修正 Euler 型移動平均予測モデルによる新エネルギー型分散電源と SMES の協調運用手法に関する考察

学生員 毛内 俊晴* 正員 鷹野 一朗**
正員 西川 尚男*** 正員 澤田 芳夫**

A Study on Collaborative Operation Methods between New Energy Type Dispersed Power Supply System and SMES by Modified Euler Type Moving Average Prediction Model

Toshiharu Monai*, Student Member, Ichiro Takano**, Member,
Hisao Nishikawa***, Member, Yoshio Sawada**, Member

In this paper, the modified Euler type Moving Average Prediction (EMAP) model is proposed in order to operate a dispersed power supply system using new energy in autonomous mode. Furthermore, EMAP model is applied to operate a new type dispersed power supply system consisting of a large scale photovoltaic system (PV), a fuel cell (FC) as well as a small scale superconducting magnetic energy storage system (SMES). This distributed power supply system can meet the multi-quality electric power requirements of customers, and ensures voltage stability and UPS (Uninterruptible Power Supply) function as well. Each sub-system of this distributed power supply contributes to the above-mentioned system performance with its own excellent characteristics. Moreover, response characteristics of this system are confirmed with simulation by software PSIM, and, under collaborative operation methods by EMAP model, the required capacity of SMES to compensate the fluctuation of both PV output and load demand is examined by the simulation using software MATLAB/Simulink.

キーワード：分散電源，修正 Euler 型移動平均予測モデル，太陽電池，燃料電池，超電導電力貯蔵装置，UPS

Keywords: dispersed power supply system, modified Euler type moving average prediction model, photovoltaic cell, fuel cell, SMES, UPS

1. まえがき

近年の電力規制緩和の流れから，電気事業に様々な企業が参入し，多くの分散電源が導入されると考えられる。また，多様な品質の負荷を想定して，様々な制御機能を付加した分散電源システムが提案されている⁽¹⁾⁽²⁾。一方，地球環境保全の観点から，新エネルギーの活用が叫ばれており，新エネ

ルギーを用いた自律的な分散電源システムの提案もなされている⁽³⁾⁽⁴⁾。文献(3)では太陽電池 (Photo Voltaic cell : PV) と超電導電力貯蔵装置 (Superconducting Magnetic Energy Storage system : SMES)，文献(4)では燃料電池 (Fuel Cell : FC) と SMES とを協調させた分散電源システムの基本的な制御手法と応答動作について検討されているが，システムの運用方法についての具体的な解析は行われていない。

新エネルギーを分散電源システムに適用すると，特に様々な種類の新エネルギーを組み合わせた場合，その組合せの形態により発電電力の変動や応答性に関して，第2項(次項)で述べるような問題が発生することが予想される。ゆえに，これらによる過剰・不足電力を上位系に負担させては，近い将来，このような分散電源システムが数量共に増加した場合，上位系の運用に悪影響を与えることが予想され，好ましい系統連系の形態とはいえない。

上位系に大きな影響を与えずに分散電源システムを自己完結的に運用するためには，電力貯蔵装置の設置が必要と

* 工学院大学 工学研究科 電気・電子工学専攻
〒163-8677 東京都新宿区西新宿 1-24-2
Graduated Course of Electrical Engineering and Electronics,
Kogakuin University

1-24-2, Nishi-shinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo 163-8677

** 工学院大学 工学部 電気工学科

〒163-8677 東京都新宿区西新宿 1-24-2

Dept. of Electrical Engineering, Kogakuin University

1-24-2, Nishi-shinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo 163-8677

*** 東京電機大学 工学部 電気工学科

〒101-8457 東京都千代田区神田錦町 2-2

Dept. of Electrical Engineering, Tokyo Denki University

2-2, Kanda-nishiki-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8457

なる。しかし、電力貯蔵装置の設備容量を大きくすれば、運用は容易となるが経済的ではない。極力小さい設備容量で、自己完結的な運用を実現することが望まれる。

また、各々の新エネルギーの特徴を活かすための協調運用手法も必要となる。そこで、第3項で述べるように、平滑値の予測処理が電力貯蔵装置の容量低減に有効であると考えられる。従来、予測処理の多くはニューラルネットワークにより行なわれてきたが⁽⁵⁾、学習条件（回数や素子数など）により精度が左右され、且つ、予測に必要なデータの取得や処理が複雑化してしまう。また、新エネルギーを用いた電源に適用した例は筆者らの知る限りではない。

そこで本稿では、簡易的に数分後の平滑値を予測する修正 Euler 型移動平均予測モデル⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾を考案し、一例として PV、FC、SMES からなる新型分散電源システムに適用し、協調運用と SMES 容量の低減について検討した。

以下考案した手法、協調運用に関する基本特性、新型分散電源システムへ適用した時のシミュレーション解析、容量の低減効果について記述する。

2. 新エネルギーを用いた新型分散電源システムの問題点

新エネルギーを用いた自律的な分散電源システムと負荷の間で有効・無効電力の授受が完結すれば、上位系に負担をかけずに負荷へ有効・無効電力を供給できる。負荷への無効電力はインバータのみで制御できるが、有効電力は分散電源システムの直流部に接続される新エネルギーと電力貯蔵装置により供給されるため、電力貯蔵装置の容量をどのように見積もるかという問題が一般論としてある。この問題は同時に、電力貯蔵装置と以下のような特別な問題点のある新エネルギーをどのように運用すればよいかを意味している。

PV 日射強度や温度の変化により発電電力が変動し、且つ、出力変動が大きい。

風力 天候や立地条件に左右されるため不安定性があり、且つ、出力変動が大きい。

FC 目標となる電力が得られるまでに応答遅れが生じ、緩やかな変動の出力ならば対応できる。

よって、これらの新エネルギーを最適に組み合わせることで、電力貯蔵装置の容量をできるだけ小さくする協調運用手法が必要になる。そこで以下では、電力貯蔵装置として小規模の SMES、新エネルギーとして FC と大型の PV アレイを用いて、各々の特徴を活かした分散電源システムを一例に挙げて、問題点を明らかにすると共に、改善方法を提案する。

3. 新エネルギーを用いた分散電源システムの具体例

〈3・1〉今回検討の対象とした新型分散電源システム 今回検討の対象とした、PV、FC、SMES を用いた新型分散電源システムの内部構成を図1に示す。このシステムは、需要家により近い視点から、以下の事項を達成できること

図1 新型分散電源システムの内部構成

Fig.1. Interior structure of new type dispersed power supply system.

を想定して考えられたものである。

- (1) 需要家への多品質電力供給
- (2) 上位系にあまり負担をかけない運用
- (3) 新エネルギーを極力利用した電力供給

近年の電気事業の規制緩和の流れから、商用系統に多数の分散電源システムが接続され、需要家の要望（電気料金の低価格化や多品質な電力供給など）がさらに高まることが予想される(1)。また、分散電源システムは上位系の運用に対して障害とならないように、需要家の要求に応えなければならない(2)。さらに、地球環境保全の観点から新エネルギーの導入が望まれ、特にFCに関しては欠かすことができない分散電源といえる。そこで、FCとPVをハイブリッド化することで、自然エネルギーを最大限利用しつつ、効率よい自己完結的な運用が可能な電源が期待できる(3)。電力貯蔵装置に関しては、高効率の装置が様々考えられるが、今回は高効率で高速応答が可能なSMESを採用している。さらに、PV、FC、SMESを共通のDCバスに接続し、各々が自律分散的に制御されることで、機動性の高いシステムを構成している。

また、新型分散電源システムには、以下の二種類の負荷が接続されている。

負荷A：通常は上位系からの電力を供給される通常負荷
負荷B：各新エネルギー源の電力を供給される高品質負荷
 尚、負荷Bに関しては、病院や通信センター、オフィスビル、ハイテク産業などの高品質の電力を必要とする需要家を想定している。

各新エネルギー源の使い分けとしては、PVは発電可能な電力を全て直流部に供給し、FCは基本的に負荷BとPV出力の差の成分を出力するように運用される。ここで、FC

図2 システムの運用方法
Fig. 2. The operating method of the system.

は一定あるいは緩やかな変動電力を出力し、日射強度の変化によるPV出力の細かい変動や電力需要(負荷B)の急変などに対しては、SMESにより過渡的な不足・余剰電力を補償することで、安定した電力を負荷Bに供給する。また、スイッチ S_4 が閉じている時以外(通常時)、負荷Bは上位系から独立しているため、停電や瞬時電圧降下といった系統擾乱の影響を受けずに、高品質の電力が自立インバータ^{(9)~(11)}により直接供給される。

一方、負荷Aに対しては、双方向コンバータにより常に無効電力補償を行ない、負荷Aの変動については、上位系に負担を与えないように、SMESの貯蔵電力を用いて変動分を補償する。よって、SMESは電力貯蔵機能の他に、負荷変動補償や発電電力の補償といった機能も有することになる(SMESの多機能化)。

さらに、SMESの貯蔵電力が不足している場合は、双方向コンバータにより上位系から支障のない程度で電力を供給したり、FCの発電電力を通常より上昇させて、SMESを充電する。同様に、PVの出力が急激に上昇した場合も、その余剰分で充電できる。

このように新型分散電源システムは、発電の際に環境負荷を最小限に抑えることが可能であり、且つ、上位系から見て無効電力を必要としない、変動の少ない集中負荷として運用させることが可能である。

また、上位系において事故が起きた場合は、スイッチ S_1 と S_3 を開いて負荷Aへの電力供給と系統連系を停止するが、負荷Bに対してはUPS(Uninterruptible Power Supply)として動作することが可能である。万一、自立インバータが故障した場合については、 S_5 を開き、 S_4 を閉じることで、双方向コンバータにより負荷Bへ連続して電力を供給する。また、SMESあるいはFCが故障した場合については、直流部にバッテリーを投入して負荷Bへの電力の信頼性を確保するが、バッテリーの劣化を抑えるため、通常時はPV、FC、SMESにより電力を供給する。このように、新型分散電源システムは複数のスイッチの切替動作により、事故の種類に応じて系統構成を柔軟に変更することで、負荷Bへ高品質の電力を供給できる。

(3・2) 予測の必要性 負荷Bに対する新型分散電源シ

表1 主な設計仕様

Table 1. Main specifications of the system.

Subsystems	Specification
SMES	10 [MJ] (stored energy), 5 [H], 2000 [A]
PV	200 [kW]
FC	200 [kW]
Load A, B	200 ± 50 [kW], 200 [V] (rms) power factor : 70 [%] (lag)
Bi-directional PWM converter	450 [kVA], carrier frequency : 5250 [Hz] voltage source / 3 phase fullbridge type
Grid Independent PWM Inverter	400 [kVA], carrier frequency : 5250 [Hz] voltage source / 3 phase fullbridge type
Boost Chopper A, B	200 [kW]
I/V converter	DC 550 ± 2 [V]
Utility power system	6600 [V] (3 phase, rms), 50 [Hz]

ステムの運用方法を図2に示す。PVの発電電力と負荷Bに対して、FCは負荷BとPV出力の差の緩やかな変化の電力成分のみを出力し、SMESは残りの速い変動分のみを出力する。このように運用すれば、FCの応答に関してはあまり負担をかけずに済むと考えられる。ゆえに、新型分散電源システムが完全に自己完結的な運用を可能とする。しかし、FCの応答性から、FCが追従できなかった電力に関してはSMESが負担することになり、結果として、SMESの容量が大きくなってしまいう問題が生ずる。

以上の問題に対して、FCが一定時間後(例えば数分後)に出力すべき値をある程度まで予測し、それを指令値として事前にFCへ与えれば、電力貯蔵装置の容量を低減できると考えられる。また、指令値は、FCが追従可能な緩やかな変動の電力値でなければならない。本稿では、ニューロ、fuzzy、GAなどを用いずに、時系列データの数分後の平滑値を簡易的に予測するFIR(Finite Impulse Response)システム^{(6)~(8)(12)}を提案し、それに基づいてFCを運用するものとする。

次項ではまず、各構成機器の制御法の詳細を述べる。

(3・3) 各構成機器の制御方法

(3・3・1) 双方向コンバータ 双方向コンバータの制御には付録に示すpq理論⁽¹³⁾を用いる。負荷Aの瞬時電圧及び瞬時電流を三相/二相変換することにより、負荷Aへの瞬時有効電力 p_{la} 及び瞬時無効電力 q_{la} を算出する。そして、負荷変動補償の場合は、変動する瞬時有効電力 Δp_{la} に対する双方向コンバータの補償有効電力 p_{bd} と、負荷Aへの瞬時無効電力 q_{la} に対する補償無効電力 q_{bd} に加工した後、(付5)式を用いて補償電流を算出する。上位系が新型分散電源システムを無効電力を必要としない、変動の緩やかな集中負荷として扱うためには、上位系からの無効電力 Q_g を0、上位系からの有効電力 P_g を一定の値とし、 p_{bd} 及び q_{bd} は次に示す定義式(1)及び条件式(2)を満たす必要がある。

$$p_{bd} = p_{la} - P_g = \Delta p_{la} \dots \dots \dots (1)$$

$$Q_g = q_{la} - q_{bd} = 0 \dots \dots \dots (2)$$

図 3 I/V コンバータ

Fig. 3. I/V converter circuit.

また、上位系から SMES を充電する場合は、(2) 式を満たした上で、 p_{bd} を一定の負の値とし、補償電流を算出する。

さらに、補償電流と変圧器及び連系リアクトルのパラメータにより、双方向コンバータの出力電圧指令値を算出した後、パルス幅変調を行なう。

〈3・3・2〉 自立インバータ 負荷 A の相電圧 v_{la} と負荷 B の相電圧 v_{lb} を同相にするために、 v_{la} と負荷 B の線電流 i_{lb} を検出し、次式を満たすように出力電圧指令値 v_{inv} を求めた後、パルス幅変調を行なう。

$$v_{inv} = L \frac{di_{lb}}{dt} + v_{la} \quad (3)$$

ここで、 L は AC リアクトルのインダクタンスであり、これにより高調波成分は吸収される。

以上より、自立インバータの出力 P_{inv} 、PV 出力 P_{pv} 、FC 出力 P_{fc} 、SMES 出力 P_{smes} 及び負荷 B への供給電力 P_{lb} には、次の関係式が成り立つ。

$$P_{inv} = P_{lb} = P_{pv} + P_{fc} + P_{smes} \quad (4)$$

上式より、 P_{fc} と P_{smes} は、 P_{lb} と P_{pv} により決定される。

〈3・3・3〉 太陽電池と昇圧チョッパ A シミュレーションでは、MPPT 制御を理想的に行なっているものとみなし、可変電流源により日射強度に比例して最大出力を自由に変更できるように模擬している。

〈3・3・4〉 燃料電池と昇圧チョッパ B FC の無負荷開放電圧と定格運転時の比を実用器相当の 1.45 とし、昇圧チョッパを用いてその出力を制御している。

〈3・3・5〉 SMES と I/V コンバータ I/V コンバータ⁽¹⁴⁾ の回路構成と動作を図 3 に示す。DC キャパシタの端子電圧 E_{dc} が設定範囲未満 (以上) である場合は、SMES の電流 I_{smes} が DC キャパシタに対して逆 (順) 方向に流れるように GTO により経路を変更し、DC キャパシタの充 (放) 電を行なうことで、 E_{dc} を設定範囲内に収める (I/V 変換)。また、 E_{dc} が設定範囲内にある場合は、 I_{smes} を還流させる。

4. 修正 Euler 型移動平均予測モデル

〈4・1〉 平滑化の対象 不規則信号からなる時系列データの平滑化には様々な手法が考えられる。そこで、緩やか

図 4 MA モデル及び EMAP モデルのランプ応答

Fig. 4. Ramp response of MA model and EMAP model.

に変動する負荷 B と、1 分周期で比較的大きく変動する PV 出力の差を、適当な手法により数分単位で平滑化すれば、この平滑値を FC の目標値として扱うことができる。そこで次項では、平滑化の手法として一般的に用いられる移動平均 (Moving Average : MA) モデルの性質を述べる。

〈4・2〉 MA モデル 重み関数が付加しない場合の単純な MA モデルは、その因果性により時間遅れが生じ、ある時刻の正確な移動平均値は、その時刻に対して $(N-1)T_s/2$ sec (群遅延時間) 後に求まる。ここで、 N はサンプリング点数、 T_s はサンプリング周期を表わす。これは、次式のようなサンプリング点数を N 点とした MA モデル (N 点 MA モデル) のパルス伝達関数 $G_{ma}(z)$ により明らかになる。

$$G_{ma}(z) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} z^{-k} = \frac{z^{\frac{N}{2}} - z^{-\frac{N}{2}}}{N(z^{\frac{1}{2}} - z^{-\frac{1}{2}})} z^{-\frac{N-1}{2}} \quad (5)$$

よって、FC が追従可能な指令値として MA モデルによる平滑値を用いた場合は、FC の時間遅れに加えて MA モデルの時間遅れが生じてしまう。

そこで筆者らは、数分後の移動平均値を簡易的に予測する FIR システムである修正 Euler 型移動平均予測 (modified Euler type Moving Average Prediction : EMAP) モデルを考案したので、その原理及び特性について説明する。

〈4・3〉 EMAP モデル 数値計算法で扱われる Euler 法は、一つ前の階差の項とその微分値に階差を乗じた項の和の形で表わされ、これにより反復が行なわれ、常微分方程式の解が求まる。これを参考にして、現在の移動平均値と微分値に遅れ時間に乗じた項の和により、数分後の移動平均値を予測するモデルが EMAP モデルである。

図 4 は、ランプ入力 $x(t)$ に対する MA モデルと EMAP モデルの応答を示している。

ただし、

$y_{emap}(nT_s)$: $t = nT_s$ における EMAP モデルの出力

$y_{ma}(nT_s)$: $t = nT_s$ における MA モデルの出力

$y_{dif}(nT_s)$: 入力 $x(nT_s)$ の微分

T_p : 予測対象時間

n : 整数

これより、 T_p を N 点 MA モデルの群遅延時間 $(N-1)T_s/2$ に設定すれば、 $y_{dif}(nT_s)$ に T_p を乗じて、更に $y_{ma}(nT_s)$ を加算した値は、その時刻から T_p 秒後の移動平均値 $y_{ma}(nT_s + T_p)$ と近似的に一致することになる。このように入力 $x(nT_s)$ の移動平均値を簡易的に予測するシステムが EMAP モデルであり、EMAP モデルの出力 $y_{emap}(nT_s)$ は、次式のように定義される。

$$y_{emap}(nT_s) = y_{ma}(nT_s) + T_p \times y_{dif}(nT_s) \cdots (6)$$

インパルス応答を考慮して、(6) 式を展開すると

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^{\infty} g_{emap}(iT_s)x\{(n-i)T_s\} \\ = \sum_{i=0}^{\infty} g_{ma}(iT_s)x\{(n-i)T_s\} \\ + T_p \times \sum_{i=0}^{\infty} g_{dif}(iT_s)x\{(n-i)T_s\} \cdots (7) \end{aligned}$$

ただし、

$g_{emap}(iT_s)$: EMAP モデルのインパルス応答

$g_{ma}(iT_s)$: MA モデルのインパルス応答

$g_{dif}(iT_s)$: 微分システムのインパルス応答

i : 整数

これより、(7) 式を Z 変換すると、次式のような EMAP モデルのパルス伝達関数 $G_{emap}(z)$ が求まる。

$$G_{emap}(z) = G_{ma}(z) + T_p \times G_{dif}(z) \cdots (8)$$

しかし、不規則な変動を振舞う時系列を単純に微分すれば、予測値が急激に変動して移動平均の予測とはかけ離れたものになる。これを改善するために、ここでは以下のような M 分割 N 点 EMAP モデル⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾を考案した。

〈4・4〉 M 分割 N 点 EMAP モデル M 分割 N 点 EMAP モデルの微分処理の概略は図 5 のようになり、その手順は以下になる。まず、入力時系列 $X(z)$ をサンプリング期間 (NT_s) 内で等間隔に M 分割し、各分割領域内で移動平均を求め、これにより M 個の移動平均値を得る。次に、これらの隣り合う移動平均値を時間的に新しい順に減算し、 $M-1$ 個の移動平均の差を求める。そして、 $M-1$ 個の差の各々に重み関数 ω_k を乗じ、再び加算することで、サンプリング期間における入力の平均的な増加分を求める。さらに、これを各移動平均値の時間的間隔 NT_s/M で割ることで、次式のような仮微分伝達関数 $\hat{G}_{dif}(z)$ が求まる。

$$\hat{G}_{dif}(z) = \frac{1}{T_s} \left(\frac{M}{N} \right)^2 \frac{(1 - z^{-\frac{N}{M}})^2}{1 - z^{-1}} \sum_{k=1}^{M-1} \omega_k z^{-\frac{k-1}{M}N} \cdots (9)$$

図 5 M 分割 N 点 EMAP モデルの微分処理 ($M=8$)
Fig. 5. Differential processing of M division N points EMAP model ($M=8$).

また、重み関数 ω_k については、信頼性が高く、できるだけ新しいトレンドを求めるように選ぶ必要がある。ここでは、次式のような直線重み関数を定義する。

$$\omega_k = \frac{2(M-k)}{M(M-1)} \left(\sum_{k=1}^{M-1} \omega_k = 1 \right) \cdots (10)$$

これは、最新のトレンドに強い重みを置くだけでなく、過去のトレンドにより信頼性を高めることができる。

以上より、 M 分割 N 点 EMAP モデルのパルス伝達関数 $\hat{G}_{emap}(z)$ は、次式のように表わされる。

$$\hat{G}_{emap}(z) = G_{ma}(z) + T_p \times \hat{G}_{dif}(z) \cdots (11)$$

これより、 T_p を N 点 MA モデルの群遅延時間 $(N-1)T_s/2$ とした場合の周波数応答 $\hat{G}_{emap}(j\omega)$ は下式のように表わされ、サンプリング点数を N/M 点とした MA モデル (N/M 点 MA モデル) の周波数応答と比較して図 6 に示す。

$$\begin{aligned} \hat{G}_{emap}(j\omega) \\ = \frac{\sin \frac{N\omega T_s}{2}}{N \sin \frac{\omega T_s}{2}} e^{-j \frac{N-1}{2} \omega T_s} \\ + (N-1) \left(\frac{M}{N} \right)^2 \frac{\sin^2 \frac{N\omega T_s}{2M}}{\sin \frac{\omega T_s}{2}} \sum_{k=1}^{M-1} \omega_k e^{j(\frac{\pi}{2} - \frac{2kN-M}{2M} \omega T_s)} \cdots (12) \end{aligned}$$

振幅特性は、低周波域の振幅に対して増幅動作を行ない、高周波域になるほど N/M 点 MA モデルの特性に近づいている。直流分に対するゲインについては、 N/M 点 MA モデルと同様に 0 dB であるため直流成分の増幅を行なわな

$$(N = 1920[\text{point}], M = 8, T_s = 0.5[\text{sec}], T_p = (N - 1)T_s/2[\text{sec}])$$

図 6 M 分割 N 点 EMAP モデルの周波数応答
($T_p = (N - 1)T_s/2$)

Fig. 6. Frequency response of M division N points EMAP model ($T_p = (N - 1)T_s/2$).

いが、図 6 では 2.5 mHz までの周波数に対してのみ増幅を行なう特性になっている。一方、 M 分割 N 点 EMAP モデルの位相特性は、振幅特性の零点の近傍以外では、 N/M 点 MA モデルの特性（直線位相特性）とおよそ一致する。これは一つあたりの分割領域内で生成される移動平均値が N/M 点 MA モデルの出力となるからである。これより M 分割 N 点 EMAP モデルは、振幅値の増幅作用により N 点 MA モデルの群遅延時間後の出力と近似的に一致させることができる。

また、予測対象時間 T_p をさらに大きくすれば、さらに先の予測が期待でき、以下のシミュレーションでは T_p を MA モデルの群遅延時間と FC の遅れ時間の和にすることで、FC が出力すべき平滑電力を予測している。

5. シミュレーションによる検討

PV, FC, SMES を用いた新型分散電源システムの運用に EMAP モデルを適用させるため、シミュレーションにより、新型分散電源システムの基本的な応答動作を確認する。そして、EMAP モデルにより FC を運用し、SMES の放出エネルギーの変動から、本システムに必要となる SMES の容量を定める。

〈5・1〉システムの過渡応答特性

〈5・1・1〉PSIM によるシミュレーション 表 1 に示す設計仕様で上記の動作を実現できるように各構成機器を設計し、下記の動作 (a)～(c) についてパワーエレクトロニクス制御専用シミュレーションソフト PSIM により、本システムの基本的な応答動作を確認した。尚、シミュレーションの際には、SMES を小規模のマイクロ SMES と想定している。

(a) 双方向コンバータによる負荷変動補償 時刻 1.0 sec において、負荷 A (200 kW, 204 kVar) が 50 kW, 51 kVar 上昇した場合、双方向コンバータにより無効電力を補

図 7 双方向コンバータによる負荷変動補償

Fig. 7. Compensation of load fluctuation by bi-directional converter.

図 8 双方向コンバータによる SMES の充電

Fig. 8. Charging of SMES by bi-directional converter.

図 9 PV, FC, SMES による負荷 B への電力供給

Fig. 9. Electric power supply to load B by PV, FC and SMES.

償しながら、上昇分を SMES の貯蔵電力を用いて補償する。

(b) 双方向コンバータによる SMES の充電 同時刻において、双方向コンバータにより無効電力を補償しながら、上位系から新型分散電源システムへ一定の電力 20 kW を供給し、SMES の充電を行なう。

(c) PV, FC, SMES による負荷 B への電力供給 FC 出力が 100 kW で一定、PV 出力が 100 kW 近傍で不規則に変動している場合、SMES により変動を補償することで、負荷 B へ一定の電力を供給する。

〈5・1・2〉過渡応答特性に関する考察 上記の動作 (a)～(c) についてのシミュレーション結果をそれぞれ図 7～図 9 に示す。

動作 (a) に関しては、図 7 から、負荷 A の上昇による有効分、無効分の増加を双方向コンバータの有効電力 P_{bd} 、無効電力 Q_{bd} により補償し、上位系への負担を抑えていることが確認できる。

また、動作 (b) に関しては、図 8 から、双方向コンバー

図 10 シミュレーションモデル
(予測値を用いる場合)

Fig. 10. Block diagram of the simulation model (with prediction).

図 11 シミュレーションモデル
(移動平均値を用いる場合)

Fig. 11. Block diagram of the simulation model (without prediction).

タにより無効電力補償を行ないながら、上位系から有効分 20 kW のみを一定で供給し、これより SMES を充電可能であることがいえる。以上の系統連系の視点からは、新型分散電源システムが常時、上位系から見ると無効電力を必要しない、変動の少ないシステムであるといえる。

一方、動作 (c) に関しては、図 9 から、PV 出力 P_{pv} が変動しても、その速い変動成分が SMES の出力 P_{smes} により補償され、負荷 B へ一定の電力 P_{lb} を供給していることが確認できる。尚、負荷 A と負荷 B が共に急変した場合も、SMES によりその変動を補償可能であることも確認している。以上から、新型分散電源システムが負荷 B への電力を安定且つ連続的に確保できるといえる。

(5.2) EMAP モデルを用いた FC の運用

(5.2.1) Simulink によるシミュレーション 負荷 B と PV 出力に応じた SMES と FC の協調運用を行なうために、FC の指令値として、 M 分割 N 点 EMAP モデルによる予測値を用いた場合と、振幅特性の高周波域でそれと似た周波数特性を持つ N/M 点 MA モデルによる単純な移動平均値を用いた場合とに分け、次に示す 3 つのケース I~III について、MATLAB/Simulink を用いてシミュレーションを行ない、SMES に求められる容量を検討する。

ケース I : PV 出力の変動が小さい場合

ケース II : PV 出力の変動が大きい場合

ケース III : PV 出力が全くない場合

ここで、 M 分割 N 点 EMAP モデルの入力 $X(z)$ は、(4) 式より、次式を満たす必要がある。

$$X(z) = P_{lb}(z) - P_{pv}(z) = P_{fc}(z) + P_{smes}(z) \cdots (13)$$

シミュレーションの際には、FC をリン酸形 FC^{(15)~(17)} と想定し、予測値を用いる場合は図 10 に示されるモデルを、また、単純な移動平均値を用いる場合は図 11 に示されるモデルを使用して、FC の指令値を算出している。リン酸形 FC の追従性については、改質系の応答性やセルの寿命等のファクターを配慮する必要はあるが、仮に目標と

($N=1920[\text{point}]$, $M=8$, $T_s=0.5[\text{sec}]$, $\tau=300[\text{sec}]$, $T_p=(N-1)T_s/2+\tau[\text{sec}]$)

図 12 シミュレーションで用いる M 分割 N 点 EMAP モデルの周波数応答 ($T_p=(N-1)T_s/2+\tau$)

Fig. 12. Frequency response of M division N points EMAP model ($T_p=(N-1)T_s/2+\tau$).

る出力が得られるまでの時定数 τ を 300 sec とした一次遅れ系として模擬している。

よって、 M 分割 N 点 EMAP モデルの予測対象時間 T_p は、ランプ入力 $X(z)$ に対するランプ応答により決定されるため、次式のように N 点 MA モデルの群遅延時間 $(N-1)T_s/2$ と一次遅れ系の群遅延時間 τ の和で表わされる。

$$T_p = \frac{N-1}{2} T_s + \tau \cdots (14)$$

各モデルのパラメータに関しては、サンプリング周期 T_s を 0.5 sec とすることで、負荷 B と PV 出力の差の電力成分に対して十分なサンプリングを行ない、分割数 M を 8、サンプリング点数 N を 1920 点として、サンプリング期間を 16 min とすることで、7 mHz 以上の周波数成分を 5 dB 以上減衰させて、各モデルの入力 $X(z)$ に対しての十分な平滑化を行なう。よって、シミュレーションで用いる M 分割 N 点 EMAP モデルの周波数特性は図 12 のように表わすことができる。

尚、シミュレーションで扱う一日の日射量データ及び電力需要データは、実測の値を本システムに合わせて模擬的に加工したものである。

(5.2.2) 協調運用手法に関する考察 上記のケース I~III について、SMES の一日の放出エネルギーに関するシミュレーション結果をそれぞれ図 13(a)、図 14(a)、図 15(a) に、FC の出力 P_{fc} の変動が大きく見られる時間帯の各電力と P_{fc} の変動速度に関するシミュレーション結果をそれぞれ図 13(b)、図 14(b)、図 15(b) に示す。

ケース I では、図 13(a) より、SMES の放出エネルギーが最大で約 7 MJ となっている。これは、(13) 式で定義される入力 $X(z)$ の変動が緩やかであり、 M 分割 N 点 EMAP モデルによる予測値のエラーが比較的小さくなるためであると考えられる。

ケース II では、図 14(a) より、ケース I に比べて SMES

(a) Fluctuations of P_{lb} , P_{pv} and discharging energy of SMES (b) Fluctuations of $P_{lb} - P_{pv}$, P_{fc} , P_{smes} , and dP_{fc}/dt

図 13 ケース I における電力・エネルギーの推移

Fig. 13. Time variations of electric power and energy in case I.

の放出エネルギーの変動が大きくなり、PV 出力の変動が極端に大きい 39 ksec 辺りで約 -14 MJ となっている。また、図 14(b) より、 P_{fc} は比較的大きな変動を示し、 P_{smes} の変動も大きくなっている。この理由として、39 ksec 辺りでは、サンプリング期間内の入力データ $X(z)$ が各時間毎に大きくばらついて分布し、仮微分伝達関数 $\hat{G}_{dif}(z)$ による総合的なトレンドの決定が困難になることが考えられる。

ケース III では、図 15(a) より、SMES の放出エネルギーの大きさが最大で約 3 MJ となり、3 つのケースの中で最も小さいことが確認できる。また、図 15(b) より、 P_{fc} の変動が小さく、SMES は残りの細かい変動を補償するに留まっている。この場合、変動が緩やかな負荷 B のみが予測の要素となるため、M 分割 N 点 EMAP モデルが FC の指令値として最適値を選ぶ可能性が高くなることが考え

(a) Fluctuations of P_{lb} , P_{pv} and discharging energy of SMES (b) Fluctuations of $P_{lb} - P_{pv}$, P_{fc} , P_{smes} , and dP_{fc}/dt

図 14 ケース II における電力・エネルギーの推移

Fig. 14. Time variations of electric power and energy in case II.

られる。

また、ケース II については前述のように、 P_{fc} が比較的大きく変動している (図 14(b) 参照)。リン酸形 FC プラントの負荷変動速度は改質器の応答速度に依存し、200 kW の実用器では 1 kW/sec の負荷変化を許容する。図 14(b) に示されるケース II の P_{fc} 変動速度の最大値 290 W/sec は十分に上記の許容範囲内に収まっており、実用上問題ない。

ここで、SMES の放出エネルギーの peak to peak が SMES の必要最低限の容量となる。よって、放出エネルギーの変動が激しいケース II を基準とすると、本システムには 20 MJ 以上の SMES が望まれる。尚、理想的に予測できたとすれば、1.2 MJ 程度の SMES で可能であることも確認している。

一方、予測値ではなく単純な移動平均値を用いた場合は、

(a) Fluctuations of P_{lb} , P_{pv} and discharging energy of SMES

(b) Fluctuations of $P_{lb} - P_{pv}$, P_{fc} , P_{smes} , and dP_{fc}/dt

図 15 ケース III における電力・エネルギーの推移

Fig. 15. Time variations of electric power and energy in case III.

I~III の何れも放出エネルギーの最大値が予測した場合よりも大きくなり、 P_{pv} の変動が速いため予測が困難なケース II に注目すれば、 M 分割 N 点 EMAP モデルを用いることにより、SMES の容量を約 71 % 低減できることになる。

また、図 15(a) より、PV を用いない、FC と SMES のハイブリッド分散電源⁽⁴⁾ の場合は、数 MJ のマイクロ SMES で充分であることがいえる。これに対し、本稿で述べた PV、FC、SMES による新型分散電源システムは、自然エネルギーを最大限に活かしながら、電力の信頼性を確保する運用を行なうため、SMES の容量がある程度まで大きくなるのは当然とも思われる。

SMES の容量がどの程度必要となるかは、『PV の出力変動をどの程度と見積もるか』、『FC の過渡応答性をどの程度と考えるか』に大きく左右されるが、何れにして

も、本稿で述べた M 分割 N 点 EMAP モデルが SMES の容量低減に有効であることが分かる。

また今回は、FC が PV の不足分を補償する場合のみを想定して検討したため、PV の出力変動の条件によって、FC の稼働率が低くなる場合が見られる。しかし、FC の稼働率は運用方法次第で向上させることが可能である。例えば、負荷 A に対して新型分散電源システムが負荷変動を補償するだけでなく、FC が出力の一部を負荷 A に供給するような運用を行えば、FC の稼働率をさらに向上させることが期待できる。この場合は、緩やかに変動する電力を双方向コンバータで負荷 A に供給するので、柔軟な系統連系を行なうことが可能である。

6. まとめ

本稿では、新エネルギーを用いた新型分散電源システムの問題点を述べ、その改善策として EMAP モデルを提案し、これを具体的に PV、FC、SMES を用いた新型分散電源システムに適用した結果、シミュレーションにより下記の結論が得られた。

(1) 協調運用、即ち、FC と SMES の各々の応答特性に適した出力分担が可能になり、且つ、SMES の容量を低減できることが MATLAB/Simulink によるシミュレーションにより明らかになった。

(2) EMAP モデルで運用した場合も、FC の応答速度は実用器の許容範囲内であることが明らかになった。

尚、今回検討したシステムでは、電流源特性を持つ SMES を I/V 変換することで電圧形変換器を駆動しているので、本システムの今後の応用・展開としては、SMES の代わりに、例えば電気二重層キャパシタのような電圧源形電力貯蔵装置を用いた場合にも、同様な方法の適用が可能である。(平成 14 年 2 月 27 日受付、平成 14 年 11 月 25 日再受付)

文 献

- (1) K. Nara and J. Hasegawa: "A New Flexible, Reliable and Intelligent Electrical Energy Delivery System", *T. IEE Japan*, Vol.117-B, No.1, pp.47-53 (1997-1) (in Japanese)
奈良・長谷川:「新しい柔軟な電気エネルギー流通システム」, 電学論 B, 117, 1, pp.47-53 (1997-1)
- (2) N.G. Hingorani: "Introducing Custom Power", *IEEE Spectrum*, Vol.32, No.6, pp.41-48 (1995-6)
- (3) T. Sasaki, H. Kita, R. Hara, E. Tanaka, and J. Hasegawa: "Interior Structure of Quality Control Center at the Low Voltage Side Considering the Power Conditioning by SMES", *T. IEE Japan*, Vol.121-B, No.10, pp.1353-1360 (2001-10) (in Japanese)
佐々木・北・原・田中・長谷川:「SMES によるパワーコンディショナ機能を考慮した電力改質センター低圧側内部構成」, 電学論 B, 121, 10, pp.1353-1360 (2001-10)
- (4) R. Nojima, I. Takano, and Y. Sawada: "Transient Performance of a New-type Hybrid Electric Power Distributed System with Fuel Cell and SMES", *IEEE Proc. IECON'01*, Vol.2 of 3, pp.1303-1308, Denver, Colorado (2001-11)
- (5) O. Ishioka, Y. Sato, T. Ishihara, Y. Ueki, T. Matsui, and T. Iizawa: "Development of Electric Load Forecasting System using Neural Networks", *T. IEE Japan*, Vol.120-B, No.12, pp.1550-1557 (2000-12) (in Japanese)
例えば、石岡・佐藤・石原・植木・松井・飯坂:「NN 応用電力需要予

- 測システムの開発], 電学論 B, **120**, 12, pp.1550-1557 (2000-12)
- (6) T. Monai, I. Takano, H. Nishikawa, and Y. Sawada: "Response Characteristics and Operating Method of a New type Dispersed Power System using Photovoltaic, Fuel Cell and SMES", Proc. 2002 IEEE PES Summer Meeting, Chicago, Illinois (2002-7)
- (7) T. Monai, I. Takano, H. Nishikawa, and Y. Sawada: "A Study on Transient Response Characteristics and Collaborative Operation Methods of New Type Dispersed Power Supply System using Photovoltaic, Fuel Cell and SMES", The 13th Annual Conference of Power & Energy Society, IEE Japan, Vol.A, No.20, pp.128-136 (2002-8) (in Japanese)
毛内・鷹野・西川・澤田:「太陽電池・燃料電池・SMES を用いた新型分散電源システムの過渡応答特性と協調運用手法に関する考察」, 平成 14 年電気学会電力・エネルギー部門大会 (分冊 A), No.20, pp.128-136 (2002-8)
- (8) T. Monai, I. Takano, H. Nishikawa, and Y. Sawada: "Response Characteristics and Operating Methods of New Type Dispersed Power System using PV, FC and SMES", The Papers of Technical Meeting on FTE, IEE Japan, FTE-02-02, pp.9-15 (2002-2) (in Japanese)
毛内・鷹野・西川・澤田:「PV・FC・SMES を用いた新型分散電源システムの応答特性とその運用」, 電気学会新エネルギー・環境研究会資料, FTE-02-02, pp.9-15 (2002-2)
- (9) T. Ito, N. Ishikawa, H. Inaka, M. Kuki, M. Watanabe, and M. Yabuki: "Development of secured power system using fuel cell power plant", Proc. the 6th FCDIC symposium, pp.98-104 (1999-5) (in Japanese)
伊藤・石川・伊中・九鬼・渡辺・矢吹:「燃料電池を用いた高信頼電源システム」, 第 6 回 FCDIC シンポジウム, pp.98-104 (1999-5)
- (10) N. Kawakami, Y. Ito, and M. Yabuki: "Development of Secured power supply system using Fuel Cell", Proc. the 8th FCDIC symposium, pp.165-169 (2001-5) (in Japanese)
川上・伊東・矢吹:「燃料電池による高品質電源応用技術の開発」, 第 8 回 FCDIC シンポジウム, pp.165-169 (2001-5)
- (11) M. Watanabe and H. Oshima: "Power Conditioning System for Fuel Cell Power Plant", 1999 National Convention Record IEE Japan—Industry Application Society—, Vol.II, S.7-4, pp.S.37-S.40 (1999-8) (in Japanese)
渡邊・大島:「燃料電池発電用電力変換装置の動向」, 平成 11 年電気学会産業応用部門大会, Vol.II, S.7-4, pp.S.37-S.40 (1999-8)
- (12) Y. Suzuki, I. Takano, and Y. Sawada: "Photovoltaic Power Generation System equalized by EDLC with Moving Average and Data Processing", The Papers of Technical Meeting on FTE, IEE Japan, FTE-02-01, pp.1-7 (2002-2) (in Japanese)
鈴木・鷹野・澤田:「移動平均法を用いた EDLC による PV システムの出力平準化」, 電気学会新エネルギー・環境研究, FTE-02-01, pp.1-7 (2002-2)
- (13) H. Akagi, Y. Kanazawa, K. Fugita, and A. Nanba: "Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power and its Application", T. IEE Japan, Vol.103-B, No.7, pp.483-490 (1983-7) (in Japanese)
赤木・金澤・藤田・難波江:「瞬时无効電力の一般化理論とその応用」, 電学論 B, **103**, 7, pp.483-490 (1983-7)
- (14) Y. Murakami and T. Ise: "Power inverter for SMES—Current and Voltage Type", The Papers of Technical Meeting on SPC, IEE Japan, SPC-99-28, pp.1-4 (1999-1) (in Japanese)
村上・伊瀬:「SMES (超伝導電力貯蔵) 用電力変換装置 電流型と電圧型の比較」, 電気学会半導体電力変換研究, SPC-99-28, pp.1-4 (1999-1)
- (15) H. Niikai, T. Urata, K. Hara, and I. Tomihara: "The Development of PAFC for The Markets and Our effort to Spread The Promotion of PAFC in The Gas Organization", Proc. of the 8th FCDIC symposium, pp.129-132 (2001-5) (in Japanese)
新飼・浦田・原・富原:「ガス業界におけるりん酸形燃料電池の市場導入展開及び普及促進への取り組み」, 第 8 回 FCDIC シンポジウム, pp.129-132 (2001-5)
- (16) T. Aoki, Y. Ogami, T. Taniguchi, Y. Iwasaki, and H. Nishikawa: "History of PAFC Fuel Cell Performance Degradation Mode", T. IEE Japan, Vol.119-B, No.4, pp.500-506 (1999-4) (in Japanese)
青木・小上・谷口・岩崎・西川:「リン酸形燃料電池の劣化モードの経時変化」, 電学論 B, **119**, 4, pp.500-506 (1999-4)
- (17) H. Nishikawa, T. Aoki, Y. Oka, and T. Taniguchi: "Method for Accelerated Lifetime Testing of phosphoric acid fuel cell", T. IEE Japan, Vol.122-B, No.1, pp.47-51 (2002-1) (in

Japanese)

西川・青木・岡・谷口:「りん酸形燃料電池の加速寿命試験方法」, 電学論 B, **122**, 1, pp.47-51 (2002-1)

付 録

pq 理論⁽¹³⁾

三相 3 線式の非接地系において, 三相瞬時相電圧 e_a, e_b, e_c を次式より $\alpha\beta$ 軸上の瞬時電圧 e_α, e_β へ変換する (三相/二相変換)。

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \dots\dots\dots (付 1)$$

ただし

$$[C] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (付 2)$$

同様に, 三相瞬時線電流 i_a, i_b, i_c を三相/二相変換すると

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \dots\dots\dots (付 3)$$

瞬時実電力 p と瞬時虚電力 q は次式のように定義される。

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \dots\dots\dots (付 4)$$

上記の p, q を任意の補償電力 p^*, q^* に加工した場合, 次式により補償電流 i_a^*, i_b^*, i_c^* が求められる。

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = [C]^{-1} \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p^* \\ q^* \end{bmatrix} \dots\dots\dots (付 5)$$

毛内 俊 晴 (学生員) 1978 年 12 月 3 日生。2001 年 3 月工学院大学工学部電気工学科卒業。同年, 同大学院工学研究科修士課程進学, 現在に至る。主として, 分散電源に関する研究に従事。2003 年 4 月富士電機(株)入社予定。IEEE student member。

鷹野 一 朗 (正員) 1959 年 9 月 11 日生。1989 年工学院大学大学院工学研究科博士課程修了(電気工学専攻)。現在, 工学院大学電気工学科助教授。工学博士。主として, イオンビームを用いた薄膜形成の研究に従事。応用物理学会, 表面技術協会, 電子情報通信学会会員。

西川 尚 男 (正員) 1940 年 4 月 23 日生。1965 年 3 月北海道大学電気工学科修士課程修了。同年 (株) 東芝に入社。主として研究所にて、しゃ断器, 中圧開閉装置, リン酸形燃料電池の開発に従事。工学博士。IEEE 会員。2001 年 9 月より東京電機大学特別専任教授。

澤田 芳 夫 (正員) 1938 年 1 月 22 日生。1960 年 3 月東京大学電気工学科卒業。同年 4 月東京芝浦電気 (株) (現 (株) 東芝) 入社。同社重電技術研究所にて、直流送電サイリスタ変換装置, 回転機, 超伝導, 核融合装置などの研究開発に従事。1995 年 4 月より工学院大学電気工学科教授。新エネルギー変換システムの研究に従事。工学博士。IEEE senior member。