

負荷切り換えに対応可能な系統連系インバータによる 擬似ランダム信号を用いた負荷推定

正員 南 政孝*^{a)} 学生員 寺口 直希*

Load Estimation of Grid Connection Inverter by Pseudo Random Binary Sequence under Load Shift

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

(2020年3月10日受付, 2020年8月21日再受付)

The grid connection inverter is built in the PCS (Power Conditioning Subsystem) for the distributed power supply, such as photovoltaic system. Recently, the researches on power flow using PCS have been advanced. In order to adjust the power of PCS, it is necessary that the grid connection inverter of the PCS predicts the load and output fluctuation in customer side. Therefore, this paper investigates a load estimation in the grid connection inverter of the PCS under load shift. The proposed estimation method adds superimposing pseudo white signal in the inverter reference signal. In addition, the pseudo random binary sequence (PRBS) creates the pseudo white signal for load estimation. As a result, the proposed method achieves the load estimation even under load shift.

キーワード: 系統連系インバータ, 負荷推定, 負荷切り換え, 擬似ランダム信号

Keywords: grid connection inverter, load estimation, load shift, pseudo random binary sequence

1. はじめに

近年, 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おり, 住宅用太陽光発電システムの開発は特に重要である⁽¹⁾⁽²⁾。しかしながら, 分散型電源が大量導入されたシステムにおいては, 発電電力変動や負荷変動により, 電力系統側のみからの電力調整が困難になることが予想される⁽³⁾⁽⁴⁾。そのため, 電力系統側と需要家側の双方からの電力融通が求められている⁽³⁾⁽⁴⁾。

需要家側で発電電力(分散型電源の出力)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調整するためには, 「実時間における出力および負荷の推定」と「負荷の状態に応じた電力調整」が必要となる⁽³⁾⁽⁴⁾。太陽光発電の出力に関しては, 推定⁽⁵⁾や予測⁽⁶⁾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⁽⁷⁾⁽⁸⁾に関しては, 電力調整⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾や電圧調整⁽¹¹⁾に基づいた検討が進んでいる。また, スマート社会を目指した取り組みとして, スマートイ

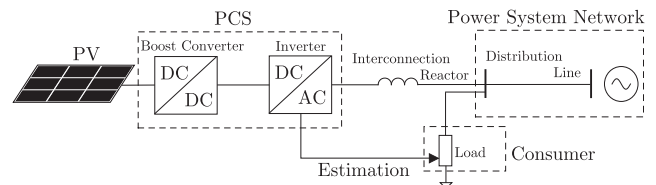


Fig. 1. Concept of load estimation by grid connection inverter in PCS with power system network.

ンバータには電圧安定化や周波数安定化などの自律調整機能が実装されている⁽¹²⁾⁽¹³⁾。しかし, これらは太陽光発電の出力に関する計測・制御が主であり, 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⁽¹²⁾。そこで著者らは, 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に, 負荷を推定する機能を付加する革新的な電子回路技術を提案している^{(14)~(16)}。

類似研究としては, 系統連系インバータの単独運転を検出するための能動信号に高調波電流を用いて高調波インピーダンスを推定する研究⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾やその波形を Bartlett 法, Welch 法, Daniell 法などで負荷推定する研究⁽¹⁹⁾が実施されている。さらに, 周期信号ではなくチャープ信号を掃引することで系統側のインダクタを推定する方式も実施されている⁽²⁰⁾。

このように負荷を直接計測する場合, 追加センサによる

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

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開発している^{(14)–(16)}。

先行研究において、推定信号に擬似ランダム信号を使用する提案手法により、純抵抗の負荷推定が実現可能であることを検証した⁽¹⁴⁾。さらに、誘導性負荷を対象とした場合でも推定が可能であることを明らかにした⁽¹⁵⁾。これまでは推定対象の負荷が一定値として推定機能を評価した。今後、より現実的な状況を模擬する必要がある。

そこで本論文では、負荷の切り換えの発生を模擬し、提案する推定手法の可能性を議論する。その結果、オフラインの処理ではあるが、切り替えにより時間変化する推定対象に対して負荷推定可能であることを示す[†]。

2. 住宅用系統連系システムおよび実証実験回路

本章では、住宅用系統連系システムの回路構成および系統連系手法について説明する。はじめに Fig. 1 に示した住宅用系統連系システムの概略を説明する。次に、このシステムを等価的に表した実証実験回路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〉 住宅用系統連系システム 本節では、本研究で対象としている住宅用系統連系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した。太陽光発電の出力は Fig. 1 に示すように PCS と連系リアクトルを介して電力系統に連系することを想定している。ここで本研究では、系統連系時のインバータによる負荷推定に着目しているため、太陽光発電と PCS 内の DC/DC コンバータ部分は直流電源で模擬する。また、住宅用を想定しているので、連系する系統は単相 AC100 V, 60 Hz とする⁽²¹⁾。電力系統側との電氣的絶縁は、インバータ直後に絶縁トランスを用いる方式⁽²²⁾を採用する。

〈2・2〉 実証実験回路 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。Fig. 1 における太陽光発電パネルと DC/DC コンバータ部分は直流電源 V_{in} (菊水電子工業, PWR1600M) で模擬する。系統連系インバータ (三菱電機, IGBT モジュール CM75TL-12NF) の出力は絶縁トランス (スワロー電機, SB11-2000E, 100 V:100 V) の漏れリアクタンス \dot{Z}_f とフィルムキャパシタ C_f によって構成した LPF (Low Pass Filter) からの出力を連系リアクトル \dot{Z}_1 を介して負荷 \dot{Z}_L に接続する。そして、電力系統側は交流電源 \dot{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 \dot{Z}_2 を介して負荷 \dot{Z}_L に接続する。Table 1 に各パラメータの値を示す。

次に、各々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

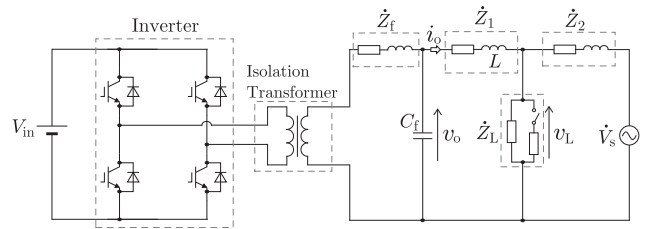


Fig. 2. Circuit configuration

Table 1. Circuit parameters

Input voltage	V_{in}	200 V
Power system voltage	V_s	100 V
Load	\dot{Z}_L	from 22 Ω to 11 Ω
Interconnection reactor	\dot{Z}_1	$0.315 + j\omega_b \times 6 \times 10^{-3} \Omega$
Distribution line	\dot{Z}_2	$11 + j\omega_b \times 36 \times 10^{-3} \Omega$
Leakage impedance	\dot{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

て連系リアクトル \dot{Z}_1 と配電線インピーダンス \dot{Z}_2 を決定する。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、本論文では汎用的な PCS⁽²³⁾⁽²⁴⁾ の大きさに合わせて、連系リアクトルのインダクタンス L は 6 mH (0.045 p.u.) とする。実機に用いる $L = 6 \text{ mH}$ のリアクトルの直列抵抗成分 0.315 Ω 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 \dot{Z}_2 は 3 km 程度の配電線直長を想定しており、 $R/Z_b = 0.072 \text{ p.u./km}$, $X/Z_b = 0.093 \text{ p.u./km}$ ⁽²⁵⁾ の値から $R = 11 \Omega$, $X = \omega_b \times (37 \text{ mH})$ 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 \dot{Z}_f は LCR ハイテスタ (日置電機, 3532-50) により測定した値で $0.350 + j0.155 \Omega$ (at 60 Hz) である。また、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。

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、インバータの系統連系手法および負荷推定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 一般的にシステムのパラメータを推定するには、すべての周波数成分を含んでいる白色信号を推定信号として用いることが望まれる⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾。し

[†] 本論文は、電気学会産業応用部門 SPC/HCA/VT 合同研究会⁽¹⁶⁾ にて報告した内容を加筆修正したものである。

^{††} ここで、 Z_b はインピーダンス基準量、 L_b はリアクタンス基準量、 ω_b は角周波数基準量を表している。また、 R は \dot{Z}_2 の抵抗成分、 X は \dot{Z}_2 のリアクタンス成分を表している。

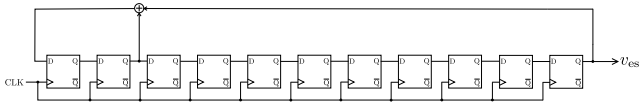


Fig. 3. Pseudo random binary sequence of 11 bit

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、人為的に広い周波数帯域を有する不規則信号である擬似ランダム信号を生成する必要がある⁽²⁷⁾。

その擬似ランダム信号を生成する方法として、シフトレジスタ (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)⁽²⁸⁾ が広く知られている。この PRBS は、腕の物理パラメータの推定⁽²⁹⁾、直流機器における回路インピーダンスの測定⁽³⁰⁾、PV の劣化検出⁽³¹⁾、バッテリーのパラメータ推定⁽³²⁾ などに応用されている。

Fig. 3 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。この回路のパラメータ設定と動作については、文献⁽¹⁴⁾ で詳述している。本研究では、推定には 2 Hz から 1 kHz までの 2 Hz ごとの 500 種類の信号を使用する。

(3・2) デッドビート制御による系統連系 本節では、インバータの系統連系手法について説明する。対象とする系統連系インバータは、デッドビート制御⁽³³⁾⁽³⁴⁾ を用いて系統連系を実現している。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り、PWM インバータ⁽³³⁾⁽³⁴⁾ や整流器⁽³⁵⁾⁽³⁶⁾ に適用されている。ここで、文献⁽¹⁴⁾ によって得られた関係式を以下に示す。

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

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、システムの安定性を向上させるため、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 $K = 0.5$ ⁽³⁷⁾ を乗じた (1) を用いてインバータ出力電圧を制御する。

Fig. 4 に系統連系インバータの制御のブロック線図を示す[†]。本負荷推定手法は、デッドビート制御により生成した信号 v_o^* に推定信号 v_{es} を重畳する。これにより、(2) の v_{inv}^* を新たな参照波としてインバータを駆動する^{††}。

$$v_{inv}^* = v_o^* + v_{es} \dots \dots \dots (2)$$

また、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、参照波の 1% 程度の振幅値に調整して重畳している。

(3・3) 負荷の算出手法 本節ではインバータの出力電圧 v_o と出力電流 i_o から擬似ランダム信号の各周波数成分における負荷インピーダンス \hat{Z}_L を算出する方法を述べる。

[†] ここで、 K_1 は力率を 1 にするための比率、 L は Fig.2 中の連系リアクトルの値を表している。
^{††} 本論文では、デッドビート制御により生成した参照波 v_o^* の振幅値は 5V であり、推定信号 v_{es} の振幅値は 50mV としている。

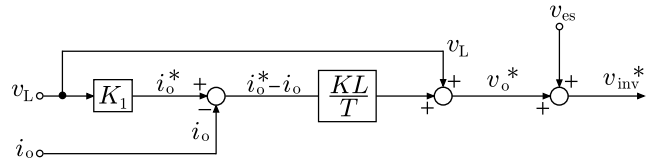


Fig. 4. Control block diagram with estimation signal

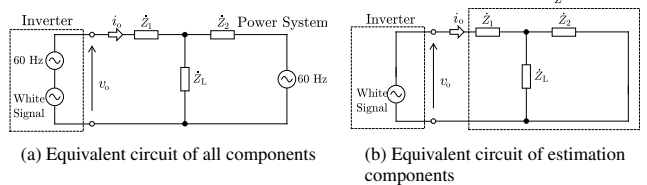


Fig. 5. Equivalent circuit of the grid connection inverter circuit and power system with estimation components

まず、インバータを動作させた際の出力電圧 v_o と出力電流 i_o 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、周波数成分ごとの振幅と位相を抽出することができる。

実機実験においては、推定時間短縮のため、得られたデータを線形補間して 2 の冪乗個に間引き高速フーリエ変換を適用する。最後に、抽出した電圧電流の振幅比と位相差から (負荷を含む) 出力側回路のインピーダンス \hat{Z} を算出する。

(3・4) 系統連系時の負荷推定手法⁽¹⁴⁾ 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⁽¹⁴⁾ に基づき説明する。

Fig. 5 (a) にインバータ出力を理想化した等価回路を示す。インバータ出力は LPF を通ることで、主成分である 60 Hz と重畳した擬似ランダム信号成分の周波数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⁽³⁸⁾ が適用できると仮定する。Fig. 5 (b) に基本波成分である 60 Hz 以外の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 (3) の合成インピーダンス \hat{Z} と考えることが出来る。

$$\hat{Z} = \hat{Z}_1 + \frac{\hat{Z}_L \hat{Z}_2}{\hat{Z}_L + \hat{Z}_2} \dots \dots \dots (3)$$

この式を推定対象である \hat{Z}_L について解くと次式が得られる。

$$\hat{Z}_L = \frac{\hat{Z}_2(\hat{Z} - \hat{Z}_1)}{\hat{Z}_2 - (\hat{Z} - \hat{Z}_1)} \dots \dots \dots (4)$$

このようにして、インバータの出力電圧電流波形より、合成インピーダンス \hat{Z} が推定できる。さらに系統連系の際に系統の切り換わりがないものと仮定し、連系リアクトル \hat{Z}_1 と配電線インピーダンス \hat{Z}_2 を既知の値としている[†]。その

^{†††} 追加センサなしの推定機能を想定しているため、実際の PCS ですでに測定可能な出力電圧 v_o と出力電流 i_o を提案手法に使用している。また、提案手法をオンラインで実現することは今後の課題であり、本論文では測定・演算・推定は全てオフラインで実施している。
[†] \hat{Z}_2 の変動や未知である場合を考慮することに関しては今後の課題である。また 1 章で述べたように、配電線インピーダンスの推定に関する検討が見受けられる⁽²⁰⁾。

ため, (4) から擬似ランダム信号の各周波数成分における負荷インピーダンス \hat{Z}_L を推定可能であると考えている。

〈3・5〉 最小二乗法によるフィッティング 本節では, 推定値の算出方法について説明する。本研究では, 算出した負荷インピーダンスに対し, 最小二乗法を用いてフィッティングして推定負荷インピーダンス \hat{Z}_L を算出する。

推定負荷インピーダンス \hat{Z}_L , 推定抵抗 \hat{R}_L , 推定インダクタンス \hat{L}_L の関係式を以下に示す。

$$\hat{Z}_L = \hat{R}_L + j\omega\hat{L}_L \dots\dots\dots (5)$$

推定負荷インピーダンス \hat{Z}_L の大きさの二乗は次式となる。

$$|\hat{Z}_L|^2 = \hat{R}_L^2 + (\omega\hat{L}_L)^2 \dots\dots\dots (6)$$

この式と擬似ランダム信号の i 番目の周波数成分における負荷インピーダンス $|\hat{Z}_{Li}|^2$ の残差の二乗和 S は以下の式で考えることができる。

$$S = \sum_{i=1}^N \{(\hat{L}_L^2 \omega_i^2 + \hat{R}_L^2) - |\hat{Z}_{Li}|^2\}^2 \dots\dots\dots (7)$$

ここで, $N = 500$ は算出点数, $\omega_i = 2\pi \cdot (2i)$ は i 番目の角周波数である^{††}。(7) に対して, $\partial S / \partial \hat{R}_L^2 = 0$, $\partial S / \partial \hat{L}_L^2 = 0$ となるように連立方程式を解くと \hat{R}_L^2 と \hat{L}_L^2 はそれぞれ以下の式で表すことができる。

$$\hat{R}_L^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i^2 \sum_{i=1}^N \omega_i^2 Z_{Li}^2 - \sum_{i=1}^N \omega_i^4 \sum_{i=1}^N Z_{Li}^2}{\left(\sum_{i=1}^N \omega_i^2\right)^2 - N \sum_{i=1}^N \omega_i^4} \dots\dots\dots (8)$$

$$\hat{L}_L^2 = \frac{N \sum_{i=1}^N \omega_i^2 Z_{Li}^2 - \sum_{i=1}^N \omega_i^2 \sum_{i=1}^N Z_{Li}^2}{N \sum_{i=1}^N \omega_i^4 - \left(\sum_{i=1}^N \omega_i^2\right)^2} \dots\dots\dots (9)$$

そして, (8) と (9) の平方根を算出した \hat{R}_L と \hat{L}_L から推定負荷 \hat{Z}_L を算出する。

4. 負荷推定の実機検証

本章では, 擬似ランダム信号を使用した負荷推定において, 負荷の切り換わりが生じた場合の負荷推定に関して実機により検証する。まず実験における測定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, 変化する負荷の推定が達成されることを示す。

〈4・1〉 実験の測定条件 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) を用いて測定する。推定に用いるデータは先行研究⁽⁴⁾に合わせて, 0.5 s を一回分とする。ここでオシロスコープによる

^{††} 〈3・1〉節より, 周波数は 2 Hz から 1 kHz までの 2 Hz ごとの 500 種類の信号を使用している。

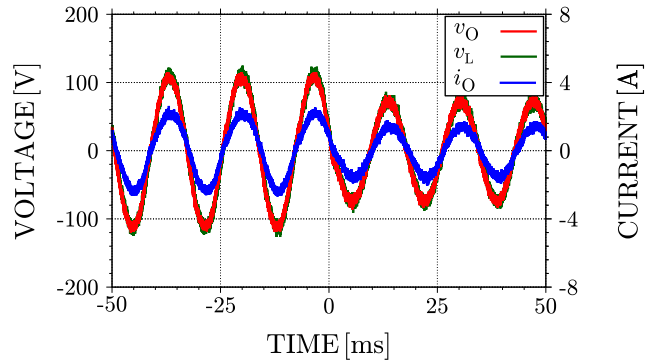


Fig. 6. Waveforms of v_o , i_o , and v_L

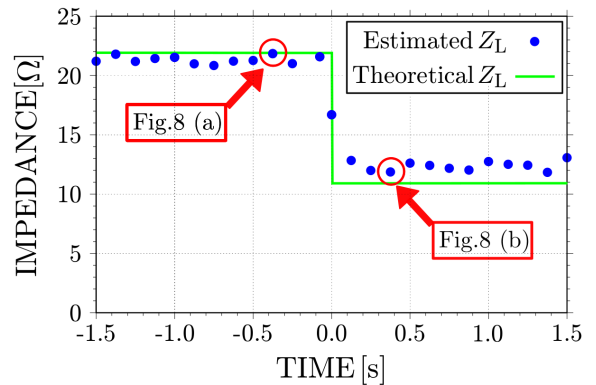


Fig. 7. Estimation results

一回分の測定点は, 125,000 点であり, その結果を線形補間により 65,536 点 (2^{16} 点) に置き換えて, 高速フーリエ変換を作用させる。また本論文では, 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高速フーリエ変換, 負荷推定はオフラインで実施している^{†††}。

〈4・2〉 出力波形と時刻ごとの負荷推定結果 Fig. 6 に連系リアクトル電流 i_o , インバータ出力電圧 v_o , 負荷電圧 v_L の波形を示す。負荷切り換わり前後の出力波形には, 歪みや大きな脈動は生じていないため, 擬似ランダム信号の重畳による出力波形への影響はほとんど無いことが確認できる。

Fig. 7 に時刻ごとの負荷推定結果を示す。本実験では, 一回の推定に要する時間が 0.5 s であり, 3 s 間のデータに対して推定している。Fig. 7 中の青の丸い点が各推定区間における推定負荷インピーダンス $|\hat{Z}_L|$ の推定結果であり, 緑の線が負荷インピーダンスの理論値である。推定負荷インピーダンス $|\hat{Z}_L|$ の推定結果は, 数 Ω 程度の誤差を含んでいるが, 真値の線に沿って推定点が分布している。この結果から負荷の切り換わりが生じた場合においても, 推定が充分に実現していると考えられる。しかしながら, 現在の推定システムでは, 一回の推定に 0.5 s 間の電流・電圧のデータを用いて負荷推定を実施している。そのため, 負荷切り換わり付近の瞬時的な負荷推定は達成できていない。より瞬時的

^{†††} オンラインでの推定に関しては今後の課題である。

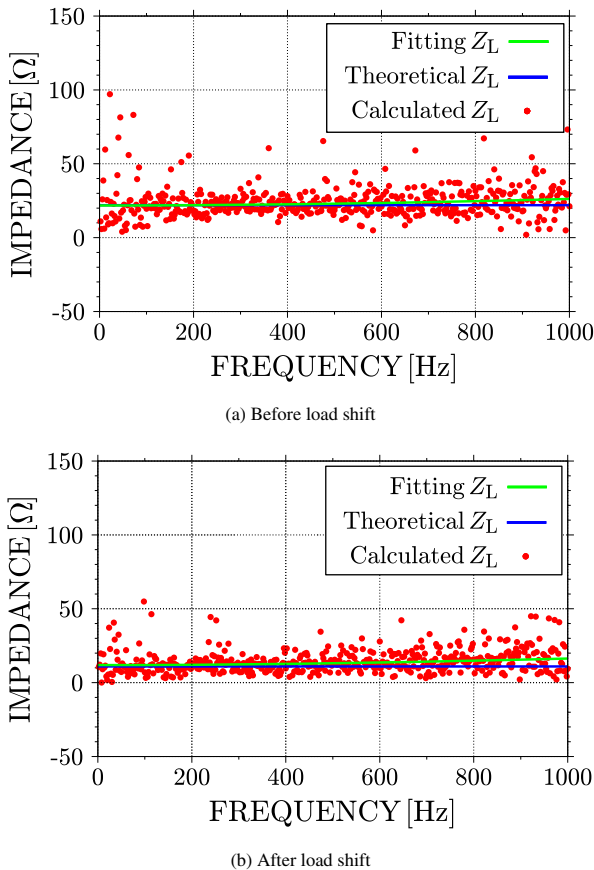


Fig. 8. Estimation results

的・過渡的な推定を達成するために、今後は推定時間の短縮を検討する予定である。

〈4・3〉 負荷推定結果の周波数ごとの評価 前節における結果の2箇所について、周波数ごとの推定結果とフィッティングの精度を評価する。Fig. 8に負荷切り換え前後の周波数に対する推定結果を示す。赤の丸い点が各周波数ごとの負荷インピーダンスの算出結果 $|\hat{Z}_L|$ である。本論文では、推定信号として2 Hz から1 kHz までの周波数成分を2 Hz 刻みに使用しているため、500 点の算出結果がそれぞれで得られている。緑の曲線は、赤の算出結果をもとに最小二乗法によって求めた近似式の(5)、青の線が真値 $|\hat{Z}_L| = |R_L + j0| = R_L$ である。負荷インピーダンスの算出結果 $|\hat{Z}_L|$ は、数 Ω から数十 Ω の誤差を含んでいるが、真値の青の曲線に沿って分布している。ここで、最小二乗法によって求めた近似式 $|\hat{Z}_L| = \sqrt{\hat{R}_L^2 + (\omega\hat{L}_L)^2}$ では、周波数の増加に伴う負荷インピーダンスの増加が確認できる。

最小二乗法により求めた Fig. 8(a) の推定抵抗 \hat{R}_L は 21.79Ω 、推定インダクタンス \hat{L}_L は 2.31 mH 、推定負荷インピーダンス $|\hat{Z}_L|$ は 21.81Ω である。また、Fig. 8(b) の推定抵抗 \hat{R}_L は 11.46Ω 、推定インダクタンス \hat{L}_L は 2.51 mH 、推定負荷インピーダンス $|\hat{Z}_L|$ は 11.49Ω である。この結果より、推定負荷インピーダンス $|\hat{Z}_L|$ はどちらの場合でも真値と近い推定が達成されている。類似研究である、PRBSを用いて電力変換器により太陽電池のインピーダンスを測

定する研究⁽³¹⁾では、10% 程度のパラメータ推定値の誤差を許容している。また、能動信号を用いて高調波インピーダンスを推定し、太陽光発電の単独運転を検出する研究⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾では、数% 程度のインピーダンス推定値の誤差を許容している。本節の推定結果における、推定負荷インピーダンス $|\hat{Z}_L|$ の真値との誤差は、負荷切り換え前で0.86%、切り換え後で4.18%である。そのため、数 Ω 程度の誤差を含んでいるが、精度の高い推定が達成できていると判断する。

また、最小二乗法によって求めた近似式と推定インダクタンス \hat{L}_L の結果より、負荷に若干の誘導成分が確認できる。これについては、既知としている配線インピーダンスや連系リアクトルの測定誤差が含まれていたのではないかと考える。そのため、これらの推定を実施する手法を考えると今後の課題となる。

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、負荷の切り換えが生じた際の擬似ランダム信号を使用した負荷推定を実機により検証した。その結果、負荷の切り換えが生じた場合の負荷推定においても、十分に推定が可能であるという結果が得られた。

今後の予定としては、現在はオシロスコープで観測した結果を線形補間し、高速フーリエ変換および複素数の演算、さらに最小二乗法を用いたフィッティングによる負荷推定までの過程が全てオフラインであるが、これらのアルゴリズムのオンライン化が課題である。また、より過渡的な推定を達成するために、推定時間の短縮に関する検討も進めていく予定である。

謝 辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP19K14977 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。

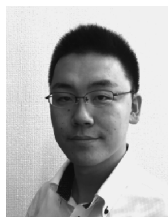
さらに、本研究の実験環境の一部は、神戸高専 道平 雅一教授と茂木 進一教授から提供していただきました。深く感謝致します。

文 献

- (1) E. Endo: "Long-term Analysis of Factors Influencing the Dissemination of Residential PV Systems in Japan", IEEJ Transactions on Power and Energy, Vol.133, No.10, pp. 761-769 (2013) (in Japanese)
- (2) 三谷康範・徳田憲昭・小林 浩:「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)
- (3) 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)
- (4) 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)
- (5) T. Hirata, M. Imamura, M. Kanno, and T. Iizuka: "Estimation of PV Power Generation with Unknown Operating Rate Variation", IEEJ Transactions on Power and Energy, Vol.134, No.4, pp. 360-366 (2014) (in Japanese)
- (6) F. Yamada, Y. Wazawa, K. Koayashi, Y. Miwa, T. Kinno, K. Yukita, and Y. Goto: "Prediction of Next Day Solar Power Generation by Gray Theory and Neural Networks", IEEJ Transactions on Power and Energy, Vol.134, No.6, pp. 494-500 (2014) (in Japanese)
- (7) H. Miyachi, H. Kita, and A. Ishigame: "Analyzing Technique of Power

- Systems Under Deregulation”, IEEJ Transactions on Power and Energy, Vol.127, No.10, pp. 1056–1059 (2007) (in Japanese)
- (8) T. Masuta, H. Sugihara, N. Yamaguchi, F. Uno, and H. Ohtake: “Economic-load dispatching Control by Optimal Power Flow with Photovoltaic Energy Curtailment Considering Transmissions Network Constraints in Interconnected Bulk Power Systems”, IEEJ Transactions on Power and Energy, Vol.139, No.2, pp. 74–83 (2019) (in Japanese)
- (9) K. Tanaka, H. Kita, E. Tanaka, and J. Hasegawa: “A Study on Management for a Group of Distributed Generators Aimed at the Cooperation with the Bulk Power System”, IEEJ Transactions on Power and Energy, Vol.125, No.7, pp. 647–654 (2006) (in Japanese)
- (10) M. Takagi, N. Tagashira, and M. Sekizawa: “Study on Reactive Power Compensation using Available Capacity of PCS of PV Systems in High Voltage Distribution Network”, IEEJ Transactions on Power and Energy, Vol.139, No.2, pp. 66–73 (2019) (in Japanese)
- (11) Y. Ueki, R. Hara, H. Kita, and J. Hasegawa: “Evaluation of Contribution for Voltage Control Ancillary Services Based on Social Surplus”, IEEJ Transactions on Power and Energy, Vol.128, No.10, pp. 1243–1251 (2008) (in Japanese)
- (12) R. Maeda, T. Fukuoka, Y. Yoshioka, and A. Harada: “Expectation for Smart Inverter & DERMS for Electric Power System Task”, IEEJ Transactions on Power and Energy, Vol.138, No.6, pp. 412–415 (2018) (in Japanese)
- (13) K. Yamane, D. Orihara, D. Iioka, Y. Aoto, J. Hashimoto, and T. Goda: “Termination Method of Volt-Var and Volt-Watt Curve for Smart Inverters Applying Optimization of Active/Reactive Power Allocation for each Inverter”, IEEJ Transactions on Power and Energy, Vol.139, No.8, pp. 513–521 (2019) (in Japanese)
- (14) M. Minami and N. Teraguchi: “An Experimental Study on Reduced Time and Improved Accuracy for Purely Resistive Load Estimation”, IEEJ Transactions on Industry Applications, Vol.139, No.9, pp. 800–805 (2019) (in Japanese)
- 南 政孝・寺口直希:「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」, 電学論 D, Vol.139, No.9, pp. 800–805 (2019)
- (15) N. Teraguchi and M. Minami: “An Experimental Study on Estimation of Inductive Load in Grid Connection Inverter by Pseudo Random Binary Sequence”, IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, Vol.140, No.3, pp. 336–337 (2020) (in Japanese)
- 寺口直希・南 政孝:「系統連系インバータによる擬似ランダム信号を使用した誘導性負荷の推定に関する実験的検討」, 電学論 C, Vol.140, No.3, pp. 336–337 (2020)
- (16) 寺口直希・南 政孝:「系統連系インバータによる負荷切り換え時の推定に関する実験的検討」, 電学 産業応用部門 半導体電力変換/家電・民生/自動車合同研究会 (SPC/HCA/VT), SPC-19-183, HCA-19-062, VT-19-036 (2019)
- (17) N. Nunomura, Y. Yoshida, and H. Suzuki: “Development of an Islanding Detection Method by the Second Harmonic Impedance Estimation for Low Voltage Interconnection Inverters”, IEEJ Transactions on Power and Energy, Vol.139, No.9, pp. 551–561 (2019) (in Japanese)
- (18) Y. Yoshida, H. Suzuki, K. Fujiwara, and Y. Ishihara: “Development of Islanding Detection Device for PV Inverters by Harmonic Impedance Detection and Performance Verification using Resonant Circuit”, IEEJ Transactions on Industry Applications, Vol.133, No.10, pp. 961–969 (2013) (in Japanese)
- (19) M. Petkovic, N. Hildebrandt, F. Freijedo, and D. Drazen: “Cascaded H-Bridge Multilevel Converter for a High-Power Medium-Voltage Impedance-Admittance Measurement Unit”, Proceedings of 12th International Symposium on Industrial Electronics (INDEL 2018)
- (20) Y. Kamatani, M. Funami, T. Hashimoto, and T. Zaitu: “Unique Self-Tuning Method for Stability of Grid-Connected Inverter”, Proceedings of IEEE International Conference on DC Microgrids (ICDCM 2019), P2-5
- (21) 佐々木敏博:「IV. 太陽光発電用インバータの現状と課題」, 電学雑誌, 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) T. Yokoyama, T. Komiyama, and E. Shimada: “Current Control for Utility Interactive Inverter Using Multisampling Method Based on FPGA”, IEEJ Transactions on Industry Applications, Vol.130, No.1, pp. 51–59 (2010) (in Japanese)
- (24) H. Watanabe, K. Koiwa, J. Itoh, Y. Ohnuma, and S. Miyawaki: “Development of Electrolytic Capacitor Less Photovoltaic Grid Connected Inverter with Boost-up type Active Buffer Circuit”, IEEJ Transactions on Industry Applications, Vol.135, No.5, pp. 467–474 (2015) (in Japanese)
- (25) D. Iioka, K. Sakakibara, Y. Yokomizu, T. Matsumura, and N. Izuhara: “Distribution Voltage Rise at Dense Photovoltaic Power Generation Area and its Suppression by SVC”, IEEJ Transactions on Power and Energy, Vol.126, No.2, pp. 153–158 (2006) (in Japanese)
- (26) 秋月影雄:「システム同定の手法」, 電学雑誌, Vol.93, No.8, pp. 696–703 (1973)
- (27) 足立修一:「システム同定の基礎」(東京電機大学出版局, 2009)
- (28) F.J. MacWilliams and N. JA Sloane: “Pseudo-random sequences and arrays”, Proceedings of the IEEE Vol.64, No.12, pp. 1715–1729 (1976).
- (29) T. Yamazaki, S. Sakaino, and T. Tsuji: “Estimation and Kinetic Modeling of Human Arm using Wearable Robot Arm”, IEEJ Transactions on Industry Applications, Vol.136, No.4, pp. 254–262 (2016) (in Japanese)
- (30) K. Takechi and H. Kakigano: “A Proposal of Power Decoupling Circuit with Passivity Discrimination Function for Residential DC System”, IAS2017, 1-77 (in Japanese)
- (31) K. Takechi, T. Yokoi, and H. Kakigano: “An Impedance Measurement Method of Solar Panels by Power Converter using PRBS”, IEEJ Transactions on Industry Applications, Vol.140, No.3, pp. 140–147 (2020) (in Japanese)
- (32) 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)
- (33) K.P. Gokhale, A. Kawamura, and R.G. Hof: “Dead Beat Microprocessor Control of PWM Inverter for Sinusoidal Output Waveform Synthesis”, IEEJ Transactions on Industrial Electronics, Vol.1A-23, No.5, pp. 901–910 (1987)
- (34) A. Kawamura, R. Chuarayapratip, and T. Haneyoshi: “Deadbeat Control of PWM Inverter with Modified Pulse Patterns for Uninterruptible Power Supply”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.35, No.2, pp. 295–300 (1988)
- (35) Y. Nishida, O. Miyashita, T. Haneyoshi, H. Tomita, and A. Maeda: “A Predictive Instantaneous-Current PWM Controlled Rectifier with AC-Side Harmonic Current Reduction”, IEEJ Transactions on Industrial Electronics, Vol.44, No.3, pp. 337–343 (1997)
- (36) S. Srdic and M. Nedeljkovic: “Predictive Fast DSP-Based Current Controller for Thyristor Converters”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.58, No.8, pp. 3349–3358 (2011)
- (37) 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」, 電学半導体電力変換研究 (1), pp. 71–76 (2011)
- (38) 奥村浩士:「エース 電気回路理論入門」(朝倉書店, 2002)

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, 2019年IEEE GCCE 2019 Excellent Poster Award, Outstanding Prize 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) 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, 2021年3月同高等専門学校専攻科電気電子工学専攻修了予定。

