用于加拉帕戈斯群岛的铅蓄电池、锂离子电池并用型电力稳定化系统

Power Stabilization System with Lead-Acid Batteries and Lithium-Ion Batteries for Galapagos Islands

曾根　学　SONE, Manabu　　长田　悠人　OSADA, Yuto

富士电机为世界自然遗产加拉帕戈斯群岛开发了铅蓄电池、锂离子电池并用型电力稳定化系统，并于 2016 年 3 月交付使用。该电力稳定化系统通过组合与风力发电机特性不同的 2 种电池的输出，使从几十秒到几小时的周期变动保持平滑，将稳定的合成输出输送至电力系统。通过上述方式，能大幅提升现有风力发电机的最大输出和设备利用率，为踏出化石燃料零使用量的第一步做出了巨大贡献。

Fuji Electric has developed a power stabilization system using lead-acid batteries and lithium-ion batteries and delivered it to the Galapagos Islands, a World Natural Heritage site, in March 2016. By combining the outputs from wind turbine generators and two types of batteries with different characteristics, this power stabilization system smooths periodic fluctuations over several tens of seconds to several hours and transmits stable combined output to the electric power system. This achieved a great increase of the maximum output and facility utilization ratio of the existing wind turbine generators and markedly contributed to taking the first step toward zero consumption of fossil fuels.

1　引言

厄瓜多尔共和国的世界自然遗产加拉帕戈斯群岛，其电力供应以柴油等小规模火力发电站为中心，产生的废气会导致环境污染。近年来，观光旅游业发展，游客和人口增加，如何配备、导入环境负担较少的电力供应系统成为当务之急。厄瓜多尔政府于 2007 年 4 月设定了“2020 年前实现加拉帕戈斯群岛化石燃料零使用”这一目标的相关政策，并为达成该目标而积极采取各种措施。

作为日本政府环境项目无偿资金援助的“利用太阳能绿色能源导入计划”的一环，富士电机以交钥匙总承包模式承包了由太阳能发电系统和电力稳定化系统组成的项目，并于 2016 年 3 月完成交付。

本文将对本项目的核心设备——电力稳定化系统进行介绍。

2　项目概要

成套设备的全貌如**图 1** 所示。项目中系统的全貌如**图 2** 所示，系统和主要设备的规格如**表 1** 所示。

在可再生能源中，太阳能发电和风力发电由于气象条件不同，其发电输出也会发生巨大的变动。因此，将这些电源导入小规模电力系统，会对电力系统的电力质量（电压和频率）产生影响。厄瓜多尔政府在本项目前就导入了由 3 座 750 kW 风力发电机组成的风力发电站。但是，由于输出变动导致电力质量出现问题，因此虽然吹入的风量足够，却一直未能以额定输出运行，设备利用率非常低。

本次通过导入电力稳定化系统，成功抑制了风力发电机的输出变动，提高了设备利用率，同时还增加了可再生能源的电力供应量。本系统利用双向功率调节器（PCS）控制蓄电池的高速充放电，同时通过组合铅蓄电池和锂离子电池，发挥各个蓄电池的特性，从而供应优质电力。

图 1　成套设备的全貌

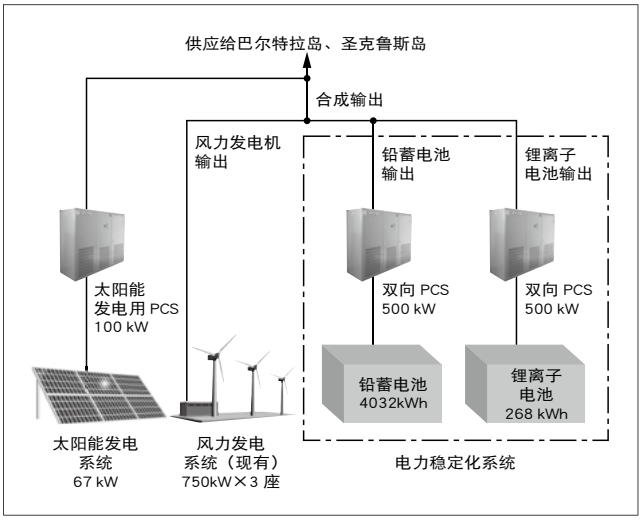

图 2　项目中系统的全貌

表 1　项目中系统和主要设备的规格

系统和主要设备		规格
太阳能发电系统		输出：67 kW
电力稳定化系统	双向 PCS	型号：PVI650-3/500
		转换方式： 三电平式正弦波 PWM
		直流输入 运行电压范围：345～600 V 最大输入电流：1507 A
		交流输出 额定容量：500 kVA 额定电压：210 V 最大输出电流：1527 A
		最大转换效率：97.3%
	铅蓄电池	容量：4032 kWh
	锂离子电池	容量：268 kWh
风力发电系统（现有）		输出：750 kW×3 座

3　电力稳定化系统

3.1　概要

电力稳定化系统通过组合风力发电机、铅蓄电池和锂离子电池的输出，使从几十秒到几小时的周期变动保持平滑，将稳定的合成输出输送至电力系统。铅蓄电池单位容量的价格较低，因此最适合用于需要较大容量的峰值位移控制。另一方面，锂离子电池的能源密度较高，可以实现高频率且快速的充放电，适用于短时间的输出变动抑制。

表 2　电力稳定化系统的主要功能

功能	铅蓄电池	锂离子电池
风力发电机输出变动抑制功能	使用 （峰值位移时限制输出）	使用
峰值位移功能	使用 （备用时停止使用）	—
输出变动抑制的备用功能	使用	—

本系统的主要功能如**表 2** 所示，构成如**图 3** 所示。

风力发电机输出变动抑制功能的目的是利用电池的输出，抵消风力发电机输出上从几十秒到几小时的周期变动。因此需要计算出可实现这一目的的输出变动抑制指令值，并分配到铅蓄电池和锂离子电池中。

峰值位移功能的目的是通过在电力需求较小、有充足发电能力的夜间等时间段对电池进行充电，在电力需求高峰期对电池进行放电，从而实现负荷均衡化。通过监视操作 PC 设定峰值位移输出目标值及其开始、结束时间，计算出实现电力均衡化的峰值位移指令值。

输出变动抑制的备用功能是指在锂离子电池因维护或故障等停止时，利用铅蓄电池阻止峰值位移，作为备用进行输出变动抑制。通过上述方式，能增加可以在输出变动抑制中使用的铅蓄电池输出，持续运行风力发电。

各电池则进行各自指令值对应的输出，实现优质的电力供应。

3.2　风力发电机输出变动抑制功能

(1)　设计

在风力发电中，为了把对互联系统的影响维持在最小限度内，会采取措施防止频率变动，例如使任意时间范围内的输出最大值和最小值的差维持在一定值以下等。

本系统的风力发电机输出变动抑制功能采用了可变时间常数控制[1]，可根据风力发电机的输出变动，连续控制拥有**图 3** 所示输出变动抑制功能的、变动量去除滤波器的时间常数。这一控制在输出变动越大时，时间常数越大，在输出变动越小时，时间常数也越小，因此可以将合成输出的变动维持在一定的变化率〈注 1〉以下。设计前，我们在富士电机集团公司旗下的富士 Green Power 所拥有的西目风力发电站，使用测量获得的风速数据，实施了本系统的输出变动抑制仿

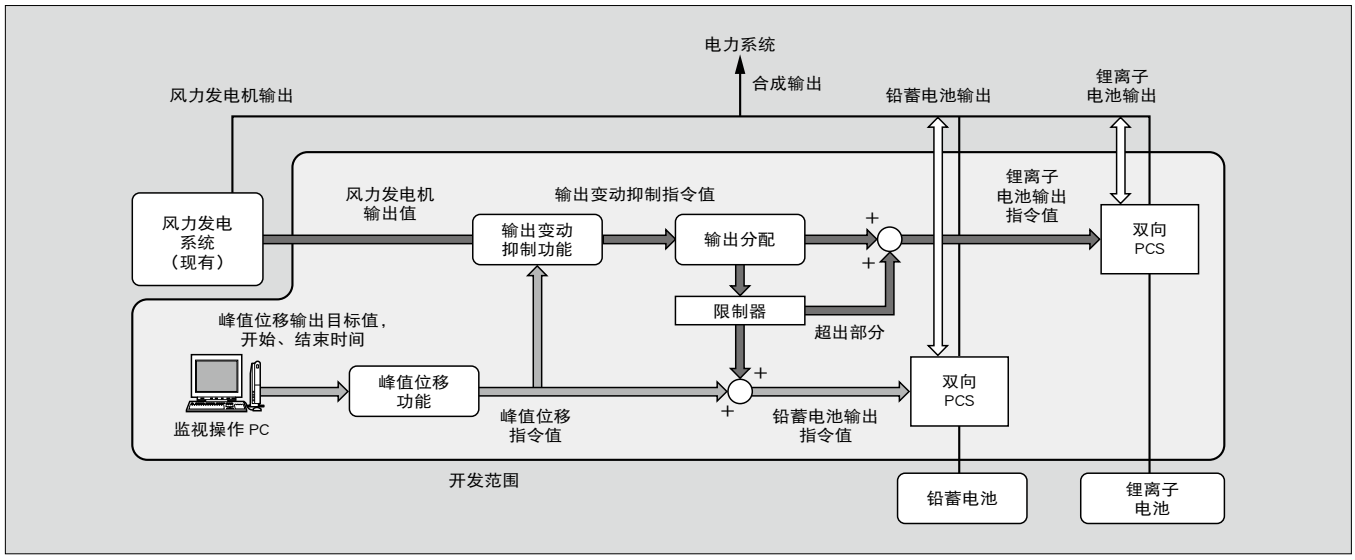

图 3　电力稳定化系统的构成

〈注 1〉一定的变化率：用顾客指定的时间范围内的输出变动（最大值 – 最小值）除以时间范围后得出的值。

真。结果发现，95% 的时间段内都可以将变化率维持在 45 kW/min 以下。该值相当于风力发电机额定输出的 2%，作为输出变动抑制，是非常小的变化率。而本项目站点处的风速变动比西目风力发电站更小，因此有望取得更好的效果。

输出变动抑制指令值的输出分配，是通过分配到铅蓄电池和锂离子电池中来维持各电池的目标充电量，从而将输出变动率维持在一定值以下。

与铅蓄电池相比，锂离子电池的容量更小，因此如果集中分配到锂离子电池中，充电所需的剩余充电量或者放电所需的充电量可能会不足。如果剩余充电量或者充电量不足，锂离子电池的输出就会受到限制，难以维持输出变动抑制功能。在铅蓄电池中，与输出变动抑制使用的充电量相比，峰值位移中使用的充电量比率更大。因此在峰值位移中，充电时需要先调整充电量来实现事先调低的目标值；放电时，则需要先调整充电量来实现事先调高的目标值。在锂离子电池中，当风力发电机输出较低时，为防止输出激增，需要调低目标充电量；当风力发电机输出较高时，为防止输出骤减，需要调高目标充电量。

将输出变动抑制指令值分配至铅蓄电池后，为了不妨碍峰值位移，设置了两个限制器。第一个是为了不抵消铅蓄电池其他功能的峰值位移指令值，在从 ±500 kW〈注 2〉开始进行峰值位移时，将对铅蓄电池的分配限制在 ±200 kW 内。第二个是为了确保峰值位移所需的充电量，当目前的充电量偏离目标充电量一定程度以上时，限制对铅蓄电池的分配。而超出限制值的部分由锂离子电池输出。

对于风力发电机输出变动抑制功能，我们通过仿真和现场试验进行了运行确认。

⑵ 仿真

通过仿真，使模拟的风力发电机输出呈阶梯状，进行了风力发电机输出变动抑制功能的运行确认。**图 4**(a)为仿真的结果。

10 点 06 分左右，模拟的风力发电机输出从 1.5 MW 降至 1.0 MW，阶梯状减少了 0.5 MW。铅蓄电池和锂离子电池的输出容量合计为 1.0 MW，比 0.5 MW 的变动更大，因此可以利用可变时间常数控制抵消阶梯状变动，使合成输出的变化率变为 45 kW/min。

此外，10 点 18 分左右，模拟的风力发电机输出从 1 MW 升至 2.2 MW，阶梯状增加了 1.2 MW。这一变动比铅蓄电池和锂离子电池的输出容量合计更大。因此，可以通过将两组电池的输出设为最大，从而将变动抑制在 0.2 MW，使变动对系统的影响控制在最小限度内。

从 10 点 06 分左右到 10 点 15 分左右的时间段内，因为接近目标充电量，所以两组电池所需的充电量为相同程度，因此两组电池进行了相同程度的放电。在风力发电机输出上升的 10 点 18 分左右到 10 点 40 分左右的时间段内，为了防止之后的输出骤减，优先对调高了目标充电量的锂离子电池进行充电。

⑶ 现场试验

图 4(b)为现场试验的结果。确认到与仿真一样，风力发电机输出的变动可以利用铅蓄电池输出和锂离子电池输出进行抑制。合成输出维持着一定的变化率。另外，通过本试验前进行的均等充电试验，铅蓄电池接近满充电状态。为了确保充足的充电空间，优先对铅蓄电池进行了放电，利用铅蓄电池进行放电，利用锂离子电池进行充电。

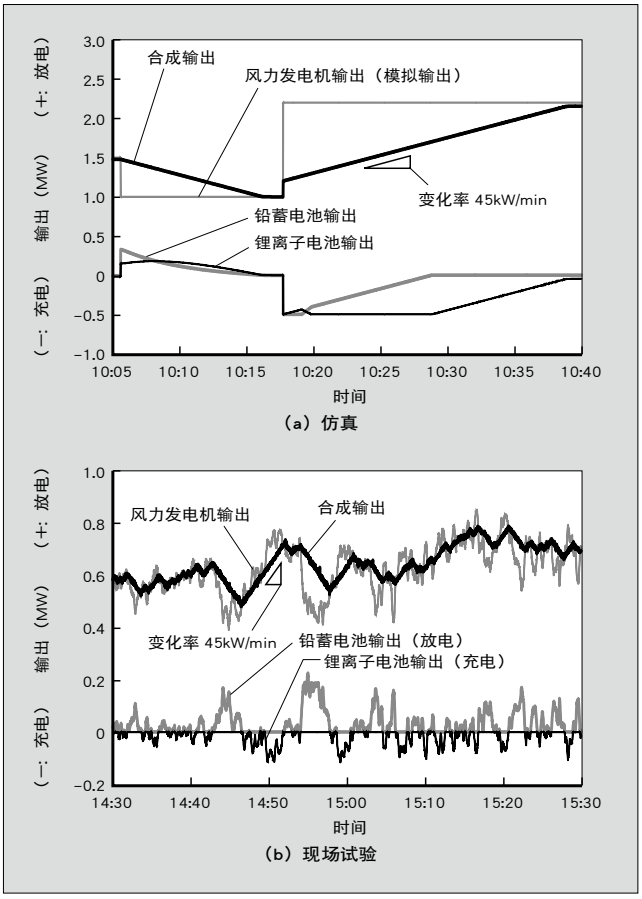

图 4　风力发电机输出变动抑制功能的运行确认

3．3　峰值位移功能

⑴ 设计

在电力需求较小、有充足发电能力的夜间等时间段对电池进行充电，在电力需求的峰值时对电池进行放电，实现了负荷的均衡化。通过上述方式，可以抑制加拉帕戈斯群岛现有发电机，即柴油发电机的输出骤变，削减启动停止次数，进而还能排除会降低发电效率的低输出运行。

此外，还可以根据傍晚的需求峰值，通过对铅蓄电池进行放电，减少柴油发电机的运转台数，从而减少燃料消耗、抑制 CO_2 排放。由于工作日和休息日的需求变化不同，我们还使其可以分别设定峰值位移时间。

对于峰值位移功能，通过工厂试验和现场试验进行了运行确认。

⑵ 工厂试验

图 5(a)为工厂试验的结果。到了设定于 13 点 40 分的峰值位移放电开始时间时开始放电，到了设定于 14 点 10 分的峰值位移结束时间时结束放电。由于对系统的影响较小，因此在峰值位移开始和结束时，以 45 kW/min 的变化率输

〈注 2〉±500 kW：+ 为放电，− 为充电。

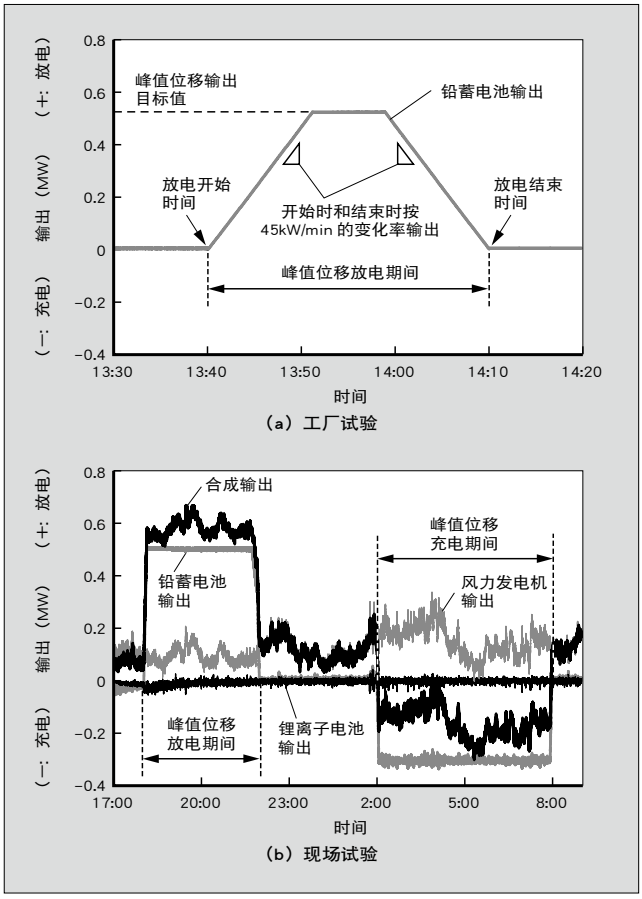

图 5　峰值位移功能的运行确认

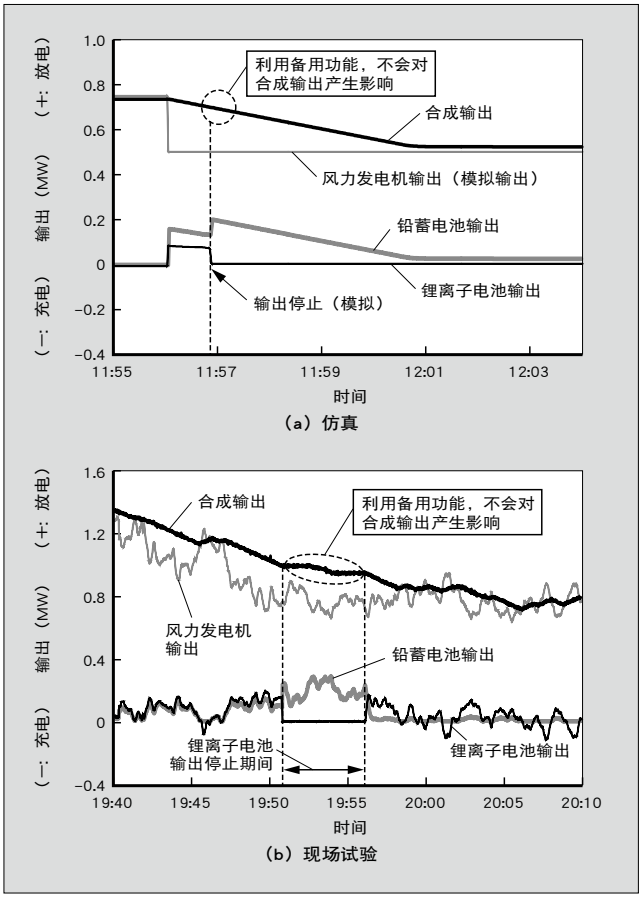

图 6　输出变动抑制备用功能的运行确认

出。我们根据这些结果，确认到按照监视操作 PC 中设定的峰值位移输出目标值及其开始、结束时间进行了峰值位移。

⑶　现场试验

图 5(b)为现场试验的结果。确认到铅蓄电池能够同时进行峰值位移和输出变动抑制。从傍晚的 18 点左右到 22 点左右，为了使需求峰值进行位移，以 500 kW 进行了放电。此外，从深夜 2 点到早上 8 点，由于需求较小，因此以 300 kW 进行了充电，以实现峰值位移。铅蓄电池同时进行了峰值位移和输出变动抑制，因此铅蓄电池的输出发生了变动，未一直保持在峰值位移的输出目标值。

3．4　输出变动抑制的备用功能

⑴　设计

在锂离子电池因维护或故障等停止时，利用铅蓄电池阻止峰值位移，作为备用进行输出变动抑制。通过上述方式，能增加可以在输出变动抑制中使用的铅蓄电池输出，持续运行风力发电。

锂离子电池停止时，很难仅凭铅蓄电池同时进行输出变动抑制和峰值位移。如果无法维持输出变动抑制功能，风力发电机输出变动有时会对互联电力系统的电力质量产生不良影响，这就须抑制风力发电机输出，万不得已时还需要停止输出。但是，这会使风力发电机损失发电机会，因此锂离子电池停止时，可停止利用铅蓄电池的峰值位移，只进行输出变动抑制。利用这一备用功能，可持续运行风力发电机。

对于输出变动抑制的备用功能，我们通过仿真和现场试验进行了运行确认。

⑵　仿真

图 6(a)为仿真的结果。确认到如果在输出变动抑制中停止锂离子电池，锂离子电池的输出就会变为零，但铅蓄电池会作为备用工作，不会对合成输出产生影响，继续进行输出变动抑制。

⑶　现场试验

图 6(b)为现场试验的结果。作为试验条件，在 19 点 51 分左右到 19 点 56 分左右停止了锂离子电池的运行。确认到在锂离子电池输出下降的同时，铅蓄电池输出上升，锂离子电池的输出部分由铅蓄电池作为备用，不会对合成输出产生影响，继续进行输出变动抑制。此外，还确认到在锂离子电池恢复的同时，开始利用锂离子电池进行输出变动抑制，不会对合成输出产生影响，继续进行输出变动抑制。

4　后记

本文针对用于加拉帕戈斯群岛的铅蓄电池、锂离子电池并用型电力稳定化系统进行了介绍。导入该系统后，能大幅提升现有风力发电的最大输出和设备利用率，为踏出化石燃料零使用量的第一步做出了巨大贡献。

我们将根据通过本系统培育的技术，开发不仅对应短周期，还能对应长周期输出变动抑制的电力稳定化系统，为进一步扩大可再生能源的导入做贡献。

参考文献

(1) 淺沼圭司ほか. 風力発電向け電力安定化装置. 富士時報. 2008, vol.81, no.3, p.203-206.

曾根　学

从事电力稳定化系统的开发和承包项目方面的工程设计和试验业务。现为富士电机株式会社发电和社会基础设施事业本部新能源成套设备事业部太阳能和风力发电技术部课长助理。

长田　悠人

从事电力系统的仿真、控制、解析相关的研究、开发。现就职于富士电机株式会社技术开发本部核心技术研究所控制技术开发中心能源解决方案开发部。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。