

# LiB と FW のハイブリットエネルギー貯蔵システムを用いた 電力平準化システムの検討

森田 寛美\* 芳賀 仁 (長岡技術科学大学)  
伊東 洋一 (サンケン電気) 有松 健司 (東北電力)

Study on Fluctuation Balancing System Considering Compensation Upper and Lower limits of Flywheel  
Hiromi Morita\*, Hitoshi Haga, (Nagaoka University of Technology)  
Youichi Ito (SANKEN Electric Co., Ltd.), Kenji Arimatsu, (Tohoku Electric Power Co., Inc.)

This paper discusses power leveling for systems where photovoltaics connects to the grid. Furthermore, this paper compared the actual model power leveling system using only LiB and the actual model power leveling system using LiB and FW to which ADAM is applied. As a result, the SOC change was 34 points smaller in the ADAM result than in the LiB-only result, confirming its effectiveness in terms of LiB life. However, through the experiment, there was the drawback that was had to rely on the external power supply to maintain the SOC of the FW. Therefore, it showed an improvement method to add control considering the upper and lower limits of FW compensation to ADAM, and confirmed it by simulation. As a result, the SOC change of LiB was only 2pont. In addition, the standard deviation of the grid power focusing only on the short-term fluctuation period was  $2.7 \times 10^{-2}$  for ADAM and  $2.4 \times 10^{-2}$  for ADAM<sub>imp.</sub>, an improvement of 11 %. From these results, it was confirmed that ADAM<sub>imp.</sub> can obtain a leveling effect while maintaining the same LiB lifetime.

キーワード：電力変動抑制，太陽光発電，電力貯蔵装置，フライホイール，リチウムイオン電池  
(Power Fluctuation Compensation, Photovoltaic Generation, Energy Storage System, Flywheel, Lithium-ion Battery)

## 1. はじめに

近年，パリ協定を契機として世界的に脱炭素化への意識が高まっている。我が国においても，二酸化炭素排出削減策の一つとして太陽光，風力，地熱，水力等の再生可能エネルギーの導入の促進が挙げられている<sup>(1)</sup>。特に，太陽光発電 (PV : Photovoltaic generation) の日本における導入量は着実に増加しており，2018 年度には 5,337 万 kW に達した。これは世界第 3 位の導入量である<sup>(2)</sup>。また，2015 年から 2025 年にかけてコストが 57% 低減すると想定されており，石炭・ガス火力発電に比べて安価な発電システムになると推測されることから，更なる PV の導入拡大が見込まれる<sup>(3)(4)</sup>。

しかし，PV の出力電力は天候により大きく変動するため，供給が不安定となる欠点がある。需要と供給のバランスが崩れた場合，電力系統の周波数が変動し，複数の発電所が連鎖的に自動的に停止し，大規模停電に陥る恐れがある<sup>(5)</sup>。すなわち，系統電力の品質低下が懸念される。そこで出力変

動抑制対策として，電力貯蔵装置 (ESS : Energy Storage System) を PV に併設し，ESS の充放電によって PV の急峻な出力変動を抑制する研究が行われている<sup>(6)-(8)</sup>。

一般的に電力平準化システムにおける ESS として，リチウムイオン電池 (LiB : Lithium-ion Battery) やナトリウム硫黄電池 (NaS 電池)，電気二重層キャパシタ (EDLC : Electric Double-Layer Capacitor) や鉛蓄電池が用いられる<sup>(9)</sup>。電力平準化システムには複数の ESS を組み合わせた複合システムがある。著者らは，補償電力の大きさである振幅に着目して分割し，LiB は閾値未満の補償電力を出力し，EDLC は閾値以上の補償電力を出力する構成を提案した<sup>(8)</sup> (以下，ADAM : Amplitude Division Allotment Method とする)。この提案法 (ADAM) についてはミニモデルを用いた検証により，その有効性を確認済みである。

本稿では，2 台の LiB のみを用いた実モデル電力平準化システム，と 2 台の LiB と 1 台のフライホイール (FW : Flywheel) <sup>(10)</sup>を用いた実モデル電力平準化システムについて，複数の ESS の補償電力を ADAM を用いて分割し補償

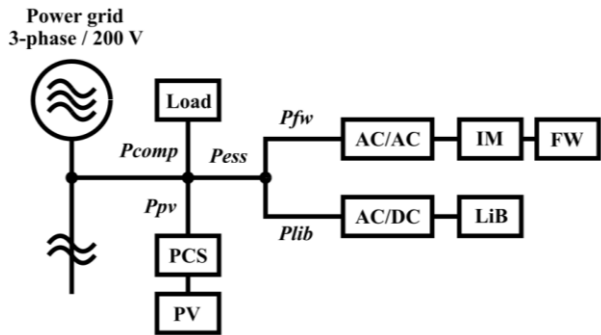


図1 電力平準化システムの全体構成  
Fig. 1. Configuration of the power leveling system.

する有効性を述べる。また、実験により ADAM の欠点を指摘し、ADAM の性能向上を目的とした ESS の SOC を管理する制御法を示す。さらに、実モデルの損失を考慮した電力平準化システムをシミュレーションで検証し、その有効性を明らかにする。

## 2. 複数の電力貯蔵装置を用いた電力平準化方法

図1に本稿で対象とする電力平準化システムの全体構成を示す。電力系統に接続された PV の出力電力変動を抑制するために、電力平準化システムを接続する。電力平準化システムには LiB を制御する AC/DC コンバータ、FW を制御する AC/AC コンバータと誘導電動機 (IM : Induction motor) が含まれている。ここで、 $P_{PV}$  は PV 発電電力、 $P_{comp}$  は平準化後の系統電力理想値、 $P_{ess}$  は ESS の補償電力である。 $P_{ess}$  は  $P_{pv}$  と  $P_{comp}$  の差に対して正の場合 ESS は放電し、負の場合 ESS は充電する。 $P_{ess}$  は LiB と FW の出力電力  $P_{lib}$  と  $P_{fw}$  の和で表わされる。 $P_{pv}$  に含まれる急峻な電力変動成分を 2 台の ESS を用いて補償する関係は、(1)式、(2)式で示される。

$$P_{PV} = P_{comp} + P_{ess} \dots\dots\dots (1)$$

$$P_{ess} = P_{fw} + P_{lib} \dots\dots\dots (2)$$

複数の ESS を用いた電力平準化方法として、補償電力の

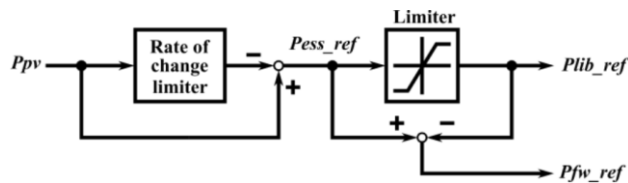


図2 ADAM の制御ブロック図  
Fig. 2. ADAM control method.

振幅に着目して分割する ADAM がある。図2に ADAM 制御ブロック図を示す。電力変動抑制に必要な補償電力指令値  $P_{ess\_ref}$  は、 $P_{PV}$  を変化率制限リミッターにより求める。その後、リミッターなどを用いて閾値未満の電力成分と閾値以上の電力成分に分割し、各変換器の補償電力指令値となる。閾値未満の電力成分は、振幅は小さいが充放電頻度が高いため電力量が大きい。一方、閾値以上の電力成分は、振幅は大きい。一方、閾値以上の電力成分は、振幅は大きい。一方、閾値以上の電力成分は、振幅は大きい。

## 3. 実証結果

〈3・1〉 システム構成 図3に実験装置の外観、表1にシステム条件を示す。FW の SOC は定格回転数 6000 rpm に対して、1500 rpm を 0%，6000 rpm を 100% としている。FW と LiB はそれぞれ SOC 管理されており、SOC が 7% になると平準化制御は一時停止し、FW と LiB は SOC が 12% になるまで外部電源により充電される。また、SOC が 100% になると平準化制御は一時停止し、FW と LiB は SOC が 95% になるまで放電される。また、FW についてはオフセット処理も施されており、FW 補償電力指令値が 0 p.u. の場合に限り外部電源により FW の SOC が一定となるように充電される。

PV 発電電力は日射量の測定値を使用し、系統電力理想値と補償電力は PV 発電電力の 2% 以下/分としている (図4参



(a) control room



(b) LiB



(c) FW

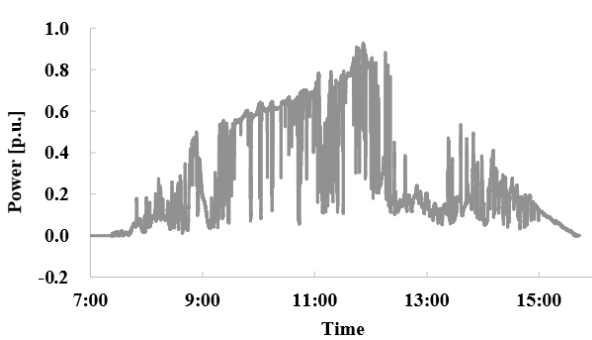
図3 実験装置

Fig. 3: Experimental instruments

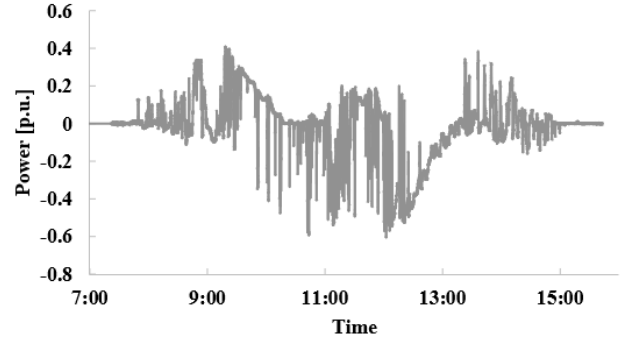
表1 システム条件  
Table 1. The system condition

PV generated power	40 kW	AC / AC converter Rated power	50 kW
FW capacity	30 kW / 250 Wh	AC / SC converter Rated power	10 kW
FW inertia	4.561 kg m <sup>2</sup>	LiB capacity	10 kW / 40 Ah
FW rated rotation speed	6000 rpm	LiB output voltage	248.4 V
FW operating range (SOC)	1500 ~ 6000 rpm (0 ~ 100 %)*	LiB operating range	20 ~ 80 %

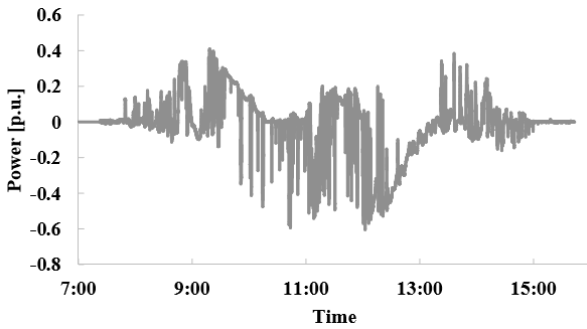
\*Convert 1500 rpm to SOC = 0 %, 6000 rpm to SOC = 100 %.



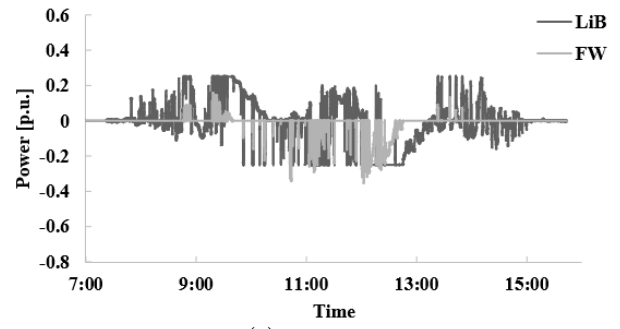
(a) PV 発電電力



(a) LiB のみ

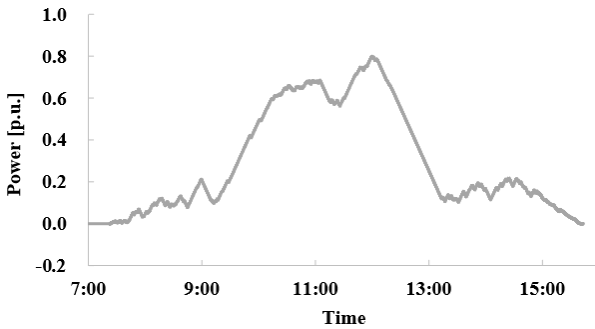


(b) 補償電力



(b) ADAM  
図5 補償電力

Fig.5 Compensated power



(c) 系統電力理想値

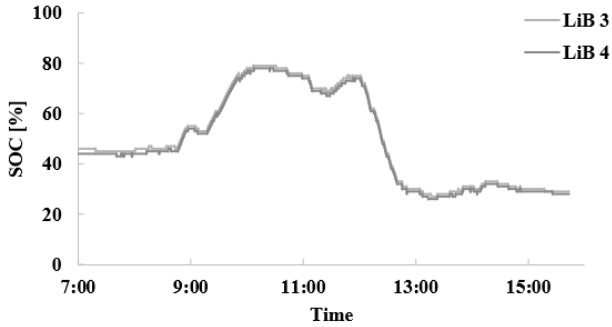
図4 基本波形

Fig.4. Basic waveforms

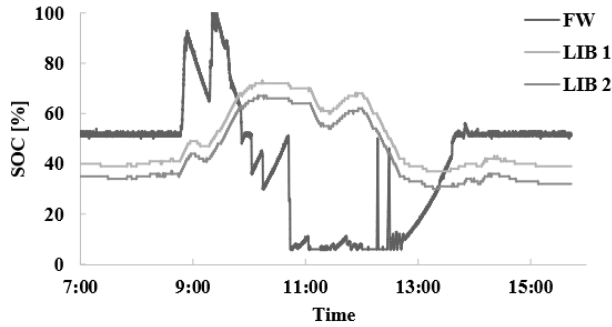
照)。なお、各測定データは40 kWのPV発電電力定格で基準化している。

〈3・2〉 平準化比較結果 2台のLiBのみを電力平準化システムとした場合と2台のLiBと1台のFWを電力平準化システムとした場合について電力平準化の効果比較を行う。LiBのみの電力平準化システムの補償電力は、(2)式において $P_{ess} = P_{lib}$ となる。LiBとFWで構成されている電力

平準化システムの補償電力はADAMを用いて分割する。各ESSの補償電力、SOC、系統電力の結果を図5~7に示す。(a)はLiBのみの実証結果、(b)はADAMの実証結果である。ADAMの振幅分割の閾値は10 kW (0.25 p.u.)とし、LiBは閾値未満の補償電力を出力、FWは閾値以上の補償電力を出力する。図5より、ADAMのLiBの補償電力は閾値(0.25 p.u.)未満となっており、LiBのみより補償割合が小さいことが分かる。各LiBのSOCの最大値と最小値を表2に示す。2台のLiBのSOC変化を合計した値はそれぞれ、LiBのみの場合では103ポイント、ADAMの場合では69ポイントである。これよりADAMの方がLiBのみと比較してSOC変化が小さいことがわかり、FWを併用することでLiBの長寿命が図ることができるといえる。しかし、FWの補償割合は小さく、その補償電力はほぼ0 p.u.となっているため、オフセット処理時間が長い。これは外部電源に依存してSOCを維持せざるを得ないという欠点である。このため第4章では、外部電源への依存度を減少させるための解決策に

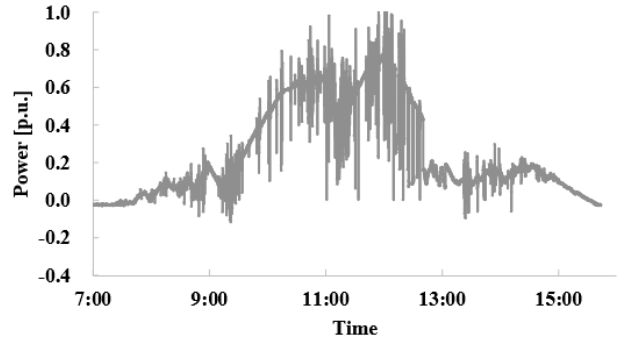


(a) LiB のみ

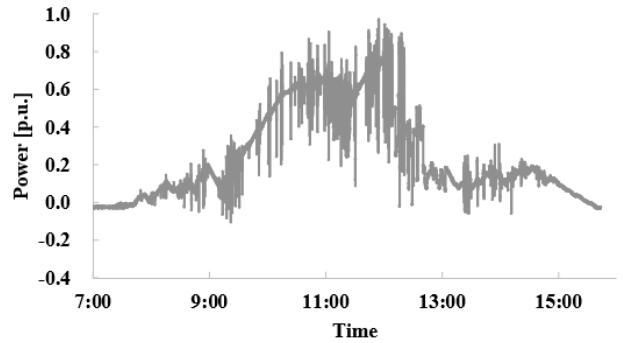


(b) ADAM

図 6 SOC  
Fig.6. SOC



(a) LiB のみ



(b) ADAM

図 7 系統電力  
Fig.7. Grid power

表 2 SOC の最大値・最小値

Table.2. SOC maximum and minimum

		Maximum	Minimum
LiB-only	LiB 3	79 %	28 %
	LiB 4	78 %	26 %
ADAM	LiB 1	73 %	37 %
	LiB 2	67 %	30 %

について述べる。

#### 4. ADAM 改善方法

第 3 章では、ADAM はオフセット処理のために FW が外部電源により充電される頻度が高いことを指摘した。そこで、ADAM に FW の補償上限・下限を考慮した制御を加えることで SOC を管理し、より高い制御性能を実現する。

〈4・1〉 制御方法 図 8 に ADAM 改善方法となるフローチャートを示す。補償電力指令値は閾値以上の場合には mode A となり、LiB は閾値未満を出力し、FW は閾値以上を出力する。補償電力指令値が閾値未満の場合には mode B または mode C に分類される。このとき、FW の SOC を適切な範囲内に維持するために、図 9 に示すように上限 ( $SOC_{high}$ ) と下限 ( $SOC_{low}$ ) を用いる。放電指令値が FW の SOC が上限以上の場合には下限になるまで mode B となる。mode B では放電指令値に係数  $\gamma$  倍した値が FW の放電指令値として与えられる。その結果、ADAM よりも放電することができ、補償上限に達しづらくなる。この mode により、ADAM と比較して FW の補償割合が高まる。放電指令値で FW の SOC が上限に達していない場合は mode C となり、すべて

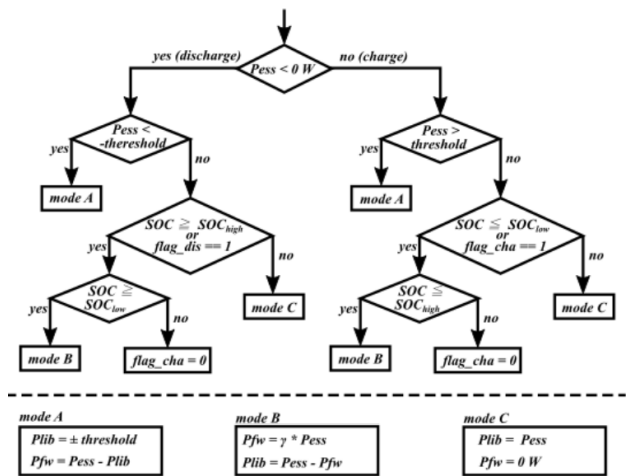


図 8 フローチャート

Fig.8. Flowchart

の補償電力を LiB が出力する。同様に充電指令値で FW の SOC が下限以下の場合、上限になるまで mode B となり、FW の補償割合が ADAM よりも高まる。一方、充電指令値で FW の SOC が下限に達していない場合は mode C となる。

〈4・2〉 シミュレーション結果 ADAM と ADAM 改善方法 (ADAM<sub>imp</sub>) について第 3 章と同様のシステムを用いてシミュレーションを行った。ただし、オフセット処理はしていない。ADAM では閾値分割の閾値を 10 kW (0.25 p.u.) とし、閾値未満の補償電力を LiB が出力し、閾値以上の補

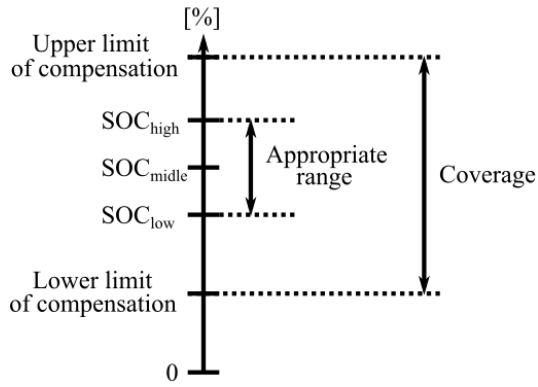
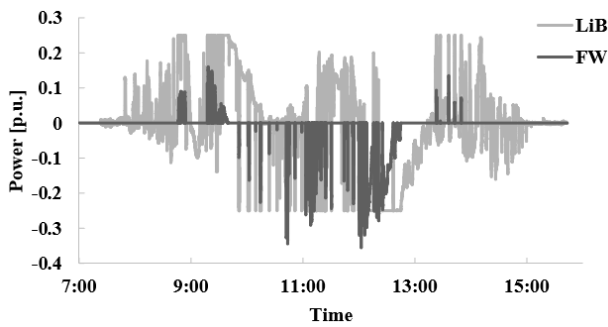
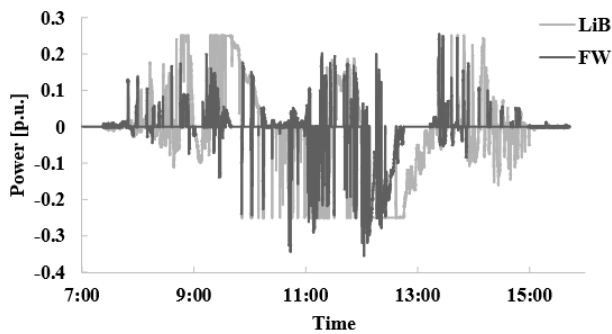


図9 FW SOC 全体図  
Fig.9. FW SOC overview



(a) ADAM



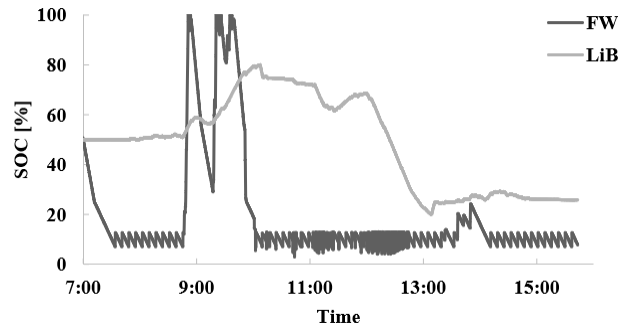
(b) ADAM<sub>imp.</sub>

図10 補償電力  
Fig.10. Compensated power

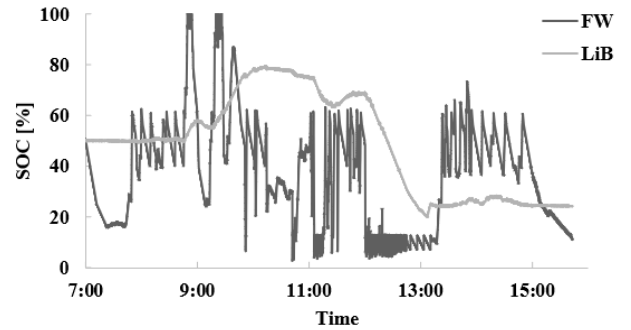
表3 SOCの最大値-最小値  
Table.3. SOC maximum and minimum

	Maximum	Minimum
ADAM	80 %	20 %
ADAM <sub>imp.</sub>	79 %	20 %

償電力を FW が出力する。ADAM<sub>imp.</sub>の閾値は ADAM と同値とした。また、FW の SOC を適切な範囲に保つための上限 ( $SOC_{high}$ ) と下限 ( $SOC_{low}$ ) は、FW の電力密度が高いという特性を考慮して、補償電力のランプ変動に対応するように設定する。また、SOC が 50 % 付近で留まるよう FW の動作範囲の中央値 ( $SOC_{middle}$ ) に対して  $\pm 10\%$  となるように、 $SOC_{high} = 60\%$ 、 $SOC_{low} = 40\%$  とした。そして、mode

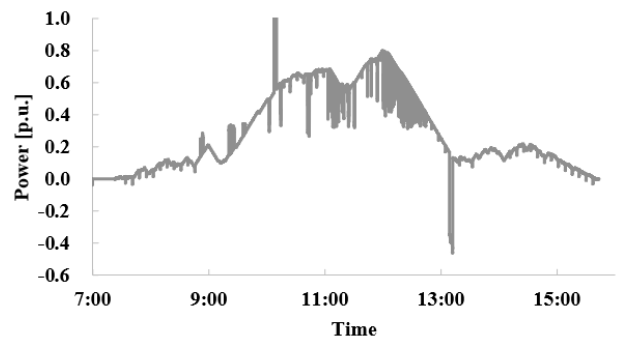


(a) ADAM

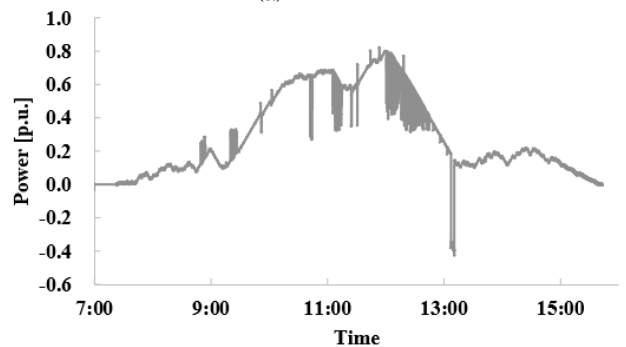


(b) ADAM<sub>imp.</sub>

図11 SOC  
Fig.11. SOC



(a) ADAM



(b) ADAM<sub>imp.</sub>

図12 系統電力  
Fig.12. Grid power

B で使用する  $\gamma = 1$  とすることで、全ての補償電力を FW に与え SOC を管理する。

各 ESS の補償電力、SOC、系統電力の結果を図 10~12 に

示す。(a)は ADAM のシミュレーション結果, (b)はADAM<sub>imp.</sub>のシミュレーション結果である。2 台の LiB の SOC はシミュレーション結果において値が同値となるため, 1 台分のみ結果を示す。ADAM とADAM<sub>imp.</sub>の FW 補償電力を比較すると, FW の補償割合がADAM<sub>imp.</sub>の方が ADAM より高くなった。特に, 充電指令値が増加したことが確認できる。それに伴い ADAM の SOC はオフセット処理が施されていないため, ほぼ補償下限に留まっており, SOC が管理されているADAM<sub>imp.</sub>は SOC が適切な範囲である 40~60%に留まっている。各 LiB の SOC の最大値と最小値を表 3 に示す。LiB の SOC 変化を合計した値はそれぞれ, ADAM の場合では 120 ポイント, ADAM<sub>imp.</sub>の場合では 118 ポイントである。また, 平準化効果を短期変動周期のみに着目した系統電力の標準偏差を求めることにより比較すると, ADAM では $2.7 \times 10^{-2}$ , ADAM<sub>imp.</sub>では $2.4 \times 10^{-2}$ となり 11%改善した。これらの結果より, ADAM<sub>imp.</sub>は LiB の寿命を同程度に保ちながら平準化効果を得ることが可能であることを確認した。

## 5. おわりに

本稿では, LiB のみを用いた実モデル電力平準化システムと ADAM を適用した LiB と FW を用いた実モデル電力平準化システムを比較した。その結果, SOC 変化が LiB のみの結果より ADAM の結果の方が 34 ポイント小さくなり, LiB の寿命の観点において有効性を確認した。しかし, 実験を通して, FW の SOC 維持を外部電源に依存せざるを得ないという欠点を得た。そこで, ADAM に FW の補償上限・下限を考慮した制御を加える改善方法を示し, シミュレーションにより確認した。その結果, LiB の SOC 変化は 2 ポイントのみとなった。また, 短期変動周期のみに着目した系統電力の標準偏差を求めると ADAM では $2.7 \times 10^{-2}$ , ADAM<sub>imp.</sub>では $2.4 \times 10^{-2}$ となり 11%改善した。これらの結果より, ADAM<sub>imp.</sub>は LiB の寿命を同程度に保ちながら平準化効果を得ることが可能であることを確認した。

以上のことから, 実モデルによる ADAM の有効性と, その改善方法の有効性を確認した。

## 文 献

- (1) 環境省：「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」, (2019)
- (2) 経済産業省 資源エネルギー庁：「エネルギーに関する年次報告」, (2020)
- (3) 一般社団法人 太陽光発電協会：「JPEAPV OUTLOOK ～太陽光発電 2050 年の黎明～〈脱炭素・持続可能社会実現にむけて〉」, (2016)
- (4) IRENA：「The Power to Change (Solar and Wind cost reduction to 2015)」, (2016)
- (5) 九州電力株式会社：「九州本土における再生可能エネルギーの出力制御について」, (2018)
- (6) 野呂 康宏・直井 伸也・鳥羽 廣次・木村 操・峯岸 利明・清水 正直・青木 伸一・奥田 靖男：「大規模太陽光発電所向けの出力変動抑制装置の構築と検証」, 電気学会論文誌 B(電力・エネルギー部門誌), Vol. 132, No. 4 pp. 381-386 (2012)
- (7) 赤塚元軌・原亮一・北裕幸・伊藤孝充・植田喜延・三輪修也・松野

直也・滝谷克幸・斉藤正美：「NAS 電池を用いた大規模太陽光発電所の出力変動抑制」, 電気学会論文誌 B(電力・エネルギー部門誌), Vol. 130, No. 2 pp. 223-231 (2010)

- (8) 芳賀仁・島尾敏裕・加藤康司・伊東洋一・有松健司：「電力変動成分を振幅分割して抑制する複合型蓄電デバイスを持つ電力平準化装置」, 電気学会論文誌 D(産業応用部門誌), Vol. 139, No. 3 pp. 330-338 (2019)
- (9) 福島敏：「電力系統における蓄電池利用・制御技術の最新動向」, 電気学会論文誌 B(電力・エネルギー部門誌), Vol. 137, No. 10 pp. 644-647 (2017)
- (10) 長嶋賢：「蓄電システムへの応用」, 電気学会誌, Vol. 138, No. 7 pp. 418-421 (2018)