

系統連系インバータにおける純抵抗負荷推定の 時間短縮および精度向上に関する実機検証

正員 南 政孝^{*a)} 学生員 寺口 直希^{*}

An Experimental Study on Reduced Time and Improved Accuracy for Purely Resistive Load Estimation in Grid Connection Inverter

Masataka Minami^{*a)}, Member, Naoki Teraguchi^{*}, Student Member

(2019年1月25日受付, 2019年4月1日再受付)

The grid connection inverter is built in the PCS (Power Conditioning Subsystem) for the distributed power supply, such as photo voltaic system. Recently, there has been considerable advances in the research on power flow using PCS. In order to adjust the power in the PCS, it is necessary that the grid connection inverter of the PCS predicts the load and output fluctuation in the customer side. Therefore, this paper investigates a load estimation in the grid connection inverter of the PCS. The proposed estimation method adds a superimposing pseudo-white signal to the inverter reference. The validity of the proposed estimation method is verified experimentally. In addition, the pseudo random binary sequence creates a pseudo-white signal for load estimation. As a result, it is experimentally clarified that the proposed method reduces the estimation time and improves the estimation accuracy.

キーワード：系統連系インバータ, 負荷推定, 擬似ランダム信号, PRBS

Keywords: grid connection inverter, load estimation, pseudo-white signal, Pseudo Random Binary Sequence

1. はじめに

近年, 地球温暖化対策の観点から太陽光や風力といった自然エネルギーを利用した分散型電源の電力系統への導入が進んでいる⁽¹⁾。その中でも住宅用として導入される太陽光発電の割合が高いわが国においては, 住宅用太陽光発電システムの開発は非常に重要である⁽²⁾。太陽光発電は天候の影響を受けやすく, 自然条件により瞬時に発電出力が変動するという問題がある⁽³⁾。そこで, 太陽光発電システムが大量に導入された場合について影響と対策について研究が進んでいる^{(4)~(7)}。配電線電圧における安定性⁽⁴⁾やメカニズムの解明⁽⁵⁾, 相互協調技術⁽⁶⁾⁽⁷⁾などが挙げられる。

現在は, 出力変動や負荷変動によって生じる電圧変動や周波数変動を規定値以内に調整するアンシラリーサービスを, 既存の電力系統側が主に提供しているが, 太陽光発電の導入が進み大容量化すると, 分散型電源の有効電力の配電系統への流入や電圧変動により, 電力系統側でアンシラ

リーサービスを提供することが困難になると考えられている⁽⁸⁾。そのため, 今後は需要家側でアンシラリーサービスを提供することが求められる。需要家側でアンシラリーサービスを提供するためには, 分散型電源の無効電力を最適化する必要がある, 配電系統のインピーダンスや負荷の情報が必要となる。

そのため, 需要家側で出力変動や負荷変動による電圧変動や周波数変動を抑制するためには, 「実時間における出力と負荷の推定」と「負荷の状態に応じた電力調整」が必要となる^{(8)~(10)}。太陽光発電の出力に関しては, 推定⁽¹¹⁾や予測⁽¹²⁾の技術がある。一方, 後者のような需要家側と系統側との協調制御⁽¹³⁾に関しては, 電力調整⁽¹⁴⁾や電圧調整⁽¹⁵⁾に基づいた検討が進んでいる。そこで, 本研究では1つ目の「実時間における負荷推定」に着目し, 負荷推定機能を有する系統連系インバータを開発することを目的としている。日本国内では, NEDOによる平成28年~30年度「電力系統出力変動対応技術研究開発事業」が実施され, スマートインバータに14の機能を実装した⁽¹⁶⁾。しかしながら, 制御機能がメインであり, 負荷推定とそれに基づく電力融通という機能は実装されていない⁽¹⁶⁾。また海外では, Prof. D. Dujicらが, 系統連系インバータに正弦波を注入して, その波形を Bartlett Method, Welch Method, and Daniell Method などにより負荷推定する研究を実施している⁽¹⁷⁾。このように負

a) Correspondence to: Masataka Minami. Email: minami@kobe-kosen.ac.jp

* 神戸市立工業高等専門学校 電気工学科
〒651-2194 神戸市西区学園東町 8-3
Kobe City College of Technology
8-3, Gakuenhigashi, Nishi-ku, Kobe 651-2194, Japan

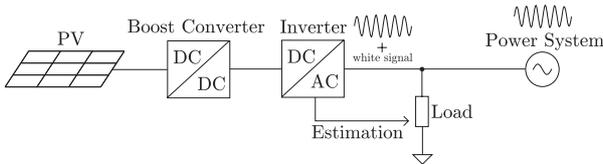


Fig. 1. Concept of load estimation by grid connection inverter in PCS with power system.

荷を直接計測する場合、追加センサによる高コスト化が懸念される。そこで本研究では、負荷に追加センサを用いずに負荷推定する機能を有する系統連系インバータを開発することを目的としている。先行研究において、系統連系インバータの出力電圧指令値と異なる周波数の微小信号を推定信号として重畳することで、負荷推定が可能であることを報告している⁽¹⁸⁾。さらに、精度の高い推定を可能にするため、推定信号に使用する周波数を複数にすることで、同じ測定時間にも関わらずデータ数を増やし、推定精度を向上させる手法を提案し、その効果を検証した⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。

本論文は、文献(19)、(20)の続報であり、Fig. 1 に示す住宅用太陽光発電システムに使用される PCS (Power Conditioning Subsystem) を想定した系統連系インバータを実機により構成し、広い周波数帯域を持つ擬似ランダム信号を利用することで、負荷推定における時間短縮と精度向上を同時に達成することを示す。

2. 主回路および制御手法

本章では、まず Fig. 1 に示した太陽光発電による電力供給システムの概略を説明する。次に、そのシステムの実機検証に用いる回路の主回路構成および回路内の各パラメータの設定条件について記述する。最後に、系統連系の制御手法を詳述する。

(2・1) 太陽光発電による電力供給システム 本節では、本研究で対象としている太陽光発電による電力供給システムの概略について説明する。Fig. 1 に本研究で対象とするシステムの概略を示す。太陽光発電の出力は DC-DC コンバータとインバータを介して系統に連系することを想定しているが、本研究では、系統連系時の負荷推定に着目しているため、太陽光発電と DC-DC コンバータ部分は直流電源で模擬する。また、住宅用太陽光発電システムを想定しているので、連系する系統は単相 AC100 V、60 Hz、高力率としている⁽²¹⁾。電力系統側との電気的絶縁は、インバータ直後の絶縁トランスを用いる方式⁽²²⁾を採用する。

(2・2) 主回路 本節では、前節で述べたシステムの実機における主回路構成と各パラメータの条件を設定する。Fig. 2 に本論文で対象とする系統連系システムの実証実験回路の主回路構成を示す。本システムは直流電源 (菊水電子工業, PWR1600M)、単相インバータ (三菱電機, IGBT モジュール CM75TL-12NF)、絶縁トランス (スワロー電機, SB11-2000E, 100 V:100 V)、LPF (Low Pass Filter; 絶縁トランスの漏れリアクタンス Z_f とフィルムキャパシタ C_f) か

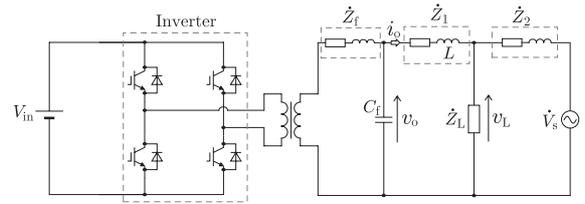


Fig. 2. Circuit structure of grid connection inverter and power system.

Table 1. Circuit parameters.

Input voltage	V_{in}	200 V
Power system voltage	V_s	100 V
Load	Z_L	22, 50 Ω
Interconnection reactor	Z_1	$0.315 + j\omega_b \times 6 \times 10^{-3} \Omega$
Distribution line	Z_2	$10 + j\omega_b \times 36 \times 10^{-3} \Omega$
Leakage impedance	Z_f	$0.35 + j0.155 \Omega$
Filter capacitor	C_f	20 μF
Switching Frequency	f_{sw}	20 kHz

Table 2. Base quantities for circuit.

Voltage	V_b	100 V
Current	I_b	2 A
Power	P_b	200 VA
Angular frequency	ω_b	$2\pi \times 60 \text{ rad/s}$
Impedance	Z_b	50 Ω
Reactor	L_b	133 mH

らの出力を連系リアクトル Z_1 を介して負荷 Z_L に接続し、電力系統側は交流電源 V_s (NF 回路設計ブロック, ES2000U) に配電線を模擬したインピーダンス Z_2 を介して負荷 Z_L に接続する。Table 1 に各パラメータの値を示す。

次に、それぞれのパラメータの選定について詳述する。まず、Table 2 に本システムの基準量を示す。この基準量を元にして連系リアクトル Z_1 と配電線インピーダンス Z_2 を決定する。本論文では、一般的な PCS⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾ † の大きさに合わせて、連系リアクトル L は 6 mH (0.045 p.u.) とする。また、実機に用いる $L = 6 \text{ mH}$ のリアクトルの直列抵抗成分 0.315Ω をここでは Table 1 に記している。次に、6.6 kV 系統の配電線を模擬したインピーダンス Z_2 は 3 km 程度の配電線巨長を想定しており、 $R/Z_b = 0.072 \text{ p.u./km}$ 、 $X/Z_b = 0.093 \text{ p.u./km}$ ⁽²³⁾ の値から $R = 10 \Omega$ 、 $X = \omega_b \times (36 \text{ mH})$ と算出している。その他、絶縁トランスの漏れリアクタンスを模擬したインピーダンス Z_f は LCR ハイテスタ (日置電機, 3532-50) (at 60 Hz) により測定した値としている。さらに、絶縁トランスと並列のコンデンサ C_f により LPF を形成しておりカットオフ周波数は 1.8 kHz に設定している。最後に、需要家を想定した負荷 Z_L は、簡単化のために抵抗成分のみ ($Z_L = R_L + j0$) とし負荷抵抗 R_L の値を 22 Ω と 50 Ω とする。

(2・3) 系統連系手法 系統連系インバータの回路方式や制御などについて様々な研究成果が報告されている^{(26)~(30)}。

† 一般的に連系リアクトルの基準量は 0.1 p.u. 以下であり本論文では 0.045 p.u. としている。

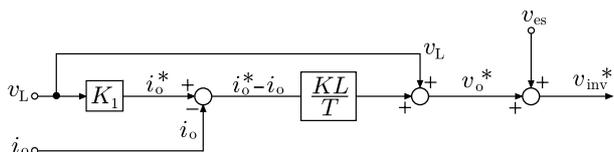


Fig. 3. Control block diagram with estimation signal.

そこで本節では、系統連系インバータに適用するデッドビート制御⁽³¹⁾⁽³²⁾について説明する。デッドビート制御は1 サンプル周期ごとに出力を指令値に追従させる制御である⁽³¹⁾⁽³²⁾。この手法を用いたPWM(Pulse Width Modulation)インバータ⁽³¹⁾⁽³²⁾や整流器⁽³³⁾⁽³⁴⁾などが提案および試作実験されている。系統連系に適用するためには、インバータ出力電圧を制御することで、連系リアクトル電流 i_o を指令値に一致させる方法が用いられている⁽²⁴⁾。

文献(19)にデッドビート制御を用いた系統連系手法の導出は詳述している。ここでは、文献(19)によって得られた関係式を以下に示す。

$$v_o^* = \frac{L}{T}(i_o^* - i_o) + v_L \dots\dots\dots (1)$$

ここで、それぞれの変数は Fig.2 に示す通りであり、上付き*は指令値を、 T はサンプリング周期を意味している。

また、連系リアクトル電流 i_o とその電流指令値 i_o^* の偏差に安定化ゲイン K を乗じることでシステムの安定性を向上できることが知られている⁽³⁵⁾。そのため、本論文では Eq. (1) に安定化ゲイン K を乗じた Eq. (2) を用いてインバータ出力電圧を制御する。ここで、 K の値は文献(35)を参考にして、0.5 とする。

$$v_o^* = \frac{KL}{T}(i_o^* - i_o) + v_L \dots\dots\dots (2)$$

Fig. 3 に系統連系インバータの制御のブロック線図を示す。最後に加えている v_{es} は負荷推定に使用する擬似ランダム信号であり、 v_{es} の条件や生成方法については次章で詳述する。

ここで対象にしている系統連系インバータは、高力率運転を想定しているので、電流指令値 i_o^* と負荷電圧 v_L を同相に設定する必要がある。そこで、負荷電圧 v_L にゲイン K_1 を乗じたものを電流指令値 i_o^* とする。

3. 負荷推定手法

本章では、まず推定信号に使用する擬似ランダム信号について説明する。次に、インバータによる負荷推定の手法について説明する。そして、この推定手法を系統連系インバータに適用する方法について述べる。

〈3・1〉 擬似ランダム信号の生成手法 一般的にシステムのパラメータを推定するには、白色信号が望まれる⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾。その理由としては、白色信号が多数の周波数成分を含んでいるからである⁽³⁷⁾。しかしながら、理想的な白色信号は物理的に実現できないため、人為的に不規則信号を生成する必要がある⁽³⁷⁾。

その擬似ランダム信号を生成する方法として、シフトレ

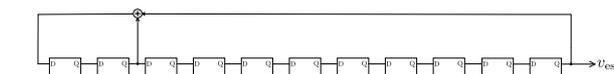
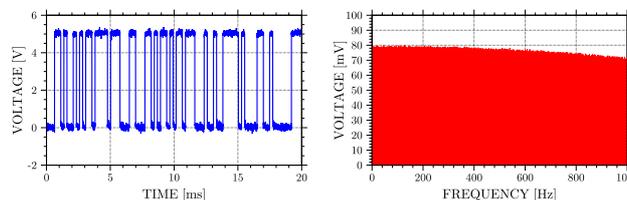


Fig. 4. Pseudo Random Binary Sequence of 11 bit.



(a) Pseudo-white signal by PRBS (b) Frequency characteristics of Fig. 5

Fig. 5. Estimation signal for grid connection inverter.

ジスタ (D Flip-Flop) と EXOR (排他的論理和; EXclusive OR) を用いた $n = 2^m - 1$ の長さを持つ PRBS (Pseudo Random Binary Sequence)⁽³⁸⁾がよく知られている。この PRBS は、腕の物理パラメータの推定⁽³⁹⁾、直流機器における回路インピーダンスの測定⁽⁴⁰⁾、PV の劣化検出⁽⁴¹⁾、バッテリーのパラメータ推定⁽⁴²⁾などに応用されている。

Fig. 4 に、本論文で使用する擬似ランダム信号を生成する回路を示す。ここでは、EXOR が1つだけで構成される 11 bit ($m = 11$) の擬似ランダム信号生成回路を採用している。また、 f_{CLK} をクロック周波数とすると、擬似ランダム信号の周期は $(2^m - 1)/f_{CLK}$ と与えられる。一般に擬似ランダム信号の周期は推定時間の 1~2 周期で決定されることが多い⁽³⁷⁾。そこで、擬似ランダム信号の 1 周期が推定時間 (0.5 s) と一致するように、クロック周波数を $f_{CLK} = 4.094 \text{ kHz}$ とする。ここで、推定時間は先行研究⁽²⁰⁾にあわせて 0.5 s とする。

推定時間を 0.5 s に設定しているため、周波数分解能は 2 Hz となる。前章で述べたインバータ出力端の LPF において、カットオフ周波数が 1.8 kHz であるので、推定には、2 Hz から 1 kHz[†]

までの 500 種類の周波数成分を利用する。そのため、先行研究⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾と比較して、推定時間が 1/30 倍、推定点が 500/(3×30) 倍^{††}になることが推察され、負荷推定における時間短縮と精度向上が期待される。

Fig. 5 に Fig. 4 によって生成した擬似ランダム信号の時間波形の一部 (Fig. 5(a)) とその周波数成分 (Fig. 5(b)) を示す。Fig. 5(b) の結果から、どの周波数成分も一様に分布していることが確認できる。

〈3・2〉 インバータによる負荷推定手法 本節では、具体的な負荷推定の手法について説明する。系統連系するインバータは指令値波形 v_o^* (以降、参照波と呼ぶ) と三角波を比較するパルス幅変調方式によって、参照波を主成分とする波形を出力する⁽⁴³⁾。また、前章のデッドビート制御を

[†] 本論文ではインバータのキャリア周波数が 20 kHz であるため、サンプリングのデータ点を考慮し推定に使用する周波数成分を 1 kHz と設定している。

^{††} 先行研究では 3 つの周波数成分で推定を 30 回実施し、本論文では 500 つの周波数成分で推定を 1 回実施している。

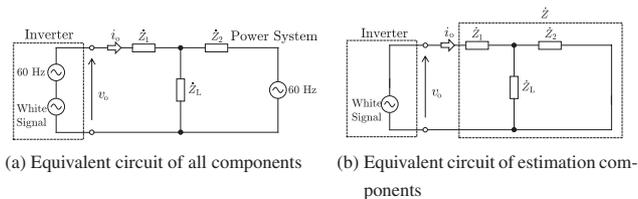


Fig. 6. Equivalent circuit of the grid connection inverter circuit and power system with estimation components.

使用した系統連系インバータでは, Eq. (2) のように参照波 v_o^* が決定されている。そこで本論文で使用する負荷推定手法では, デッドビート制御によって生成している参照波 v_o^* に擬似ランダム信号 v_{es} を重畳することを考える。ここで, 擬似ランダム信号を重畳する際は, 系統連系に影響を与えないように, Fig. 5(a) の信号を参照波の 1% 程度の振幅値に分圧して重畳している。

$$v_{inv}^* = v_o^* + v_{es} \dots \dots \dots (3)$$

Fig. 3 のブロック線図における最終段がこの擬似ランダム信号の重畳である。そして, Eq. (3) の v_{inv}^* を新たな参照波としてインバータを駆動する。

次に, インバータを動作させた際の出力電圧電流波形を測定する。これらの波形に対して離散フーリエ変換を適用することで, 推定に用いる周波数成分の振幅と位相を抽出することができる。実験においては, 推定時間短縮のため, 得られたデータを線形補間して 2 の冪乗個にし, 高速フーリエ変換を適用する。そして, 抽出した電圧電流の振幅比および位相差を計算して, 負荷インピーダンス Z_L を推定する。

〈3・3〉 系統連系時の負荷推定手法⁽¹⁸⁾ 前節までに負荷推定手法について述べてきた。本節では, インバータが系統連系している際の負荷推定の考え方について, 文献(18)に基づき説明する。

Fig. 6(a) にインバータ出力を理想化した等価回路を示す。インバータ出力を LPF に通したことで, 主成分である 60 Hz と重畳した擬似ランダム信号成分のみを持つ交流電圧源として見做すことが出来る。ここで, この回路に対して重ね合わせの原理⁽⁴⁴⁾が適用できると仮定する。Fig. 6(b) に擬似ランダム信号成分[†]に着目した場合の等価回路を示す。電力系統側は擬似ランダム信号の周波数成分を持たないため, インバータの出力側を Eq. (4) の合成インピーダンス Z と考えることが出来る。

$$Z = Z_1 + \frac{Z_L Z_2}{Z_L + Z_2} \dots \dots \dots (4)$$

この式を推定対象である Z_L について解くと次式が得られる。

$$Z_L = \frac{Z_2(Z - Z_1)}{Z_2 - (Z - Z_1)} \dots \dots \dots (5)$$

このようにして, インバータの出力電圧電流波形より, 上述の推定手法で合成インピーダンス Z が推定できれば, Z_L

[†] ただし, 60 Hz の成分以外に注目している。

と Z_2 は既知の値^{††}であるので, Eq. (5) から負荷インピーダンス Z_L を推定可能であると考えている。

4. 負荷推定の実機検証

前章の手法に基づいて, これまで著者らは系統連系インバータが負荷推定可能であることを示した⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。本章では, 擬似ランダム信号を用いることによる効果を実機により検証する。まず, 推定信号の条件について説明する。そして, 実機による負荷推定結果を示し, 擬似ランダム信号を用いることで時間短縮と精度向上が達成されることを示す。

〈4・1〉 実験条件 本節では, 実験条件について説明する。Fig. 2 におけるインバータ出力電圧 v_o , 連系リアクトル電流 i_o , 負荷電圧 v_L の波形をデジタルオシロスコープ (LeCroy, WaveRunner 204MXi) を用いて測定している。先行研究⁽²⁰⁾との比較のため推定に用いるデータは 0.5 s を 1 回分としている。ここでオシロスコープによる測定点は, 125,000 点であり, その結果を線形補間により 65,536 点 (2¹⁶ 点) に置き換えて, 高速フーリエ変換を作用させる^{†††}。

〈4・2〉 実験結果 本節では, 系統連系インバータによる負荷推定結果について説明する。まず, 負荷電圧 v_L と連系リアクトル電流 i_o の波形を表し, 高力率の運転が出来ていることを示すとともに, インバータ出力電圧 v_o の波形を表し, 系統連系に擬似ランダム信号重畳が影響を与えていないことを示す。次に, 擬似ランダム信号の周波数成分における負荷インピーダンス Z_L の推定結果を示し, 負荷推定が可能であることを明らかにする。さらに, 擬似ランダム信号を適用することによって負荷推定における時間短縮と精度向上が達成されることを示す。

〈4・2・1〉 系統連系時の出力波形 ここでは系統連系時のインバータ出力波形について検討する。Fig. 7(a) に負荷抵抗 $R_L = 22 \Omega$ の場合における負荷電圧 v_L , 連系リアクトル電流 i_o , インバータ出力電圧 v_o の波形を示す。この結果から計算すると, 系統連系インバータの力率は 99.52% であり, 高力率の運転が行なえていることが確認された。また, 連系リアクトル電流波形 i_o には大きな脈動や歪みは見られないため, 擬似ランダム信号重畳による出力波形への影響はほとんど無いと考えられる。実際, Fig. 7(b) の結果から擬似ランダム信号重畳に起因するスペクトラムが広い周波数帯域で確認できる^{††††}。しかし, 計算した連系リアクトル電流 i_o のひずみ率も 2.53% と系統連系インバータの

^{††} 本論文では系統連系の際に系統の切替等がないものと仮定し, 配電線インピーダンス Z_2 を既知の値としている。 Z_2 の変動を考慮した推定に関しては今後の課題である。

^{†††} 本論文では負荷電圧 v_L , インバータ出力電圧 v_o , 連系リアクトル電流 i_o の波形の観測および FFT, 負荷推定はオフラインで実施している。

^{††††} 詳細なデータは割愛するが, 擬似ランダム信号を重畳していない際の意図しないノイズによるスペクトルは 1/10 以下であり, Fig. 7(b) 全範囲に亘って存在するスペクトルが擬似ランダム信号のものであることを確認している。

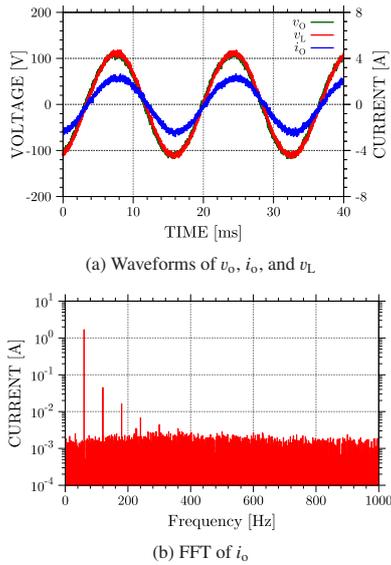


Fig. 7. Waveforms of v_o , i_o , and v_L and frequency characteristics of i_o in Fig. 2 at $R_L = 22 \Omega$.

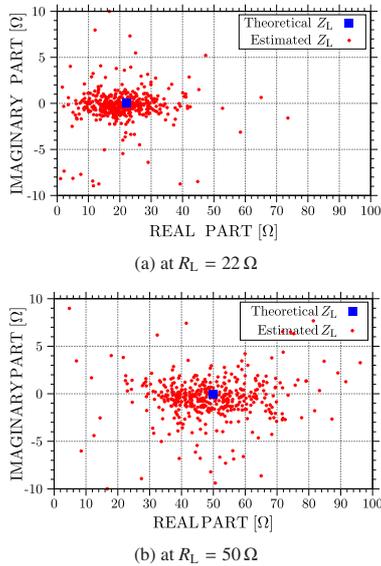


Fig. 8. Estimation results at $R_L = 22 \Omega$ and $R_L = 50 \Omega$.

規定 (5%以下⁽⁴²⁾) を満たしている。

〈4・2・2〉 負荷推定結果とその精度 Fig. 8に負荷推定結果を複素平面上に示す。四角の点が真値 $Z_L = R_L + j0 = 22 \Omega, 50 \Omega$ であり、丸点が1つの周波数成分ごとの推定結果である。500種類の周波数成分があるため、500点の推定結果がそれぞれ得られている。ここで Fig. 8の縦軸のインピーダンスの虚部は全て60Hzに換算した値をプロットしている。この結果より、推定対象の負荷が十分に推定されていることが分かる。Table 3に、推定によって得られた結果を平均したものをまとめる。比較として、先行研究⁽²⁰⁾の結果も記載している。

次に、得られた推定結果に関して評価を行なう。推定精度の評価には、標準誤差 SE (standard error)^{(46)(47)†}を用い

† n 個の結果 x_i ($i = 0, 1, \dots, n$) が得られたとき、平均 \bar{x} , 標準偏差 $s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2}$ から、標準誤差 SE は $\frac{s}{\sqrt{n}}$ と計算される。

Table 3. Evaluation of estimation between previous paper⁽²⁰⁾ and this paper.

	previous paper ⁽²⁰⁾	this paper
at 22 Ω		
Average	22.04 - j0.45 Ω	21.93 - j0.44 Ω
SE	0.46 Ω	0.28 Ω
at 50 Ω		
Average	49.52 - j2.30 Ω	49.39 - j0.99 Ω
SE	1.40 Ω	0.54 Ω

る。Table 3に、標準誤差の値も合わせてまとめている。推定点が先行研究のものと比較して500/90倍になっていることに伴って、標準誤差が先行研究と比較して低減していることが確認できる。さらに、本論文では推定時間が0.5sであるので、先行研究の結果の1/30倍早く推定が可能であることを意味している。

5. おわりに

本論文では、住宅用太陽光発電システムに使用されるPCSを想定した系統連系インバータにおいて、擬似ランダム信号を用いた負荷推定を実機により検証した。その結果、負荷推定において、推定時間が1/30倍になり、推定精度が約2倍になるという結果が得られた。

また、現在の研究段階ではオシロスコープで観測した結果のFFT、負荷推定はオフラインで行なっているが、これらのアルゴリズムのオンライン化も検討課題である。今後の課題は、負荷が純抵抗だけでなく、誘導性負荷などの場合に関しての推定が可能であるかの検証や配電線インピーダンス Z_2 の変動を考慮した推定、重畳する推定信号が推定結果に及ぼす影響について検討する。

さらに、負荷推定機能を有する系統連系インバータによる「実時間における負荷推定」が実現できれば、次に、複数台のPCSが接続された場合に「負荷に応じた電力調整」に関する検討を進めて行く予定である。

謝辞

本研究の実験補助として活動していただきました、塩井太介氏 (2018年3月神戸高専卒業, 同年4月長岡技術科学大学編入学) には、この場を借りて謝意を表します。さらに、本研究の実験環境の一部は、神戸高専道平雅一教授と茂木進一教授から提供していただきました。深く感謝致します。

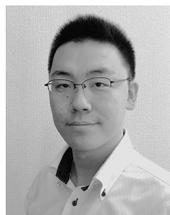
本研究の一部は、JSPS 科研費 JP16K18070 の助成を受けたものである。ここに記して感謝の意を表する。

文献

- (1) 三谷康範, 他: 「分散電源大量導入の今と課題への取り組み」, 電学誌, Vol.138, No.2, pp.74-77 (2018)
- (2) E. Endo: "Long-term Analysis of Factors Influencing the Dissemination of Residential PV Systems in Japan", *IEEE Trans. PE*, Vol.133, No.10, pp.761-769 (2013) (in Japanese)
- (3) R. Komiyama and Y. Fujii: "Assessment of Japan's Optimal Power Generation Mix Considering Massive Deployment of Variable Renewable Power Generation", *IEEE Trans. PE*, Vol.132, No.7, pp.639-647 (2006) (in Japanese)

- (4) K. Ishikawa, et al.: "Fundamental Voltage Characteristics in Power System with a Large Penetration of Photovoltaic Generation", *IEEJ Trans. PE*, Vol.134, No.1, pp.2-8 (2014) (in Japanese)
- (5) T. Matsumura, et al.: "A Study on Rising and Reducing Process of Receiving-end Voltage due to Introduction of Large PV Systems into Distribution Power System", *IEEJ Trans. PE*, Vol.138, No.1, pp.23-29 (2018) (in Japanese)
- (6) Y. Shiohara, et al.: "A Study on Cooperative Voltage and Frequency Control Method using Distributed Generations Considering Large Penetration of Renewable Energy Sources", *IEEJ Trans. PE*, Vol.135, No.8, pp.485-492 (2015) (in Japanese)
- (7) H. Kobayashi: "Trends of PV Operation Techniques Cooperated with the Utility System and Measures of the Utility System Side to Cope with Massive Penetration of PV", *IEEJ Trans. PE*, Vol.137, No.6, pp.415-418 (2017) (in Japanese)
- (8) H. Asano: "Emerging Energy Systems from the End User's Perspective", *IEEJ Trans. PE*, Vol.124, No.1, pp.3-6 (2004) (in Japanese)
- (9) 浅野浩志: 「デマンドレスポンスによる需給安定化」, 電学誌, Vol.132, No.10, pp.688-691 (2012)
- (10) 浅野浩志: 「電力システム運用における需要側資源の活用」, 電学誌, Vol.135, No.11, pp.766-771 (2015)
- (11) T. Hirata, et al.: "Estimation of PV Power Generation with Unknown Operating Rate Variation", *IEEJ Trans. PE*, Vol.134, No.4, pp.360-366 (2014) (in Japanese)
- (12) F. Yamada, et al.: "Prediction of Next Day Solar Power Generation by Gray Theory and Neural Networks", *IEEJ Trans. PE*, Vol.134, No.6, pp.494-500 (2014) (in Japanese)
- (13) H. Miyauchi, et al.: "Analyzing Technique of Power Systems Under Deregulation", *IEEJ Trans. PE*, Vol.127, No.10, pp.1056-1059 (2007) (in Japanese)
- (14) K. Tanaka, et al.: "A Study on Management for a Group of Distributed Generators Aimed at the Cooperation with the Bulk Power System", *IEEJ Trans. PE*, Vol.125, No.7, pp.647-654 (2006) (in Japanese)
- (15) Y. Ueki, et al.: "Evaluation of Contribution for Voltage Control Ancillary Services Based on Social Surplus", *IEEJ Trans. PE*, Vol.128, No.10, pp.1243-1251 (2008) (in Japanese)
- (16) R. Maeda, et al.: "Expectation for Smart Inverter & DERMS for Electric Power System Task", *IEEJ Trans. PE*, Vol.138, No.6, pp.412415 (2018) (in Japanese)
- (17) M. Petkovic, et al.: "Cascaded H-Bridge Multilevel Converter for a High-Power Medium-Voltage Impedance-Admittance Measurement Unit", 12th International Symposium on Industrial Electronics (INDEL 2018)
- (18) 南 政孝・引原隆士: 「負荷推定に基づく分散型電源の系統連系に関する実験的検討」, SCI'13, Vol.57, No.216-1 (2013)
- (19) 塩井太介・南 政孝, 他: 「系統連系インバータによる負荷推定の推定精度向上に関する数値的検討」, SPC-17-186, HCA-17-048, VT-17-028 (2017)
- (20) 塩井太介・南 政孝, 他: 「系統連系インバータによる負荷推定の推定精度向上に関する実験的検証」, 電全大, 4-126 (2018)
- (21) 佐々木敏博: 「IV. 太陽光発電用インバータの現状と課題」, 電学誌, Vol.112, No.12, pp.950-953 (1992)
- (22) 池田祐治: 「個人住宅用太陽光発電システム」, 電学誌, Vol.116, No.12, pp.817-820 (1996)
- (23) D. Iioka, et al.: "Distribution Voltage Rise at Dense Photovoltaic Power Generation Area and its Suppression by SVC", *IEEJ Trans. PE*, Vol.126, No.2, pp.153-158 (2006) (in Japanese)
- (24) T. Yokoyama, et al.: "Current Control for Utility Interactive Inverter Using Multisampling Method Based on FPGA", *IEEJ Trans. IA*, Vol.130, No.1, pp.51-59 (2010) (in Japanese)
- (25) H. Watanabe, et al.: "Development of Electrolytic Capacitor Less Photovoltaic Grid Connected Inverter with Boost-up type Active Buffer Circuit", *IEEJ Trans. IA*, Vol.135, No.5, pp.467-474 (2015) (in Japanese)
- (26) M. Minami and T. Hikihara: "Tracking and Linkage Control Methods of Distributed Generation Based on Passivity Characteristics: Tolerance to Voltage Sag", *IEEJ Trans. IA*, Vol.133, No.7, pp.685-691 (2013) (in Japanese)
- (27) T. Kato, K. Inoue, et al.: "Stability Analysis for Grid-Connected LCL-Type Inverter with Digital Control", *IEEJ Trans. IA*, Vol.136, No.9, pp.615-621 (2016) (in Japanese)
- (28) Y. Noge, J. Itoh, et al.: "Multi-Level Inverter with a Full-Bridge Clamp Circuit for a Single-Phase Three-Wire Grid", *IEEJ Trans. IA*, Vol.136, No.12, pp.944-952 (2016) (in Japanese)
- (29) Y. Hirase, et al.: "Virtual Synchronous Generator Control for Single-Phase Three-Wire Systems", *IEEJ Trans. IA*, Vol.137, No.6, pp.546-552 (2017) (in Japanese)
- (30) H. Watanabe and J. Itoh: "Experimental Verification of Isolated Grid-connected Inverter with Small Passive Component", *IEEJ Trans. IA*, Vol.138, No.1, pp.67-68 (2018) (in Japanese)
- (31) K.P. Gokhale, A. Kawamura, and R.G. Hoft: "Dead Beat Microprocessor Control of PWM Inverter for Sinusoidal Output Waveform Synthesis", *IEEE Trans. IE*, Vol.1A-23, No.5, pp.901-910 (1987)
- (32) A. Kawamura, R. Chuarayapratip, and T. Haneyoshi: "Deadbeat Control of PWM Inverter with Modified Pulse Patterns for Uninterruptible Power Supply", *IEEE Trans. IE*, Vol.35, No.2, pp.295-300 (1988)
- (33) Y. Nishida, et al.: "A Predictive Instantaneous-Current PWM Controlled Rectifier with AC-Side Harmonic Current Reduction", *IEEE Trans. IE*, Vol.44, No.3, pp.337-343 (1997)
- (34) S. Srdic and M. Nedeljkovic: "Predictive Fast DSP-Based Current Controller for Thyristor Converters", *IEEE Trans. IE*, Vol.58, No.8, pp.3349-3358 (2011)
- (35) 渋谷貴之・春名順之介・伊東淳一: 「系統連系システムにおける高速電流制御の安定性に関する検証」, SPC-11-013, pp.71-76 (2011)
- (36) 秋月影雄: 「システム同定的手法」, 電学雑誌, Vol.93, No.8, pp.696-703 (1973)
- (37) 足立修一: 「システム同定の基礎」, 東京電機大学出版局 (2009)
- (38) F.J. MacWilliams and N. JA Sloane: "Pseudo-random sequences and arrays", *Proceedings of the IEEE*, Vol.64, No.12, pp.1715-1729 (1976)
- (39) T. Yamazaki, et al.: "Estimation and Kinetic Modeling of Human Arm using Wearable Robot Arm", *IEEJ Trans. IA*, Vol.136, No.4, pp.254-262 (2016) (in Japanese)
- (40) K. Takechi and H. Kakigano: "A Proposal of Power Decoupling Circuit with Passivity Discrimination Function for Residential DC System", *JIASC2017*, 1-77 (in Japanese)
- (41) 横井健志・武智混司・柿ヶ野浩明: 「PRBS を用いた電力変換器によるインピーダンス測定法に関する検証」, パワーエレクトロニクス学会 第 221 回定例研究会, A-15 (2017)
- (42) A.J. Fairweather, M.P. Foster, and D.A. Stone: "Battery parameter identification with pseudo random binary sequence excitation (PRBS)", *Journal of Power Sources*, Vol.196, No.22, pp.9398-9406 (2011)
- (43) D.G. Holmes and T.A. Lipo: "Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice", Wiley-IEEE Press (2003)
- (44) 奥村浩士: 「エース 電気回路理論入門」, 朝倉書店 (2002)
- (45) 資源エネルギー庁, 電力品質確保に係る系統連系技術要件ガイドライン
- (46) 岸根卓郎: 「理論・応用 統計学」, 養賢堂 (1977)
- (47) 松原 望, 他: 「統計学入門 (基礎統計学 I)」, 東京大学出版会 (1991)

南 政 孝 (正員) 2010年3月京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。2013年3月同大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程修了。2013年4月神戸市立工業高等専門学校助教。2014年4月講師, 2017年4月准教授, 現在に至る。博士(工学)。パワーエレクトロニクスに関する教育・研究に従事。2018年4月~2019年3月スイス連邦工科大学ローザンヌ校パワーエレクトロニクス研究室にて客員教授。平成20年電気関係学会関西支部連合大会 奨励賞, 2017年電気学会産業応用部門優秀論文発表賞を受賞。電子情報通信学会, システム制御情報学会の各会員。



寺 口 直 希 (学生員) 1999年1月4日生。2014年4月神戸市立工業高等専門学校電気工学科入学, 2019年3月神戸市立工業高等専門学校電気工学科卒業。同年4月神戸市立工業高等専門学校専攻科電気電子工学専攻に進学。

