

# 機器の高調波特性に基づく非侵入型モニタリング

Non-Intrusive Monitoring based on harmonics characteristic of appliances

中北 正武音\*1  
Masamune Nakakita

小野田 崇\*1\*2  
Takashi Onoda

\*1 東京工業大学大学院  
Tokyo Institute of Technology

\*2 (財) 電力中央研究所  
Central Research Institute of Electric Power Industry

Non-intrusive monitoring is a method to estimate the on/off state of individual electrical appliances from the measurement of the total household load demand. We propose a method that compares the harmonics characteristic of each appliance utilizing the changes of the harmonics characteristic between certain time periods. In this paper, we report the result of experiments using the proposed method. The method can estimate the on/off state of an air conditioner even when there is noise from unexpected electric appliances.

## 1. はじめに

一般家庭の有する電気機器の構成や使用実態に関する情報は、潜在需要の推定、需要変化の予測、季時別料金システムを選択、各種的確なサービスの提供等を行う上で必要不可欠なものの一つである。そこで、一般家庭の引込線口付近に設置した測定器で得られる情報から、下流に接続されている電気機器個別の動作状態を推定するシステムの利用を考える。図1は、家庭を対象に本モニタリングシステムを適用した場合のイメージ図である。このシステムでは、測定器を一般家庭の引込線口付近に設置するだけで、下流に接続されている電気機器には測定器を設置する必要がなく、そのための配線も必要ない。これを非侵入型モニタリングシステムと呼ぶ。

各家庭の消費電力の時間推移を可視化した消費電力の見える化は既にサービスとして提供されているが、機器毎の消費電力の時間推移までは提示できておらず、具体的に特定の機器の使用時間帯を移したり使用を控えるといった継続的な省エネ活動に至っていない。また、家庭内で動作している電気機器の構成を居住者自身が正確に把握できておらず、省エネに取り組む際に決まった電気機器のみをオフ状態にしたり、使用していないつもりでもオン状態になってしまっている電気機器が多く存在するなどの問題が生じている。これらを解決することで、さらなる省エネ活動に貢献できると期待される。

オン/オフの消費電力が図2のようにステップ状に変動する電気機器（以下、ノンインバータ機器）の動作状態推定は、総負荷電力の変化分と各機器の定格電力の比較で可能である。しかし、昨今普及の著しいインバータ回路を有する電気機器（以下、インバータ機器）では、オン/オフの消費電力の変化が図3のように不規則に変動するため、同じ方法では動作状態推定ができない[1]。ノンインバータ機器とインバータ機器が混在する場合には、インバータ回路が高調波を出すことを利用して教師あり学習を用いた電気機器の動作状態を識別する方法が提案されている[2, 3]。しかし、この手法は教師データを得るために一度は家庭内に入る必要があり、完全な非侵入型モニタリングシステムとはなっていない。本稿では、一度も家庭に入らずに教師データを必要としないアプローチを報告する。

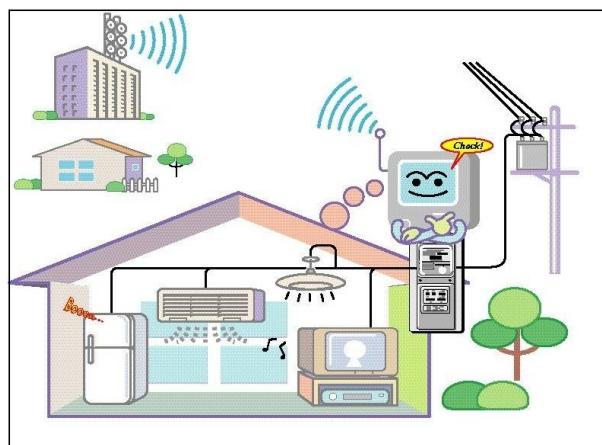


図1: 非侵入型モニタリングシステム

## 2. 関連研究

### 2.1 ノンインバータ機器を対象とした推定手法

米国の EPRI\*1 と MIT\*2 がノンインバータ機器を対象とした動作状態推定手法を提案した。図2のように消費電力の時間推移がステップ状に変動するノンインバータ機器のみから構成される場合、総負荷電力の変化分と各電気機器の定格電力の比較により電気機器のオン/オフ状態推定を可能にした手法である。つまり、事前に測定した各電気機器の定格電力と総負荷電力の消費電力の照らし合わせによって推定する。たとえば図2の冷蔵庫の定格電力が120Wの場合、総負荷電力の時間推移による変化に着目し、120Wの消費電力が増加した時刻に冷蔵庫がオン状態になったと推定できる。しかし、昨今普及の著しいインバータ機器のオン/オフの消費電力は必ずしもステップ状ではなく、図3に示すインバータエアコンの消費電力の時間推移からもわかるように消費電力が不規則に変動する。そのため、インバータ機器とノンインバータ機器が混在する場合には、総負荷電力や定格電力に着目しただけでは動作状態推定ができない。

連絡先: 中北正武音, 東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻, 〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259, 045-924-5205, nakakita@ntt.dis.titech.ac.jp

\*1 Electric Power Research Institute

\*2 Massachusetts Institute of Technology

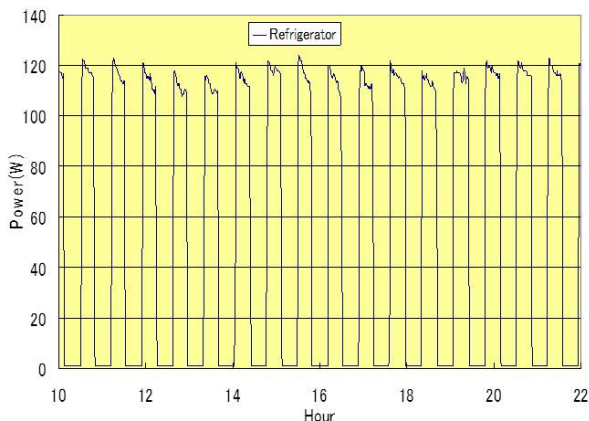


図 2: ノンインバータ機器 (冷蔵庫) の消費電力の時間推移

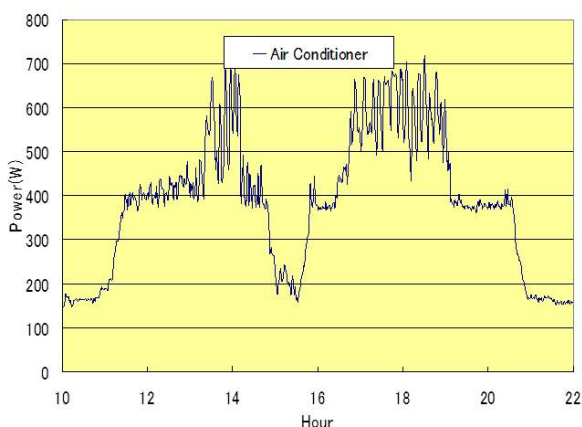


図 3: インバータ機器 (エアコン) の消費電力の時間推移

## 2.2 高調波特性と学習を用いた推定手法

米国 EPRI と MIT の推定手法の課題を克服したものが日本の電力中央研究所が開発した推定手法である。ノンインバータ機器とインバータ機器が混在する場合を対象とし、各電気機器の定格電力に着目するのではなく、インバータ回路が生成してしまう総負荷電流の奇数次高調波成分（以下、高調波パターン）に着目することで推定を可能とした。しかし、参考文献 [2, 3] で提案されている方法では教師あり学習を用いているため、図 4 や図 5 の例のようにさまざまな電気機器の動作状態で高調波パターンを事前に準備する必要がある。教師データを学習することで分類器を作り、計測される未知のデータから各電気機器の動作状態を推定する。つまり、一度は家庭内の各電気機器に計測装置を設置して教師データを得る必要があり、完全な非侵入型モニタリングシステムとはなっていない。

## 3. 高調波特性に基づく電気機器のオン/オフ推定の提案

### 3.1 提案手法の概要

本研究では、一度も家庭内の各電気機器に計測装置を設置することなしに総負荷電流の高調波パターンを用いて各電気機器の動作状態を推定する方法を検討する。ここで、各次数の高調波成分に強く変化が生じるかなどはインバータ機器に使用される電源毎に異なり、各インバータ機器は固有の高調波パター

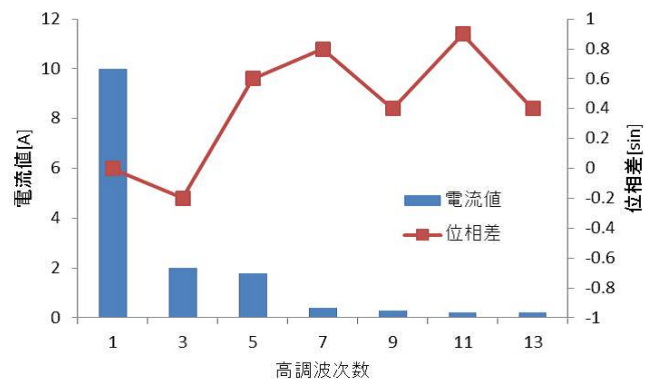


図 4: インバータエアコンのみが稼働している状態の高調波パターン

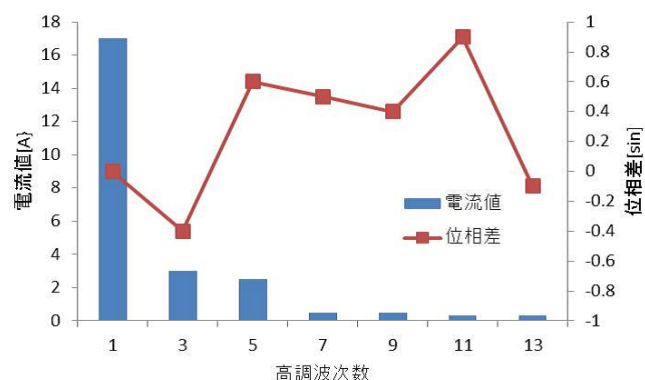


図 5: インバータエアコン, 白熱灯, テレビが稼働している状態の高調波パターン

ンを持つことになる [3]。この特性を利用して、各電気機器の高調波特性に基づくオン/オフ推定方法を提案する。この方法は以下の 3 つのステップから構成される。

1. 消費電力と第 1 次（基本波）から 13 次までの奇数次高調波を同時に測定できる装置を用いて、各電気機器固有の高調波パターンを得る [4]。
2. ある時点  $t$  とその一つ手前の時点  $t-1$  における総負荷電流の高調波パターンの差分を取り出す。
3. 2 時点の高調波パターンの差分と各電気機器固有の高調波パターンを比較することで、どの電気機器がオン/オフ動作しているのかを推定する。

## 4. 実験

### 4.1 使用データ

参考文献 [4] で使用した、実家庭における検証実験データを用いた。表 1 に測定した電気機器のリストを示す。

表 1: 電気機器リスト

| No. | 接続相 | 設置場所 | 電気機器 |
|-----|-----|------|------|
| 1   | U 相 | 和室   | エアコン |
| 2   | V 相 | 居間   | テレビ  |

これらは、2004年7月から9月にかけて、実家庭において電気機器使用実態測定実験を行ったものである。このデータは、推定方法の性能評価のため、総負荷電流の高調波パターンと各電気機器の消費電力を測定するだけでなく、同時に推定対象電気機器の消費電力も測定したものである。なお、測定間隔は1分である。

#### 4.2 実験方法

3章で示したステップに従って、表1のエアコンとテレビのオン/オフ状態推定を行う。

#### 4.3 実験条件

##### 4.3.1 しきい値の設定

先述した総負荷電流の差分を取った高調波パターンにおいて、各電気機器がオン/オフ動作したと識別するのに利用するしきい値を第1次（基本波）から13次の奇数次高調波成分に各々設定する。オフオン状態切替とオンオフ状態切替とでは設定方法が以下のように異なる。

オフオン状態切替時 オフからオン状態になるすべての場合において、各高調波成分の差分値の最小値をしきい値に設定することでオン状態への切替を識別。

オンオフ状態切替時 オンからオフ状態になるすべての場合において、各高調波成分の差分値の最大値をしきい値に設定することでオフ状態への切替を識別。

##### 4.3.2 相関係数

総負荷電流の差分を取った高調波パターンと各電気機器固有の高調波パターンにおいて、各高調波成分の相関係数を算出し、各電気機器の高調波パターンで特徴的な値を示す次数を抽出する。

##### 4.3.3 適合率・再現率

性能比較を行う際の適合率と再現率は以下のように算出した。

適合率 推定結果の正解数/全データ数

再現率 推定したオンまたはオフの正解数/推定したオンまたはオフの数

#### 4.4 実験結果

総負荷電流の差分を取った高調波パターンと各電気機器固有の高調波パターンの各高調波成分の相関係数を算出した結果を表2に示す。表2(a)はエアコンを対象とした場合であり、表2(b)はテレビを対象とした場合の結果である。この結果から、エアコンの場合では第1次（基本波）以外に第7次、第11次の順に高い相関を示している。同様にテレビの場合では第1次（基本波）以外に第9次、第13次、第3次の順に高い相関を示している。高い相関を示した各高調波成分において設定した閾値を表3に示す。ここで、前節で述べたしきい値の設定により選択したしきい値を太文字で示す。ただし、テレビの場合、第13次の代わりに有効的なしきい値が得られた第3次を選択した。エアコンとテレビを対象としたオン/オフ状態推定を行った結果を表4に示す。

エアコンに関して、オフからオン状態への切替りとオンからオフ状態への切替りのどちらにおいても90%程度の高い適合率が得られていることがわかる。しかし、再現率に関してはオフからオン状態への切替りに比べてオンからオフ状態への切替りの場合の方が10ポイント以上も高い値を示している。

テレビに関して、相関の高い高調波成分のみに着目した場合に比較的高い適合率を得たが、エアコンの場合と比較すると精度は低く、再現率に関してはとても低い値を示している。

表 2: 相関分析結果

| 次数 | 相関係数     |         |          |         |
|----|----------|---------|----------|---------|
|    | オフ オンの場合 |         | オン オフの場合 |         |
|    | 2004/07  | 2004/08 | 2004/07  | 2004/08 |
| 1  | 0.9548   | 0.9059  | 0.4592   | 0.6134  |
| 3  | 0.9251   | 0.8772  | 0.4750   | 0.5821  |
| 5  | 0.9006   | 0.8735  | 0.4116   | 0.5730  |
| 7  | 0.9562   | 0.9413  | 0.5090   | 0.5618  |
| 9  | 0.8688   | 0.7795  | 0.5366   | 0.5989  |
| 11 | 0.9143   | 0.9352  | 0.3502   | 0.2585  |
| 13 | 0.9366   | 0.8551  | 0.5371   | 0.6063  |

(a) 対象機器：エアコン

| 次数 | 相関係数     |         |          |         |
|----|----------|---------|----------|---------|
|    | オフ オンの場合 |         | オン オフの場合 |         |
|    | 2004/07  | 2004/08 | 2004/07  | 2004/08 |
| 1  | 0.8513   | 0.6578  | 0.7038   | 0.5507  |
| 3  | 0.7868   | 0.4693  | 0.3323   | 0.5772  |
| 5  | 0.7890   | 0.2999  | 0.1745   | 0.5487  |
| 7  | 0.8657   | 0.3532  | 0.1578   | 0.5073  |
| 9  | 0.8862   | 0.7206  | 0.1092   | 0.4974  |
| 11 | 0.6618   | 0.7042  | 0.3572   | 0.1865  |
| 13 | 0.8203   | 0.6883  | 0.3501   | 0.6241  |

(b) 対象機器：テレビ

## 5. 考察

エアコンに関して、再現率に着目すると、オフからオン状態への切替りに比べてオンからオフ状態への切替りの場合の方が高い値を示している。この点から、オフからオンとオンからオフへの切替りに関して、相関係数の算出方法や各高調波成分に設定するしきい値の選択方法を改良する見込みがある。ただし、適合率と再現率はどちらも比較的高い値を示しているため、消費電力と総負荷電力の高調波パターンからエアコンのオン/オフ動作状態を推定できると考えられる。

テレビに関して、比較的高い適合率を示しているにも関わらず再現率はとても低い値を示している。これは、有効的なしきい値の設定ができていないことによると考えられる。つまり、ほぼすべてのデータがオン/オフ動作しているとみなしているためだと予想される。よって、適合率が比較的高い値を示すのは当然であるが良い結果とは言えない。これは、テレビの消費電力がエアコンなど他の電気機器に比べて小さいため、高調波成分も小さくなり、エアコンなど他の機器に埋もれてしまうためだと考えられる。

## 6. 今後の課題

今回提案した推定手法は、エアコンのように消費電力が大きく、各高調波成分も大きな値を示す場合には有効である。しかし、テレビなど消費電力や各高調波成分の値が小さい電気機器はエアコンなどの大きな値を示す電気機器に埋もれてしまい、実験結果からもわかるように推定が困難である。この結果を踏まえ、差分を取った高調波パターンにおける各次数間の変化量

表 3: 各高調波成分の閾値

| 次数 | 閾値             |                |                |         |
|----|----------------|----------------|----------------|---------|
|    | オフ オンの場合       |                | オン オフの場合       |         |
|    | 2004/07        | 2004/08        | 2004/07        | 2004/08 |
| 1  | 0.9394         | <b>0.9351</b>  | <b>-1.8338</b> | -2.8355 |
| 3  | 0.1647         | 0.1262         | -0.7880        | -1.3110 |
| 5  | 0.0863         | 0.0129         | -0.2079        | -0.2088 |
| 7  | <b>-0.0938</b> | -0.0816        | <b>0.0908</b>  | -0.0767 |
| 9  | -0.0461        | -0.0381        | -0.0613        | -0.1842 |
| 11 | -0.0045        | <b>-0.0278</b> | <b>0.0413</b>  | 0.0272  |
| 13 | -0.0072        | -0.0218        | -0.0172        | -0.1176 |

(a) 対象機器：エアコン

| 次数 | 閾値             |                |                |         |
|----|----------------|----------------|----------------|---------|
|    | オフ オンの場合       |                | オン オフの場合       |         |
|    | 2004/07        | 2004/08        | 2004/07        | 2004/08 |
| 1  | <b>-0.7946</b> | -0.0311        | <b>-0.0013</b> | -0.0045 |
| 3  | <b>-0.9516</b> | -0.6605        | <b>-0.0001</b> | -0.0001 |
| 5  | -0.6914        | -0.060         | -0.0003        | -0.0008 |
| 7  | -0.4802        | -0.0601        | -0.0001        | -0.0008 |
| 9  | -0.1256        | <b>-0.1975</b> | <b>-0.0003</b> | -0.0012 |
| 11 | -0.1061        | -0.1035        | -0.0014        | -0.0002 |
| 13 | -0.1238        | -0.1058        | -0.0002        | -0.0001 |

(b) 対象機器：テレビ

に着目することで得られる各電気機器の高調波パターンの形から性能比較し検証する必要がある。この方法により、たとえオン/オフ動作時に高調波成分に大きな変化を示すエアコンなどが混在する場合でも、高調波成分の小さい電気機器が埋もれてしまう問題を回避できると考えられる。さらに、本研究で対象とする電気機器以外をノイズとみなし、そのノイズを除去するフィルターを設計することでより精度の高い推定が可能になると予測される。また、本手法では、エアコンとテレビのみを対象としたが、冷蔵庫や照明の動作状態推定も検証する必要がある。

## 7. おわりに

各電気機器が固有に持つ高調波パターンと、差分を取った総負荷電流の高調波パターンから電気機器のオン/オフ状態を推定する方法を提案した。オン/オフ状態の推定実験を行った結果、エアコンに関しては90%の高い適合率に加え、オン/オフともに高い再現率が得られた。しかし、特徴的な高調波が出にくい電気機器が他の電気機器の高調波成分の変化に埋もれてしまう場合があり、本手法の課題が明らかになった。今後は前章であげた課題への対応方法を検討する。

## 参考文献

[1] George W.Hart . Non-intrusive appliance load monitoring . Proceedings of the IEEE , vol.80 , no.12 , pp.1870-1891 , 1992 .

表 4: 性能比較

| 使用データ期間：2004/07 |          |         |          |         |
|-----------------|----------|---------|----------|---------|
| 次数              | オフ オンの場合 |         | オン オフの場合 |         |
|                 | 適合率 (%)  | 再現率 (%) | 適合率 (%)  | 再現率 (%) |
| 1               | 100.0    | 75.4    | 99.1     | 89.4    |
| 1,7             | 99.5     | 76.7    | 94.3     | 99.0    |
| 1,7,11          | 99.5     | 75.3    | 93.9     | 99.0    |
| all             | 99.1     | 86.7    | 88.7     | 100.0   |

| 使用データ期間：2004/08 |          |         |          |         |
|-----------------|----------|---------|----------|---------|
| 次数              | オフ オンの場合 |         | オン オフの場合 |         |
|                 | 適合率 (%)  | 再現率 (%) | 適合率 (%)  | 再現率 (%) |
| 1               | 100.0    | 80.2    | 99.7     | 95.3    |
| 1,7             | 99.7     | 80.2    | 99.7     | 99.7    |
| 1,7,11          | 99.4     | 80.5    | 99.4     | 99.7    |
| all             | 98.8     | 82.4    | 98.8     | 100.0   |

(a) 対象機器：エアコン

| 使用データ期間：2004/07 |          |         |          |         |
|-----------------|----------|---------|----------|---------|
| 次数              | オフ オンの場合 |         | オン オフの場合 |         |
|                 | 適合率 (%)  | 再現率 (%) | 適合率 (%)  | 再現率 (%) |
| 1               | 74.4     | 0.4     | 82.4     | 0.4     |
| 1,9             | 72.1     | 1.7     | 56.5     | 0.5     |
| 1,3,9           | 67.4     | 6.0     | 57.7     | 0.6     |
| all             | 5.8      | 1.4     | 10.6     | 0.4     |

| 使用データ期間：2004/08 |          |         |          |         |
|-----------------|----------|---------|----------|---------|
| 次数              | オフ オンの場合 |         | オン オフの場合 |         |
|                 | 適合率 (%)  | 再現率 (%) | 適合率 (%)  | 再現率 (%) |
| 1               | 69.3     | 0.4     | 92.2     | 0.5     |
| 1,9             | 69.3     | 2.1     | 67.5     | 0.6     |
| 1,3,9           | 65.3     | 6.1     | 70.1     | 0.8     |
| all             | 9.3      | 2.0     | 4.0      | 0.2     |

(b) 対象機器：テレビ

[2] Takashi Onoda, Hiroshi Murata, Gunnar Räetsch, Klaus-R. Mueller . Experimental analysis of Support Vector Machines with Different Kernels based on Non-Intrusive Monitoring Data . International Joint Conference on Neural Networks , pp.2186-2191 , 2002 .

[3] Katsuhisa Yoshimoto, Yukio Nakano, Yoshiteru Amano, Bahman Kermanshahi . Non-Intrusive Appliances Load Monitoring System Using Neural Networks . 2000 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings , 2000 .

[4] Yukio Nakano, Hiroshi Murata . Non-Intrusive Electric Appliances Load Monitoring System Using Harmonic Pattern Recognition - Trial Application to Commercial Building- . International Conference on Electrical Engineering , 2007 .