可实现高级维护和操作的数字化变电站技术

Technology of Digital Substation for Advanced Maintenance and Operation

石上 雄太 ISHIGAMI, Yuta　　杉田 浩平 SUGITA, Kohei　　野川 方生 NOGAWA, Michio

电力行业的变电站设备因长时间运行而发生老化，很多设备迎来了更新时期。变电站设备更新时，不仅要求更新工程提高效率、控制成本，还要求更新设备的高可靠性和维护、操作的高级化。为满足这一需求，富士电机开发了符合有关数字化变电站配置的国际标准规格 IEC 61850 的 IED 和 MU。将多个 IED 和 MU 通过以太网通信电缆连接，推进开发，使符合 IEC 61850 的数字化变电站系统实用化，采用过采样法，验证保护性能（三周期断路）。

The aged substation facilities in Japanese electric power industry has created the growing need to replace many of them. When replacing substation facilities, it is required to improve construction work efficiency, save costs, increase equipment reliability, and enhance maintenance and operation. To meet these needs, Fuji Electric developed IEDs and MUs in accordance with IEC 61850, an international standard that stipulates the configuration of digitalized substations. Connecting IEDs and MUs via Ethernet, we have been developing an IEC 61850 fully digitalized substation by using oversampling techniques and examining protection performance (3-cycle breaking).

1 引言

随着电力系统改革的推进，跨地区广域系统的运营正在扩大。在此情况下，电力公司间无缝化连接、分布型电源大量连接时系统稳定程度的维持、设备长时间运行带来的老化、人才不足造成的保养等课题和问题越来越明显。在此背景下，要求各电力企业进一步提高电力的稳定供应及设备更新的效率，降低成本。

特别是，电力行业的变电站设备因长时间运行而发生老化，很多设备迎来了更新时期。这些设备更新时，不仅要求更新工程提高效率、控制成本，还要求更新设备的高可靠性和维护、操作的高级化。为满足这样的需求，在新建和更新变电站设备时，期待实现利用数字化技术的数字化变电站。数字化变电站可节省现有变电站设备中铺设的数百根控制电缆，使变电站设备紧凑化，提高施工效率。

本文对可实现高级维护和操作的数字变电站技术进行论述。

2 变电站数字化技术的动向

图 1 所示为数字化变电站的信息系统结构示例。此前，站母线的实用化已经先行进行了研究。近年来，过程母线的实用化研究正在兴起。

为实现数字化变电站，国外倾向于采用国际标准 IEC 61850 中规定的监视控制信息的公共信息模型以及通信服务接口。日本也在研究基于 IEC 61850 的变电站数字化。[(1)~(3)]

在现有变电站系统中，安装了数百根控制信号等模拟信号电缆。通过将这些模拟信号电缆置换为光缆等的过程母线，可将变电站内的所有信息进行数字化。过程母线通信可以通过 IEC 61850 中规定的通信服务接口，轻松地连接各制造商的设备。

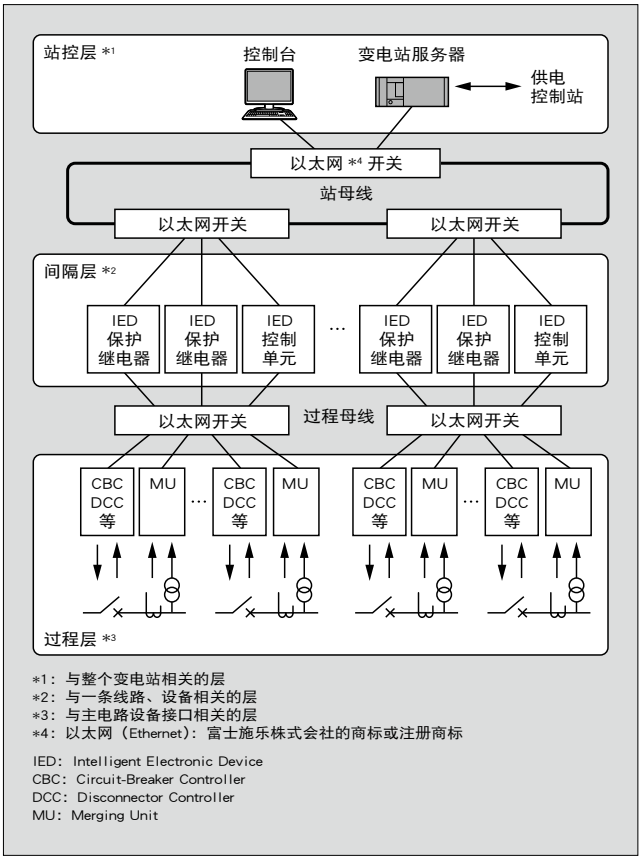

图 1　数字化变电站的信息系统结构示例。

模拟信号电缆连接室外过程层现场设备和室内间隔层设备之间的长距离。过程母线化使得该模拟信号电缆的根数减少，并实现现场设备小型化、施工省力。另外，过程母线化可缩短施工时间、提高施工及维护时的安全性。

此外，通过基于变电站内信息数字化的信息共享，监视与自动控制等功能得到提高，可实现变电站系统的平稳运行

并防止事故的发生。而且，通过长时间积累并重新利用在多家变电站内测得的各种电量和设备信息，有望实现变电站设备资产管理的升级。

3 富士电机的变电站数字化技术

富士电机从 2011 年开始推进变电站内信息的全数字化，即使数字化变电站实用化的研发。下面对数字化变电站配置设备的开发情况进行说明。

3.1 符合 IEC 标准的 IED、MU

数字化变电站的主要配置设备包括 IED (Intelligent Electronic Device) 和 MU (Merging Unit)。IED 是检测变电站内外发生的各种事故，向断路器输出跳闸命令的保护运算装置。MU 是输入变电站内测量的电压电流和断路器开关信息，转换为数字化数据，并向 IED 输出的输入输出转换装置。绝大多数的 IED 与 MU 间通信，采用 IEC 61850 国际标准规格。

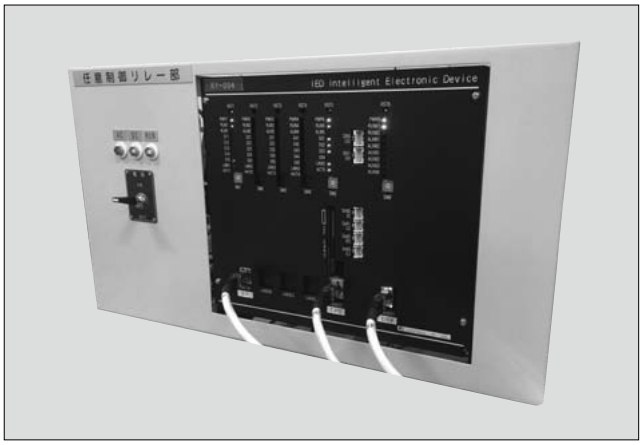

图 2 IED 外観

传统保护性继电器装置测得的变电站内的电压电流和断路器开关信息的输入是模拟数据，而 MU 到 IED 的输入则是数字数据。因此，所有 MU 均需使用共同的时刻输出时间同步的数字化数据。

基于以上论述，富士电机新开发了支持 IEC 61850 的 IED 和 MU。所开发的 IED 外观如**图 2** 所示。本 IED 与 MU 之间的通信，使用了 IEC 61850 的通信服务接口。电压与电流的瞬时值数据通信使用了 SV (Sampled Values)，断路器开关信息等的通信使用了状态变化通知用通信 GOOSE (Generic Object-Oriented Substation Events)。

富士电机正致力于符合 **3. 2 节**所述国际标准规格 IEC 61588 的时间同步系统的实用化。此外，还致力于 **3. 3 节**所述时间异步系统的实用化。

3.2 使用了电力系统仿真器的模型验证

富士电机在实地构建数字化变电站之前，开发了模拟符合 IEC 61850 和 IEC 61588 的电力系统的电力系统仿真器。数字化变电站模型构建于该电力系统仿真器中。通过公司内部试验确认了数字化变电站所需功能，并交付给中部电力株式会社。下面对该电力系统仿真器进行论述。[4]

(1) 电力系统仿真器的系统结构

图 3 所示为电力系统仿真器的系统结构。

运行支援系统对构建于电力系统仿真器中的数字化变电站模型内的断路器模型等进行控制和状态监视。

电力系统仿真器根据系统配置连接多个模拟了电力流通设备的设备模型，构成等比例缩微的系统（缩微系统）。这些设备模型由模拟型模型和混合型模型组成。模拟型模型使用 R、L、C 元件对变压器和输电线路等电力流通设备进行了等比例缩微。另一方面，混合型模型对同步发电机、太阳能发电系统和用户负载等特性进行数字化运算，将与运算结果相应的电流作为模拟量进行输出。

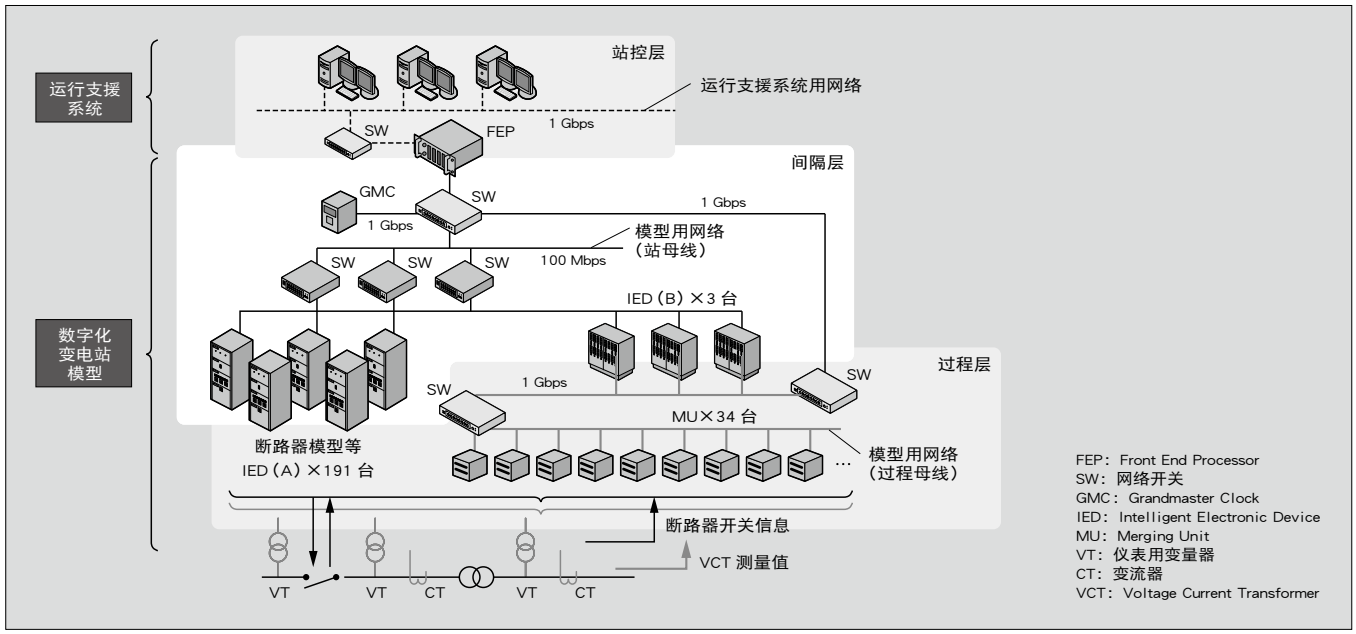

图 3 电力系统仿真器的系统结构

为了在电力系统模拟器中构建数字化变电站，信息通信设备由以下 3 要素构成。

(a) 对系统电压与电流的瞬时值进行采样的 MU

(b) 控制断路器的测量控制用 IED

(c) 执行保护控制运算的保护控制运算用 IED

⑵ 通信概况

通信网络基于以太网〈注 1〉构建。运行支援系统通过运行支援系统用网络与数字化变电站模型内的断路器模型等连接。给各设备模型的控制命令，通过相当于管理变电站的上位服务器的 FEP (Front End Processor) 根据 IEC 61850 协议进行转换，发送到设备模型内的 IED。另一方面，各设备模型内的 IED 发送的实时监视数据经 FEP 集中，在运行支援用网络的客户端上实时地用图表表示出来。

⑶ IED 与 MU 的种类

IED 与 MU 的种类如**表 1** 所示。在数字化变电站模型内的网络 (模型用网络) 上，共计连接了 228 台 IED 和 MU。将测量控制用的 191 台 IED (A) 连接到站母线上。将保护控制运算用的 3 台 IED (B) 连接到站母线和过程母线两边。另外，将瞬时值测量用的 34 台 MU 连接到过程母线。各 IED 和 MU 使用符合 IEC 61850 及 IEC 61588 的以太网开关相互连接。

⑷ 时间同步与采样同步

表 1 IED 与 MU 的种类

种类	名称	台数
IED	IED（A）：测量控制用	191 台
	IED（B）：保护控制运算用	3 台
MU	MU	34 台
合计		228 台

在电力系统仿真器中，为了高精度地分析、评价数字化变电站的仿真结果，需将分散配置在缩微系统中的 IED (A) 和 IED (B) 测量的数据按照采样时间进行即时整合，即进行采样同步。另外，保护控制运算用 IED (B) 使用通过高精度时间同步的多台 MU 采样的电压和电流瞬时值，始终进行保护控制的运算。因此，与通过像一般电力波形记录仪那样预先设定的触发器，仅在某个时间区间取得测量数据的方式不同，IED (B) 始终需要高精度且时间同步的测量数据。因此，缩微系统内的所有 IED 和 MU 需要始终与一个基准时间同步地进行测量和控制。整个系统的基准时间使用了 GMC (Grandmaster Clock)。

运行支援系统网络通过 NTP (Network Time Protocol) 进行时间同步。另一方面，为应对高精度时间同步，模型用网络使用 IEC 61588 の PTP (Precision Time Protocol) 进行了时间同步。因此，模型用网络内的 IED 及 MU，相对于 GMC 基准时间，实现了 ±1 μs 以内的时间同步精度。

根据以上所述的时刻同步技术，缩微系统内的所有 IED 可以 20 μs 以下的时间同步精度取得数据。作为电力系统仿真器而言，时间同步精度已经足够。

⑸ 任意控制继电器模型

如**图 4** 所示，模拟数字化变电站的保护继电器系统的任意控制继电器模型 (Ry 模型)，由 IED (B) 和 MU 组合而成。

Ry 模型的 MU 通过仪表用变量器 (VT : Voltage Transformer) 和变流器 (CT : Current Transformer) 的各输入单元，以 5760 Hz 的采样频率测量缩微系统的电压和电流。并且，该 MU 还实时取得从断路器模型的触点输出的断路器开关信息。该 MU 使用 IEC 61850 的通信服务 SV 和 GOOSE，将这些系统信息发送给过程母线。

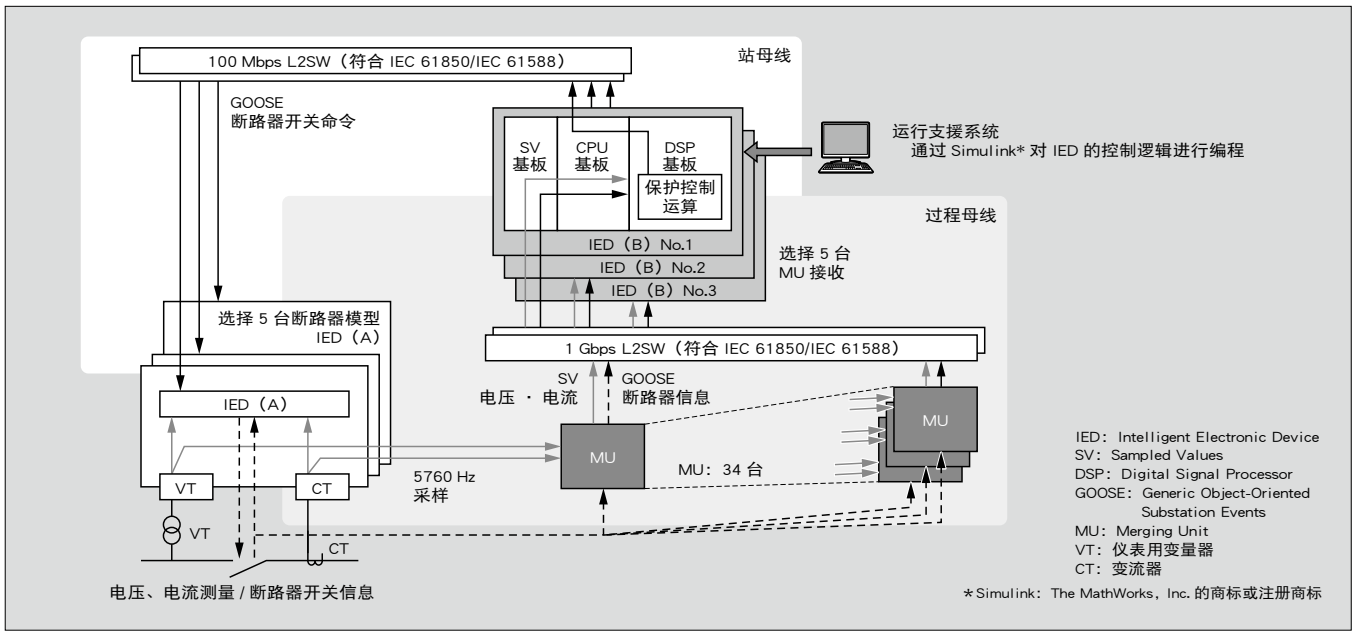

图 4 Ry 模型的系统构成

〈注 1〉以太网 (Ethernet)：富士施乐株式会社的商标或注册商标

表 2　保护继电器元件块

保护对象	保护方式	保护继电器元件块
输电线	PCM 电流差动继电器（直接接地）	87P、27S/G、51G
	PCM 电流差动继电器（电阻接地）	87S/G、64、27B
	线路选择	50S/SA/G2/G3、67GS、64、27
	过电流	51、51G、64
	短路、接地故障距离（直接接地）	44S/G、27Gϕ、51G
	短路、接地故障距离（电阻接地）	44S、51 ϕ、67G/GA、64
变压器	Y-Y-Δ 用	87、51、87G、67G、51G、64
	Y-Δ 用	87、51、87G、67G、51G、64
	Y-Y 用	87、51、87G、51G、64

IED（B）使用通过 SV 和 GOOSE 从 MU 经过程母线接收的数据进行保护控制运算。通过该运算生成的断路命令和接通命令，经站母线发送给 IED（A）。另外，用户可以对 IED（B）的保护控制运算制作任意的控制逻辑。

IED（A）从与站母线连接的 IED（B）接收基于 GOOSE 的断路器开关命令，根据接收到的命令控制断路器的开关。

(6) 可编程功能

IED（B）为具有可由购买者或用户，而不是 IED 制造商安装软件的可编程功能的 IED。用户可使用安装在电力系统仿真器的运行支援系统中的市售软件 Simulink〈注 2〉，对以瞬时值等为输入要素的任意控制逻辑进行编程。在 Simulink 的画面上组合预先准备的控制用的各种模块（**表 2**），组成所需的控制逻辑。

使用本功能，除了系统运行结果和系统行为的分析、评价之外，用户还可验证新保护继电器控制逻辑的开发和新系统稳定化系统的控制逻辑验证等大规模系统引进效果。

3.3　数字化变电站实用化措施

以电力系统仿真器开发的 IED、MU 的基本技术和实绩为基础，富士电机与中部电力株式会社等一起，进行了使用无需时间同步技术的新方法的研究和实证[5][6]。

(1)　数字化变电站实用化的课题

普通数字化变电站通信网络由二层通信开关 (L2SW) 等通信设备以及为进行各设备的时间同步而提供高精度时间信息的 GMC 等组成。但是，GMC 停止后，以采样的同时性为前提的差动继电器等有可能进行不必要的动作。此外，由于 L2SW 的连接作业和设置作业需要一定知识，因此，在防止操作维护时的人为错误和缩短作业时间等方面存在课题。

同时，在变电站监视装置和保护控制装置进行数字化时，有必要在广泛应用的 PCM 电流差动继电器的采样时间同步方法和超高压变电站的事故去除时间的制约下进行研讨。

(2)　过采样方法的采用

过采样方法是指 MU 等设备的采样频率远高于现在变电站系统所用的采样频率 5760 Hz（60 Hz 系列）的方法。

如果各设备以现在变电站系统的采样频率进行时间异步采样，则时机会出现偏差。因此，对以时间同步为前提的保护继电器事故进行检测的性能有可能下降。采样频率越高，则该时间异步引起的采样时机偏差越小。因此，如果提高采样频率，使其处于保护继电器事故检测精度的容许范围内，则可无需时间同步。

另一方面，过采样方法无法改善的时间差中存在 MU 等各设备内各模拟滤波器 (AF) 的延迟特性引起的偏差。为抑制该偏差造成的影响，在各设备中，在**图 5** 所示各功能的处理分担中，通过将 IED 接收之前的①～②处理的延迟时间集中在一定范围内，可将来自多台 MU 的采样值作为同一时间的信息进行处理。

(3)　确保保护性能（三周期断路）

保护继电器装置除了精度和可靠性之外，还要求具备排除事故的快速响应性。变电站在数字化后也需与传统保护系统一样，在三个周期内断路，即 60 Hz 系统的事故排除时间需在 50 ms 以内。满足这一要求的数字化变电站保护系统各功能的处理分担如**图 5** 所示。

为实现三周期以内的断路，需压缩**图 5** 所示①输入处理、②发送处理（上行）、③继电器运算处理、④发送处理（下行）、⑤输出处理中各功能处理所需延迟时间及处理时间的偏差，采取了以下措施：

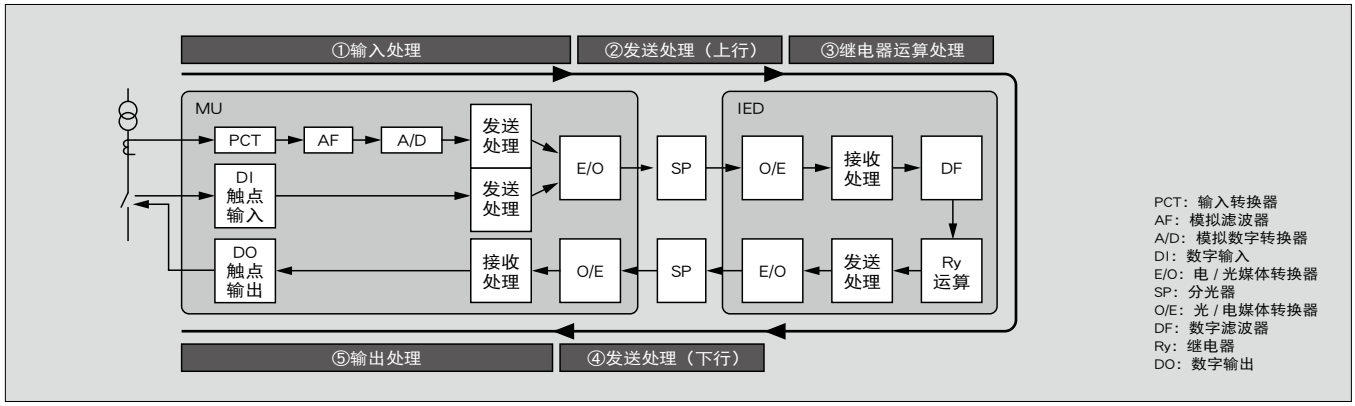

图 5　各功能的处理分担

〈注 2〉Simulink：The MathWorks，Inc. 的商标或注册商标

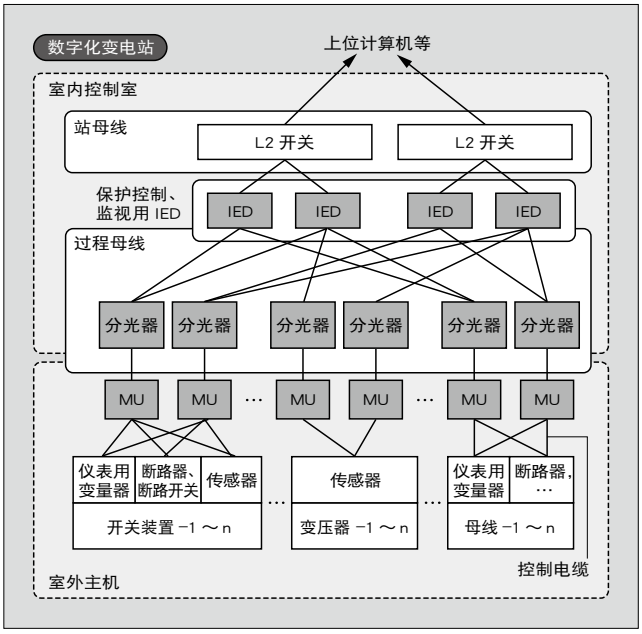

图 6　以实用化为目标的数字化变电站结构示例

(a)　继电器运算及数字滤波器（DF）的优化

(b)　模拟滤波器（AF）简化（高速化与特性均匀化）

(c)　利用快速响应性及可靠性优异（与 L2SW 相比）的分光器（SP）抑制传输延迟、波动

现在，正在试制采取了这些措施的保护继电器系统，并在验证其性能。此外，为实现对电力系统设备使用过采样方法的数字化变电站，正在进行各种开发。**图 6** 所示为以实用化为目标的数字化变电站结构示例。

4　后记

以上，对可实现高级维护和操作的数字变电站技术进行了论述。

我们认为，各项举措及其成果将对数字化变电站的实用化以及实用化所创造的新价值和收益做出贡献。

数字化变电所用的 IED、MU 等设备及 IEC 61850 等通信技术，在分散型电源、智能电网、蓄电池、风力发电、水力发电、火力发电、EV 等各领域的应用也在不断扩大，计划今后也致力于面向这些领域的产品开发。

参考文献

(1)　“IEC 61850-5 Edition 2.0 Communication requirements for functions and device models”. 2013.

(2)　“IEC 61850-9-2 Edition 2.0 Specific communication service mapping（SCSM）- Sampled values over ISO/IEC 8802-3”. 2011.

(3)　一般社団法人 電気協同研究会 .“新しい通信技術による保護リレーシステムの設計合理化”. 電気協同研究 . 2015, 第 71 巻，第 1 号 .

(4)　池田進矢ほか .“系統解析シミュレータにおける IEC 61850 適応の IED，MU 開発”. 保護リレーシステム研究会 . 2019, PPR-19-008.

(5)　伊藤拓也ほか .“オーバーサンプリング原理によるプロセスバスシステムの新たなサンプリング同時性の確保手法”. 保護リレーシステム研究会 . 2019, PPR-19-007.

(6)　小島一浩ほか .“新しい高信頼性プロセスバスを適用した保護リレーシステムの検証”. 平成 30 年電気学会電力・エネルギー部門大会 . 2018, 214.

石上　雄太

从事能源管理事业的开发。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。博士（工学）。电气学会会员。

杉田　浩平

从事保护控制系统的开发及工程业务。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流通综合技术部课长助理。

野川　方生

从事电力流通领域保护控制系统的工程业务。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流通综合技术部课长。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。