

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 4 月 20 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560333

研究課題名(和文) カオスを用いた太陽光発電電力予測と電力平滑化制御法に関する研究

研究課題名(英文) Short-term Prediction of Photovoltaic Generation Power based on Chaotic Behaviors and Power Smoothing Control Methods

研究代表者

船曳 繁之 (Funabiki, Shigeyuki)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：60108123

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：カオス理論を用いた太陽光発電電力の短期間予測法(カオス短期間予測)を開発し、実験により誤差20%の精度で予測できることを明らかにした。次に、カオス短期間予測の欠点である時間遅れを改善するため、差分ベクトルの連なりから予測する手法を提案し、これにエネルギー制御を導入することでエネルギー貯蔵装置容量を約1/4に低減できた。移動平均と指数平滑化に基づいた電力平滑化制御法の比較を行い、エネルギー貯蔵装置低減効果は指数平滑化の方が大きいことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We developed a short-term prediction method for electric power generated by the photovoltaic generation system using the Chaos Theory (Chaos short-term prediction). The experimental verification showed that the proposed prediction method can predict generation power with error of 20%. In the subsequent step, we proposed a novel method to predict generation power using a series of difference vectors for improving the time delay in the chaos short-term prediction. It is found from the comparative study of the power smoothing control methods that the exponential smoothing is superior to the moving average from a viewpoint of the reduction in the storage capacity of energy storage device.

研究分野：工学

キーワード：太陽光発電 発電電力変動 カオス 予測 電力平滑化 エネルギー貯蔵装置

## 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化防止と化石燃料枯渇化の視点から、再生可能エネルギーの利用促進が急務となっている。2008年の洞爺湖サミットで福田首相は、「2030年に2005年の40倍である5,300万kWの太陽光発電(PV)システムの導入(2020年の中途目標:1,400万kW)」を提唱した。さらに、翌年には、中途目標である2020年の目標値を、2,800万kWに上方修正した。この目標実現を目指して、政府は2009年より太陽光発電余剰電力の高価買い取り制度、PVシステム設置補助金制度を実施している。これにより、2008年に比較して2009年のPVシステムの国内出荷量は2.6倍、さらに2010年は3.6倍に増加し、今後さらに大量のPVシステム導入が予想されている。しかし、電力系統に分散設置されるPVシステムのPV電力変動は、電力系統の送配電系統の電力品質に悪影響を与えると危惧されている。更なるPVシステム導入のためには、PV電力変動抑制は早急に解決すべき課題である。したがって、PVシステム導入促進のためにPVシステムまたはPVシステム群にエネルギー貯蔵装置を設置し、変動する電力を抑制することが不可欠となる。

このエネルギー貯蔵装置として、電気二重層キャパシタ(EDLC)やリチウムイオン電池等の二次電池を用いたシステムが提案され<sup>(1)</sup>、電力変動を抑制するシステムの開発が行われている。雲の動きによってランダムに変動するPV電力を抑制する場合、過去のデータからエネルギー貯蔵装置の指令値を決定する手法では、時間遅れのためエネルギー貯蔵装置容量が増大し、システムは高コスト化する。将来の日本の電力事情を解決するキーである大量のPVシステム導入を促進するためには、エネルギー貯蔵装置の容量を低減し、PV電力変動を抑制する制御技術の早急な開発が不可欠である。

PV電力の変動は、一日を通しての日変化、雲の動きに起因した秒から分オーダーの周期を持つ変動がある。この電力変動の内、2分以下の周期をもつ変動成分はGF(ガバナーフリー)、20分以上の周期の変動はEDC(経済負荷配分制御)により現在の発電機と電力系統制御で十分対応可能である。PVシステムで発生する電力変動で問題となるのは、2分から20分程度の周期をもつLFC(負荷周波数制御)領域での成分である。したがって、PVシステムの大量導入により顕在化するこの周波数領域の変動をエネルギー貯蔵システムにより抑制できれば、今後のPVシステム大量導入を促進可能である。

## 2. 研究の目的

本研究では、PV電力変動のカオス性に着目し、カオスの力学的周期性を用いてLFC領域のPV電力変動を予測し、この予測した値と実測データを用いた新しい電力変動抑制制御法を開発する。これによりエネルギー貯蔵装置容量の低減を実現し、PVシステム大量導入時のエネルギー貯蔵装置の実用可能性を高めることを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究は、PV電力のカオス性解析と予測、予測データを用いた電力平滑化手法、研究過程で課題として明らかになった時間遅れの改善法について、以下の手順にしたがって研究を進めた。

### (1) PV電力のカオス短期間予測と電力平滑化制御

① 最大電力点追従(MPPT)制御により得られるPV電力の時系列データを、大気外日射量と大気透過率を用いて基準化し、タケンスの埋め込み定理にしたがって遅れ時間 $\tau$ で $n$ 次元空間に埋め込む<sup>(2)-(4)</sup>。埋め込まれたベクトルのリアプノフ指数解析を行い、カオス性を呈する $\tau$ と $n$ の値を

決定する。特に、不規則変動であるPV電力の予測には、遅れ時間と次元の決定が非常に重要であり、種々の天候下で最も精度良く予測可能な値を決定する。

- ② 決定した遅れ時間  $\tau$  で  $n$ 次元空間に埋め込まれたベクトルから、局所ファジィ再構成法によりPV電力の変動を予測する。そして予測時間（設計するフィルタ特性より約10分先）の予測精度を検証する。
- ③ 現有のシミュレーションソフト PSIM を用いた計算機シミュレーションにより、エネルギー貯蔵装置を有する PV システムで、提案する電力変動抑制制御法（予測値を用いた移動平均法）の検証を行う。電力変動縮小率とエネルギー貯蔵装置の容量低減から提案制御法の評価を行う。

(2) 時間遅れの改善法

時間遅れの更なる改善のため、複数の差分ベクトルの連なりからアトラクタの軌跡を予測する新しい手法を提案する。この新しい予測手法により、時間遅れの改善ができること、そして最も予測効果が期待される PV 電力変動の激しい日で予測精度が向上することの検証を行う。この検証には、設置が進んでいる大容量PVシステムの実測データを用いて実施する。

(3) 種々のフィルタリングを用いた電力平滑化制御法の評価

移動平均に加えて種々のフィルタリング手法による電力平滑化制御の比較と評価も行なう。

4. 研究成果

研究方法で述べた 3 項目に分けて研究成果を纏める。

(1) PV電力のカオス短期間予測と電力平滑化制御

PV 電力の時系列データをタケンスの埋込み定理を用い、5 次元空間に遅れ時間 298 秒で埋込み、この埋め込んだベクトルがカオス性を有するかの検証を行った。次元と遅れ時間の値は、自己相関解析と誤り近傍法を用いて決定した。局所ファジィ再構成法により、PV 電力で問題となる LFC 領域の長周期の約半分（相当する 700 秒先）を予測した。その一例を図 1 に示す（灰色：実測データ、赤線：予測結果）。種々の天候で予測した結果、その予測誤差は平均 20.6% となった。

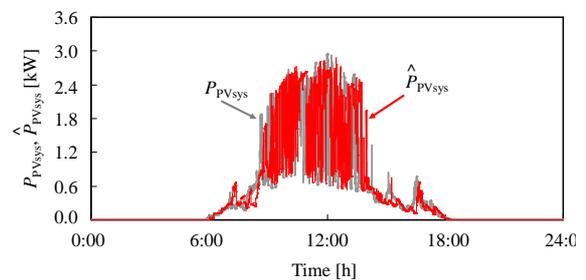


図 1 PV 電力予測実験結果

予測した PV 電力を用いた次式の移動平均法により電力平滑化制御を行なった。

$$p_0^* = \frac{\Delta T}{T_n} \sum_{i=N_n}^0 p_{pvsys}(i) + \frac{\Delta T}{T_f} \sum_{i=1}^{N_f} \hat{p}_{pvsys}(i) \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $p_{pvsys}(i)$  : 過去の電力データ、 $\hat{p}_{pvsys}(i)$  : 予測した電力データ、 $T_p, N_p$  : 過去期間の時間とデータ数、 $T_f, N_f$  : 予測期間の時間とデータ数、 $\Delta T$  : サンプル間隔である。

電力平滑化制御結果を図 2 に示す。すなわち、カオス短期間予測結果を用いた電力平滑化制御  $P^*_{PC,pMA}$  は、予測を用いない従来の移動平均法  $P^*_{PC,MA}$  に比較して時間遅れを 320 秒 (=848-528) 改善できた。これにより、電力平滑化制御に必要なエネルギー貯蔵装置の容量を 30% 低減できることを明らかにした。

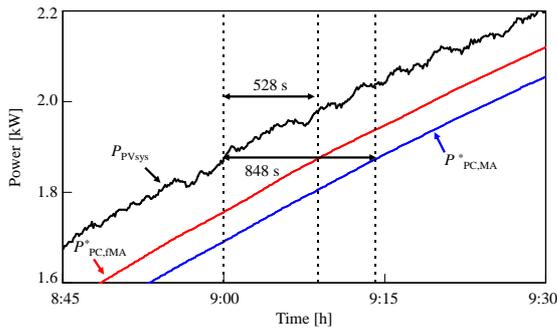
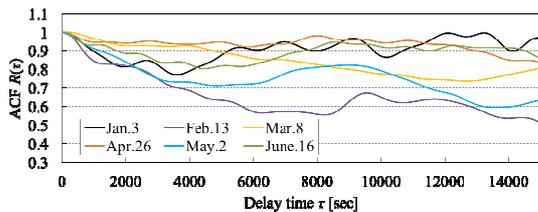


図2 電力平滑化制御結果 (拡大)

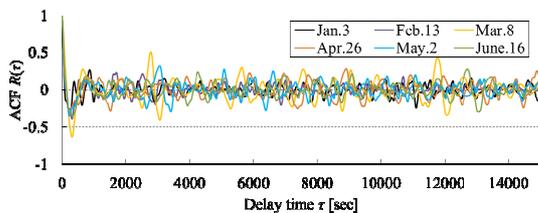
本研究の過程で、PV 電力変動はカオス性を持つ成分と周期性を持つ成分の両者を有する可能性が分かった。そこで、これら二つの成分の分離方法とその成分評価について検討を行なった (雑誌論文①)。GF 以外の PV 電力を次式で 2 つの周波数帯に分離した。

$$y_{\text{prn}}(t) = g_1(t) + g_2(t) \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $g_2(t)$  が LFC 領域成分、 $g_1(t)$  が長周期成分である。図 3 に周期回帰モデルにより  $g_1(t)$  と  $g_2(t)$  に分離した時系列データの自己相関係数  $R(\tau)$  を示す。 $g_2(t)$  は  $\tau$  の増加により急速に零に近づく結果となり、PV 電力変動のカオス性は、LFC 領域成分に起因することが明らかに



(a)  $g_1(t)$



(b)  $g_2(t)$

図3 自己相関係数

なった。一方、長周期成分は変動しながら一定値になり、カオスの性質を持たないことが分かった。

このような PV 電力のカオス性に注目した研究は国内外で実施されておらず、新規かつ先見的な研究である。得られた結果は、PV システム導入で問題となる電力変動を抑制するエネルギー貯蔵装置容量低減の可能性を明示している。

(2) 時間遅れの改善法

カオス短期間予測手法の欠点である時間遅れを更に改善するため、複数個の差分ベクトルの連なりからアトラクタの軌跡を予測する新しい手法を検討した (雑誌論文②)。この新しい予測手法により予測誤差と時間遅れが改善でき、予測精度が向上することを明らかにした。800kW の PV システムの半年間のデータを用いて、PV 電力変動の平滑化制御シミュレーション実験を行った。その結果、変動縮小率は 3.7% 悪化するものの、電力貯蔵装置容量を、(1) で検討した平滑化制御法の約 23% (約 1/4) にまで低減できることを明らかにした。

このように時系列データのカオス性やその差分ベクトルに基づいて短期間予測する手法により、電力平滑化制御に必要なエネルギー貯蔵装置を大幅に低減できることは、今後の大容量 PV システム導入を促進すると期待される。さらに現在、ニューラルネットワークを用いて PV 電力変動を学習することにより、時間遅れを改善する方法について検討している。

(3) 電力平滑化制御法の比較

電力平滑化制御法として、移動平均法 (MA)、修正移動平均法 (MMA) <sup>(5)</sup>、1 次指数関数平滑化法 (ES1)、2 次指数関数平滑化法 (ES2) の評価結果を表 1 に示す。フィルタリング効果とエネルギー貯蔵装置容量の観点から、1 次

表1 システム評価 (晴天日)

	without	with EDLC			
	EDLC	MA	MMA	ES1	ES2
$\epsilon$ [%]		52.8	52.4	50.3	52.5
$E_{EC}$ [kJ]		1687	1317	1208	1531
$P_{LFC}$ [W]	139	1.41	1.50	2.65	0.18

指数平滑化法が最も優れた手法であることを明らかにした(雑誌論文④)。さらにデジタルフィルタである FIR フィルタと IIR フィルタについても、移動平均、指数関数を用いた手法との比較と評価を行った(雑誌論文③)。

< 引用文献 >

- (1) 久保裕政・平野 剛・奥田浩司:「電気二重層コンデンサを用いた太陽光発電の出力平滑化」、平成11年電気学会電力・エネルギー部門大会、No. 110、1999、pp. 334-335
- (2) 五百旗頭正・菅家正康・藤本泰正・鈴木新悟:「カオスの時系列の短期予測のための局所ファジィ再構成法」、日本ファジィ学会誌、Vol. 7、1995、No. 1、pp. 186-194
- (3) J. D. Farmer, and J. J. Sidorowich, "Predicting chaotic time series," *Physical Review Letters*, Vol. 59, No. 8, 1987, pp. 845-848
- (4) M. Casdagli, "Nonlinear prediction of chaotic time series," *Physica D*, Vol. 35, 1989, pp. 335-356
- (5) 鈴木保章・鷹野一朗・沢田芳夫:「修正移動平均を用いた太陽光発電システム出力平滑化の一手法」、電学論 B、Vol. 123、No. 7、2003、pp. 892-893

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 2 件)

- ① 高橋明子、山形彰宏、今井 純、船曳繁

之、太陽光発電電力変動の分離とカオス解析、電気学会論文誌 B、査読有、136 巻、7 号 (掲載決定)

- ② 高橋明子、槇野友久、今井 純、船曳繁之、差分ベクトルを用いた太陽光発電システムの電力平滑化制御、電気学会論文誌 B、査読有、136 巻、3 号、2016、268-274 頁、DOI: 10.1541/ieejpes.136.268
- ③ Yuichi Yoshida, Akiko Takahashi, Jun Imai, Shigeyuki Funabiki, Power Smoothing Control Methods using Moving Average and FIR Filter in Distributed Generation Systems, *Journal of Japan Institute of Energy*, 査読有, Vol. 94, No. 9, 2014, pp. 1051-1056
- ④ 金平知之、高橋明子、今井 純、船曳繁之、分散型電源システムにおける電力平滑化制御法の比較、電気学会論文誌 B、査読有、134 巻、7 号、2014、596-603 頁、DOI: 10.1541/ieejpes.134.596

[学会発表] (計 4 1 件)

- ① 多田雄貴、高橋明子、今井 純、船曳繁之、ARIMA モデルを用いた PV 電力平滑化制御指令値の決定、電気学会全国大会、2016 年 3 月 16 日-18 日、東北大学 (宮城県仙台市)
- ② 吉田雄一、高橋明子、今井 純、船曳繁之、電力平滑化制御に用いるデジタルフィルタの比較、平成 27 年電気関連学会関西連合大会、2015 年 11 月 14 日-15 日、大阪電気通信大学 (大阪府寝屋川市)
- ③ T. Makino, A. Takahashi, J. Imai, S. Funabiki, Reduction of Energy Storage Capacity in a Large-scale Photovoltaic Generation System, *Proceedings of the 6<sup>th</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, 2014. 11. 23-11. 27, 国立京都国際会館 (Kyoto, Japan)

- ④ 山形彰宏、高橋明子、今井 純、船曳繁之、太陽光発電電力の気象変動成分の周期に関する検討、平成 26 年度電気・情報関連学会中国支部大会、2014 年 10 月 25 日、福山大学（広島県福山市）
- ⑤ 青木公佑、高橋明子、今井 純、船曳繁之、ニューラルネットワークを用いた太陽光発電電力予測法の実験的検証、平成 26 年度電気・情報関連学会中国支部大会、2014 年 10 月 25 日、福山大学（広島県福山市）
- ⑥ 青木公佑、高橋明子、今井 純、船曳繁之、遺伝的アルゴリズムを用いた太陽光発電電力予測法のパラメータ最適化、平成 26 年電気学会電力・エネルギー部門大会、2014 年 9 月 10 日-12 日、同志社大学（京都府京田辺市）
- ⑦ K. Shibata, A. Takahashi, J. Imai, S. Funabiki, Short-Term Prediction of Power Fluctuations in Photovoltaic Systems Using Chaos Theory, Proceedings of IEEE PES General Meeting, 2014. 7. 27-8. 1, Tokyo Big Sight (Tokyo, Japan)
- ⑧ 金平知之、高橋明子、今井 純、船曳繁之、分散型電源システムにおける電力平滑化制御法の比較、平成 25 年度電気・情報関連学会中国支部大会、2013 年 10 月 19 日、岡山大学（岡山県岡山市）
- ⑨ 榎野友久、高橋明子、今井 純、船曳繁之、大規模太陽光発電システムの発電電力予測を用いた電力貯蔵装置容量の低減効果、平成 25 年度電気・情報関連学会中国支部大会 2013 年 10 月 19 日、岡山大学（岡山県岡山市）
- ⑩ T. Kanehira, A. Takahashi, J. Imai, S. Funabiki, A Comparison of Electric Power Smoothing Control Methods for the

Distributed Generation Systems, IEEE PEDS 2013, 2013. 4. 25, Kitakyushu International Conference Center (Kitakyushu, Fukuoka Prefecture)

- ⑪ 山形彰宏、高橋明子、今井 純、船曳繁之、太陽光発電電力のカオス短期間予測法の実験的検証、電気学会全国大会、2013 年 3 月 22 日、名古屋大学（愛知県名古屋市）
- ⑫ 榎野友久、高橋明子、今井 純、船曳繁之、大規模太陽光発電システムの発電電力予測、電気学会全国大会、2013 年 3 月 22 日、名古屋大学（愛知県名古屋市）
- ⑬ 金平知之、高橋明子、今井 純、船曳繁之、分散型電源システムにおける移動平均法と指数平滑法を用いた電力平滑化制御法の比較、電気・情報関連学会中国支部大会、2012 年 10 月 20 日、島根大学（島根県松江市）

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ

<http://www.psc.ec.okayama-u.ac.jp/pps.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

船曳 繁之 (FUNABIKI Shigeyuki)

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号：60108123

### (2) 研究分担者

高橋 明子 (TAKAHASHI Akiko)

岡山大学・大学院自然科学研究科・助教

研究者番号：10644213