

ガラパゴス諸島向け鉛蓄電池・リチウムイオン電池併用による電力安定化システム

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

曾根 学 SONE, Manabu

長田 悠人 OSADA, Yuto

世界自然遺産であるガラパゴス諸島向けに、鉛蓄電池とリチウムイオン電池の併用による電力安定化システムを開発し、2016年3月に納入した。この電力安定化システムは、風力発電機と特性の異なる2種類の電池からの出力を組み合わせることにより、数十秒から数時間にわたる周期の変動を平滑化し、安定した合成出力を電力系統に送電する。これにより、既存の風力発電機の最大出力と設備利用率を大きく引き上げ、化石燃料使用量ゼロに向けて第一歩を踏み出すことに大きく貢献した。

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 まえがき

エクアドル共和国の世界自然遺産であるガラパゴス諸島の電力供給は、ディーゼルなどの小規模火力発電所が中心であり、その排ガスによる環境汚染が危惧されている。近年の観光地化による観光客や人口の増加に対応するためには、環境負荷の少ない電力供給システムの整備・導入が喫緊の課題となっている。エクアドル政府は、2020年までにガラパゴス諸島における化石燃料の使用をゼロにする目標を2007年4月に政策として設定し、その目標を達成するために取り組んでいる。

富士電機は、日本政府の環境プログラム無償資金協力“太陽光を利用したクリーンエネルギー導入計画”の一環として、太陽光発電システムと電力安定化システムから成るプロジェクトをフルターンキーで受注し、2016年3月に納入した。

本稿では、本プロジェクトの中心となる電力安定化システムについて述べる。

2 プロジェクトの概要

プラントの全景を図1に示す。プロジェクトにおけるシステムの全体像を図2に、システムと主要機器の仕様を表1に示す。

再生可能エネルギーの中でも、太陽光発電や風力発電は気象条件によってその発電出力が大きく変動する。そのため、これらの電源を小規模な電力系統に導入すると、電力系統の電力品質（電圧や周波数）に影響を与えることがある。エクアドル政府は、本プロジェクトに先行して3基の750 kW 風力発電機から成る風力発電所を導入した。しかし、出力変動に伴う電力品質の問題が生じたために、十分



図1 プラントの全景

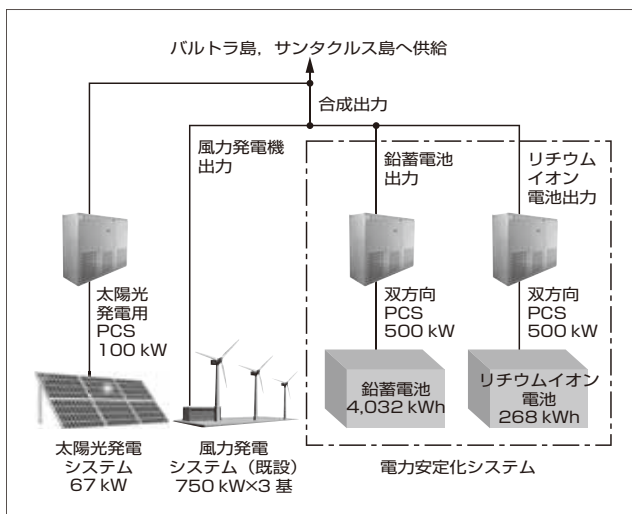


図2 プロジェクトにおけるシステムの全体像

表1 プロジェクトにおけるシステムと主要機器の仕様

システムと主要機器		仕様
太陽光発電システム		出力：67 kW
電力安定化システム	双方向 PCS	型式：PVI650-3/500
		変換方式： 3レベル式正弦波 PWM
		直流入力 運転電圧範囲：345～600V 最大入力電流：1,507A
		交流出力 定格容量：500kVA 定格電圧：210V 最大出力電流：1,527A
	最大変換効率：97.3%	
鉛蓄電池	容量：4,032 kWh	
リチウムイオン電池	容量：268 kWh	
風力発電システム（既設）		出力：750 kW × 3 基

な風が吹いていながら定格出力で運転できない状態が続き、設備利用率は非常に低かった。

そこで今回、電力安定化システムを導入することにより、風力発電機の出力変動を抑制し、設備利用率を高めるとともに、再生可能エネルギーの電力供給量を増やすことに成功した。本システムは、双方向パワーコンディショナ（PCS）にて蓄電池の高速充放電を制御するとともに、鉛蓄電池とリチウムイオン電池を組み合わせることにより、それぞれの蓄電池の特長を生かして高品質な電力を供給する。

3 電力安定化システム

3.1 概要

電力安定化システムは、風力発電機、鉛蓄電池およびリチウムイオン電池からの出力を組み合わせることにより、数十秒から数時間にわたる周期の変動を平滑化し、安定した合成出力を電力系統に送電する。鉛蓄電池は、容量当たりの価格が安いので、大きな容量が必要となるピークシフト制御に適している。一方、リチウムイオン電池は、エネルギー密度が高く、高頻度かつ急速な充放電が可能のため、短時間の出力変動抑制に適している。

本システムの主要な機能を表2に、構成を図3に示す。

風力発電機出力変動抑制機能は、風力発電機出力の数十

表2 電力安定化システムの主要な機能

機能	鉛蓄電池	リチウムイオン電池
風力発電機出力変動抑制機能	使用 (ピークシフト時は出力を制限する)	使用
ピークシフト機能	使用 (バックアップ時は使用を止める)	—
出力変動抑制のバックアップ機能	使用	—

秒から数時間にわたる周期の変動を電池の出力によって打ち消すことを目的とする。このための出力変動抑制指令値を算出し、鉛蓄電池とリチウムイオン電池に配分する。

ピークシフト機能は、電力需要が小さく発電能力に余裕がある夜間などの時間帯に電池を充電し、電力需要のピーク時に電池を放電することで負荷を平準化することを目的とする。監視操作 PC からピークシフト出力目標値とその開始・終了時刻を設定し、電力を平準化するためのピークシフト指令値を算出する。

出力変動抑制のバックアップ機能は、リチウムイオン電池がメンテナンスや故障などで停止した場合に、鉛蓄電池によるピークシフトを止め、出力変動抑制のバックアップを行う。これにより、出力変動抑制に使用できる鉛蓄電池出力を増加して、風力発電の運転を継続することを目的とする。

各電池はそれぞれの指令値に応じた出力を行って、高品質な電力供給を実現する。

3.2 風力発電機出力変動抑制機能

(1) 設計

風力発電では、連系する系統への影響を最小限にとどめるために、例えば、任意の時間幅における出力の最大値と最小値の差を一定値以下にするなどの周波数変動対策を行うことがある。

本システムの風力発電機出力変動抑制機能では、風力発電機の出力変動に応じて、図3の出力変動抑制機能が持つ変動成分除去フィルタの時定数を連続的に制御する可変時定数制御を採用している。この制御は、出力変動が大きい場合には時定数を大きくし、出力変動が小さい場合には時定数を小さくすることにより、合成出力の変動を一定の変化率以下に維持できる。設計に先立ち、富士電機のグループ会社である富士グリーンパワーが保有する西目風力発電所において測定した風速データを使用し、本システムの出力変動抑制シミュレーションを実施した。その結果、95%の時間帯で変化率を45kW/min以下に維持できることが分かった。この値は、風力発電機定格出力の2%に相当し、出力変動抑制として十分に小さい変化率である。本プロジェクトのサイトでは、西目風力発電所よりも風速変動が小さいため、より高い効果が期待できる。

出力変動抑制指令値の出力配分は、出力変動率を一定値以下に維持するため、各電池の目標充電量を維持するように鉛蓄電池とリチウムイオン電池に配分する。

鉛蓄電池と比較してリチウムイオン電池の容量は小さいため、リチウムイオン電池に配分が集中すると、充電に必要な空き充電量あるいは放電に必要な充電量が足りなくなる恐れがある。空き充電量あるいは充電量が足りず、リチウムイオン電池の出力が制限されてしまうと、出力変動抑制の維持が困難になる。鉛蓄電池では、出力変動抑制に用

<注1> 一定の変化率：顧客の指定する時間幅における出力変動（最大値－最小値）を時間幅で割ったものである。

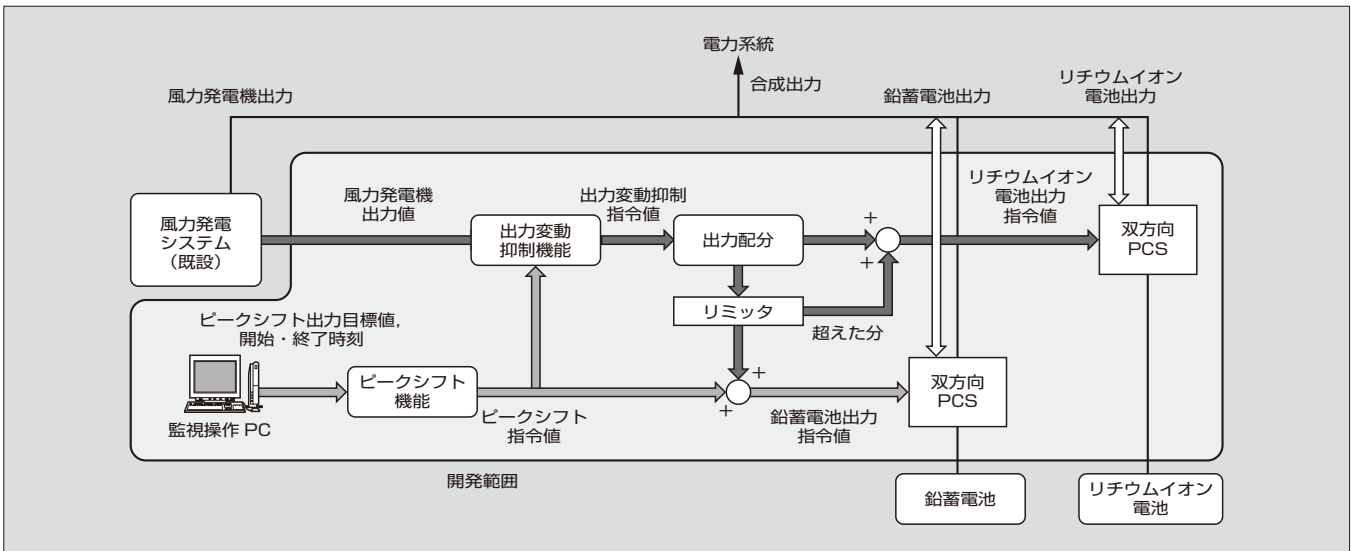


図3 電力安定化システムの構成

いる充電量に比べてピークシフトに用いる充電量の比率が大きい。そのため、ピークシフトにおいて、充電する場合には事前に低く設定した目標値になるように充電量を調整しておき、放電する場合には事前に高く設定した目標値になるように充電量を調整しておく。リチウムイオン電池では、風力発電機出力が低い場合には、出力の急増に備えて目標充電量を低く設定し、風力発電機出力が高い場合には、出力の急減に備えて目標充電量を高く設定する。

出力変動抑制指令値を鉛蓄電池へ配分した後は、ピークシフトを妨害しないようにするために二つのリミッタを設けている。一つ目は、鉛蓄電池の別の機能であるピークシフトの指令値を打ち消さないようにするため、鉛蓄電池への配分を $\pm 500 \text{ kW}$ からピークシフト中は $\pm 200 \text{ kW}$ に制限する^(注2)。二つ目は、ピークシフトに必要な充電量を確保するため、目標充電量から現在の充電量が一定以上乖離(かいり)した場合に、鉛蓄電池への配分を制限している。なお、制限値を超えた分はリチウムイオン電池が出力する。

風力発電機出力変動抑制機能についてシミュレーションと現地試験によって動作確認を行った。

(2) シミュレーション

シミュレーションによって、模擬の風力発電機出力をステップ状に与え、風力発電機出力変動抑制機能の動作確認を行った。図4(a)にシミュレーションの結果を示す。

10時6分ごろに模擬の風力発電機出力を1.5MWから1.0MWにステップ状に0.5MW減少させた。鉛蓄電池とリチウムイオン電池の出力容量の合計は1.0MWであり、0.5MWの変動より大きいため、合成出力の変化率が 45 kW/min となるように可変時定数制御によりステップ変動を打ち消している。

また、10時18分ごろに模擬の風力発電機出力を1MWから2.2MWにステップ状に1.2MW増加させた。この変動は、鉛蓄電池とリチウムイオン電池の出力容量の合計よ

<注2> $\pm 500 \text{ kW}$: +は放電を, -は充電を指す。

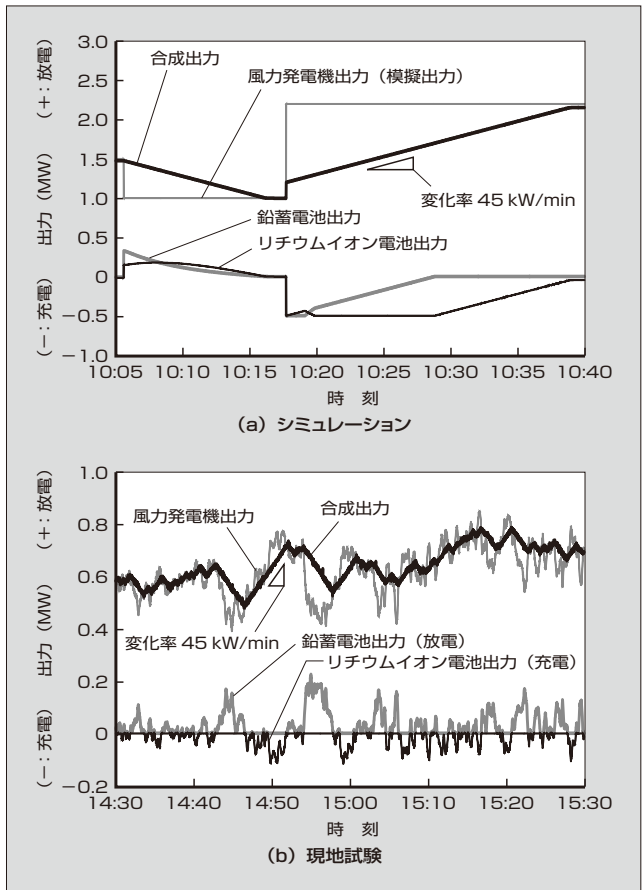


図4 風力発電機出力変動抑制機能の動作確認

り大きかった。そのため、両電池の出力を最大にすることで変動を 0.2 MW に抑制し、系統に与える影響を最小限に抑えている。

さらに、10時6分ごろから10時15分ごろまでの時間帯においては、目標充電量に近づけるために必要な両電池の充電量が同程度であるため、両電池は同程度の放電を行っている。風力発電機出力が上昇した10時18分ごろから10時40分ごろまでの時間帯においては、その後の出力

の急減に備えるため、目標充電量を高く設定したリチウムイオン電池の充電を優先している。

(3) 現地試験

図4(b)に現地試験の結果を示す。シミュレーションと同様に、風力発電機出力の変動を鉛蓄電池出力とリチウムイオン電池出力で抑制できることを確認した。合成出力は一定の変化率を維持している。なお、本試験の前に行った均等充電の試験により、鉛蓄電池は満充電に近い状態になっている。充電の余裕を確保するために鉛蓄電池の放電を優先しており、放電は鉛蓄電池で、充電はリチウムイオン電池で行っている。

3.3 ピークシフト機能

(1) 設計

電力需要が小さく発電能力に余裕がある夜間などの時間帯に電池を充電し、電力需要のピーク時に電池を放電することで負荷を平準化する。これにより、ガラパゴス諸島の既存の発電機であるディーゼル発電機の出力の急変を抑制し、起動停止回数を削減し、さらに、発電効率が悪くなる低出力運転の排除が可能になる。

また、夕方の需要ピークに合わせて鉛蓄電池を放電することにより、ディーゼル発電機の稼働台数を減少させ、燃料の消費とそれに伴うCO₂排出の抑制が可能である。なお、需要の変化は平日と休日で異なるため、それぞれのピークシフト時刻を設定できるようにした。

ピークシフト機能について工場試験と現地試験によって動作確認を行った。

(2) 工場試験

図5(a)に工場試験の結果を示す。13時40分に設定したピークシフト放電開始時刻になると放電を開始し、14時10分に設定したピークシフト終了時刻に合わせて放電が終了する。システムへの影響を小さくするため、ピークシフトの開始時と終了時には、45kW/minの変化率で出力する。これらのことから、監視操作PCで設定したピークシフト出力目標値とその開始・終了時刻のとおりピークシフトを行うことを確認した。

(3) 現地試験

図5(b)に現地試験の結果を示す。鉛蓄電池がピークシフトと出力変動抑制を同時に行うことを確認した。夕方の18時ごろから22時ごろまでは需要ピークをシフトさせるため、500kWで放電を行っている。また、深夜の2時から朝の8時までは需要が小さくなるので、300kWでピークシフトのための充電を行っている。鉛蓄電池がピークシフトと出力変動抑制を同時に行っているため、鉛蓄電池の出力がピークシフト出力目標値で一定とならずに変動している。

3.4 出力変動抑制のバックアップ機能

(1) 設計

リチウムイオン電池がメンテナンスや故障などで停止した場合には、鉛蓄電池はピークシフトを止め、出力変動抑

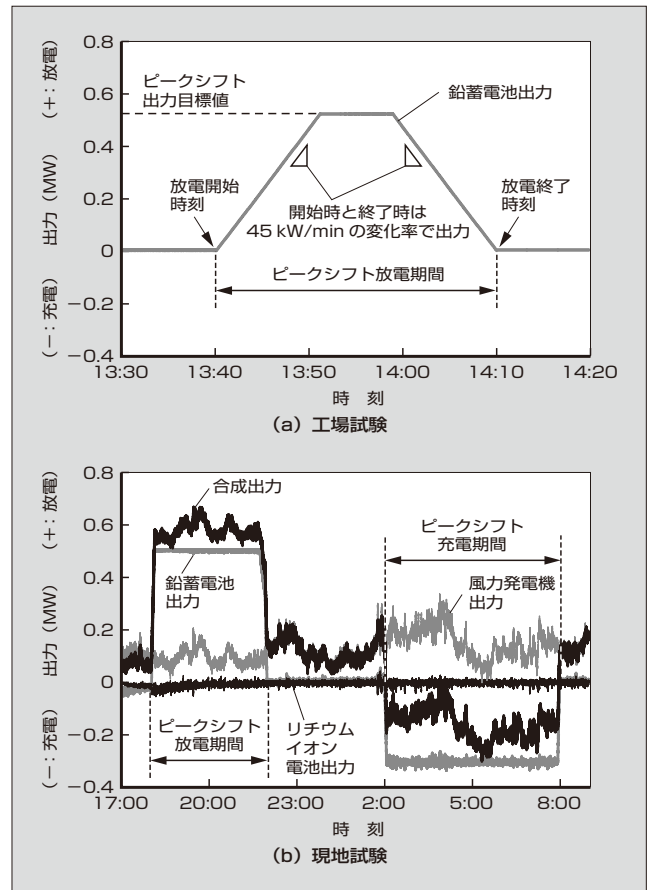


図5 ピークシフト機能の動作確認

制のバックアップを行う。これにより、出力変動抑制に使用できる鉛蓄電池出力が増加して、風力発電が運転を継続できる。

リチウムイオン電池が停止した場合に、鉛蓄電池だけで出力変動抑制とピークシフトを同時に行うことは困難である。出力変動抑制機能が維持できないと、風力発電機出力の変動が連系する電力系統の電力品質へ悪影響を及ぼす場合があるため、風力発電機出力を抑制するか、最悪は停止しなければならない。しかし、これは風力発電機の発電機会の損失につながるため、リチウムイオン電池が停止した場合は、鉛蓄電池によるピークシフトを停止させて出力変動抑制のみを行う。このバックアップ機能により、風力発電機は運転を継続できる。

出力変動抑制のバックアップ機能についてシミュレーションと現地試験によって動作確認を行った。

(2) シミュレーション

図6(a)にシミュレーションの結果を示す。出力変動抑制中にリチウムイオン電池を停止させると、リチウムイオン電池の出力はゼロとなるが、鉛蓄電池がバックアップを行い、合成出力に影響を与えず、出力変動抑制を継続することを確認した。

(3) 現地試験

図6(b)に現地試験の結果を示す。試験条件として、19時51分ごろから19時56分ごろまでリチウムイオン電池の運転を停止させた。リチウムイオン電池の出力が低下す

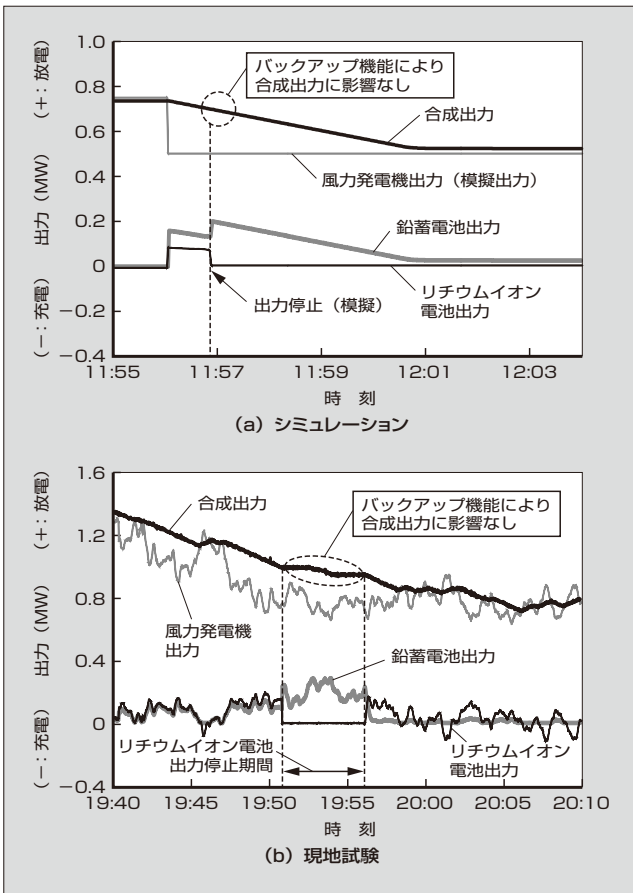


図6 出力変動抑制のバックアップ機能の動作確認

ると同時に鉛蓄電池の出力が上昇し、リチウムイオン電池の出力分を鉛蓄電池がバックアップを行うことで、合成出力には影響を与えず、出力変動抑制を継続することを確認した。また、リチウムイオン電池が復帰すると同時にリチ

ウムイオン電池による出力変動抑制を開始し、合成出力には影響を与えず、出力変動抑制を継続することを確認した。

4 あとがき

ガラパゴス諸島向けの鉛蓄電池・リチウムイオン電池併用による電力安定化システムについて述べた。このシステムの導入により既存の風力発電の最大出力と設備利用率を大きく引き上げ、化石燃料使用量ゼロに向けて第一歩を踏み出すことに大きく貢献した。

本システムで培った技術を基に、短周期のみならず長周期の出力変動抑制にも対応できる電力安定化システムを開発し、再生可能エネルギーのいっそうの導入拡大に貢献する所存である。

参考文献

- (1) 浅沼圭司ほか. 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

電力安定化システムの開発および受注案件にてエンジニアリング・試験業務に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部新エネプラント事業部太陽光・風力発電技術部課長補佐。



長田 悠人

電力システムのシミュレーション・制御・解析に関する研究・開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部コア技術研究所制御技術開発センターエネルギーソリューション開発部。電気学会会員。





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。