

Analysis of Output Fluctuation of Solar Power Generation and Detection of Short-Time Fluctuation Period

Hiroki KOBAYASHI^{*1} Toru HARIGAI^{*2‡} Yuto TAKEUCHI^{*1} Hirofumi TAKIKAWA^{*3}
Kazuhiko ITO^{*4} Motohisa HIRATSUKA^{*4}

太陽光発電の出力変動解析と短期出力変動期間検出

小林 宏規¹ 針谷 達^{2‡} 竹内 悠人¹ 滝川 浩史³
伊藤 和彦⁴ 平塚 元久⁴

Abstract

Short-term fluctuations of solar power output via cloud shadows are one of the factors causing difficulty in predicting the output of solar power generation. In this paper, the short-term fluctuations of solar power output are analyzed using a discrete Fourier transform, short-time Fourier transform, and continuous wavelet transform. Based on the frequency analysis results, the necessity for short-term predictions are presented. It was found that continuous wave conversion is most suitable for the analysis of non-stationary waveforms such as the output of solar power generation. From the scalogram obtained by the continuous wavelet transform of the output power waveform of solar power generation, the frequency band corresponding to the short-term fluctuation was determined. The short-term fluctuation time was calculated by applying envelope processing to the absolute values of the spectral intensity in the frequency band, and it accounted for ~29% of the annual solar power generation time. Therefore, it was clear that approximately 29% of the annual solar power generation time requires a power generation prediction interval as fast as the floating speed of cloud shadows.

Keywords: Solar power generation, Power generation prediction, Solar irradiation intensity, Cloud shadow
キーワード: 太陽光発電, 発電量予測, 日射強度, 雲影

1. はじめに

太陽光発電の大量導入にともない、効率的な電力需給調整の必要性が増している。この電力需給調整のひとつとして、太陽光発電の発電電力量予測に基づいた電力取引市場がある。現在の太陽光発電電力の予測に基づいた

電力取引市場において、最も取引間隔の短い市場は、30分単位予測を基に1時間前に取引を行う“時間前市場”⁽¹⁾である。しかし、太陽光発電の発電電力は、発電施設に到来する雲の影（雲影）の影響により、短期かつ急激に変動する⁽²⁻⁵⁾ため、現在の時間前市場で導入している1時間以上前の発電電力予測では、実発電電力との誤差が生まれやすい。予測発電電力と実発電電力の差は、電力の供給過多または不足を生じるため、効率的な電力需給調整を妨げる⁽⁶⁻⁷⁾。現在、ガバナフリー運転により、電力系統に数秒から数分の短期的な変動が生じても安定運用を維持されている。しかし、太陽光発電の大量導入により、電力系統の周波数変動を十分に抑制できなくなる

*1 Development of Electrical and Electronic Information Engineering, Toyohashi University of Technology

*2 Lecturer, Development of Electrical and Electronic Information Engineering, Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibiyaoka, Tempaku, Toyohashi, Aichi 441-8580, Japan

‡e-mail: harigai.toru.un@tut.jp

*3 Professor, Development of Electrical and Electronic Information Engineering, Toyohashi University of Technology

*4 AIM Co.,Ltd.

Received: October 18, 2020, Accepted: February 16, 2021

*1 豊橋技術科学大学 電気・電子情報工学専攻

*2 豊橋技術科学大学 電気・電子情報工学系 講師 (〒441-8580 豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘 1-1)

‡e-mail: harigai.toru.un@tut.jp

*3 豊橋技術科学大学 電気・電子情報工学系 教授

*4 (株) エイム

(原稿受付: 2020年10月18日, 受理日: 2021年2月16日)

ことが予想される⁽⁸⁾。また、出力が平滑化されるならし効果は常に効くとは限らない⁽⁹⁾。そのため、太陽光発電の短期的な変動を解析することは、電力系統を安定運用維持するために非常に重要である。

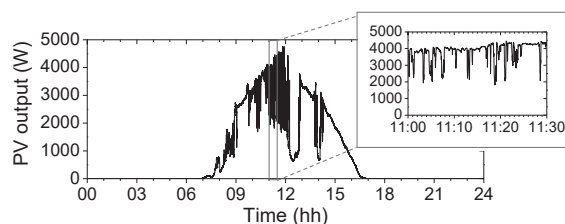
先行研究では、雲の速さを実験的に割り出すことで太陽光発電の短期出力変動を示唆した報告⁽²⁻⁵⁾やならし効果をウェーブレット変換を用いて定量的に評価した報告が挙げられている⁽¹⁰⁾。本研究では、太陽光発電の発電電力が短期的かつ急激に変動している時間が、太陽光発電の発電をしている時間に対し、どの程度の割合を占めるのかを調べ、現在の電力取引市場より短い周期における太陽光発電電力予測の必要性⁽¹¹⁾について検討した。

まず、太陽光発電の出力電力の変動を、周波数解析法を用いて解析し、雲影に起因すると考えられる短期的かつ急激な出力電力変動を表す周波数帯を特定した。次に、この雲影に起因する出力電力の変動を表す周波数帯の現れた時間幅を短期変動時間として抽出した。その後、短期変動時間に対し、太陽光発電施設が日の出から日の入までの発電している時間を有効発電時間とし、有効発電時間に対する短期変動時間の割合を求めた。この短期出力変動時間割合は、太陽光発電の出力電力が雲影によって短い時間内で変動している割合を表すため、この割合から発電電力出力の短期予測の必要性を検討した。

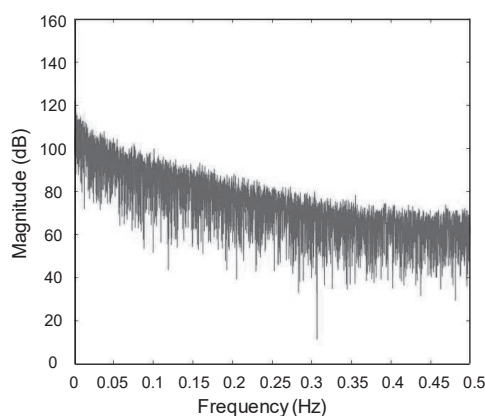
2. 太陽光発電電力波形の周波数解析

太陽光発電の出力電力の変動は、変動時間と変動周波数の2つの要素を持っており、時間により周波数が変化する非定常な波形である⁽¹²⁾。周波数解析の代表的な方法の一つにフーリエ変換がある。フーリエ変換は、時間の関数 $f(t)$ を周波数の関数 $F(\omega)$ に変換するもので、 $f(t)$ を様々な周波数、振幅の三角関数に分解することで波形に含まれる周波数成分の解析を行う。フーリエ変換によって得られた周波数スペクトルは、波形の特徴を解析するために使われることが多い⁽¹³⁾。

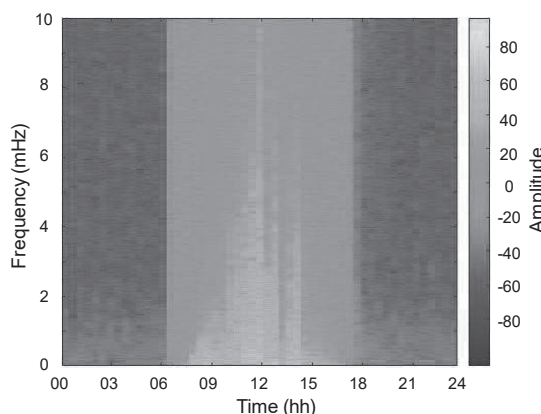
太陽光発電の出力電力波形に対し、離散フーリエ変換を行い、周波数スペクトルを算出した。豊橋技術科学大学自然エネルギー実験棟屋上に設置した太陽電池アレイ(京セラ株式会社, 定格DC出力4.86kW, 1秒毎サンプリング)の2017年1月3日の出力電力波形をFig. 1(a)に示す。Fig. 1(b)は、Fig. 1(a)に示した波形に対し、離散フーリエ変換を行った周波数スペクトルである。Fig. 1(a)から、8:30-9:00 および10:00-12:00, 13:30-14:30の時間帯において、雲影による短期的かつ急激な出力電力の変動が起きていることがわかる。一方で、Fig. 1(b)の周波数スペクトルでは、Fig. 1(a)で確認できた短期的かつ急激な出力電力の変動を示すような特徴的なスペクトルは得られなかった。離散フーリエ変換の前提として、解析対象の波形に対し、周期性が求められることから⁽¹⁴⁾、太陽光発電の出力電力のような非定常な波形に対しては、必要な特徴抽出が困難であった。



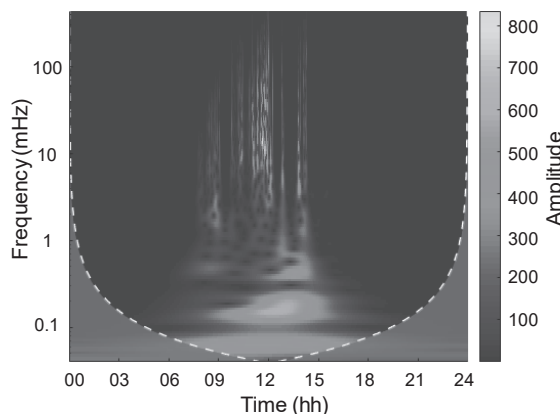
(a) Output power waveform of photovoltaic generation



(b) Discrete Fourier transform



(c) Short-time Fourier transform



(d) Continuous wavelet transform

Fig.1 Photovoltaic output power waveform and its frequency analyses.

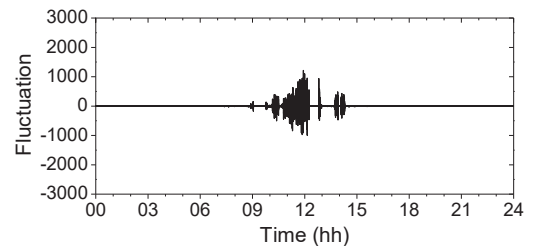
短時間フーリエ変換は、時間と周波数の両方を同時に解析する時間周波数解析法である。一定の大きさの窓関数を用いて波形を切り出し、その切り出した波形にフーリエ変換を適用する。波形に対し、窓関数をずらしながら適用することで、時間情報を持つ解析スペクトルが得られる。Fig. 1(c)は、Fig. 1(a)の波形に対し、短時間フーリエ変換を行い解析したスペクトログラムである。このスペクトログラムでは、窓関数のセグメント長ごとに得られたスペクトルに対し、横軸を時間、縦軸を周波数として、その強度をカラーバーで表す。窓関数には、ハミング窓を用い、セグメント長は 1000 サンプル、オーバーラップ長は 500 サンプルとした。Fig. 1(c)のスペクトログラムでは、10:00-14:30 の時間帯で、2 mHz から 10 mHz の間の高い周波数帯において強いスペクトルが得られた。しかし、Fig. 1(a)の波形が示す短期かつ急激な出力変動の時間帯に対して、短時間フーリエ変換で得られたスペクトルの時間分解能は十分ではなく、短期変動時間を抽出するには、より高い時間分解能が必要である。解析スペクトルの時間分解能を高めるためには、解析に用いる窓関数のパラメータをより詳細に調整する必要がある⁽¹⁵⁾。窓関数の設定は、解析対象となる波形の周期性が低いほど複雑になる。

時間周波数解析法のひとつとして、ウェーブレット変換がある。ウェーブレット変換は、マザーウェーブレットという 1 つの基本関数を拡大縮小および平行移動させることにより、解析対象となる波形に対して、周波数と時間の同時解析を行う。式(1)にウェーブレット変換式を示す。

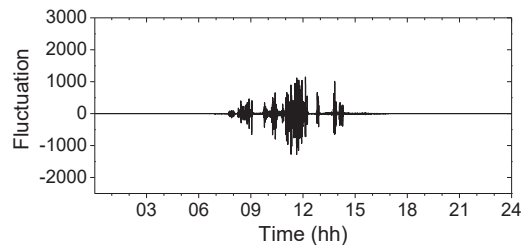
$$W(b, a) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{a}} \varphi\left(\frac{b-a}{a}\right) f(t) dt \quad (1)$$

a は、マザーウェーブレット $\varphi(t)$ を時間方向に拡大縮小する比率を決定するパラメータであり、周波数に相当する。 b は、マザーウェーブレット $\varphi(t)$ を時間方向に平行移動させることで、解析対象とする波形内の解析位置を変更するパラメータである。 a を大きくすると、波形を時間方向に縮小して、窓関数の時間幅定義域が狭まる代わりに周波数が高くなる⁽¹⁶⁾。短時間フーリエ変換では、解析する波形データに対し、窓関数は固定であるが、ウェーブレット変換では、 a を周波数帯毎に変更することで、非定常な波形に対しても解析対象とする各波形に適した時間分解能と周波数分解能を調整可能である。

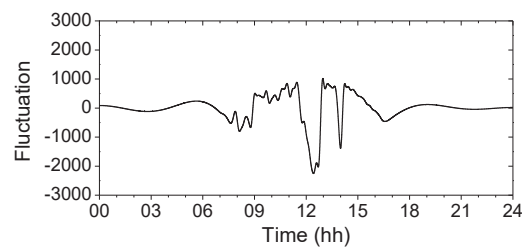
ウェーブレット変換には、連続ウェーブレット変換と離散ウェーブレット変換がある。連続ウェーブレット変換ではマザーウェーブレットの拡大縮小および平行移動の値を連続的に変化させる。一方、離散ウェーブレット変換では、マザーウェーブレットの拡大縮小および平行移動の値を離散的 (2 のべき乗) に変化させることで、解析分解能は低下するが、計算量を少なくする⁽¹⁶⁾。本研究では、解析分解の高い連続ウェーブレット変換を用いた。マザーウェーブレットには、Morse ウェーブレット⁽¹⁷⁾を用いた。



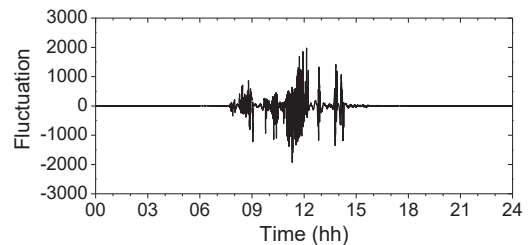
(a) 100–500 mHz



(b) 1–100 mHz



(c) 0.05–1 mHz



(d) 1–500 mHz

Fig.2 Fluctuation components of each frequency band obtained by inverse wavelet transform from Fig. 1(d).

Fig. 1(a)の出力電力波形に対し、連続ウェーブレット変換を行い解析したスカログラムを Fig. 1(d)に示す。スカログラムでは、横軸を時間、縦軸を周波数として、スペクトル強度をカラーバーで表す。Fig. 1(d)を見ると、0.1 mHz–0.3 mHz と 1 mHz–500 mHz の周波数帯で強いスペクトルが得られた。1 mHz–500 mHz の周波数帯では、8:30–9:00 および 10:00–12:00、13:30–14:30 の時間帯において強いスペクトルが見られた。これらの時間帯は、Fig. 1(a)の出力電力波形で確認できた短期かつ急激な出力電力変動の発生時間帯と一致した。出力電力波形の解析に連続ウェーブレット変換を適用することで、周波数別に時間分解能の高い解析結果が得られた。

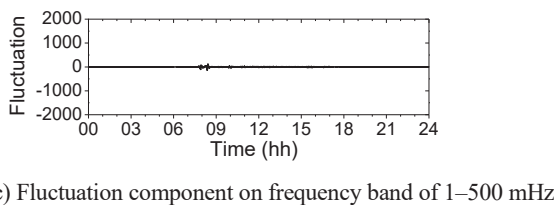
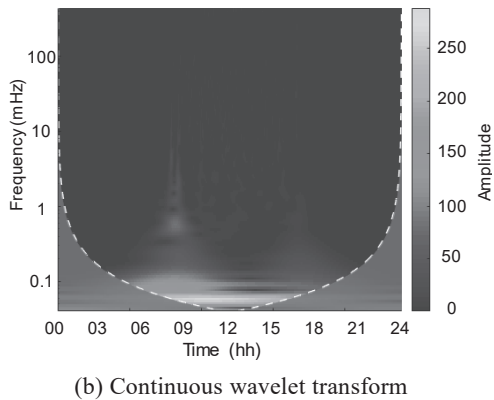
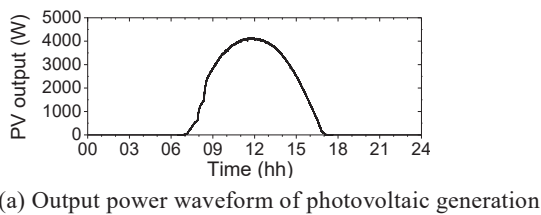


Fig.3 Analysis of output -power waveform on a clear day using continuous wavelet transform.

3. 連続ウェーブレット変換による発電電力の短期変動時間の抽出

太陽光発電の出力電力波形を連続ウェーブレット変換した Fig. 1(d)における4つの周波数帯 100 mHz–500 mHz (周期 2 s–10 s), 1 mHz–100 mHz (周期 10 s–17 min), 0.05 mHz–1 mHz (17 min–333 min), 1 mHz–500 mHz (2 s–17 min) に対し、逆ウェーブレット変換を行い、Fig. 2に示すように出力電力の変動成分を抽出した。100 mHz–500 mHzの高い周波数帯を示す Fig. 2(a)では、Fig. 1(a)に見られる8:30–9:00の間の変動が抽出できていない。Fig. 2(b)のように、抽出対象の周波数帯を1 mHzまで広げることによって、8:30–9:00の時間帯も含め Fig. 1(a)において短期出力変動が見られた時間帯と、抽出した変動成分が高い値を示した時間帯がよく一致した。また、低い周波数帯の Fig. 2(c)では、短期的な変動とは異なり、より中長期的な変動の傾向が抽出された。Fig. 2(d)は、Fig. 1(d)で強いスペクトルが見られた周波数領域全体の1 mHz–500 mHzを含み、周期は2 s–17 minに相当する。この周期は、雲影が太陽光発電施設上空に到達し、過ぎ去るまでの時間とよく一致していた⁽¹⁸⁻¹⁹⁾。したがって、太陽光発電の出力電力波形に対して、連続ウェーブレット変換を用い、適切な周波数帯を選択することで、雲影の到

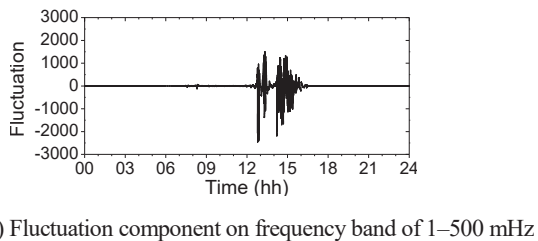
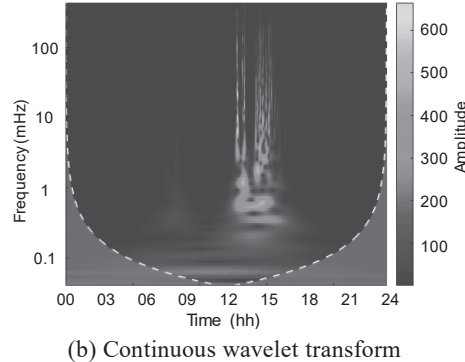
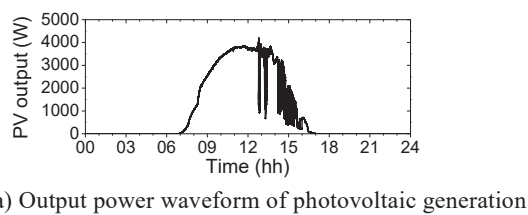


Fig.4 Analysis of output power waveform on a sunny day with clouds using continuous wavelet transform.

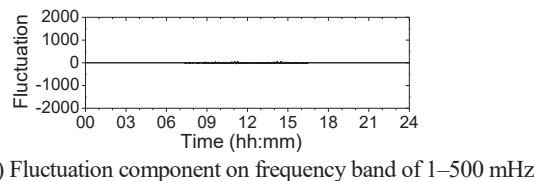
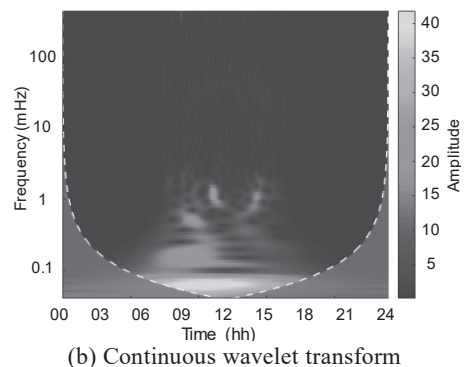
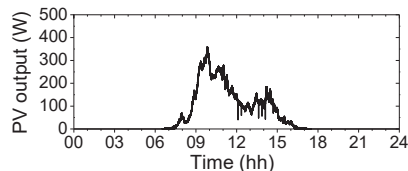


Fig.5 Analysis of output power waveform on a rainy day using continuous wavelet transform.

来に起因する短期かつ急激な出力電力の変動を抽出できたと考える。

快晴と、雲のある晴天、および雨、それぞれの天気の日における発電出力電力の波形と、その短期出力変動成分を、Fig. 3と Fig. 4, Fig. 5に示す。Fig. 3(c)より、短期変動成分はほとんど抽出されなかった。快晴日では、雲影の影響による発電電力の変化がほぼ無いため、変動成分も現れなかったと考えられる。Fig. 4は、Fig. 4(a)に示すように、当該日の午後から出力電力が急激な上下動を繰り返しており、晴れの当該日の午後には雲が多数到来した日である。Fig. 4(b)のスカログラムには、午後の出力変動が示唆されており、1 mHz–500 mHzにおいて Fig. 1(d)と同様の傾向を示していた。Fig. 4(c)では、午後の出力電力の急激な上下動が、短期変動成分として確認できた。Fig. 5に示す雨の日では、Fig. 3の快晴日と同様に、ほとんど短期変動成分は現れなかった。

雨の日の場合、空には雨雲が広がっており、快晴日や晴天日に比べ、発電出力電力は著しく低い。出力電力が低いため、出力変動も小さいことから短期変動成分も現れなかったと考えられる。

4. 短期変動時間割合の算出

雲影に起因する短期かつ急激な出力電力の変動が、年間を通じてどの程度起こっているかを、短期変動成分を時間積算することで求めた。Fig. 6(a)は、Fig. 4(c)の変動成分の絶対値をとったものであり、Fig. 6(b)は、Fig. 6(a)に対して、長さの異なる包絡線処理を行った波形を表している。包絡線処理により、雲影の到来と通過によって生じる短期かつ急激な変動が発生している時間を算出する。包絡線の長さとして、60 sと 120 s, 300 sを検討した。60 sの包絡線では、短く瞬間的な変動時間幅となってしまう、包絡線処理効果を得られなかった。一方で、300 sの包絡線では長すぎるため、得られた包絡線の時間幅に、短期変動の生じていない時間も含んでしまった。したがって、短期変動時間の算出には、120 s 包絡線処理を用いた。得られた包絡線に対し、低出力変動を無効変動としてカットする閾値を設け、Fig. 6(c)に示すように、この閾値以上の値を時間積算し、短期変動時間 t とした。太陽光発電施設において、日の出から日の入りまでの発電している時間を有効発電時間 T とし、(2)式より、その短期変動時間割合 R を求めた。

$$R = \frac{t}{T} \times 100 (\%) \quad (2)$$

解析対象データには、同システムの2014年～2018年の5年間の発電出力電力を用いた。各年の月別短期変動時間割合を Fig. 7に示す。なお、2018年9月は、発電設備のトラブルによるデータ欠損がある。また、各年の8月は、発電設備メンテナンスのため、10日程度のデータ欠損がある。

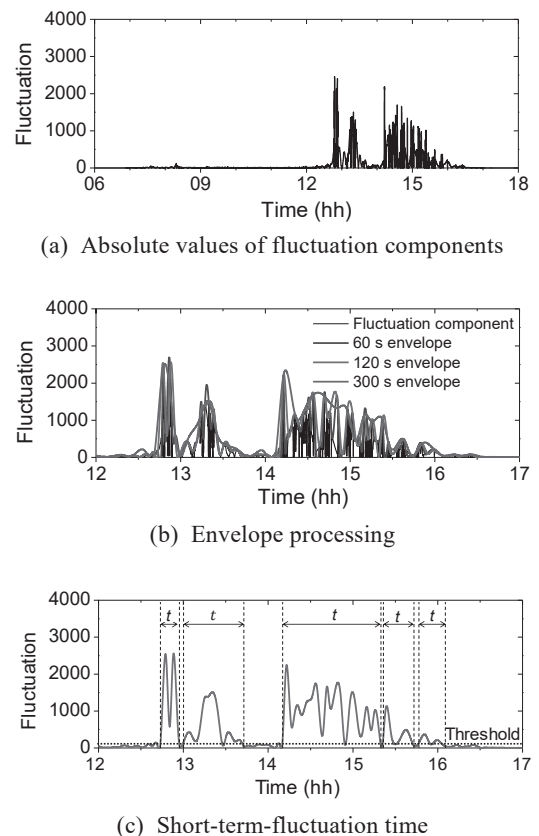


Fig.6 Calculation of short-term-fluctuation time for Fig. 4(b).

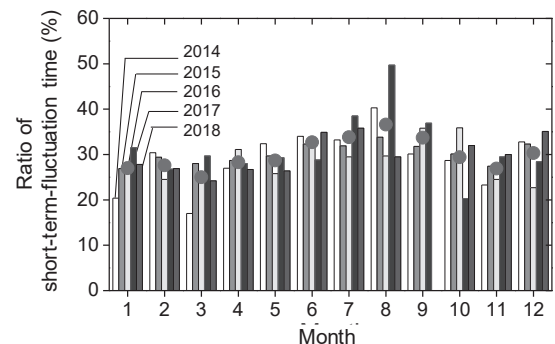


Fig.7 Ratio of short-term-fluctuation time in each month for 5 years.

各年の平均 R は、2014年で29%、2015年で30%、2016年で29%、2017年で31%、2018年で26%であった。また、5年間の平均 R は29%であり、年間の有効発電時間のうち、およそ3割の時間は、太陽光発電の出力電力が短期かつ急激な変動をしていることが明らかになった。月別 R では、他の月に比べ、7月～9月は比較的大きな値を示した。夏季は、積雲や積乱雲などのまとまった厚い雲が発生しやすいことから、発電出力電力の急激な変動が生じやすいと考えられる。したがって、現状の時間前市場では、年間の有効発電時間の約3割の期間、特に夏場において、大きな誤差が生じる可能性がある。

5. まとめ

本研究では、太陽光発電の出力電力の変動を、3つの周波数解析法を用いて解析し、雲影に起因すると考えられる短期的かつ急激な出力電力変動を表す周波数帯を特定することを試みた。

離散フーリエ変換は、解析対象の波形に対し周期性が求められることから、太陽光発電の出力電力のような非定常な波形に対しては、必要な特徴抽出が困難であった。

短時間フーリエ変換は、固定の窓関数を時間方向にずらしながら適用することで、非定常な波形の解析を実現している。解析では、短期的かつ急激な出力電力変動をしている一部の時間帯において強いスペクトルを示した。しかし、得られたスペクトルの時間分解能は十分ではなく、短期変動時間を抽出するには、窓関数のパラメータをより複雑に調整する必要があることがわかった。

一方、連続ウェーブレット変換は、マザーウェーブレットを拡大縮小し、窓関数の大きさを変化させることで、非定常な波形に対し、適切な時間分解能と周波数分解能の調整が可能である。そのため、太陽光発電の出力電力波形に対し、連続ウェーブレット変換を適用することで、雲影に起因して発生する短期かつ急激な出力電力の変動を抽出した。雲影に起因する出力電力の変動は、1 mHz–500 mHzの周波数帯に現れ、逆ウェーブレット変換および包絡線処理から、短期変動時間を算出した。太陽光発電の有効発電時間に対して、短期変動時間の占める割合を5年間のデータから算出した。その結果、約3割の時間で短期的かつ急激な変動が起こっていることが明らかになった。現在、時間前市場で用いられている発電予測では、予測間隔が1時間以上前と長い。そのため、2秒～17分の周期で変動する出力変動を予測に反映しても、1時間の間で雲が状態変化（消滅、途中発生、方向転換）してしまう可能性があるため、実発電電力との誤差が大きくなる。そして、現在の市場において予測誤差を生じさせるような期間は、有効発電時間の約3割の時間存在する。したがって、理想的な需給調整のためには、現状より短い周期で発電電力を予測し、電力取引を行う必要がある。電力取引にかかる時間や雲の移動速度を考慮すると、5分前の電力を5分単位で取引することが妥当だと考える。

謝辞

本研究の一部は、国立研究法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）と東海産業技術振興財団の支援を受けて行われた。

参考文献

- 1) JEPX, 取引概要, (Oct. 2020), <http://www.jepx.org/outline>
- 2) J. L. Bosch, J. Kleissl, Cloud motion vectors from a network of ground sensors in a solar power plant, *Solar Energy*, **95**, 13–20 (2013).
- 3) J. L. Bosch, Y. Zheng, and J. Kleissl, Cloud velocity estimation from an array of solar radiation measurements, *Solar Energy*, **87**, 196–203 (2013).
- 4) V. Fung, J. L. Bosch, and J. Kleissl, Cloud shadow speed sensor, *Atmospheric Measurement Techniques*, **7**, 1693–1700 (2014).
- 5) S. Pelland, G. Galanis, G. Kallos, Solar and photovoltaic forecasting through post-processing of the Global Environmental Multiscale numerical weather prediction model, *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, **21**, 284–296 (2013).
- 6) M. Lave, J. Kleissl, Solar variability of four sites across the state of Colorado, *Renewable Energy*, **35**, 2867–2873 (2010).
- 7) L. M. Hinkelman, Differences between along-wind and cross-wind solar irradiance variability on small spatial scales, *Solar Energy*, **88**, 192–203 (2013).
- 8) K. Tada, T. Sato, A. Umemura, R. Takahashi, J. Tamura, Y. Matsumura, D. Yamaguchi, H. Kudo, M. Niiyama, Y. Taki, Frequency control of power system including PV and wind farms by using output frequency band control of HVDC interconnection line, *The Journal of Engineering*, **18**(7), 4879–4883 (2019).
- 9) 一般社団法人電気学会, 安全・安心社会の電気エネルギーセキュリティ, (Feb. 2021), 39–42
<http://www2.iee.or.jp/~invc2000/committee/INVC2001/report/>
- 10) K. Kawasaki, T. Oozeki, K. Ootani, K. Kitamura, H. Sugihara, K. Kurokawa, S. Nishikawa, 太陽光発電変動特性評価法の研究, *Proceedings of JSES/JWEA Joint Conference*, Vol.2004, 483–486.
- 11) P. Mandal, S. T. S. Madhira, A. Ulhaque, J. Meng, and R. L. Pineda, Forecasting Power Output of Solar Photovoltaic System Using Wavelet Transform and Artificial Intelligence Techniques, *Procedia Computer Science*, **12**, 332–337 (2012).
- 12) O. Perpiñán, E. Lorenzo, Analysis and synthesis of the variability of irradiance and PV power time series with the wavelet transform, *Solar Energy*, **85**, 188–197 (2011).
- 13) N. Kawasaki, K. Otani, and K. Kurokawa, An evaluation method of the fluctuation characteristics of photovoltaic systems by using frequency analysis, *Solar Energy*, **90**, 3356–3363 (2006).
- 14) H. S. Oh, C. M. Ammann, P. Naveau, D. Nychka, and B. L. O. Bliesner, Multi-resolution time series analysis applied to solar irradiance and climate reconstructions, *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, **65**, 191–201 (2003).
- 15) A. G. Shaik, R. R. V. Pulipaka, A new wavelet based fault detection, classification and location in transmission lines, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **64**, 35–40 (2015).
- 16) I. Daubechies, The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis, *IEEE Trans. on Information Theory*, **36**, 961–1005 (1990).
- 17) MathWorks, Morse ウェーブレット, (oct. 2020), <https://jp.mathworks.com/help/wavelet/ug/morse-wavelets.html>
- 18) R. Nomura, T. Harigai, Y. Suda and H. Takikawa, Second by second prediction of solar power generation based on cloud shadow behavior estimation near a power station, *AIP Conf. Proc.*, 1807, 020024–1–10, (2017).
- 19) Y. Takeuchi, T. Harigai, H. Kobayashi, H. Takikawa, K. Ito, M. Hiratsuka, Sensor signal variations during shadow passing in cloud-shadow-behavior estimation method with original solar irradiation sensors, *Journal of Japan Solar Energy Society*, **46**(4), 71–77 (2020).