

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：54502

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14977

研究課題名(和文) 電力融通のための負荷推定機能を有したスマートインバータの開発

研究課題名(英文) Development of Smart Inverter with Load Estimation Function for Electric Power Fusion

研究代表者

南 政孝 (Minami, Masataka)

神戸市立工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：50707867

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、太陽光発電システムによる発電電力を有効活用するため、使用している負荷に合わせて、電力融通することを目指している。その大目標を実現する上で、本助成による研究では、追加センサなどを用いずに、負荷で消費される電力を推定する系統連系インバータを研究対象にしている。1,2年目には、単相系統連系インバータを製作および駆動して、擬似ランダム信号という推定信号により、負荷が時間的に変化する際の推定応答を評価して、時間的な負荷推定が可能であることを示した。さらに3年目には、実システムに適用すべく、三相インバータを製作して数値解析および実験により単独運転時の負荷推定が可能であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の太陽光発電システムでは、多くの機能が搭載されているスマートインバータが注目を集めている。その中で、負荷推定により必要としている電力を抽出して、電力を融通するという機能はこれまでにないスマートインバータとしての機能である。そのため、本研究の根幹となる負荷推定機能を有したスマートインバータの開発は、今後増えることが期待されている分散型電源システム(例として太陽光発電システムが挙げられる)に必要な研究テーマである。本助成による成果がその新機能の一助となる結果が得られていることから、今後の発展がさらに期待される。

研究成果の概要(英文)：This research aims to effectively utilize the power generated by photovoltaic power generation systems by matching it to the load using it. To achieve this major goal, the research funded by this grant focuses on grid-connected inverters that estimate the power consumed by loads without the use of additional sensors. In the first and second years, a single-phase grid-connected inverter was fabricated and driven, and the estimated response of the load as it changes over time was evaluated using an estimated pseudo-random signal, showing that temporal load estimation is possible. In the third year, a three-phase inverter was fabricated for application to a real system, and numerical analysis and experiments showed that load estimation during stand-alone operation was possible.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：スマートインバータ 負荷推定 系統連系

1. 研究開始当初の背景

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。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。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。

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。太陽光発電の出力に関しては、推定や予測の技術がある。一方、後者のような需要家側と系統側との協調制御に関しては、電力調整や電圧調整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。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。そこで本研究代表者は、図 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ことを提案している(同研究代表者 科研費 若手研究(B) 16K18070)。

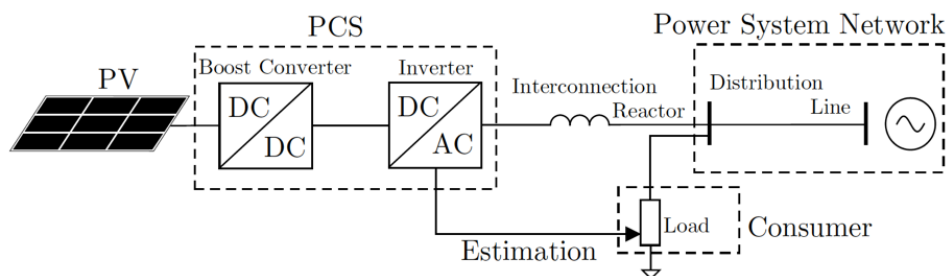


図 1. 住宅用太陽光発電システムの構成例と負荷推定に関する概要図

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やその波形を Bartlett 法, Welch 法, Daniell 法などで負荷推定する研究が実施されている。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。

このように負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開発している。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。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。

2. 研究の目的

そこで本研究の本助成では、より現実的な状況を模擬する必要があり、「負荷が変動する際の推定の可否」「実システムに近い容量に対する提案手法の適用可能性」を検討する必要がある。そのため本研究の本助成による目的は、この 2 つに関する数値的および実機実験による提案手法の適用可能性を検証することである。

3. 研究の方法

本研究で提案している擬似ランダム信号を用いた負荷推定手法について説明する。

(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。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。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) が広く知られている。図 2. に、本研究で使用する擬似ランダム信号を生成する回路を示す。本研究では、推定には 2Hz から 1kHz までの 2Hz ごとの 500 種類の信号を使用する。図 2. は 11bit の擬似ランダム信号生成回路であり、事前の実験結果より 11bit 以上の生成回路と比較して、十分なランダム性を確認したため、本回路を採用している。

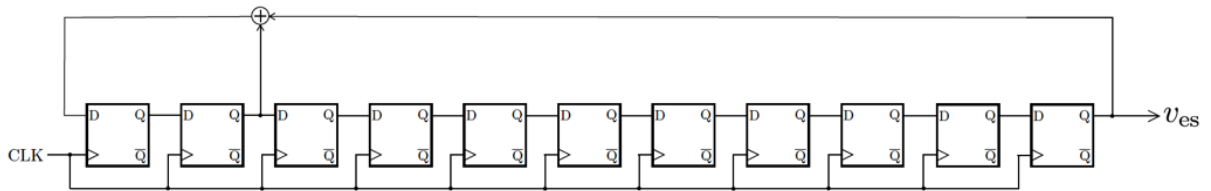
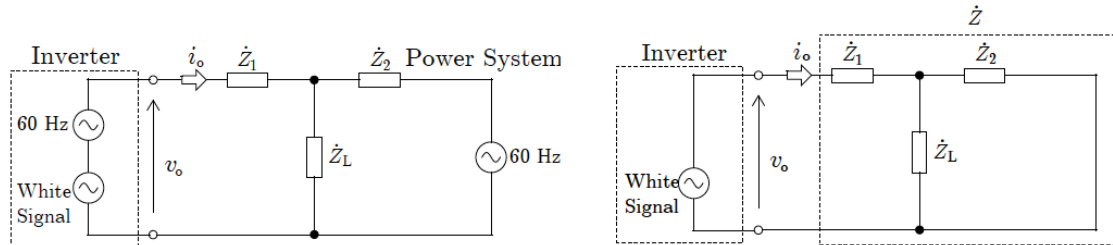


図 2. 11bit の擬似ランダム信号生成回路構成



(a) 全システムの等価回路モデル (b) 擬似ランダム信号成分のみの等価回路モデル

図 3. 対象システムを簡易化して等価回路モデルに置き換えた場合の推定信号成分の評価方法

(2) システム連系時の負荷推定手法

図 3. に (a) 全システムの等価回路モデルと (b) 擬似ランダム信号成分のみの等価回路モデルを示す。ここでは全ての素子に線形性が成り立っており、重ねの理が適用できるものと仮定する。ここで、電力フローの主成分となる 60Hz 成分以外の推定信号 (擬似ランダム信号) に注目する。図 3 (b) に示すように、太陽光発電システム側 (図中のインバータ) と電力系統側の 60Hz 成分がないため、等価回路では推定信号のみが電圧源と見做せて、推定対象の負荷 (図中の Z_L) を含む全インピーダンス Z が接続された回路となる。回路構成成分の Z_1 と Z_2 が既知であると仮定をおき、全インピーダンス Z の値と合わせることで、推定対象の負荷 Z_L が算出できる。この時、各周波数成分に Z_L が算出されるため、1 回の処理により、3.1 節で述べたように 500 点の算出値が得られる。周波数に対する特性を最小二乗法によりフィッティングすることで推定対象の負荷 Z_L の値を推定する。

また、単独運転時 (電力系統側と接続されていない時) は図 3 (a) の Z_2 以降を開放とすることで同様に提案手法が適用可能である。

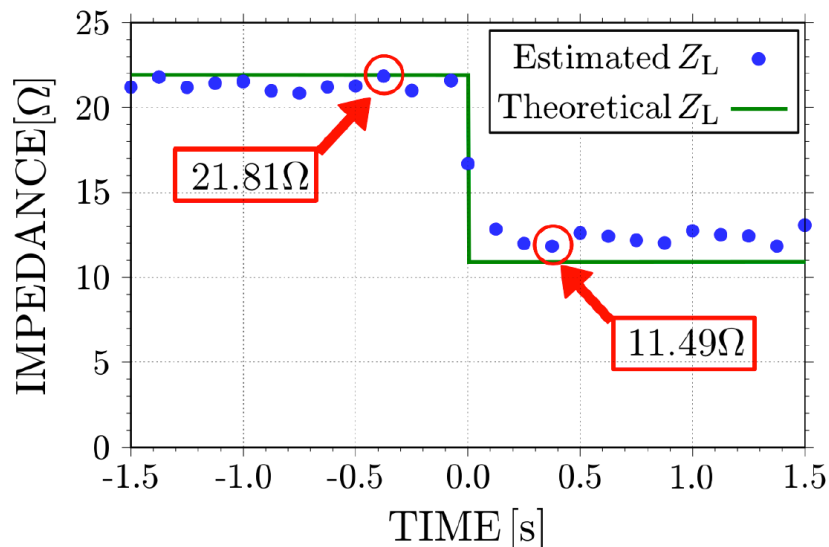


図 4. 時刻ごとの負荷推定結果と理論値との比較

4. 研究成果

(1) 単相系統連系インバータによる負荷切り替え時による負荷推定の評価

図 4. 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 0.5s であり、

3s 間のデータに対して推定している。図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 0.5s 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・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。

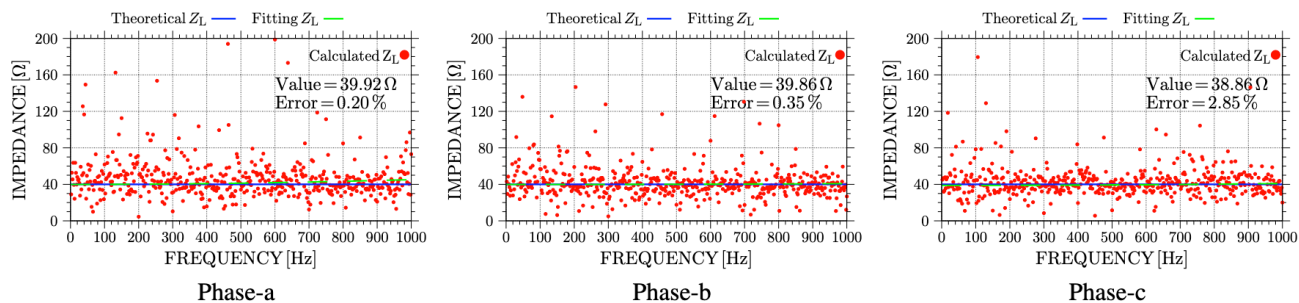


図 5. 三相インバータにおける相ごとの一定負荷に対する推定結果

(2) 三相インバータによる負荷推定の評価

図 5. に三相インバータにおける a, b, c 相ごとの一定値負荷（時間的に変化しない負荷）に対する推定結果を示す。ここで、赤色の点が 3.2 節で説明した各周波数成分の算出値であり、青色の線が理論値、緑色の線が算出値から最小二乗法により得られた推定結果の曲線である。それぞれの推定結果を図中の値として示している。a, b 相は 0. 数%の誤差なので、非常に精度良く推定が実現できている。一方で、c 相は 3%以内と許容範囲内ではあるものの a, b 相以上にばらつきによる推定値の誤差が大きく出る結果となった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Minami Masataka, Teraguchi Naoki	4. 巻 141
2. 論文標題 Load Estimation of Grid Connection Inverter by Pseudo Random Binary Sequence under Load Shift	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	6. 最初と最後の頁 31 ~ 36
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejeiss.141.31	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Teraguchi Naoki, Minami Masataka	4. 巻 140
2. 論文標題 An Experimental Study on Estimation of Inductive Load in Grid Connection Inverter by Pseudo Random Binary Sequence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	6. 最初と最後の頁 336 ~ 337
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejeiss.140.336	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 寺口 直希, 南 政孝
2. 発表標題 擬似ランダム信号を用いた系統連系インバータによる三相負荷の推定に関する数値的検討
3. 学会等名 電気学会 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)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 寺口 直希, 南 政孝
2. 発表標題 擬似ランダム信号を使用した系統連系インバータによる負荷推定の算出方法に関する一検討
3. 学会等名 平成31年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 寺口 直希, 南 政孝
2. 発表標題 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
3. 学会等名 電気学会 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)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoya Morinaka, Masataka Minami
2. 発表標題 An Experimental Analysis of Load Estimation for Three-phase Inverter by using Pseudo Random Sequence Signal
3. 学会等名 IPEC2022 Student Poster Competition (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関