利用世界最大级 60 MWh 氧化还原液流电池的系统蓄电池用大容量交直转换系统

Large-Scale Power Conditioning System for Grid Storage Battery System with Redox Flow Battery Having World's Highest Capacity Class of 60 MWh

毛内　俊晴 MONAI, Toshiharu　　**须崎　久晴** SUZAKI, Hisaharu　　**矢野　敬二** YANO, Keiji

住友电气工业株式会社的世界最大级利用 60MWh 氧化还原液流电池的系统稳定化实证设备中，富士电机承包了由交直转换装置（2.5MVA×13 组）和组控制柜组成的大容量交直转换系统的制造工程，并已交付给北海道电力株式会社 南早来变电所。交直转换装置可对应电力系统的频率变动，进行高速充放电的相当于自由调速的控制、中央供电指令所的远程控制和基于电池状态的辅助充放电控制等。组控制柜管理 65 台功率调节器的状态，实现了大规模且高速的并联运行。

Fuji Electric received an order from Sumitomo Electric Industries, Ltd. for a large-scale power conditioning system consisting of power conditioning equipment (2.5 MVA×13 banks) and storage-bank control panels, which are part of a power system stabilization demonstration facility using a redox flow battery system having the world's highest capacity class of 60 MWh. We delivered the system to the Minami-Hayakita Substation of Hokkaido Electric Power Co., Inc. The power conditioning equipment is capable of governor-free equivalent control for quick charging and discharging in accordance with the frequency fluctuation in the power system, remote control from the central load dispatching center, and supplementary discharge control depending on the battery status. The bank controller panels control the statuses of as many as 65 power conditioning sub-systems to achieve large-scale and high-speed parallel operation.

1　引言

风力发电和太阳能发电依赖于天气，因此会发生不规则的输出变动。随着向电力系统导入的扩大，可能会对频率等电力质量产生影响。在这一背景下，为了抑制电力系统可再生能源输出的变动，经济产业省的“大型蓄电系统紧急实证业务”正不断得到推进。其中，北海道电力株式会社和住友电气工业株式会社共同实施了利用氧化还原液流电池（RF 电池）的系统稳定化实证业务，并于 2015 年 12 月进行了实证试验[1),2)]。系统稳定化实证设备由额定输出为 15000 kW、额定容量为 60000 kWh 的 13 个组[〈注 1〉]构成。是拥有世界最大级蓄电容量的设备。

在该实证设备中，富士电机从住友电气工业株式会社承包的大容量交直转换系统已于 2015 年 12 月完成在北海道电力株式会社 南早来变电所的设置工作。

现在，风力发电和太阳能发电等为了抑制输出变动，有的区域还要求在发电站中同时设置蓄电池设备。为此，本次交付的交直转换系统被设置在用于抑制大规模电力系统变动的变电所。

本文将对利用世界最大级 60 MWh 氧化还原液流电池的系统蓄电池用大容量交直转换系统进行介绍。

2　交直转换系统的概要

交直转换系统的概要如**图 1** 所示。利用蓄电池设备的交直转换装置原来基本上都是 1 MVA 以下的小规模装置，

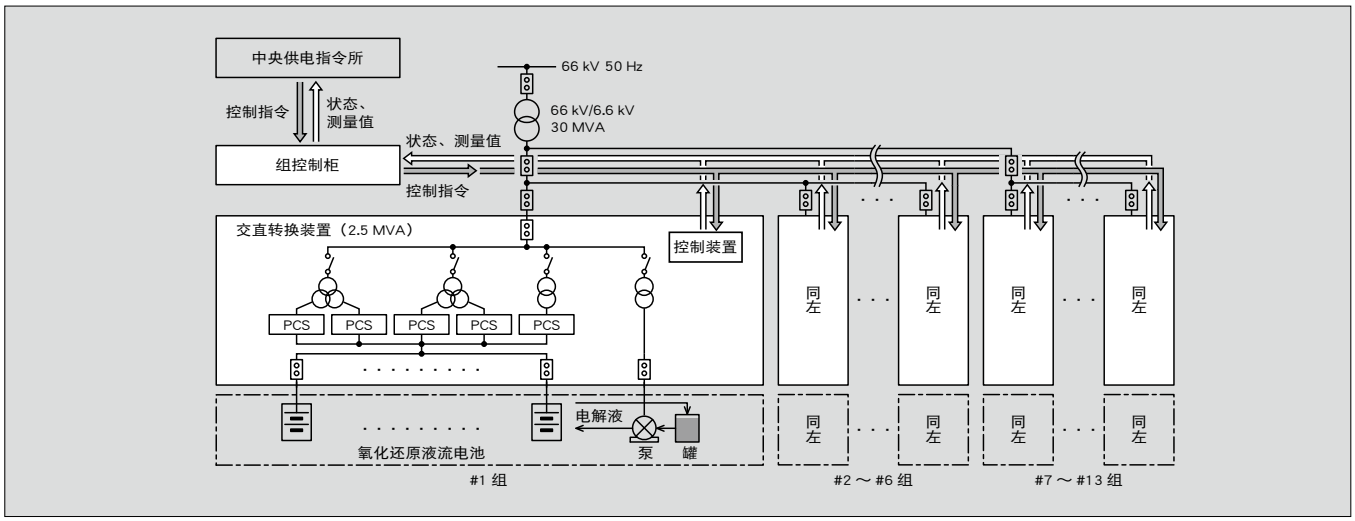

图 1　交直转换系统的概要

〈注 1〉组：本文中，将“组”定义为交直转换装置和与之连接的蓄电池的组合单位。

图 2　交直转换装置的设置情况

但本系统是大容量，最大输出为 30 MW。由 13 个每组 2.5 MW 的交直转换装置和管理它们的组控制柜构成，在进行大规模且高速的并联运行的同时，实现了节省空间化。

⑴　交直转换装置

交直转换装置将 RF 电池与交流系统互联，实施相当于自由调速的控制，和根据来自中央供电指令所的指令等进行充放电。设置情况如**图 2** 所示。

⑵　组控制柜

组控制柜将来自中央供电指令所的控制指令合理分配到各组的交直转换装置中，从而控制交直转换装置。

3　交直转换装置的构成

每组交直转换装置的构成如**图 3** 所示，主要规格如**表 1** 所示。交直转换装置由功率调节器（PCS）部、高压互联部和电池连接部构成。

3.1　PCS 部

PCS 部以搭载 AT-NPC（Advanced T-type Neutral-Point-Clamped）三电平 IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）模块的百万瓦级太阳能用 PCS “PVI750-3/500[3]”为基础，由 5 台专为蓄电池用而开发的“PVI800-3/600”并联构成，具有高效率、节省空间和噪音低的特点。而且还有系统互连保护功能、FRT（Fault Ride Through）功能、经 PCS 内置可编程控制器（PLC）“MICREX-SX”的上层通信接口、高速响应上层控制指令的功能以及进行稳定充放电的输出抑制功能等。

3.2　高压互联部

交直转换装置的高压互联部将 5 台 PCS 的交流输出集中到交流母线中，由连接在蓄电池设备内部母线（6.6 kV）上的高压互联柜、用于升高 PCS 交流输出压力的主变压器柜以及从内部母线供应 RF 电池辅助装置动力的辅助装置电源柜构成。

高压互联柜在蓄电池设备内部母线与交流母线的连接部

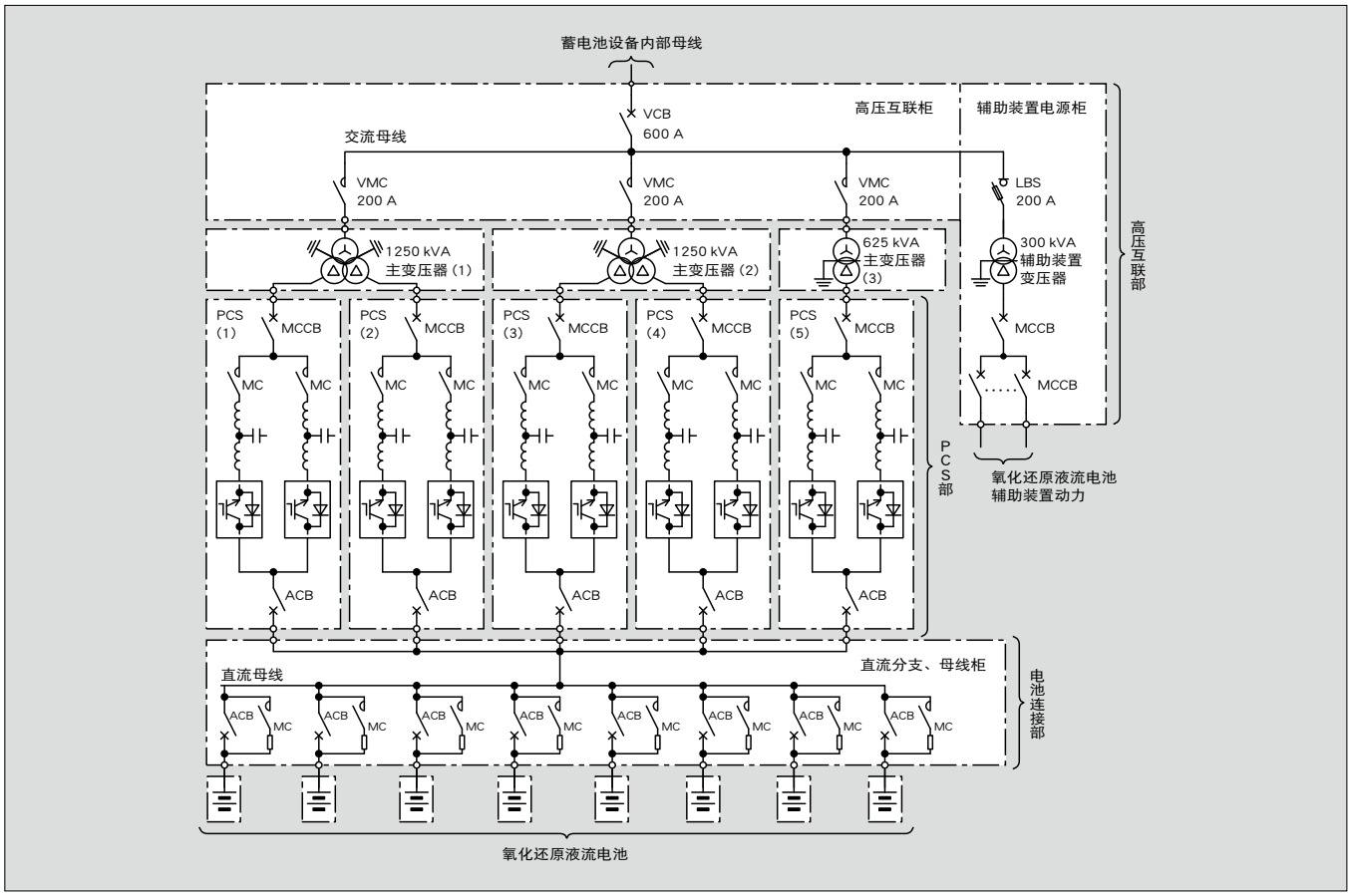

图 3　交直转换装置的构成（每组）

表 1　交直转换装置的主要规格（每组）

项目		规格
方式	主电路和转换方法	自励式电压型正弦波 PWM
	控制方式	电压型电流控制
	运行方式	系统互联
	冷却方式	强制空冷
直流输入输出	直流分支数	8 分支
	直流电压范围	DC480～750 V
	最大直流电流	连续 6400 A（800 A×8 并联）
交流输入输出	相数	三相 3 线式
	额定电压和变动范围	6600 V±10%
	额定频率和变动范围	50 Hz±1 Hz
	交流受电端额定容量	2500 kVA
	高次谐波电流含有率	综合 5%以下、每次 3% 以下
	功率因数	0.95 以上
控制响应时间		在 −100%～+100%范围时为 100 ms 以内
噪音		70 dB 以下
外形尺寸		W15233×D2920×H2870（mm）

采用高压真空断路器（VCB），并在将 PCS 的交流输出集中到交流母线中的电路内采用了比 VCB 更小的真空电磁接触器（VMC）。通过它们实现了节省空间化。

在主变压器柜中，为 4 台 PCS 设置了 2 台三绕组模塑变压器。与二绕组模塑变压器相比，设置空间得到了大幅削减。此外，还为剩下的 1 台 PCS 设置了超高效模塑变压器。利用这些组合实现了高压互联部的高效化。

除了高压互联柜和主变压器柜外，还备有高压互联部的系统互联保护和装置保护所需的保护继电器，以及作为交直转换装置主控制部的 PLC。高压互联部的 PLC 不仅要负责相当于自由调速的控制，还要起到与组控制柜和 PCS 内 PLC 之间的通信接口作用。这些通信中都采用富士电机的高速数据通信网络“PE-Link”，实现了节约配线、节省空间和高速的控制响应。

3.3　电池连接部

交直转换装置的电池连接部由用于输入 8 个分支 RF 电池的直流分支柜，和将各分支集中到直流母线中，向 5 台 PCS 供应通用直流电压的直流母线柜构成。此外，它还会利用信号转换器检测电池连接部的电流和电压，在高压互联部的 PLC 中输入这些测量信号。

直流分支柜由低压空气断路器（ACB）、RF 电池的初期充电用电路〔电阻和电磁接触器（MC）〕以及直流电流检测用信号转换器构成。通过在各分路中设置直流电流检测用信号转换器来提高控制精度。

直流母线柜由可通过 DC6400 A 电流的母排构成主电路，这个主电路中集中了直流接地检测装置和直流电压检测用信号转换器。

通过这些主电路构成和测量功能、保护功能，实现了适合连接大容量 RF 电池的直流电路。

4　交直转换装置的控制功能

交直转换装置的控制功能是一个具有划时代意义的功能，它利用大规模蓄电池设备进行原来火力发电站和水力发电站中实施的自由调速控制，以及根据中央供电指令所的指令进行的负荷频率控制。并在此基础上，利用蓄电池的特性进行了长周期变动抑制控制等。

4.1　相当于自由调速的控制

相当于自由调速的控制是在交直转换系统中检测电力系统的频率（系统频率），调整交直转换装置输出以恢复基波频率的短周期变动抑制控制。根据系统频率的变化和调节率计算出电力变化量，利用 PID 调节器，以 10 ms 为单位生成调速指令值，从而决定交直转换装置的输出（**图 4**）。

如果系统频率比基波频率更低，那么在电力系统中供小于求，因此会生成增加系统频率的调速指令值。反之，如果系统频率高于基波频率，那么在电力系统中供大于求，因此会生成减少系统频率的调速指令值。另外，交直转换装置的输出检测出系统频率后会在 100 ms 以内响应。

这样，利用交直转换装置进行相当于自由调速的控制时，充电、放电双向均可实现高速的频率调整运行。

4.2　远程控制

交直转换装置在以下控制中，经组控制柜接收中央供电指令所的指令信号，并远程控制 RF 电池的充放电。

⑴　短周期变动抑制控制

缓和多个风力发电和太阳能发电合成输出的短周期变动（周期在 20 分钟以下）的变动补偿控制，以及将整个系统的供需不平衡量分配给水力发电站和 RF 电池的负荷频率控制。

⑵　长周期变动抑制控制

根据风力发电和太阳能发电的输出预测，缓和长周期变动（周期在 20 分以上）的控制。

⑶　防调节力不足措施运行控制

避免输出预测和供需计划中出现剩余电力的控制。

⑷　短 / 长周期混合控制

将短周期变动抑制控制和长周期变动抑制控制组合后，作为整个蓄电系统进行控制，从而实现最佳运行。

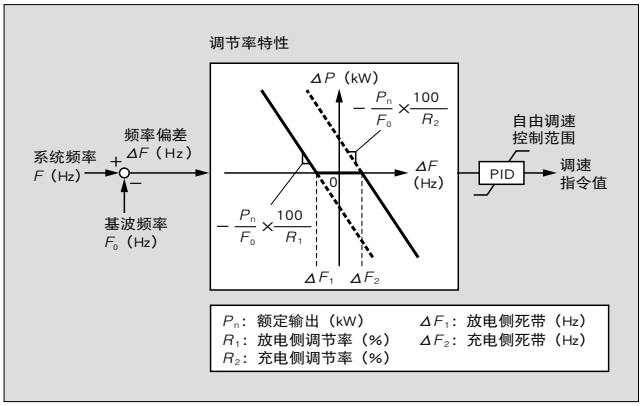

图 4　相当于自由调速的控制的控制原理

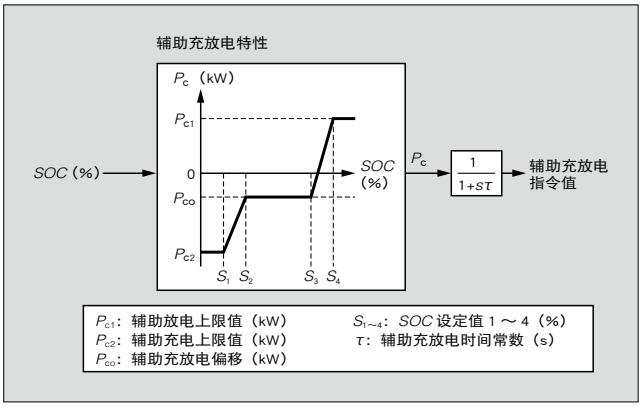

图 5　辅助充放电控制的控制块

4.3　辅助充放电控制

辅助充放电控制会检测出 RF 电池的充电状态 *SOC*，利用从辅助充放电特性中取得的辅助充放电指令值，将 *SOC* 调整到目标范围（**图 5**）。

在 *SOC* 低于设定值 S_2 的状态下，为充电方向的辅助充放电指令值，在 *SOC* 高于设定值 S_3 的状态下，为放电方向的辅助充放电指令值。辅助充放电指令值通过与相当于自由调速的控制等的电力指令值合成，并将合成后的指令值送至 PCS，可以将 *SOC* 调整到目标范围内。

此外，辅助充放电指令值的时间变化可以通过设定值 τ，调整至不会对电力系统产生影响的变化速度。

4.4　初期充电和维护控制

在交付或维护时，RF 电池电动势为 0 V 状态，这时，从交直转换装置向 RF 电池充电称为初期充电。

在初期充电中，最初有 1 台 PCS 在直流电压恒定控制的整流模式下运行，剩余的 4 台在系统互联模式下运行。将系统互联模式的 PCS 输出向整流模式 PCS 中产生的充电电力减少的方向调整，同时利用带电阻的初期充电用电路依次连接 RF 电池。通过上述方式，可以将 RF 电池和整流模式的 PCS 冲击电流降低至各个允许电流值以内。

接着，在没有冲击电流的状态下，将所有电路从初期充电用电路依次切换成 ACB 电路后，将整流模式的 PCS 切换为系统互联模式。最后，在恒定电力充电下运行所有 PCS，将 RF 电池增加至规定的电动势，完成初期充电。

对于电动势为 0 V 状态的 RF 电池，只要施加较低的直流电压就能减少冲击电流，但是在无斩波的 PCS 中，技术上无法实现较低的直流电压控制。对此，利用交直转换装置的初期充电通过与上述多个 PCS 组合后的控制，以及利用最佳电阻值设计的初期用充电电路的 MC、ACB 开关控制得以实现。

此外，维护控制是指为了确认 RF 电池的性能，根据 RF 电池控制柜中输入的设定值和操作信号控制充放电，可以进行具有以下动作特性的运行。

⑴　直流充电运行

具有直流恒定电流、直流恒定电力和直流恒定电压特性的充电动作。

⑵　直流放电运行

具有直流恒定电流、交流恒定电力和直流恒定电压特性的放电动作。

⑶　交流充电运行

具有交流恒定电力和直流恒定电压特性的充电动作。

⑷　交流放电运行

具有交流恒定电力和直流恒定电压特性的放电动作。

5　组控制柜的功能

组控制柜管理并联连接的 65 台 PCS 的状态，能够实现高速且最佳的控制。针对中央供电指令所接收的控制信息等，决定运行组的选择和输出，将控制指令分配到 13 个组的交直转换装置中。此外，集中管理各组的运行信息等，并发送至中央供电指令所。

为了在短周期变动抑制控制中获得期望的响应，必须迅速地进行这些控制用信息的处理和收发。因此，在组控制柜中，针对与中央供电指令所和交直转换装置的通信方式、控制用测量信号的检测方式以及组的运行运算法则，采用了可高速执行的装置。

5.1　中央供电指令所的双向通信

组控制柜具有从 PLC 接收中央供电指令所的下行控制指令，将交直转换系统的测量值和状态信号等上行信息发送至中央供电指令所的双向通信功能。在中央供电指令所和组控制柜之间的通信中适用专用协议，收发使用了大容量蓄电池系统的电力系统运用所需的控制信息。

5.2　与交直转换装置的双向通信

具有从 PLC 接收交直转换装置的测量值和状态信号，将电力指令值和运行指令等控制指令发送至交直转换装置的通信功能。通过在交直转换装置和组控制器之间的通信中采用 PE-Link，实现了作为交直转换系统的高速控制响应。

5.3　高速频率测量装置的频率测量

相当于自由调速的控制中最关键的系统频率，利用组控制柜的高速频率测量装置进行检测。高速频率测量装置是为了实现高速的频率检测，而对高性能型多功能复合测量终端“PowerSATELITE Ⅱ”进行了专门设计制造的定制品。而且还在面向孤岛的微电网系统[4]中采用，在 50 Hz 系统中可以 30 ms 左右的速度检测出系统频率。通过在利用各组交直转换装置的相当于自由调速的控制和后述的统一指令运行用的相当于自由调速的控制中使用高速检测的系统频率信号，提高了频率调整的响应性能。

5.4　个别指令运行

个别指令运行是指从中央供电指令所个别操作、控制组的运行。

在负荷频率控制等中，中央供电指令所的控制指令可利用组控制柜分配到中央供电指令所指定的组的交直转换装置中。通过这种构成，中央供电指令所可以执行指定组的远程

控制、相当于自由调速的控制和辅助充放电控制。

5.5 统一指令运行

统一指令运行是指针对中央供电指令所的组统一控制指令，利用组控制柜的控制，将多个组的电池作为一个大容量蓄电池处理的运行。

从中央供电指令所分配了统一指令运行对象的组和组统一的电力指令值后，利用 PLC 根据电力指令值的大小等决定运行组数，在对象组中选择优先顺序较高的组，从而进行启动和停止。如要决定优先顺序，可以选择以下两种模式。

⑴ 日程表参照模式

将组的优先顺序事先登记在每日日程表中，决定当天运行组的优先顺序。

⑵ 电池状态参照模式

根据各组 RF 电池的 *SOC* 等电池状态，随时更新运行组的优先顺序。

此外，虽然交直转换装置的相当于自由调速的控制与个别指令运行对应，但是在组控制柜中封装统一指令运行用的相当于自由调速的控制后，可以生成统一调速指令值。

组控制柜中生成的统一调速指令值与来自中央供电指令所的组统一电力指令值合成后，可生成组统一合成指令值。组统一合成指令值根据 RF 电池的 *SOC* 等的大小进行分割，然后，分配给运行中的组。如果这一电力指令值超过各组的输出限制值，就会重新分配给其他组。即，组间输出分配控制。这些指令值分配处理在 PLC 中以 20 ms 为单位进行。由于交直转换装置的输出与分配的电力指令值相匹配，因此在组统一合成指令值中交直转换装置的合成输出能够始终保持一致。

5.6 测量服务器

测量服务器是一个导入了设备监视系统“MICREX-VieW PARTNER”[5]的服务器 PC。从组控制柜将与中央供电指令所之间的上行、下行信息，以及 RF 电池和交直转换装置中的状态、警报信号、测量值和控制变量，经 Ethernet〈注 2〉收集后进行一元化管理，从而掌握整个交直转换系统的运行情况。可显示状态 / 警报信号的历史记录、显示测量值和控制变量的 1 秒趋势、进行 CSV 数据的自动保存等。趋势显示示例如**图 6** 所示。

图 6 “MICREX-VieW PARTNER”的趋势显示示例

〈注 2〉Ethernet：富士施乐株式会社的商标或注册商标

6 后记

本文针对利用世界最大级 60 MWh 氧化还原液流电池的系统蓄电池用大容量交直转换系统进行了介绍。在实证试验中，确认了频率变动抑制等的效果，有望作为针对可再生能源输出变动的新调整能力获得成果。

大容量电力储藏装置是电力系统不可或缺的系统，为了进一步扩大引进可再生能源，预计今后会大量导入该系统。富士电机将积极引进卓越的技术，通过提供最佳构成、控制下的蓄电系统，为促进引进可再生能源做贡献。

最后，对在大容量交直转换系统的开发、设计、制作中给予我们大力支持的北海道电力株式会社表示深深地感谢。

参考文献

⑴ 多田邦彦ほか. 南早来変電所大型蓄電システム実証事業⑴ー実証事業の概要についてー. 平成 28 年電気学会電力・エネルギー部門大会予稿集. 2016, no.225, p.4-5-17-4-5-18.

⑵ 矢野敬二ほか. 南早来変電所大型蓄電システム実証事業⑵ー 60MWh レドックスフローー電池システムの性能評価ー. 平成 28 年電気学会電力・エネルギー部門大会予稿集. 2016, no.226, p.4-5-19-4-5-20.

⑶ 中川雅之，项东辉. 大规模太阳能发电系统技术. 富士电机技报. 2013, vol.C5, no.3, p.175-179.

⑷ 小岛武彦，福屋善文. 面向孤岛的微电网系统. 富士时报. 2011, vol.C3, no.1, p.12-16.

⑸ 铃木健浩等. 可简单联动综合 EMS 的设备监视系统“MICREX-VieW PARTNER”. 富士电机技术期刊. 2016, vol. C8, no.4, p.230-233.

毛内　俊晴

从事电力、能源领域的电力转换系统，特别是蓄电控制系统的企划、开发、工程设计业务。现为富士电机株式会社发电和社会基础设施事业本部社会系统事业部电力流通综合技术部课长助理。

须崎　久晴

从事水力、风力、太阳能发电设备和电力稳定化设备的成套设备工程设计业务。现为富士电机株式会社发电和社会基础设施事业本部社会系统事业部电力流通综合技术部课长助理。

矢野　敬二

从事氧化还原液流电池系统的工程设计业务。现就职于住友电气工业株式会社能源系统事业开发部电力储藏技术部。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。