针对配电领域可再生能源大量导入采取的对策和在 BCP 方面的应对措施

Countermeasures Against the Introduction of Large Amounts of Renewable Energy in the Distribution Field and Support for BCP

松枝　剑 MATSUEDA, Tsurugi　　望月　正希 MOCHIZUKI, Masaki　　神通川　亨 JINTSUGAWA, Toru

“可再生能源固定价格收购制度”引进后，因太阳能发电等可再生能源大量导入配电系统，其电压管理越来越复杂。为应对这一问题，富士电机开发了电压调整设备和对其进行集中控制的集中电压控制系统。另外，为满足东日本大震灾之后人们对 BCP 的强烈需求，开发了采用虚拟化技术和独自开发的配置控制中间件的广域备份型配电自动化系统。参与 NEDO 项目，在印度进行了使用这些技术的综合配电管理系统的构建和实证试验。

Since the enactment of the Feed-in Tariff Scheme for Renewable Energy (FIT), large amounts of renewable energy such as solar power generation have been introduced into distribution systems, thereby complicating the voltage management of the distribution systems. To deal with that difficult situation, Fuji Electric has developed voltage regulators and centralized voltage control systems for centrally controlling the regulators. We have also developed a wide-area backup type distribution automation system that meets the requirements of business continuity plans (BCPs), which have been strongly required since the Great East Japan Earthquake, by using virtualization technologies and our proprietary configuration control middleware. Furthermore, participating in a New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) project, we have built a comprehensive distribution management system using these technologies and performed demonstration tests for it in India.

1　引言

自 2009 年开始实施“可再生能源固定价格收购制度”(FIT) 以后，因太阳能发电等可再生能源大量导入配电系统，配电系统的电压管理越来越复杂。因此，富士电机开发了针对配电系统的电压调整设备——静止型无功补偿器 (SVC：Static Var Compensator)。此外，还开发了通过中央系统控制包括 SVC 在内的电压调整设备的集中电压控制系统。

另外，东日本大震灾以后，人们希望制定业务连续性计划 (BCP：BCP：Business Continuity Plan)，提前采取措施，以便在受灾时配电自动化系统也能继续展开业务。为应对该问题，开发了虚拟化技术、VNC (Virtual Network Computing) 等技术及独创的配置控制中间件。

另外，在国立研究开发法人新能源产业技术综合开发机构 (NEDO) 和印度北哈里雅纳配电公司 (UHBVN) 的智能电网实证事业中，于哈里雅纳邦帕尼帕特构建了综合配电管理系统，验证了系统对印度配电公司电力质量问题的可用性。

2　配电系统用 SVC

传统配电系统，主要是通过配电用变电站的负载时分接头转换变压器 (LRT：Load Ratio Control Transformer) 和线路途中的自动电压调整器 (SVR：Step Voltage Regulator) 的分接头切换进行电压调整。但是，由于这些设备控制响应慢，而且只能进行离散的电压调整，因此在可再生能源的输出发生急剧变化等时，难以将电压维持在合适的范围内。为解决该问题，可快速且连续地调整电压的 FACTS (Flexible AC Transmission System) 设备的导入得到积极推进。

富士电机与东北电力株式会社进行联合研究，利用采用了磁通控制技术的可变电感器，开发出了新型他励式配电系统用 SVC[(1)]。

该新型他励式配电系统用 SVC 的基本原理如**图 1** 所示。因可通过直流电流控制电抗器中流过的电流，故无需谐波滤波器，结构比传统产品简单。磁芯上缠有交流绕组和控制绕组。在控制绕组中通以直流电流，产生磁饱和，有效磁导率减少。基于该原理，通过控制磁通密度，改变有效磁导率，从而控制电感，调整流入系统的无功功率。主回路仅由铁心和绕组构成，抗浪涌等性能强，可确保可靠性。此外，因调整无功功率的控制电流为直流，故控制电路及软件的算法也变得简单。

该新型他励式配电系统用 SVC 的外观如**图 2** 所示，规格如**表 1** 所示。为确认通过该 SVC 的电压调整动作，在东

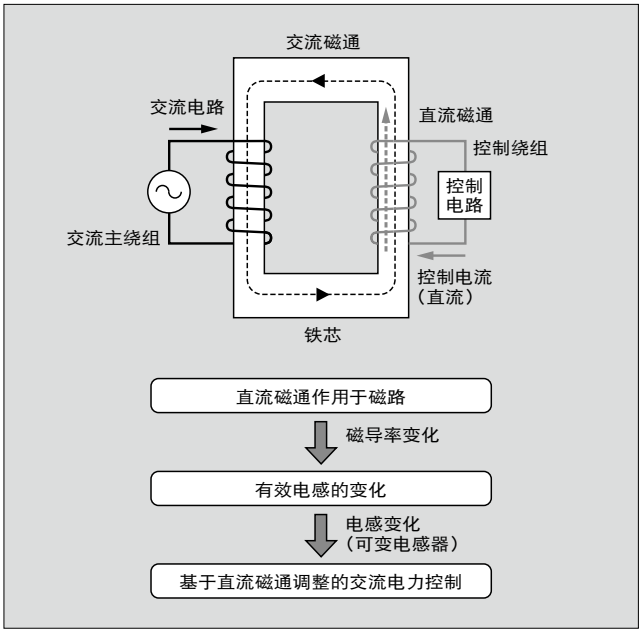

图 1　他励式配电系统用 SVC 的基本原理

图 2　他励式配电系统用 SVC 的外观

表 1　他励式配电系统用 SVC 的规格

项目	规格
额定容量	300 kVA
可变容量	0～300 kvar（延迟）
额定电压	6600 V
频率	50/60 Hz
冷却方式	自然空冷
质量	4000 kg 以下
外形尺寸	W2500×D1500×H2000（mm）
主电路	可变电感器 （无高次谐波滤波器）

北电力株式会社的协助下，目前正在东北电力株式会社管辖范围内的实际配电线路上进行现场试验。

3　集中电压控制系统

传统电压调整设备利用连接点的测量信息分别决定控制量（本地控制）。但可再生能源的大量导入导致配电系统的电压管理变得复杂，现有的电压控制方式无法在机器之间进行协调，有可能难以进行准确的电压控制。因此，目前正在探讨实时控制各电压调整设备的集中电压控制系统，以便在中央系统中收集来自带传感器开关及电压调整设备的测量数据，从而将整个配电系统的电压维持在适当范围内。

富士电机在 NEDO 项目“分散型能源新一代电网构建实证事业”中，开发了如**图 3** 所示的集中电压控制系统。图中将集中电压控制系统作为一个独立的系统，但是我们设想将来会作为配电自动化系统的一个功能而导入。集中电压控制系统具有以下特点：

(a)　按照一定周期从配电系统各点设置的带传感器开关及电压调整设备收集测量数据。

(b)　在掌握整个配电系统状态的基础上，计算对各电压调整设备的最佳指令值。

(c)　对各电压调整设备实时发送指令值，对其进行控制。

在开发的集中电压控制系统中，除了 LRT、SVR 之类传统电压调整设备外，还将 SVC 和静止型同步串联补偿器（SSSC：Static Synchronous Series Compensator）

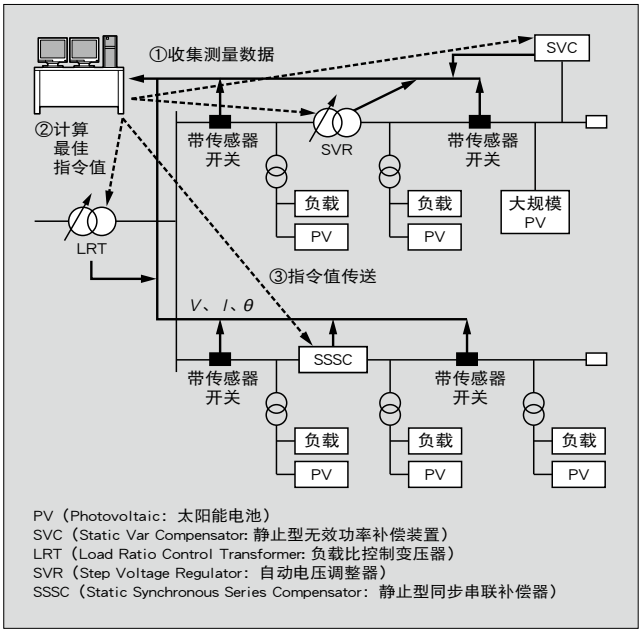

图 3 集中电压控制系统的概念图

等下一代电压调整设备添加到控制对象中。通过将目标电压作为指令值发送给 SVC 和 SSSC，发挥机器内部的高速电压控制，实现了高电压维持性能。

另外，在计算最佳指令值时，除整个配电系统的电压正常化之外，还考虑了以下 2 点：第一，减少 LRT 和 SVR 的分接头切换次数。这样有望延长 LRT 和 SVR 的寿命。第二，多个 SVC 输出分担的优化。这样，当发生急剧电压波动时，可维持 SVC 的补偿性能，减少无功电流引起的功率损失。

按照如**图 4** 所示的配置，对所开发的集中电压控制系统进行了实时综合运行试验。电力系统和电压调整设备在数字仿真器上进行模拟，通过 IEDIED (Intelligent Electronic Device)，与安装在通用 PC 上的集中电压控制程序相结合。另外，为实现高级配电网管理，需要确保多家供应商之间的相互操作性，因此在 IED 及通用 PC 上安装了基于电力用通信标准 IEC 61850 的通信系统。

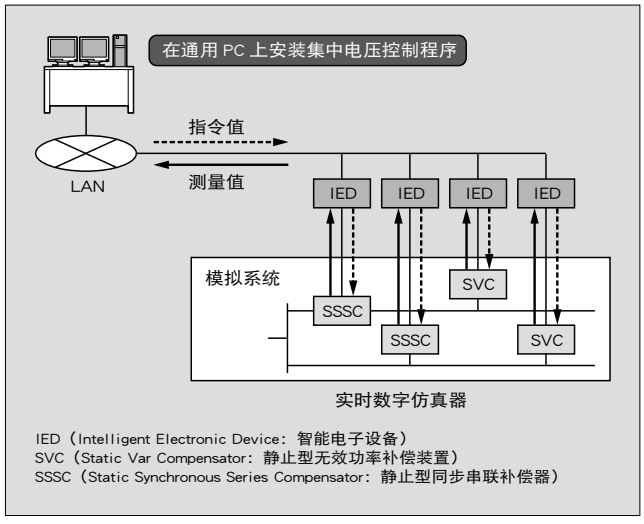

图 4　实时综合运行试验的结构图

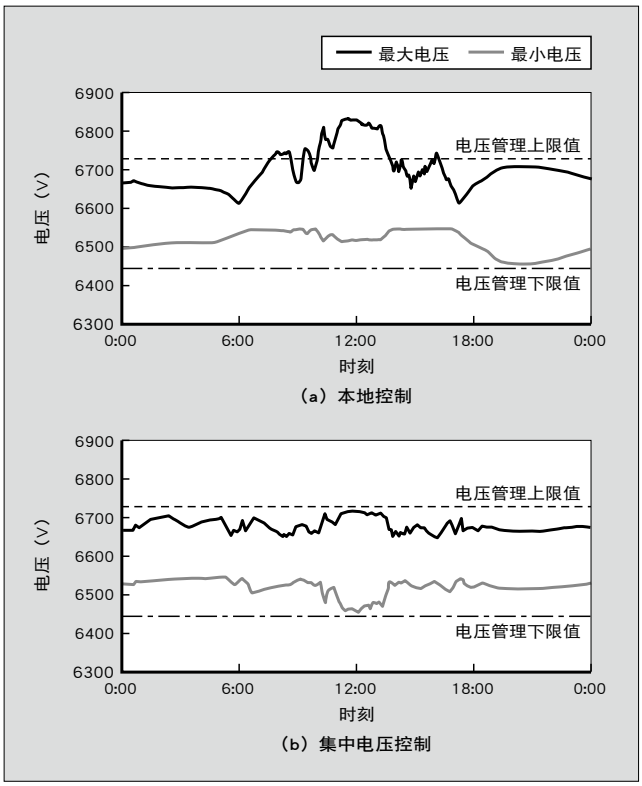

图 5　实时综合运行试验结果

如**图 5** 所示，由两台 SVC 和两台 SSSC2 组成模拟系统，测量和控制周期为 1 分钟，进行了 24 小时的综合运行试验。结果表明，系统可正常运行。另外，如**图 5** 所示，在本地控制时电压偏离了合理范围，而在集中电压控制时电压维持在合理范围内，确认了其使用效果。

而且，通过离线仿真，在各种条件下验证了集中电压控制系统的导入效果。结果表明，在较长的配电线上设置多个电压调整设备等时，导入效果明显。特别是在由包括下一代设备在内的多台电压调整设备构成的系统中，通过导入集中电压控制系统，太阳能发电的导入可能性可望提高 10 ～ 20%。

4　广域灾害时的 BCP 应对

如第一章所述，从 BCP 的观点考虑，近年来，即使发生大规模灾害，引起服务器安装场所和运营场所受灾，也要求配电自动化系统可继续进行配电系统运营业务。因此，富士电机开发了支持 BCP 的广域备用型配电自动化系统。

4.1　系统结构

广域备用型配电自动化系统的系统结构如**图 6** 所示。为了让安装有服务器的营业所在受灾时也能继续运行，本系统在相距数十公里至数百公里的两处营业所分散安装服务器，进行双重化备份。系统结构是在各营业所配置多台操作台用 PC 的私人云型。操作台用 PC 采用无风扇、无磁盘的瘦客户机〈注〉，各装置和网络均进行双重化备份处理，即使单体故障、单线路异常也可以继续运营。

广域备份型配电自动化系统在各服务器内构建了运行业务应用程序的“业务虚拟设备”和显示画面的“客户端虚拟设备”。客户端虚设备拟仅配置操作台的数量。**图 7** 所示为广域备份型配电自动化系统的虚拟环境。

操作台用 PC 通过 VNC 与常用模式的服务器 A 单元内的各个客户端虚拟设备连接，进行画面显示。VNC 是指通过网络，在远程操作台用 PC 上显示服务器内客户端虚拟设备画面的远程桌面软件。通过使用虚拟化技术和 VNC，包括应用软件在内的所有信息均可保存到服务器内。各操作台用 PC 只显示并操作服务器内的画面，PC 中未保存任何信息，因此可确保安全，维护也简单。

4.2　灾害应对操作

因服务器维护或安装有服务器的营业所受灾等导致某服务器（例如服务器 A）无法操作时，需要将停止时间控制在最小限度。因此，富士电机开发出了检测到异常后，可在 1

〈注〉瘦客户机：指用户使用的终端中几乎没有信息，在服务器端进行处理的结构

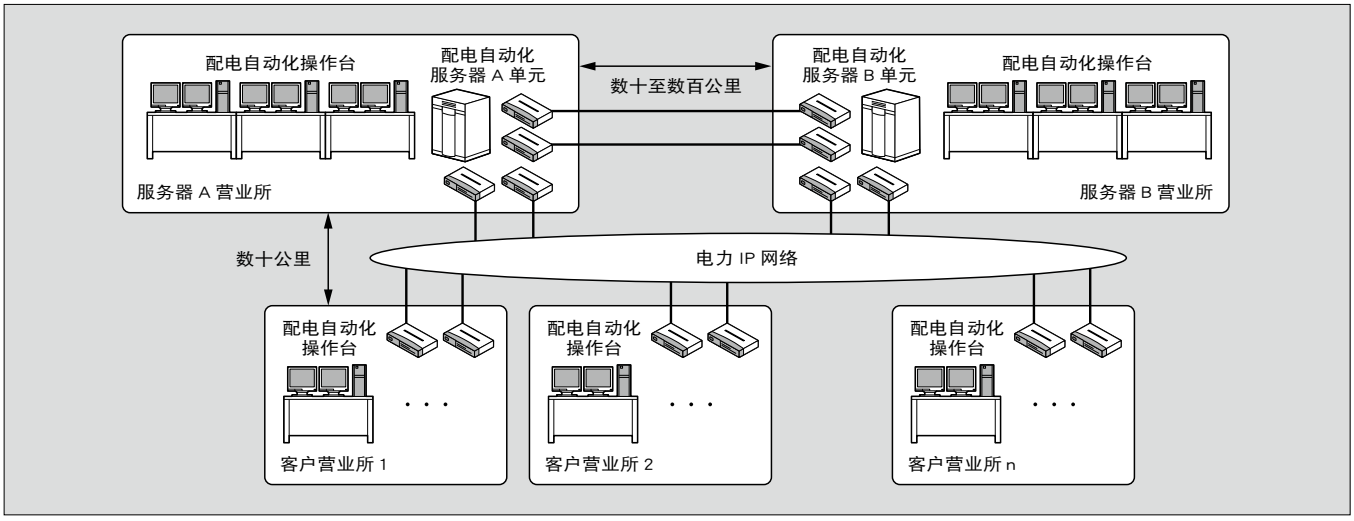

图 6　广域备份型配电自动化系统

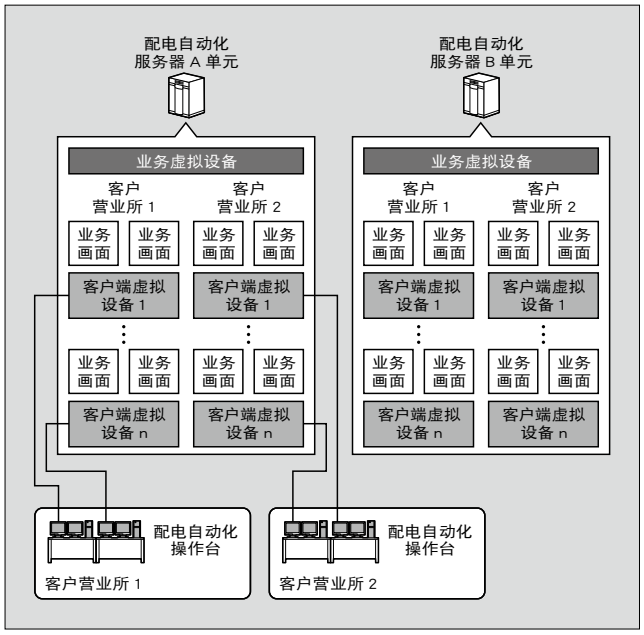

图 7　支持 BCP 的配电自动化系统的虚拟环境

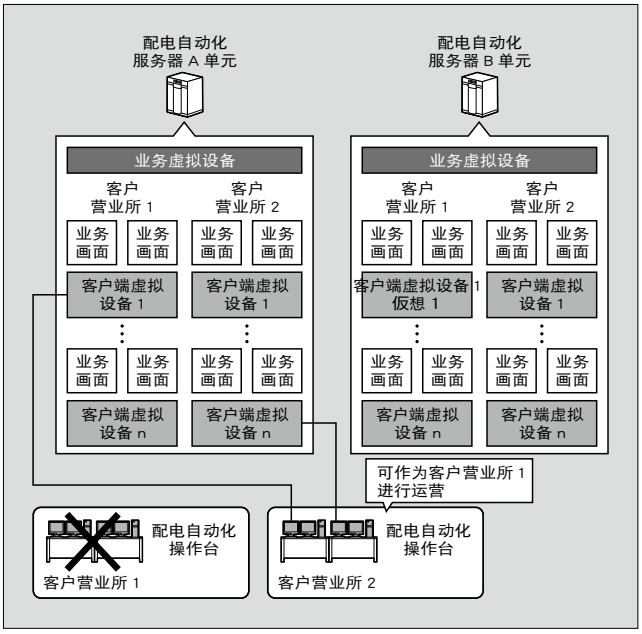

图 9　客户营业所停止时的代理运营

秒以内切换服务器运行模式的独创配置控制中间件。

另外，服务器 A 单元、B 单元两方的客户端虚拟设备处于随时可进行画面显示的状态，服务器 A 单元停止时，操作台用 PC 将自动切换至服务器 B 单元的客户端虚拟设备。**图 8** 所示为灾害等导致服务器 A 停止时的动作情况。

另外，如**图 9** 所示，客户营业所受灾时，其他客户营业所通过访问受灾营业所的客户端虚拟设备，可对受灾营业所进行监视控制。

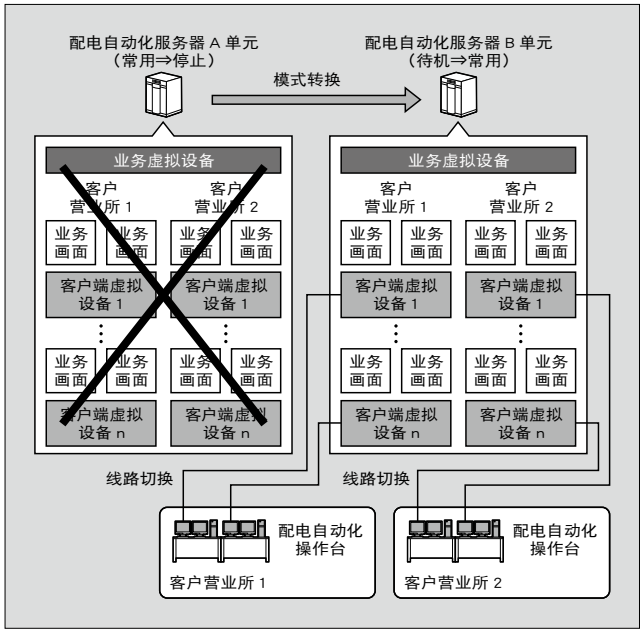

图 8　关于服务器 A 停止时的运行

5　综合配电管理系统实证（NEDO 印度实证）

随着经济的增长，印度的电力需求不断增大，而由于基础设施落后，电力长期处于短缺状态。因此，印度很多配电公司均面临着缩短事故停电时间、降低负载峰值、降低配电损失等与电力品质相关的课题。

基础调查及实证前调查的结果表明，尤其是在 UHBVN 的帕尼帕特地区，这些课题急需解决。因此，作为 NEDO 的实证事业，2015 年 10 月～ 2019 年 3 月期间，在帕尼帕特构建了使用智能电网相关技术的综合配电管理系统，对问题的解决方案进行了实证和评价。

5.1　实证系统结构

本实证以帕尼帕特的三个变电站和四根馈线为对象，构建了**图 10** 所示的配电系统，安装了配电设备及智能电表相关设备。并且，构建了以 SCADA（Supervisory Control And Data Acquisition）为中心的综合配电管理系统，验证了解决问题方案的有效性。系统的各构成要素大致可分类如下：

⑴　上位系统（SCADA 等）

构建了进行配电设备监视控制的 SCADA、基于来自 SCADA 的停电信息进行停电管理的 OMS（Outage Management System）及以顾客为单位管理智能电表数据并与 UHBVN 现有收费系统协作的 MDMS（Meter Data Management System）。这些上位系统服务器安装在 UHBVN 的数据中心，在新建的操作中心设置了 4 个操作台。

⑵　配电设备

在 3 处变电站设置了 4 台真空断路器（VCB：Vacuum Circuit-Breaker），在 4 条馈线上设置了 22 台负载开关（LBS：Load Break Switch）。另外，在各 VCB 和 LBS 上分别设置了通信设备 RTU（Remote Terminal

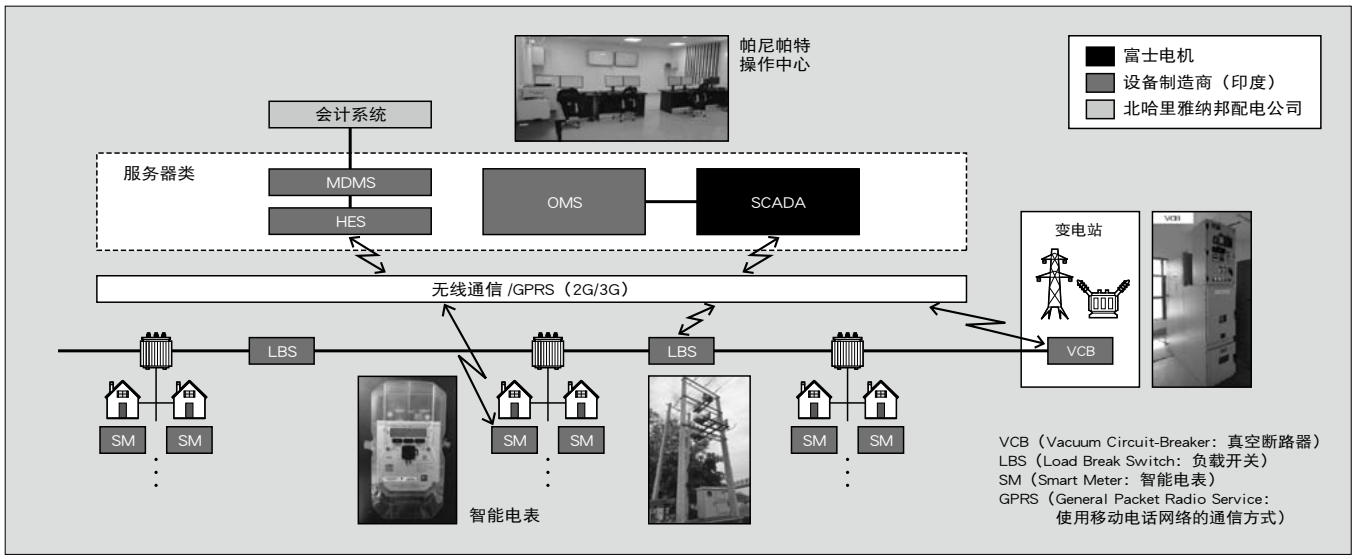

图 10　实证系统结构示意图

Unit）和 FTU（Feeder Terminal Unit），可通过 SCADA 对各 VCB 和 LBS 进行监视控制。

⑶　智能电表相关设备

安装了 11000 台单相和三相智能电表及 67 台从仪表收集数据和进行控制的 DCU（Data Concentrator Unit）。DCU 收集的仪表数据通过 HES（Head End System）传送到 MDMS。

5. 2　实证系统的有效性验证

使用在帕尼帕特构建的综合配电管理系统，验证了 UHBVN 在解决缩短事故停电时间、降低负载峰值、降低配电损失这三个问题方面的有效性。

⑴　缩短停电时间效果的验证

在进行实证的帕尼帕特，通过比较引进 SCADA 系统前后的 SAIDI（System Average Interruption Duration Index）及 SAIFI（System Average Interruption Frequency Index），验证了停电时间和停电次数的改善效果。对 SCADA 系统运营开始前的 2017 年和运营开始后的 2018 年进行比较，结果表明，SAIDI 改善了 66%，SAIFI 改善了 26%。另外，在示范期间收集的事故停电例中，通过 SCADA 系统迅速确定事故点和来自其他馈线的配合，确认到实证对象馈线的停电时间平均可以缩短约 62%。从上述结果可知，SCADA 系统提高了实证对象馈线的电力供应可靠性。但是，该改善效果还包括了近年来印度自身电力品质的改善部分。另外，本系统在实证事业结束后，经印度电力部从 NEDO 转让给了 UHBVN。今后，预定将继续进行高精度比较分析。

⑵　降低负载峰值效果验证

使用通过智能电表收集的电量数据，验证了实证系统降低负荷峰值的有效性。首先，将用户按照电力使用量进行分组，对各组进行了伪需求响应。具体而言，使用智能电表的电力限制功能，按组轮流限制电力使用量，通过仿真验证需求削减效果。结果表明，使用智能电表的电力限制功能，可削减整体需求的峰值。

⑶　降低配电损失效果验证

比较实证馈线所有的 DT（Distribution Transformer）和 DT 所有智能电表的合计电量，测量和分析了该馈线的配电损失。结果表明，实证地区每日平均配电损失率相当大，约为 38.0%。另外，分析了配电损失每天的时间变化，发现与用户电力使用量的时间变化大致相同。从该结果可知，配电损失的主要原因在于盗电等导致的人为损失，该损失占很大比例。在整治通信基础设施的基础上，通过比较以区间为单位的 DT 和智能电表的电量，可确定配电损失较大的区间，再对该区间集中地进行现场调查，即可发现盗电场所。

6　后记

通过上述配电自动化系统和 SVC，富士电机为应对大量导入可再生能源而导致的配电系统不稳定的问题，以及受灾时连续进行系统运营业务做出了贡献。今后，为了应对更加复杂的系统，安心地运营配电系统，将继续推进系统和设备开发。

本文中的部分成果来自国立研究开发法人 新能源产业技术综合开发机构（NEDO）的项目——分散型能源新一代电网构建实证事业的结果。在此谨向各位相关人员表示深深地感谢。

参考文献

⑴　小岛武彦等. 有助于解决电压变动问题的配电系统用静止型无功功率补偿装置. 富士电机技术期刊. 2017, vol.C9, no.2, p.96-99.

松枝　剑

从事电力公司用配电自动化系统的工程工作。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流通综合技术部课长助理。

望月　正希

从事电力公司用配电自动化系统的工程工作。现就职于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流通综合技术部。

神通川　亨

从事与电力系统仿真、控制、分析相关的研究、开发。现为富士电机株式会社技术开发总部数字创新研究所数字平台中心系统控制研究部经理。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。