有效降低（图中“有补偿”部分）。

这种补偿效果分析仿真自 1980 年代初期开始实施，已拥有 40 年以上的实绩。最初，采用了运算放大器等的模拟仿真器进行分析，近年来则根据验证系统的复杂性，结合既有经验，利用数字仿真器也能进行分析。

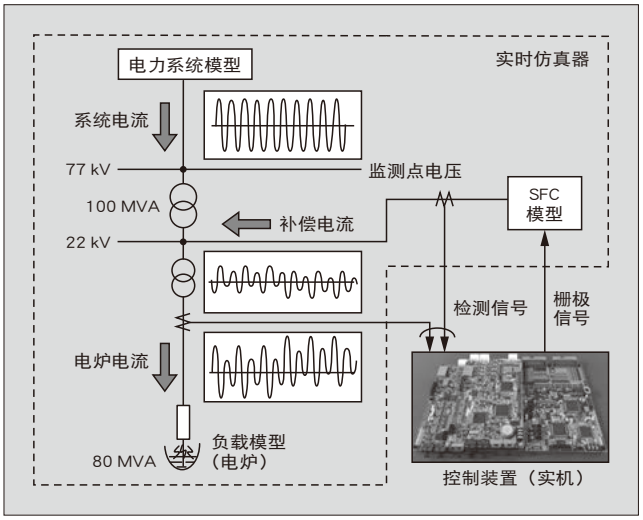


图 17　仿真构成图

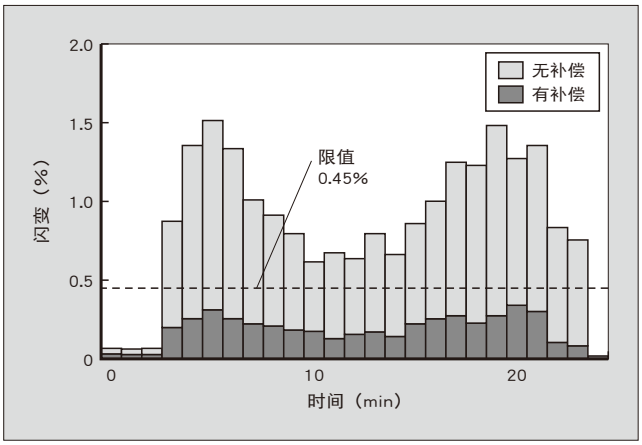


图 18　仿真结果

5　后记

本文对各种无功功率补偿装置的特点进行了介绍。随着面向无碳的电炉需求不断增加，对电力供应的电能质量要求日益严格，无功功率补偿装置的作用也愈发显著。

近年来，已经不仅仅是对已发生的无效功率波动进行补偿，能够从源头抑制无效功率波动的新型电源装置也在不断被开发。今后，富士电机将继续利用丰富的经验和最新技术，提供符合用户需求的高性能系统。

大宫　和树

从事工业电源设备的工程业务工作。现为富士电机株式会社能源事业本部变电系统事业部产业电源技术部主任。

筱原　博

从事电力电子、大容量电力转换装置的开发工作。现为富士电机株式会社能源事业本部开发统括部变换装置开发部主查。电气学会会员。

冈崎　洋平

从事变压器的设计与开发。现就职于富士电机株式会社能源事业本部千叶工厂设计第一部。

有助于降低环境负荷的绝缘油变压器

Ester Transformers That Contribute to Reductions in Environmental Impact

千叶 公一郎 CHIBA, Koichiro

作为油浸式变压器绝缘油长期使用的矿物油，存在废弃时 CO_2 排放、漏油造成环境污染的问题。针对这些问题，富士电机开发了来源于植物且具有优异生物降解性的酯类绝缘油，并正在逐步应用于油浸式变压器。2008 年度，富士电机将使用棕榈油酯化处理所得的棕榈油脂肪酸酯变压器推向市场。在 2022 年度，又将以大豆油为原料的酯类绝缘油应用于变压器，纳入产品阵容。今后，富士电机将继续提供能兼顾环保且客户满意度高的产品。

Mineral oil, which has been used as insulating oil for oil immersed transformers, poses problems such as CO_2 emissions during disposal and environmental pollution due to unexpected oil leaks. To address these problems, ester-based insulating oil has been developed and is increasingly being applied to oil immersed transformers. This oil is derived from plants and features excellent biodegradability. In FY2008, Fuji Electric launched a transformer that uses palm fatty acid ester produced by esterifying palm oil. In addition, we added a transformer that uses ester-based insulating oil made from soybean oil to the product lineup in FY2022. Going forward, we will continue to provide environmentally friendly products that satisfy our customers.

1　引言

油浸式变压器被安装在以变电站为代表的室内外受变电设备中，承担着在电力系统中升降电压的重要作用。油浸式变压器的绝缘油以往以来自石油的矿物油为标准，但近年来随着环保意识的提高，采用生物降解性能优异的酯类绝缘油（简称酯油）的绝缘油变压器正在逐步普及。

2008 年度，富士电机推出了采用棕榈油酯化处理所得的棕榈油脂肪酸酯（PFAE：Palm Fatty Acid Ester）的变压器[1]。2022 年度，如**图 1** 所示，还推出了采用大豆油 作为原料制成酯类绝缘油的大豆油变压器。本文，将介绍这些绝缘油变压器的特点。

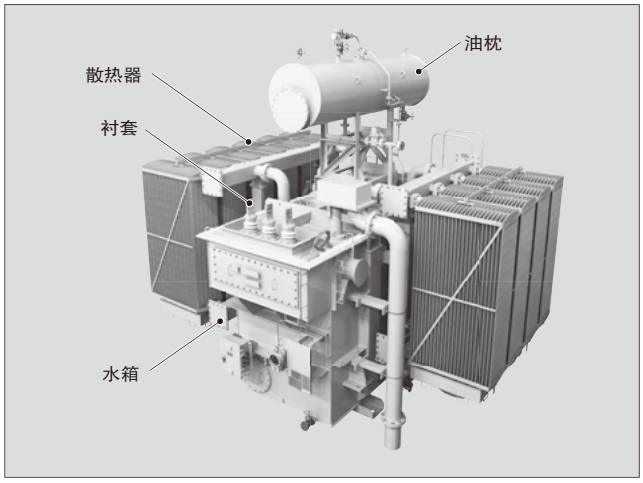


图 1　大豆油变压器

2　油浸式变压器的课题

2.1　油浸式变压器概要

变压器是一种配备铁芯和两个以上绕组、通过电磁感应作用实现交流电压转换的设备。基于变压器的工作原理和自身结构，铁芯中会产生磁滞损耗和涡流损耗，绕组中会产生电阻损耗，因此存在发热现象。为了高效进行冷却，将绕组和铁芯浸没在具有热媒作用的绝缘油中并收放至油箱后的装置，被称为油浸式变压器。**图 2** 所示为其内部结构。在油浸式变压器油箱的侧面安装有散热器，可用于冷却因吸收绕组和铁芯热量而升温的绝缘油。

绝缘油必须具备绝缘性、冷却性和长期稳定性等基本功能，而能够均衡满足上述特性的矿物油一直是标准选择。

2.2　油浸式变压器的课题

以下所示为传统油浸式变压器的课题。

(1)　削减 CO_2 排放量

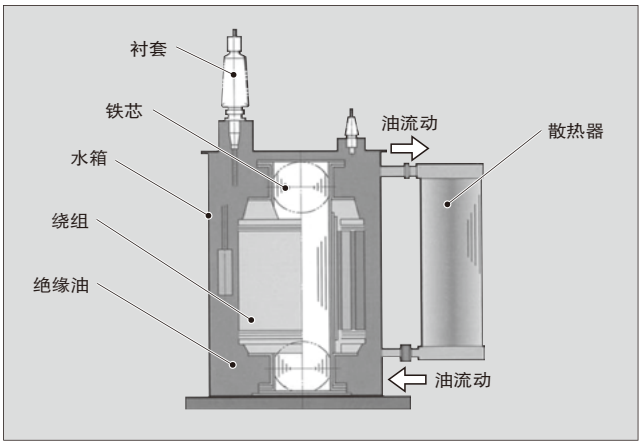


图 2　油浸式变压器的内部结构

近年来，在全球范围内，对全球气候变暖和碳中和等环境问题的讨论日益增多，在变压器领域也开始要求进一步关注环境影响。在更新或废弃传统的矿物油变压器时，必须将油箱内抽出的矿物油进行焚烧处理，因此要求能减少焚烧过程中 CO_2 的排放。

⑵ 降低漏油时的环境负荷

由于油浸式变压器的油配管密封圈老化或内部故障等原因，万一发生绝缘油泄漏，需要尽可能降低对环境负荷。对矿物油而言，由于其生物降解性较低，一旦扩散到土壤或地下水中，会长期滞留并带来严重环境污染风险，因此亟需相应对策，从根本上解决问题。

⑶ 变压器的长寿命化

为了降低生命周期成本，业内对与之紧密相关的变压器长寿命化抱有很高期待。通常，变压器的寿命主要取决于绕组所用绝缘纸的劣化，因此需要采取对策，抑制绝缘纸老化。

同时，作为电力系统改革中的重要一环，2020 年实施的输配电分离以及 2023 年引入的收入上限制度，对提高剩余寿命诊断精度也提出了更高要求。

⑷ 小型化和省空间化

在城市地区安装的变压器日益增加，为了能在有限的用地上进行安装，变压器需要实现小型化和省空间化。

⑸ 提高防灾性能

随着预防性维护技术的发展，变压器事故已非常少见，但仍需进一步降低火灾发生的风险。对于油浸式变压器而言，绝缘油的闪点和燃点越高越安全。

3 绝缘油变压器的设计和特点

3.1 绝缘油变压器的设计

为解决 **2.2 节**中提及的矿物油变压器问题，采用植物油为原料的酯类绝缘油变压器正逐步在全球普及。在日本国内，2019 年发布的酯类绝缘油 JIS 标准系列[⑵-⑷]也推动了其普及。

在酯类绝缘油中，富士电机所应用于变压器的 PFAE（棕榈脂肪酸酯）与大豆油基酯类绝缘油的主要特性，及其与矿物油的对比如**表 1** 所示[⑴⑸]。富士电机的绝缘油变压器在设计时充分考虑并采用了酯类绝缘油的特性。

例如，以大豆油为基础的酯类绝缘油与矿物油相比具有运动粘度高、不易流动的特性，但通过改良油箱内的导油结构、降低流动阻力，可确保油流并实现所需的冷却性能。

表 1 酯类绝缘油的主要特点

项目		棕榈油脂肪酸酯	大豆油	矿物油
密度（15 ℃）	(kg/L)	0.86	0.92	0.87
运动粘度（40 ℃）	(mm^2/s)	5.1	32.2	7.7
闪点 （开放式）	(℃)	188	326	150
燃点	(℃)	208	360	–
流动点	(℃)	−37.5	−20	−30
绝缘破坏电压（球 2.5 mm）	(kV)	94	82	> 80
生物降解性（28 天）	(%)	77	99	23

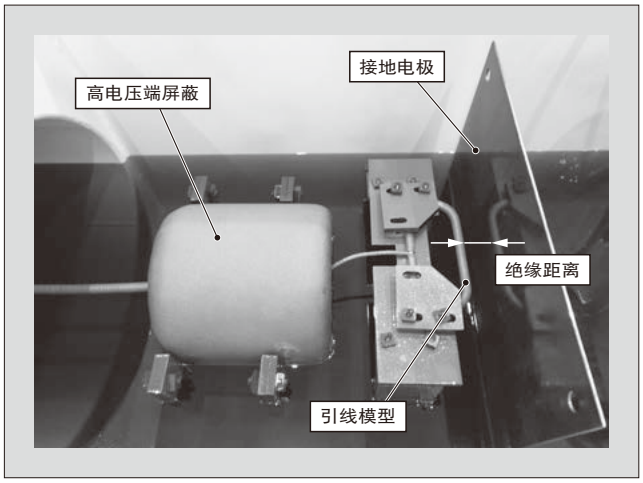


图 3 用于验证实验的要素模型实例

此外，酯类绝缘油的相对介电常数约为 3，与矿物油约为 2.2 的数值相比，更接近绕组导体所用绝缘纸的相对介电常数（约 3.5）。因此，考虑到介电常数匹配效应，浸渍在酯类绝缘油中的绕组，其绝缘破坏电压有时会高于矿物油。目前，正在通过实验验证这些与矿物油不同条件下的绝缘特性。**图 3** 所示为用于验证实验的要素模型实例。在该要素模型中，将模拟变压器绕组和外部连接的引出线电极，以及与模拟油箱的接地电极的相对配置。**图 3** 中为绝缘油注入至中途的状态，但在实际实验中会将整个要素模型浸入绝缘油内，然后以绝缘距离作为参数，评估绝缘特性。

此外，与绝缘油接触部分中使用的绝缘纸、涂料、粘合剂等材料，是基于加速试验所得的推测寿命来进行选择的。即使是能在矿物油中可以长期使用的材料，在酯类绝缘油中使用时也可能加速老化。因此，分别在 PFAE 和大豆油酯类绝缘油中进行了评估。

3.2 绝缘油变压器的特点

采用植物油为原料的酯类绝缘油变压器的特点如下所示：

⑴ 削减 CO_2 排放量

作为酯类绝缘油，其原料植物在生长过程中会吸收大气中的 CO_2。在更新油浸式变压器等情况时，如果将酯类绝缘油焚烧处理或作为燃料重复使用时会排放 CO_2，但因其原料植物在生长过程中已吸收相应 CO_2，相互抵消后可使从生产到废弃的整个生命周期的 CO_2 排放量相比传统矿物油大幅降低。

⑵ 降低漏油时的环境负荷

万一因事故导致变压器中的油流入土壤，由于酯类绝缘油具有可被好氧微生物分解的特性，因此能够抑制土壤污染。

⑶ 变压器的长寿命化

众所周知，绕组绝缘纸会因纸中水分而加速发生水解反应。与矿物油相比，酯类绝缘油的饱和含水量更高，因此纸中水分会向酯类绝缘油转移，从而抑制绝缘纸的老化，预计比加入矿物油的油浸式变压器寿命更长[⑸]。关于 PFAE，由于与其他酯类绝缘油和矿物油相比，其分子结构中双键比例较少，因此具有抗氧化稳定性高、绝缘油不易老化的特点。

⑷ 变压器的小型化和省空间化

如**表 1** 所示，PFAE 在具备高绝缘性能的同时，其运动粘度低于矿物油及其他酯类绝缘油，因此具有更好的冷却性能。同时，使用 PFAE 的变压器相比使用其他油种时，可以实现进一步的小型化和省空间化。

此外，由于 PFAE 的流动点低于以其他植物油为原料的酯类绝缘油，因此 PFAE 变压器比使用其他植物油的绝缘油变压器更适合在寒冷地区运行。

⑸ 提高防灾性能

由于通过大豆油制造的酯类绝缘油具有较高的闪点和燃点，其最大特点就是能够降低火灾发生及蔓延的风险。因此，采用该类油的变压器适用于工业成套设备、数据中心等更重视防灾性能的场所。

2023 年 3 月，根据消防厅于发布的消防预第 205 号文件，大豆油变压器不属于《消防法》第 2 条第 7 项中规定的危险物，而属于使用燃点超过 300 ℃的植物油作为绝缘油的变压器。在满足特定条件的前提下，即使在以往需要配置特殊灭火设备的安装要求下，也可以用大型灭火器进行替代。受此影响，在随后发布的《变电站等防火对策指针 2024 年补充版》[6]中，分别安装矿物油变压器和大豆油变压器时，变压器室内灭火设备的安装标准如**表 2** 所示。由于大豆油变压器在灭火设备简化方面可能带来成本优势，其普及应用备受期待。

⑹ 预防性维护技术

在矿物油变压器方面，基于油中气体分析的预防性维护技术已基本得到确立，并通过《油浸式变压器的维护管理》[7]及《电力用变压器改修指南》[8]进行了普及。与矿物油变压器相比，绝缘油变压器在实际现场中的运行年限和导入数量尚少，其预防性维护技术仍处于尚未完全确立的阶段。

表 2 变压器室内灭火设备的安装标准

（a）安装了油浸式变压器的变压器室

项目			变压器容量		
			不足 1000 kVA	1000 以上 不足 10000 kVA	10000 kVA 以上
有效接地系统的变压器室			固定式灭火设备		
非有效接地系统的变压器室*1	占地面积	不足 200 m²	灭火器		灭火器＋固定式灭火设备*2
		200 m² 以上	灭火器＋大型灭火器*3		

*1：对于在同一厂内或毗邻厂内没有技术人员常驻的变电站等的主要变压器室中，原则上应设置固定式灭火设备。
*2：建议设置固定式灭火设备。
*3：不足 10000 kVA 且非有载分接头切换变压器时， 可将固定式灭火设备替换为大型灭火器。

（b）安装了大豆油变压器的变压器室

项目		变压器容量		
		不足 1000 kVA	1000 以上 不足 10000 kVA	10000 kVA 以上
占地面积	不足 200 m²	灭火器		灭火器＋大型灭火器*4
	200 m² 以上	灭火器＋大型灭火器		

*4：建议设置大型灭火器。

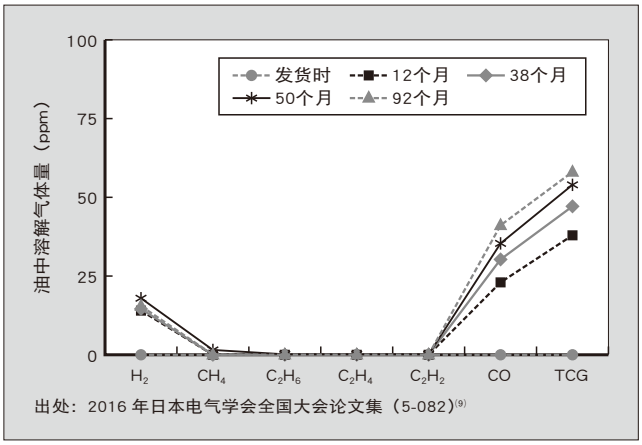


图 4 首台 PFAE 变压器的油中溶解气体分析结果

2008 年以后，富士电机对已投入运行的 14 台 PFAE 变压器的绝缘油进行了油中气体分析、油中水分、绝缘特性的测量，以确认各变压器的功能健全性状态。同时，还调查了运行初期阶段油中溶解气体的生成情况及油品特性[9]。作为示例，**图 4** 展示了 2008 年开始运行的首台 PFAE 变压器（6.6 kV/2 MVA）的油中溶解气体分析结果。从结果来看，主要产生的气体是 H_2、CO，其余气体在运行开始 92 个月后 CH_4 约 1 ppm，产生量属于极微量，而 C_2H_6、C_2H_4、C_2H_2 均低于检测下限。H_2 在运行 12 个月后达到 14 ppm，但之后未出现进一步增加趋势。CO 在运行开始后 12 个月时增加到 23 ppm，此后呈现缓慢上升趋势。运行初期，H_2 和 CO 大量生成的现象在矿物油变压器中也有报道，据推测与变压器所用的材料或制造工艺有关，因此在首台 PFAE 变压器中也考虑是相同现象导致的气体生成。此外，**图 5** 所示为该首台 PFAE 变压器测得的绝缘破坏电压及油中水分量的经时变化。绝缘破坏电压维持在约 80 kV，油中水分量约 15 ppm，已确认其与初始值相比无明显的特性变化。

对大豆油变压器而言，也计划以同样的方式积累现场运行数据，并基于这些测量结果，致力于确立基于油中气体分

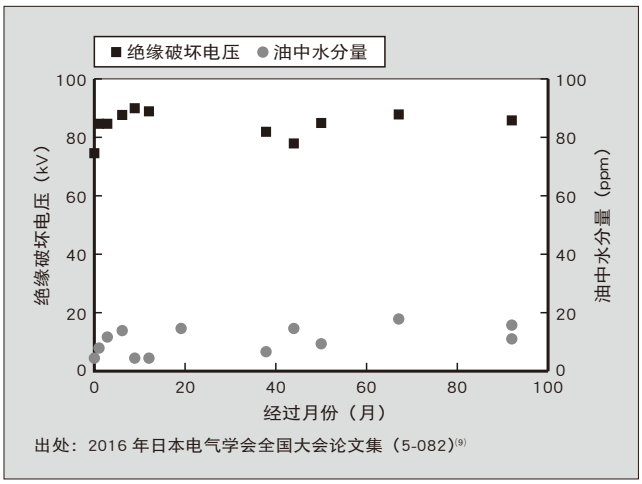


图 5 首台 PFAE 变压器测得的绝缘破坏电压及油中水分量的经时变化

析的预防性维护技术。

4 后记

以上，对有助于降低环境负荷的绝缘油变压器进行了介绍。为了应对今后绝缘油变压器日益增长的需求，富士电机也在扩大制造规格的范围。为了让用户更安心地使用绝缘油变压器，也在不断扩充保养维护服务的内容。今后，富士电机将继续提供能兼顾环保且客户满意度高的产品。

参考文献

⑴ 彦坂知行、千叶公一郎. 有助于降低环境负担的棕榈油脂肪酸酯绝缘油变压器. 富士电机技术期刊. 2022, vol.C14, no.2, pp.90-94.
⑵ JIS C 2390-1：2019 生分解性電気絶縁油 - 第 1 部：合成エステル.
⑶ JIS C 2390-2：2019 生分解性電気絶縁油 - 第 2 部：天然エステル（植物油）.
⑷ JIS C 2390-3：2019 生分解性電気絶縁油 - 第 3 部：植物由来エステル.
⑸ Tokunaga,J. et al. “Palm Fatty Acid Ester as Biodegradable Dielectric Fluid in Transformers: A Review” IEEE Electrical Insulation Magazine. 2019, vol.35, no.2, pp.34-46.
⑹ 一般社団法人日本電気協会発変電専門部会.“変電所等における防火対策指針. JEAG 5002-2020. 2024 年追補版”.
⑺ 一般社団法人電気協同研究会.“油入変圧器の保守管理”. 電気協同研究. 第 54 巻, 第 5 号.
⑻ 一般社団法人電気協同研究会.“電力用変圧器改修ガイドライン”. 電気協同研究. 第 65 巻, 第 1 号.
⑼ 鈴木貴志ほか.“パームヤシ脂肪酸エステル（PFAE）入り変圧器の油中ガストレンド”. 平成 28 年電気学会全国大会論文集, 5-082.

千叶 公一郎
从事新事业开发、变压器开发业务。现为富士电机株式会社能源事业本部发电成套设备事业部核能事业推进室 MOX 项目部课长。

有助于提升变电设备开发效率的千叶工厂短路试验设备

Chiba Factory Short-Circuit Test Equipment That Contributes to More Efficient Development of Substation Equipment

藤城　智 FUJISHIRO, Satoshi　　**水本　贵之** MIZUMOTO, Takayuki　　**阿部　直贵** ABE, Naoki

为了应对稳步增长的客户需求，并在提供环境负荷小且符合日本国内外标准的高电压变电设备产品时解决试验效率提升的课题，富士电机在千叶工厂内建设了使用短路发电机的短路试验设备，建立并完善了在公司内部进行变电设备性能验证的体制。新建的短路发电机采用最新的轴系设计技术，可进行 50 Hz 和 60 Hz 的试验。此外，将作为动力源的电机改为变频器驱动，因此通过变频器的再生制动，实现了缩短停止时间和再生电力的有效应用。与以往相比，开发周期更短，有助于新产品及时投放市场。

Improving testing efficiency has been a challenge in efforts to meet the steadily growing demand for high-voltage substation equipment products with minimal environmental impact that satisfy Japanese and overseas standards. To address this, we constructed short-circuit test equipment using a short-circuit generator at Fuji Electric's Chiba Factory and established a system to verify the performance of substation equipment in-house. The newly installed short-circuit generator enables testing at 50 and 60 Hz using the latest shaft system design technology. Using an inverter to drive the motor for the power source allows the equipment to use regenerative braking by the inverter for shortening the shutdown time and effectively utilizing regenerative power. This equipment will shorten development periods compared to past approaches, contributing to the timely launch of new products.

1　引言

当前，负责向工厂等大规模设备供电的高电压变电设备需求保持着稳定增长。其原因，在于日本国内在高速经济增长时期引进的设备仍存在持续更新需求。同时，支撑数字化发展的数据中心和半导体工厂等的新建、扩建带来的需求也在日本国内外不断增加。此外，以往广泛用于高电压变电设备的绝缘气体——SF_6 气体，从应对全球气候变暖的角度出发，在全球范围内正在加强其使用量的削减和监管，用于替代 SF_6 的气体开发和替代断路的技术开发正日益活跃。同时，基于《WTO/TBT 协议》的 JIS 标准向 IEC 标准对应也在推进。例如，随着日本国内配电柜标准（JIS C 62271-200：2021 额定电压超过 1 kV 且不超过 52 kV 的金属封闭开关设备及控制设备）的制定，预计海外厂商将进入日本市场，市场竞争也将更加剧烈。

富士电机致力于响应这些市场需求，通过提供环境负荷低且符合日本国内外标准的变电设备，努力为社会作出贡献。本文，将介绍为提升变电设备开发效率，于 2024 年在富士电机千叶工厂设置的短路试验设备。

2　传统短路试验设备的课题

富士电机主要的变电设备制造和开发基地在千叶工厂。以往在千叶工厂的新产品开发验证试验中，一直使用由电容组构成的短路试验设备。使用电容组设备进行的开发试验时，在满足相关标准规定的型式试验方面仅能实现部分性能验证。在新产品开发的最终阶段，只能在公司外部的大功率试验所进行型式试验。这种情况会导致被测设备的运输和试验费用增加、交付周期延长、缺乏灵活性。因此，提高试验效率成为一大课题。

3　新建短路试验设备的概要与设备构成

3.1　概要

为了解决**第2章**中提出的课题，富士电机于 2024 年在千叶工厂新建了短路试验设备。设备全景如**图 1** 所示。

表 1 所示为使用此次新建设备可验证的代表性被测设备及试验项目。**图 2** 所示为在该设备上实施这些试验时的短路试验电路构成示意。以短路发电机作为电流源，通过切换设备组合，即可实现各试验项目所要求的试验条件。在以高电压断路器为被测设备进行的短路断路试验中，应用的方法是将短路发电机提供的短路电流与另一电源提供的恢复电压结合后进行的合成试验[1]。

本设备基本可以实现以下试验条件。

(1)　直接试验：三相 17 kV/50 kA、
　　三相 9.8 kV/63 kA

(2)　短时间耐电流试验：三相 600 V/100 kA 2 s

图 1　短路试验设备全景

表 1　具有代表性的被测设备和试验项目

被测设备	试验项目
○气体绝缘开关装置 ○交流断路器 ○断路器 ○接地开关装置	○短路断路试验 ○短时间耐电流试验 ○各电流开关试验
○变压器 ○整流器	○短路强度试验
○配电柜	○短时间耐电流试验 ○内部电弧试验
○避雷器	○短路试验 ○耐电弧试验

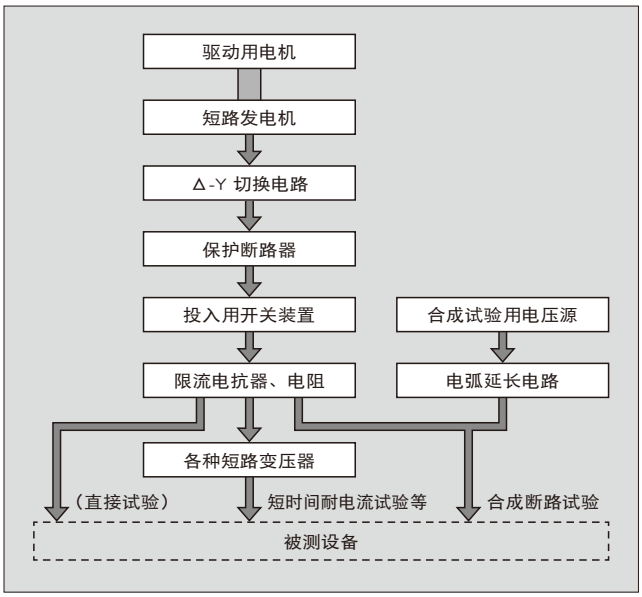


图 2　短路试验电路的构成示意图

⑶　合成断路试验：额定电压最高 245 kV、
额定断路电流最高 63 kA

3.2　主要设备构成

为了满足 **3.1 节**中介绍的各类试验条件，确定的短路试验设备的主要构成设备规格如**表 2** 所示。设备中，用于产生模拟短路事故试验电流的是短路发电机，其外观如**图 3** 所示。通过在驱动短路发电机的电机上应用变频器，并在短路发电机中采用最新的轴系设计技术，实现了在 50 Hz 和 60 Hz 条件下的试验。在短路发电机减速停机时，可通过变频器实现再生制动，从而缩短停机时间，提升运行率。同时，通过将电力再生回馈至地区内，可实现电能的有效利用。

短路发电机的基本结构通常与普通的汽轮机发电机相似，但短路试验所需电流仅维持约 5 个周期的极短时间，因此实现该条件所需性能与普通发电机有着显著差异。通过**表 3** 所示的试验结果可知，已安装的短路发电机实现了设计要求的性能。此外，用于断路器试验的合成断路试验设备如**图 4** 所示。

表 2　构成短路试验设备的主要设备规格

（a）　驱动用电机

项目	规格
型式	横轴笼式感应电机
额定电压	2910 V
额定输出	2000 kW
频率	50 和 60 Hz
转速	3000 和 3600 r/min
冷却方式	IC97W
起动方式	变频器起动
时间额定	连续

（b）　短路发电机

项目	规格
型式	横轴圆柱励磁式同步发电机
额定容量	100 MVA
额定短路容量	2000 MVA（短路三周期后）
额定电压	17 kV（Y-Δ 接线切换）
极数	2
相数	三相
频率	50 和 60 Hz
转速	3000 和 3600 r/min
励磁方式	闸流管励磁方式
冷却方式	IC97W（配有独立型送风机和空气冷却器）

（c）　保护断路器（SF_6 气体断路器）

项目	规格
型式	BAG002RR
额定电压	24 kV/15.5 kV
额定分断电流	50 kA/63 kA
特点	配备极间电容器， 带电压抑制电路
额定油压操作压力	31.5 MPa
额定封入气体压力	0.65 MPa

（d）　投入用开关装置（SF_6 气体开关装置）

项目	规格
型式	BAG002ZZ
额定电压	24 kV
额定投入电流	200 kA（峰值）
额定油压操作压力	31.5 MPa
额定封入气体压力	0.65 MPa
特点	可三相同步、 单相单独投入
投入时间	30±0.3 ms

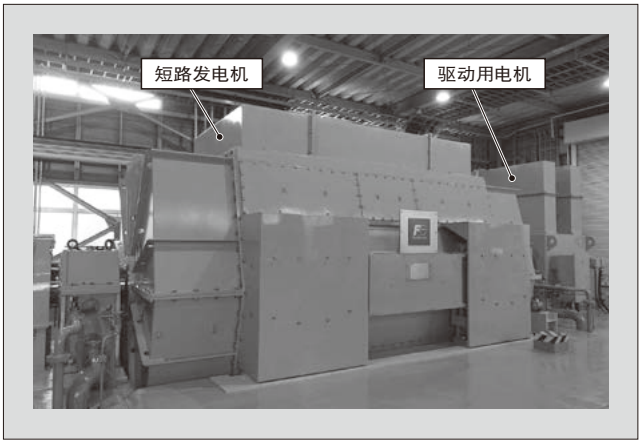


图 3　短路发电机

表 3　短路发电机的性能

项目	试验结果
三相短路电流 （短路三周期后交流部分）	52 kA（16.8 kV、Y 接线、60 Hz） 67 kA（7.4 kV、Δ 接线、50 Hz）
转速下降 （三相、Y 接线、52 kA、 60 Hz、短路持续五周期）	82 r/min （下降率 2.3%）
起电压的波形畸变率	1.1%
短路发电机轴振动 （17 kV 时）	14 μm（p-p）（50 Hz 时） 10 μm（p-p）（60 Hz 时）
发电机停机时间	约 16 分钟

图 4　合成断路试验用设备

4　特点

下面，将介绍为实现**第3章**所述的短路发电机而采取的各种技术措施。

4.1　确保短路电流性能绕组配置

短路电流的大小主要由初始瞬态电抗 X_d" 决定，而 X_d" 中，约 80% 由定子绕组的漏电抗构成[2]。因此，为了高效产生较大的短路电流，需要降低漏电抗。为了降低电抗，尽量减少了定子绕组匝数，并将空隙磁通密度比普通机型提高了约 20%。

此外，由于巨大的短路电流会在定子绕组上产生电磁力，需要定子绕组具备能够承受该电磁力的结构。为了降低电抗并防止定子绕组松动，本机采用了单层绕组，而普通机型则多为双层定子绕组。

为了抑制短路时发电机转速下降的问题，采用了将绕组截面面积最大化、将绕组电阻损耗降至最小的结构。通过该结构，绕组发热得到抑制，冷却所需风量也能降至最小，有效抑制了转速下降。此外，由于短路发电机的通电时间比普通汽轮机发电机短很多，绕组的焦耳热温升几乎不会成为结构上的限制因素。

同时，为了防止感应电压波形偏离正弦波，定子绕组的绕制方式与普通旋转机相同，采用了短距绕组。

4.2　抑制短路电流的衰减

即使通过减小电抗来增大短路初期的电流，但如果交流部分的电流衰减过大，则断路器所要求的短路三周期后的电流将减小，无法充分发挥发电机性能。为了抑制衰减，转子绕组用楔块采用截面积比普通机型大 30% 左右的设计。同时，使用导电率与电工铜相当的特殊铜材，从而提高初始瞬态开路时间常数 T_{do}"。

转子绕组的结构设计既保持了较大的短路瞬态时间常数 T_d"，又确保了转子齿部的强度。

4.3　结构强化

短路发电机在每次进行短路试验时都会承受极大的冲击载荷，因此必须具备能够承受这种在苛刻条件下使用的结构。

下面，将介绍本机采用的主要结构。**图 5** 所示为短路发电机的整体结构。

⑴　定子铁芯

为了防止定子铁芯因老化而产生松动和层间错位，采用硅钢片叠层后，用相当于普通汽轮机发电机 2 倍数量的紧固螺柱和压环一起加压，并固定在定子机架上。与定子机架的结合采用燕尾键。同时，在燕尾键与定子机架之间插入楔子，实现了无间隙的牢固连接。

⑵　定子绕组

定子绕组端部分别承受最大径向 5500 kN、轴向 2500 kN、旋转方向 120 kN 的冲击力。由于是二极机，端部长度较长，考虑端部可能发生严重变形并导致绝缘破坏。为了防止这种情况，采用了将定子绕组端部牢固固定在定子机架上的结构。如**图 6** ⑷所示，将圆锥形钢制一体结构的控制台固定在定子机架上，通过环氧树脂叠层板将定子绕组端部沿着控制台安装，并用每侧约 220 根螺柱紧固。此外，在绕组端部插入大量绝缘间隔片以保持绕组间的必要距离，绝缘间隔片未能填充的部分则注入树脂。**图 6** ⑹所示为定子绕组端部的最终成品外观。

⑶　转子绕组

图 7 所示的转子绕组端部，除了承受离心力、热膨胀差外，还会反复受到短路时冲击电磁力和扭转振动引起的旋转方向振动加速度的作用。为了应对这些问题，将转子轴体部分的沟槽延伸至绕组端部，将绕组端部的轴向直线部分置入该延伸沟槽内，即可约束其旋转方向的运动。此外，为了保

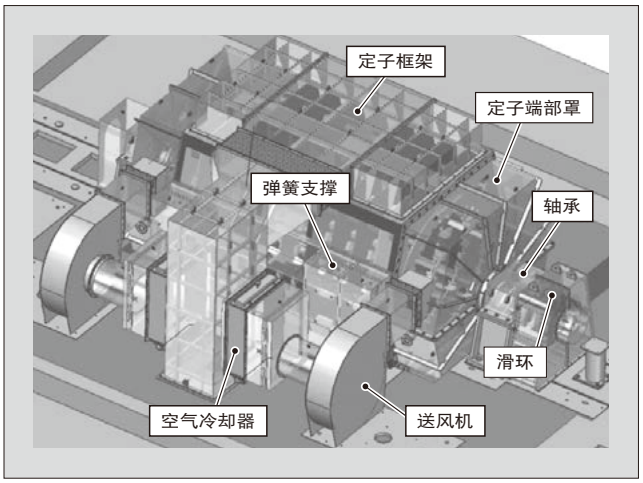


图 5　短路发电机的整体结构

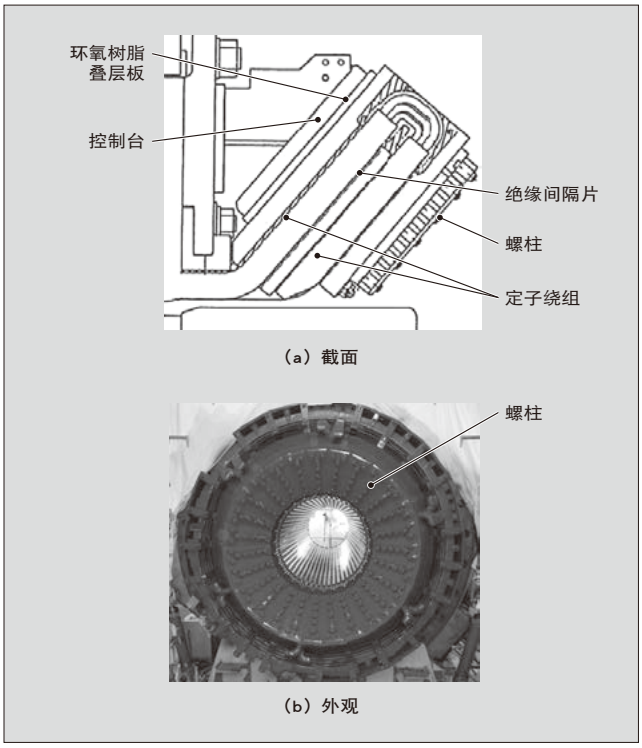


图 6　定子绕组固定子端部的结构

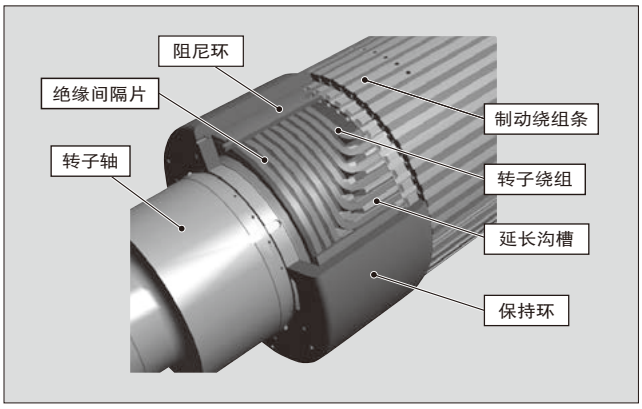


图 7　转子绕组端部的结构

持绕组间必要的间距并防止绕组变形，在绕组端部的所有间隙中均插入了绝缘间隔片。

⑷　制动绕组

制动绕组由转子楔块和磁极部分导条组成的制动绕组条构成，通过阻尼环短接形成电流电路。如**图 7** 所示，制动绕组条配置在转子沟槽的最外径部，阻尼环则安装在接触转子绕组端部保持环内径的位置。阻尼环为厚度约 20 mm、长度 600 mm、外径 1000 mm 的铜环，环的一侧加工成梳齿状，插入至转子沟槽内并与制动绕组条的下表面相接触。

⑸　转子结构

设计转子结构时，必须确保能够使弯曲和扭转的共振频率远离运行频率。普通发电机只需针对 50 Hz 或 60 Hz 中的一个运行频率避开共振即可，但短路发电机在 50 Hz 和 60 Hz 两种频率下均需运行，因此转子结构需同时避开这两个共振频率。

此外，短路发电机在突发短路时每次试验都会产生巨大的扭转力矩。为此，采用了具备足够强度的转子轴。

⑹　定子的弹簧支撑

如果将发电机定子直接安装在建筑物地面的基础上，基础一侧将承受最大 4000 kN 的冲击载荷。这种情况不仅对基础本身不利，从基础向外部传递的振动也不可忽视。因此，设计时以将该冲击载荷衰减至约一半为目标，采用在基础四角设置弹簧支撑装置来支撑定子的结构。同时，由于设备在 50 Hz 和 60 Hz 下均需运行，因此通过冲击试验测定定子机架的固有振动频率，可确认其在运行范围内不会发生共振。

5　后记

在公司内部构建短路试验设备后，可在公司内部验证的项目增加，气体绝缘开关装置、配电柜、断路器等变电设备的开发试验效率也得到提高。通过在公司内部实施符合规范的型式试验，可以缩短开发周期，及时提供能满足市场需求的新产品。

今后，将推进并获取由公益财团法人日本适合性认定协会（JAB：Japan Accreditation Board）认证试验所的资质，以及参与日本短路试验委员会（JSTC：Japan Short Circuit Testing Committee）成员等活动。作为大功率试验所，努力提升自身水平。

参考文献

⑴　門裕之. 用語解説 第 162 回テーマ：合成試験とアーク延長. 電気学会論文誌 B. 2024, vol.144, no.9, p.NL9_6.

⑵　同期機諸定数調査専門委員会.“電気学会技術報告 同期機諸定数の適用技術”. 一般社団法人電気学会. 2000-07, no.798.

藤城　智

从事变电设备、高压受配电设备的开发工作。现为富士电机株式会社能源事业本部开发统括部电源受变电设备开发中心变电机器开发部经理。电气学会会员。

水本　贵之

从事大型旋转机的开发和电气设计工作。现就职于富士电机株式会社能源事业本部川崎工厂电机设计部。电气学会会员。

阿部　直贵

从事大型旋转机的结构设计和开发工作。现就职于富士电机株式会社能源事业本部川崎工厂电机设计部。

缩略语（本期所使用的主要缩略语）

AI	Artificial Intelligence	人工智能
BCP	Business Continuity Plan	业务持续计划
CAN	Controller Area Network	局域网
CVD	Chemical Vapor Deposition	化学气相沉积法
DAC	Direct Air Capture	直接空气碳捕集
DLC	Diamond-Like Carbon	类金刚石碳
ERPX	Electric Power Reserve Exchange	一般社团法人电力供需调节能力交易所
EV	Electric Vehicle	电动汽车
FC	Fuel Cell	燃料电池
FIP	Feed-in Premium	
FIT	Feed-in Tariff	固定价格收购制度
FRT	Fault Ride Through	事故时持续运行
GDU	Gate Drive Unit	栅极驱动电路
GFM	Grid Forming	电网成形型
GTCC	Gas Turbine Combined Cycle	燃气轮机联合循环
GX	Green Transformation	绿色转型
IDC	Internet Data Center	互联网数据中心
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	绝缘栅双极型晶体管
IoT	Internet of Things	物联网
JAB	Japan Accreditation Board	公益财团法人日本适合性认定协会
JEPX	Japan Electric Power Exchange	一般社团法人日本电力批发交易所
JSTC	Japan Short Circuit Testing Committee	日本短路试验委员会
LFC	Load Frequency Control	负载频率控制
LHV	Lower Heating Value	低位发热量
LiC	Lithium Ion Capacitor	锂离子电容器
LPG	Liquefied Petroleum Gas	液化石油气
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell	熔融碳酸盐型燃料电池
MMC	Modular Multilevel Converter	模块化多电平转换
MOX	Mixed Oxide	混合氧化物
NITE	National Institute of Technology and Evaluation	独立行政法人制品评价技术基础机构
OCCTO	Organization for Cross—regional Coordination of Transmission Operators, JAPAN	电力广域运营推进机构
ORC	Organic Rankine Cycle	有机朗肯循环
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell	磷酸型燃料电池
PCS	Power Conditioning System	功率调节器
PEFC	Polymer Electrolyte Fuel Cell	固体高分子型燃料电池
PFAE	Palm Fatty Acid Ester	棕榈油脂肪酸酯绝缘油变压器
PID	Proportional-Integral-Differential	
PLL	Phase-Locked Loop	相位同步电路
PV	Photovoltaic	太阳能发电
PVD	Physical Vapor Deposition	物理真空蒸镀法
PWM	Pulse Width Modulation	脉冲宽度调制
RoCoF	Rate of Change of Frequency	频率变化率
SFC	Static Flicker Compensator	静止型闪变补偿装置
SG	Synchronous Generator	同步发电机
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	固体氧化物型燃料电池
SVC	Static Var Compensator	静止型无效功率补偿装置
TSO	Technical Support Organization	技术支援机构
UPS	Uninterruptible Power System	不间断电源装置
VSG	Virtual Synchronous Generator	虚拟同步发电机

富士电机
Fuji Electric

http://www.fujielectric.com.cn/

＊包括本期刊物在内，从创刊至今的论文档案可通过以下 URL 查阅。

富士电机技术期刊（中文）
http://www.fujielectric.com.cn/jtkw.html

富士电机技报（日文）　https://www.fujielectric.co.jp/about/company/contents_02_03.html
FUJI ELECTRIC REVIEW（英文）　https://www.fujielectric.com/company/tech/contents3.html

富士电机技术期刊　第 17 卷　第 2 号

2025 年 9 月 20 日　印刷
2025 年 9 月 30 日　发行

编辑兼发行人　中 山 和 哉

发 行 处　富士电机株式会社
技术开发本部
邮 编 141-0032
日本东京都品川区大崎一丁目 11 番 2 号
Gate City 大崎东楼

（联系地址）　富士电机（中国）有限公司
邮 编 200062
上海市普陀区凯旋北路 1188 号环球港 B 座 26 楼
电 话 021-5496-1177

编 辑 室　Fuji Office & Life Service Co., Ltd. 内
“富士电机技报”编辑室
邮 编 191-8502
日本东京都日野市富士町 1 番地
电 话 ＋81-42-585-6965
传 真 ＋81-42-585-6539

印 刷 处　Fuji Office & Life Service Co., Ltd.
邮 编 141-0032
日本东京都品川区大崎一丁目 11 番 2 号
Gate City 大崎东楼
电 话 ＋81-3-5435-7311

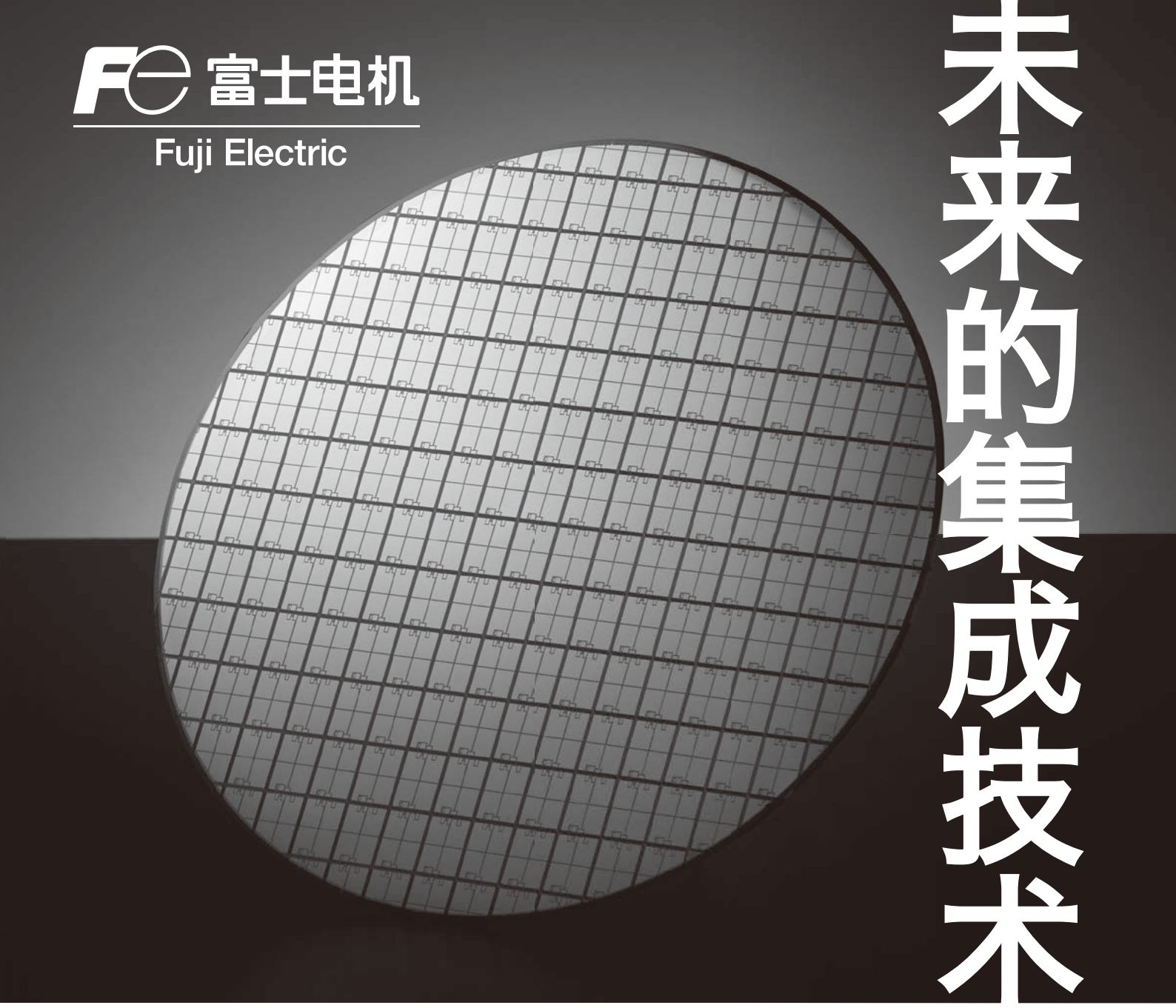
＊本刊记载的公司名称及产品，有可能是各相关公司的商标或注册商标。

本刊所载论文是在日本发行的富士电机技报 98 卷 1 号“有助于实现能源稳定供应、优化和稳定化的能源系统”的翻译版本。

©2025 Fuji Electric Co., Ltd.（版权所有，侵权必究）

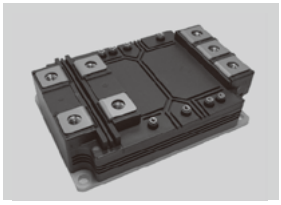
富士电机

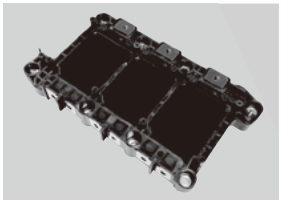
Fuji Electric

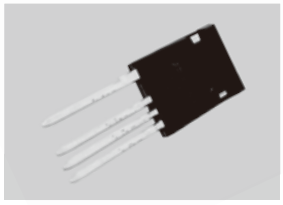


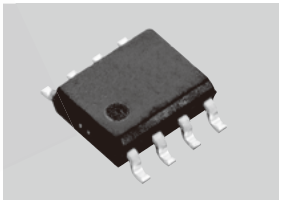
未来的集成技术

凝聚了独有电力电子技术及无限应用可能的富士电机功率半导体。本重要元件在高耐压、大容量化、低电力损失化、小型轻量封装化方面不断改善，正在太阳能发电、风力发电等清洁能源领域，产业和家庭用户所期待的节能领域以及混合动力车、电动汽车类交通领域等诸多方面发挥着重要作用。此外，通过采用 SiC 新材料，富士电机还开发出性能更高的次世代功率半导体。今后，富士电机将继续在能源与环境技术领域不断创新，为创建安全、安心、可持续发展的社会作贡献。



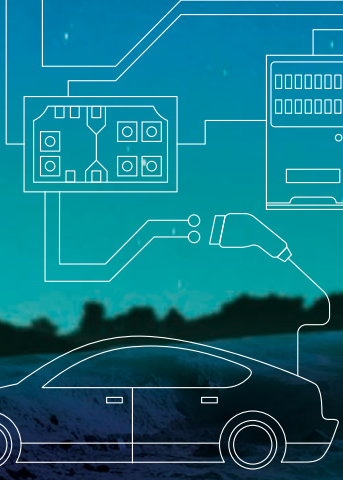






富士电机的功率半导体

Power Electronics as a force for social good.


Geothermal Power Plants

Power Conditioning Systems

Uninterruptible Power Systems

Power Semiconductors

Inverters

Vending Machines

Contributing to the creation of a sustainable society

Fuji Electric
Innovating Energy Technology

本刊使用了环保型 FSC® 认证纸张和植物油油墨。

FSC www.fsc.org 混合产品 纸张 | 支持负责任林业 FSC® C017911

VEGETABLE OIL INK