

フライホイールの補償上限・下限に考慮した 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, in this paper, we propose a power leveling control method with LiB and FW as a storage device. For the command value of charge/discharge power to each energy storage systems, we proposed a method of dividing the compensation power by adding a control method that focuses on the remaining capacity of flywheel to ADAM, which is a division method that focuses on the amplitude component of the compensation power. Because of the simulation, when the threshold was changed from 6 kW to 10 kW in 1 kW increments using the energy storage systems of the same capacity as the conventional method, the total efficiency was improved at all thresholds and the maximum improvement was 4.8 %. In addition, the fluctuation reduction rate also improved at all thresholds, with a maximum improvement of 17.0%.

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⁽¹⁾。特に，太陽光発電 (PV : Photovoltaic generation) は 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定されていることから，PV の導入拡大が見込まれている⁽²⁾⁽³⁾。

しかし，PV の出力電力は天候により大きく変動するため，供給が不安定な欠点がある。需要と供給のバランスが崩れた場合，周波数変動し，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⁽⁴⁾。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⁽⁵⁾⁽⁷⁾。

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⁽⁸⁾。蓄電デバイスとして，文献⁽⁷⁾では，LiB と EDLC の 2 種類の ESS を用いた電力平準化システムについて検討している。文献内において各 ESS への充放電電力の指令値は，補償電力の振幅成分に着目した分割方法 (ADAM : Amplitude Division Allotment Method) が用いられている。しかし，ADAM は ESS の補償上限・下限に考慮した制御について検討が行われていない。そのため，充放電電力指令値を ESS に与えても充電状態を管理していないため出力できない場合が発生し，変動抑制できない課題がある。

そこで本稿では，LiB とフライホイール (FW : Flywheel)⁽⁹⁾を用いた電力平準化システムを対象とし，ADAM を基にした制御法の検討を行い，FW の残容量に着目した制御法を提案する。まず，従来法 (ADAM) と提案法の基本原理を述べる。そして，提案法を PV の電力平準化システムに適用することを目的に，小型モデルを用いたシミュレーションによりその有効性を検討する。提案法の有効性は，補償電力を分割する際に用いる閾値を変化させた場合の総合効率と変動抑制率を用いて明らかにする。

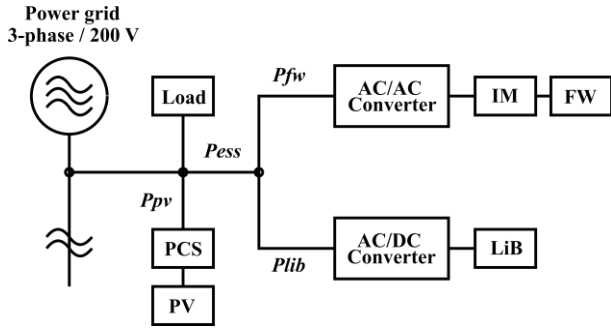


図 1 電力平準化システムの全体構成
Fig. 1. Configuration of the power grid.

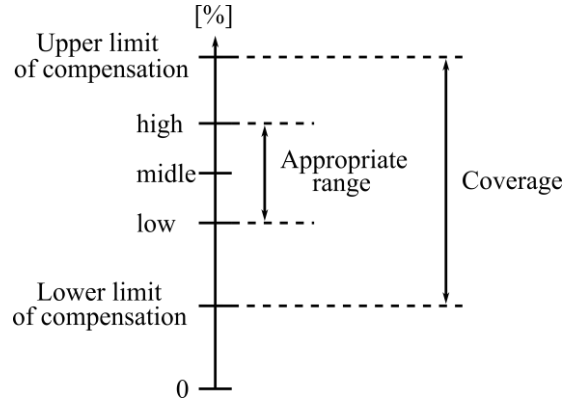


図 4 FW 残容量の概要
Fig. 4. FW SOC schematic.

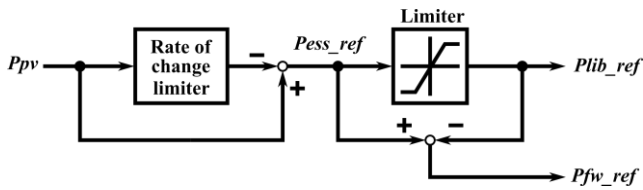


図 2 従来法の制御ブロック図
Fig. 2. Conventional method.

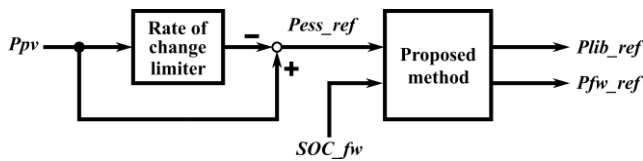


図 3 提案法の制御ブロック図
Fig. 3. Proposed method.

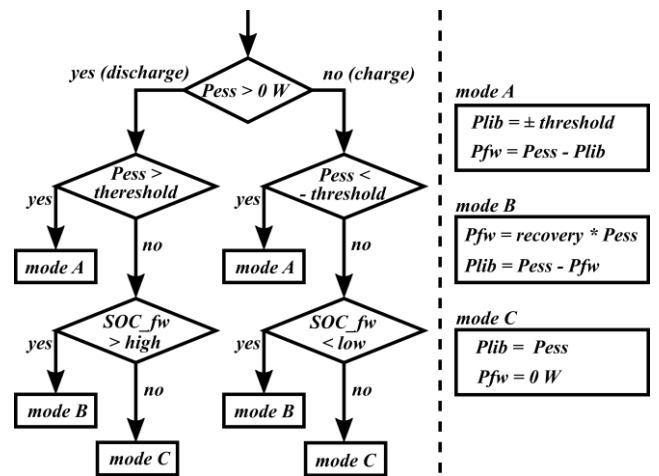


図 5 提案法のフローチャート
Fig. 5. Flowchart of proposed method.

2. 複数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} は平準化後の理想的な系統電力、 P_{ess} は ESS への補償電力指令値である。補償電力指令値は LiB と FW の出力電力 P_{lib} と P_{fw} の和を用いて表わされる。PV 発電電力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、次式の関係で示される。

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

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

〈2・1〉 従来の電力平準化方法 複数の ESS を用いた従来の電力平準化方法として、補償電力の振幅に着目して分割する ADAM がある。図 2 に従来法の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通すことで求める。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することで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。よって、出力電力の割に容量が大きい LiB が閾値未満の電力成分を出力する。一方、閾値以上の電力成分は、振幅は大きい但し充放電頻度が低いため電力量が小さい。よって、容量の割に出力電力が大きい FW が閾値以上の電力成分を出力する。

〈2・2〉 提案する電力平準化方法 図 3 に提案する電力平準化方法の制御ブロック図を示す。従来と同様の方法で電力変動抑制に必要な補償電力指令値 P_{ess_ref} を得る。 P_{ess_ref} が正の時、ESS に放電させる補償電力指令値を与え、負の時 ESS に充電させる補償電力指令値を与える。提案法は、ADAM に FW の補償上限・下限を考慮した制御を加えた補償電力の分割方法である。提案法の特長は、補償電力指令値を分割する際に FW の残容量 SOC_{fw} を用いて図 4 に示すように FW の残容量を適切な範囲に保つための上限 (high) と下限 (low) を制御アルゴリズムに考慮する点である。

図 5 に提案法のフローチャートを示す。提案法には 3 種

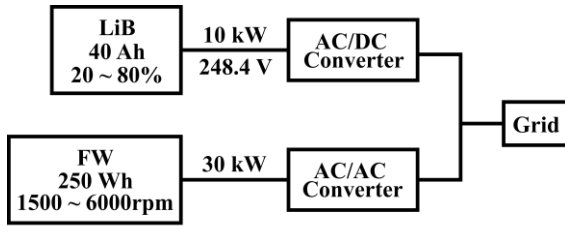


図6 電力平準化システムの概要
Fig. 6. Fluctuation balancing system schematic.

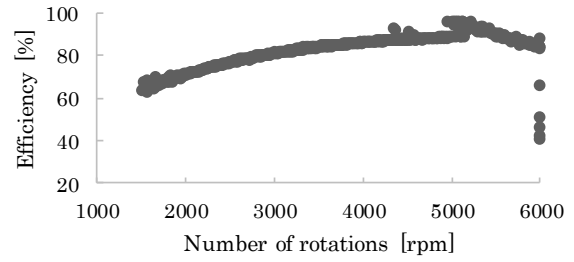
類のモード切替が存在する。補償電力指令値が閾値より大きい場合は Mode A となり、閾値(threshold)未満は LiB が出力し、閾値以上は FW が出力する。補償電力指令値が閾値以下の場合、Mode B または Mode C に分類される。Mode B では放電指令値で FW 残容量が上限に達したとき、FW の指令値は補償電力指令値に係数 $recovery$ ($0 \leq recovery \leq 1$) を積算した分が与えられる。これにより従来法よりも多く放電することで、補償上限に達しづらくなる。また、充電指令値で FW 残容量が下限に達したとき、FW の指令値は補償電力指令値に係数 $recovery$ を積算した分が与えられる。これにより従来法よりも多く充電することで、補償下限に達しづらくなる。Mode B によって、従来法より FW の使用割合が増加する。FW の残容量が適当な範囲の時 Mode C となり、LiB に全ての補償電力指令値が与えられる。

3. シミュレーション

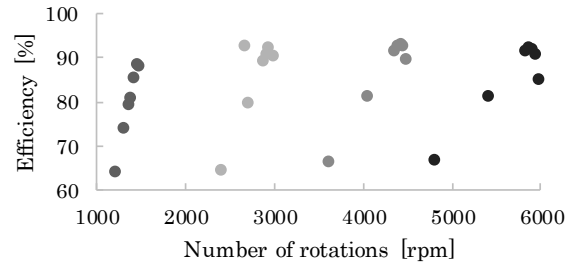
(3-1) システム構成 図6にシミュレーションで使用するシステム構成を示す。40 kW の PV を模擬する。FW の容量は 30 kW/250 Wh、定格回転数は 6000 rpm、慣性モーメントは 4.561 kg m^2 である。動作範囲は 1500 ~ 6000 rpm である。FW に接続された AC/AC コンバータの定格出力は 50 kW である。LiB の容量は 40 Ah、出力電圧は 248.4 V である。LiB の SOC 動作範囲は 20 ~ 80 % である。LiB に接続された AC/DC コンバータの定格出力は 10 kW である。FW と LiB はそれぞれ動作範囲の下限に達したとき、指令値が与えられていないときは 1500 rpm または 20 % で一定なるように制御されており、充電指令値のみに対応する。一方動作範囲の上限に達したとき、放電指令値のみ出力し、指令値が与えられていない場合は、機械損または自己放電により残容量が減少する。

本稿ではシミュレーションにおいて損失も考慮して検証する。損失は次のように考慮する。図7に各システムの効率特性を示す。AC/AC コンバータと IM の効率特性は、それぞれ 300 ~ 6000 rpm, 1500 ~ 6000 rpm に対する効率特性を用いる。IM については回転数に対する機械損も考慮する。AC/DC コンバータの効率特性は、直流電圧 162 ~ 291.6 V における効率を測定して用いる。LiB の自己放電特性は図7(e)を想定している。

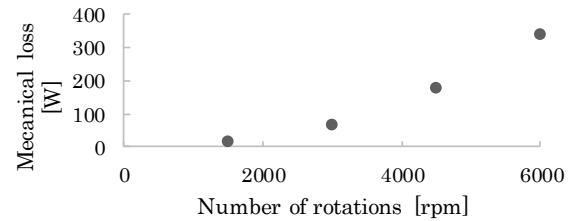
(3-2) シミュレーション条件 従来法と提案法について閾値を変化させながら損失と変動抑制効果をシミュレ



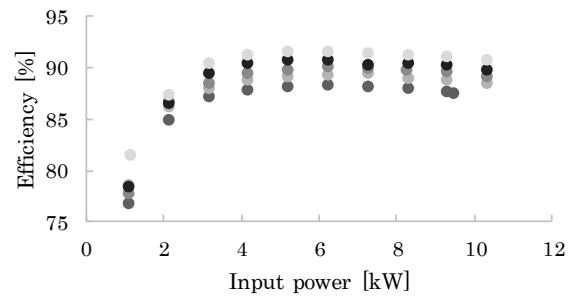
(a) AC/AC コンバータの効率特性



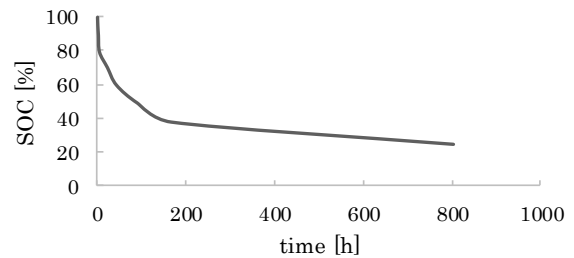
(b) IM の効率特性



(c) IM の機械損特性



(d) AC/DC コンバータの効率特性



(e) LiB の自己放電特性

図7 電力平準化システムの効率特性

Fig. 7. Efficiency characteristics of fluctuation balancing system.

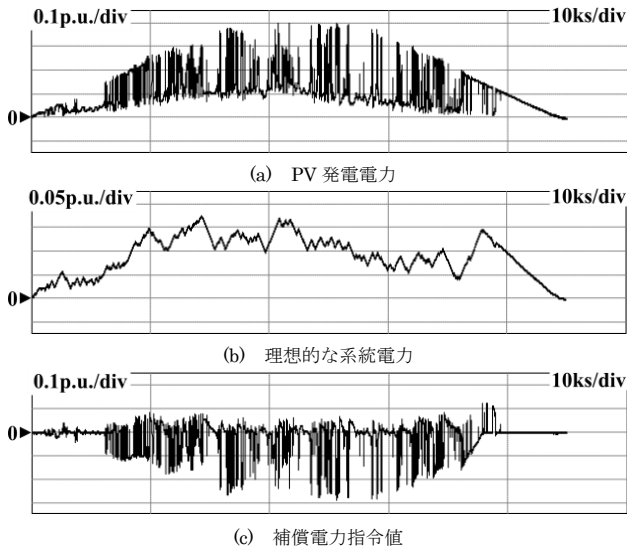


図 8 シミュレーションで使用する波形
Fig. 8. Waveforms for simulation.

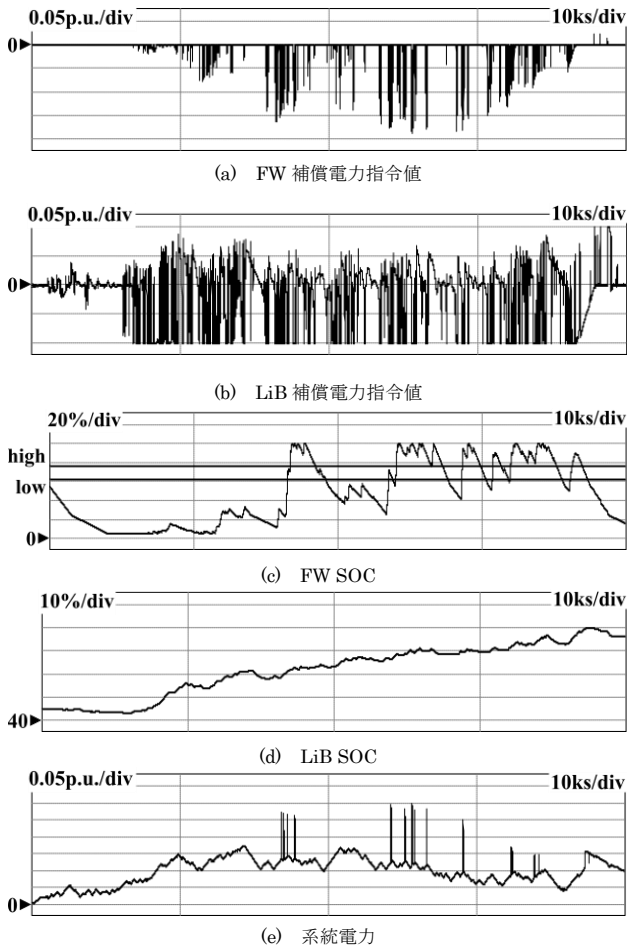


図 9 従来法のシミュレーション結果
Fig. 9. Simulation results of proposed method.

ーションにより比較する。シミュレーションで用いる PV 発電電力は、図 8(a)に示す福島県二本松市の 2020 年 4 月 27 日、天気は薄雲の時に実測した日射量を使用する。薄雲時は、日射量が急峻に変動する時間帯が比較的多くみられる。

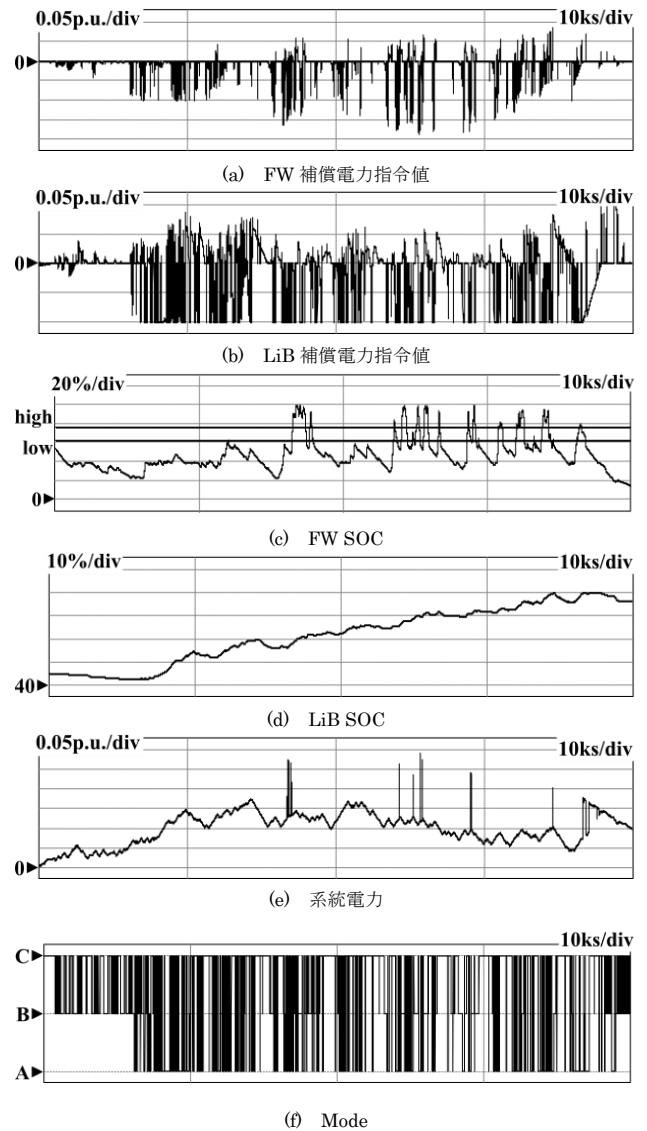


図 10 提案法のシミュレーション結果
Fig. 10. Simulation results of conventional method.

このような電力変動成分を系統側に流入させないようにするために、ESS から変動成分を補償するように電力を出力する。図 8(b)に平準化後の理想的な系統電力、図 8(c)に補償電力指令値を示す。各波形は 40 kW で規格化している。

本稿では出力変動緩和対策の基準である「発電所定格出力の 1%以下/分」⁽¹⁰⁾を参考にして PV 発電電力を制限することで、系統電力と補償電力指令値を求める。

提案法で使用するパラメータである FW の残容量を適切な範囲に保つための上限(high)と下限(low)の設定方法を述べる。FW は容量の割に出力電力が大きい特徴がある。よって、指令値のランプ変動を補う役割がある。そのためには、常に容量の中央値付近で待機することが望ましい。FW の動作範囲 1500 ~ 6000 rpm に対する容量の中央値(middle)は middle= 70 %、中央値に対して±20%の上限下限値はそれぞれ high = 77 %、low = 63%となる。また、Mode B で使用する recovery = 1 とすることで FW に全ての補償電力指

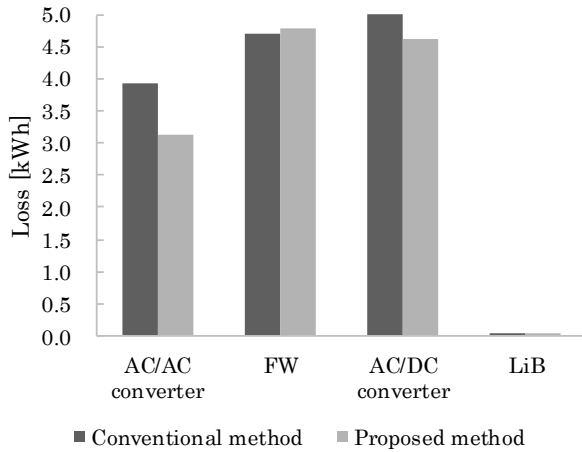


図 11 各システムの損失結果
Fig. 11. System loss results.

表 1 総合効率と FRR の結果

Table 1. Total efficiency and FRR results.

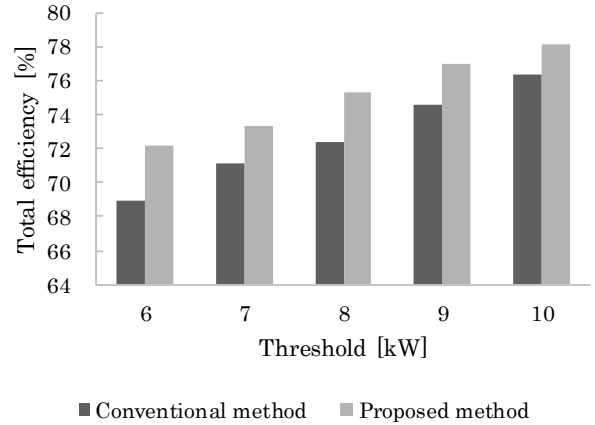
	Conventional method	Proposed method
Total efficiency [%]	76.4	78.1
FRR [%]	68.0	76.5

令値を与えるようにした。

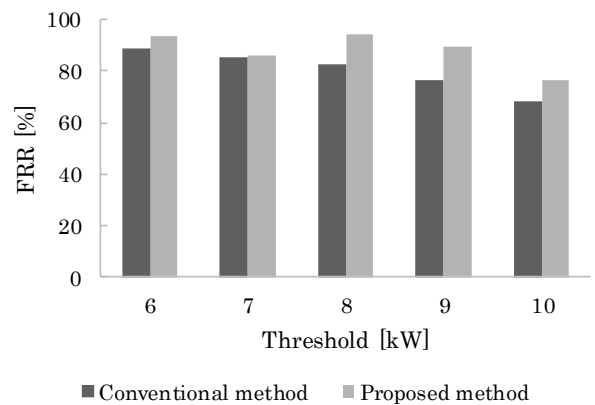
容量は従来法で使用する補償電力指令値を用いて決定する。まず、瞬時電力絶対値の最大値を所要 kW 容量とし、使用する ESS の定格 kW 容量で割ることで使用台数を算出する。次に、積算電力量の最大値・最小値を所要 kWh 容量とし、使用する ESS の定格 kWh 容量で割ることで使用台数を算出する。そして、瞬時電力と積算電力量で算出した使用台数において多い方を用いる。また、提案法の容量は従来法により算出した値を用いる。

〈3・3〉電力平準化の比較 図 9 に従来法を用いたときの電力平準化システムの各部の波形を示す。図 9(a)は FW の補償電力指令値、図 9(b)は LiB の補償電力指令値、図 9(c)は FW の SOC、図 9(d)は LiB の SOC、図 9(e)は系統電力である。閾値を 10 kW に設定して、閾値未満の補償電力指令値は LiB が出力し、閾値以上の補償電力指令値は FW が出力する。図 10 に提案法を用いたときの電力平準化システムの各部の波形を示す。図 10(a)は FW の補償電力指令値、図 10(b)は LiB の補償電力指令値、図 10(c)は FW の SOC、図 10(d)は LiB の SOC、図 10(e)は系統電力、図 10(f)は Mode である。閾値は従来法と同様の 10 kW に設定した。図 9(a)と図 10(a)を比較すると、従来法(図 9)より提案法(図 10)の方が FW の補償電力指令値が増加していることがわかる。また、図 10(c)より、FW の SOC は全体的に中央に寄るような動作をしていることが確認できる。

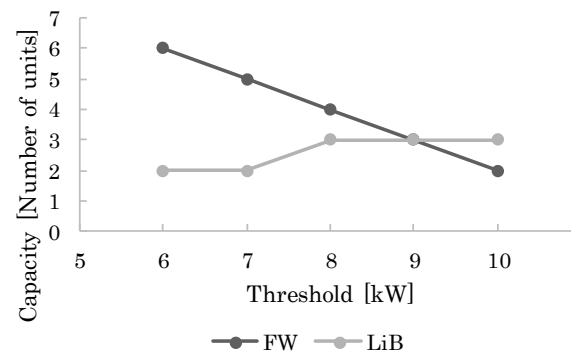
電力平準化システムにおける総合効率 (TE : Total efficiency) を(3)式より求める⁽¹²⁾。



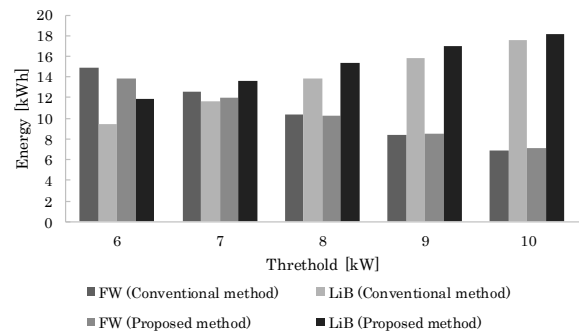
(a) 総合効率結果



(b) FRR 結果



(c) ESS の使用容量



(d) ESS 別積算電力量

図 12 閾値別シミュレーション結果

Fig. 12. Threshold simulation result.

$$TE = \frac{E_{ess}}{E_{ess} + L_{total}} \times 100 \dots\dots\dots (3)$$

E_{ess} : 一日の ESS の出力電力量の絶対値

L_{total} : 一日の ESS の合計損失

算出結果、従来法では 76.4 %, 提案法では 78.1 % となり、3.0 % 改善することができた。図 11 に示す従来法と提案法のシステム別の損失を比較すると、各コンバータの損失低減の影響が大きいことがわかる。

電力変動の抑制効果を表す指標として変動抑制率 (FRR : Fluctuation Reduction Rate) が用いられる⁽¹¹⁾。FRR は(4)~(6)式を用いて算出する。

$$FRR = \frac{S_{PV} - S_{comp}}{S_{PV}} \times 100 \dots\dots\dots (4)$$

S_{PV} : PV 出力電力の評価区間内のスペクトル合計

S_{comp} : 系統電力の評価区間内のスペクトル合計

$$S_{PV} = \sum_{i=\tau_1}^{\tau_2} C_i^{PV} \dots\dots\dots (5)$$

$$S_{comp} = \sum_{i=\tau_1}^{\tau_2} C_i^{comp} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 C_i 変動周期 i におけるスペクトル成分であり、 τ_1 , τ_2 は評価対象変動周期の上下限値である。本稿では 2 秒~5 分を評価区間としている。FRR は値が大きいほど電力変動を抑制できていることを表す。図 9 と図 10 に示すシミュレーション結果を用いて FRR を求めると、従来法では 68.0 %, 提案法では 76.5 % となり、12.5 % 改善することができた。図 9(e) と図 10(e) において、ランプ状態の出力は ESS の補償上限・下限を超えたことにより補償できていない部分であり、これが提案法(図 10)の方が減少している。FRR は PV 発電電力のパワースペクトルの合計に比べて系統電力のパワースペクトルの合計がどの程度低減されたかを示す指標である。よって、出力電力の応答値が悪ければ FRR は小さくなる。すなわち、FW が補償上限・下限に達した場合に FRR は小さくなる。従って、FW の残容量に考慮した提案法は FW が補償上限・下限に達しづらいため、FRR を改善しやすいといえる。

〈3・4〉 閾値別の比較 図 12 に閾値を 6 kW から 10 kW まで 1 kW ずつ変化させた場合の従来法より提案法のシミュレーション結果を示す。図 12(a) に示す閾値別の総合効率より、全ての閾値において効率が改善し、最大で 4.8 % 改善できた。また、閾値を大きくすると FW の使用割合が減少するため効率が改善した。図 12(b) に示す閾値別の FRR より、全ての閾値において FRR を改善し、最大で 17.0 % 改善することができた。また、従来法は閾値が小さくなるほど FRR が改善しているが、提案法は閾値が 7 kW 以下で FRR が悪化している。これは図 12(c) に示すように、LiB の容量が減少しているため生じた。容量は従来法と同容量使用し

ていることを考慮すると、図 12(d) に示すように、LiB の積算電力量が閾値 7 kW 以下で従来法と提案法の積算電力量の差が大きい。よって、必要容量が不足しているため FRR が悪化したといえる。

4. おわりに

本稿では、ADAM に FW の残容量に着目した制御法を加えた補償電力の分割方法を提案した。提案した分割方法は、FW の残容量を適当な範囲に保つための上限 high と下限 low を設けることで、従来法に比べて損失の低減と変動抑制率の改善を行う。シミュレーションの結果、従来法と同容量の ESS を用いて、閾値を 6 kW から 10 kW まで 1 kW ずつ変化させた場合、全ての閾値において総合効率が改善し、最大で 4.8 % 改善できた。また、変動抑制率も全ての閾値において改善し、最大で 17.0 % 改善することができた。

以上のことから、提案する ADAM に FW の残容量に着目した制御法を加えた補償電力の分割方法の有効性を確認した。

文 献

- (1) 経済産業省:「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」, (2019)
- (2) 一般社団法人 太陽光発電協会:「JPEA PV 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)
- (3) IRENA:「The Power to Change (Solar and Wind cost reduction to 2015)」, (2016)
- (4) 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)
- (5) 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)
- (6) 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・斎藤正美:「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)
- (7) 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)
- (8) 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)
- (9) 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)
- (10) 北海道電力株式会社:「太陽光発電設備の出力言動緩和対策に関する技術要件」, (2016)
- (11) 北海道電力株式会社, 稚内市:「大規模電力供給用太陽光発電系統安定化等実証研究(稚内サイト)」, NEDO 系統連系技術実証研究成果報告会資料, (2008)
- (12) 樋笠博正・石川文彦・芝山宗昭・小野健・横山彰一・中村史朗・山田忠利・吉田康夫:「8MWh 級高温超電導浮上式フライホイール電力貯蔵システム概念設計および適用性の検討」, 電気学会論文誌 B(電力・エネルギー部門誌), Vol. 113, No. 7 pp. 768-775 (1993)