

電気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

小野田 崇^{*1*2}

Takashi Onoda

中北 正武^{*2}

Masamune Nakakita

^{*1}(一財)電力中央研究所

Central Research Institute of Electric Power Industry

^{*2}東京工業大学大学院

Tokyo Institute of Technology

Information on actual use of electrical appliances in each household is essential to the realization of smart grid and power saving. 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. This total load demand is measured at the entrance of the feeder line to the house. With this method, it is not necessary to enter a house when measuring power consumption of each appliance. 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, a television, and a refrigerator, 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、電力の潜在需要の推定、電力需要変化の予測、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。近年注目を集めているスマートグリッドに関連して、スマートシティ[1]、スマートハウス[2]、スマート家電[3]などの研究が盛んに行われている。これらが一般家庭全体に普及すれば、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非常に簡単に取得することが可能となる。しかし、これらの技術が一般家庭全体に普及するには、まだまだ時間を必要とし、現実的には、電気機器の構成や使用実態に関する情報を簡単に取得することは難しい。

そこで、現状想定される一般家庭の有する電気機器の構成や使用実態などを把握するために、主に計測と推定といった2つのアプローチが取られている。1つ目の計測に関しては、一般家庭内の各電気機器に個別の測定器を各々設置し、計測されたデータから、各電気機器の動作状態を判断するシステムである。家庭内に入って各電気機器に測定器を設置することから、侵入型モニタリングシステムと呼ばれる。このシステムでは、対象機器すべてに測定器を設置する必要があり、さらに、その設置作業は家庭内に入って行うことから、コスト面とプライバシーの問題が生じてしまう。2つ目の推定に関しては、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び、侵入型モニタリングシステムで生じるコスト面とプライバシーの問題を克服している点から、今後さらに求められるモニタリングシステムである。図1に、一般家庭を対象に非侵入型モニタリングシステムを適用した場合のイメージを示す。

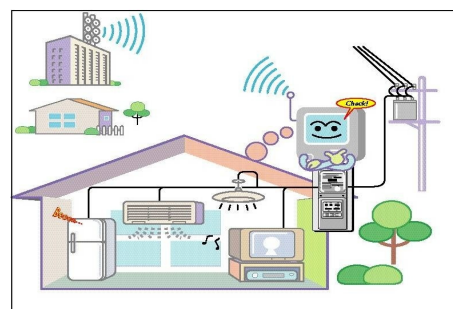


図1: 非侵入型モニタリングシステム

2. 関連研究

本章では、1章で述べた、一般家庭の有する電気機器の構成や使用実態の把握のために用いられる非侵入型モニタリングシステムの関連研究を紹介する。2.1節では、消費電力がステップ状に変動する電気機器(ノンインバータ機器)を対象とした推定手法について述べる。2.2節では、昨今普及の著しいインバータ回路を有する電気機器(インバータ機器)とノンインバータ機器が混在する場合の推定手法について述べる。そして、既存の関連研究での課題を明らかにし、2.3節では、その課題を克服する本研究の目的を述べる。

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とMIT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[4, 5]。この手法は、消費電力の時間推移がステップ上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照合することにより電気機器のオン/オフ状態推定を可能にしたものである。たとえば、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、総負荷電力が120W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、インバータエアコンの消費電力などは不規則に変動する。そのため、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、総負荷電力の変化と各電気機器の定格電力だけに着目した手法では電気機

連絡先: 小野田 崇, (一財)電力中央研究所 システム技術研究所,
〒201-8511 東京都狛江市岩戸北2-11-1, 03-3480-2111,
03-5497-0318, onoda@criepi.denken.or.jp

器の動作状態推定ができない。

2.2 インバータ機器とノンインバータ機器が混在する場合の推定手法

米国の 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 [6, 7]。この手法は、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高調波に着目し、引込線口付近で計測される総負荷電流の第 1 次（基本波）～第 13 次の奇数次高調波成分（以下、高調波パターン）と比較照合することで推定を可能としたものである。電流値とその位相差から構成される高調波パターンに着目することで、消費電力の時間推移が不規則に変動するインバータエアコンなどのインバータ機器を対象にした場合でも高調波パターンの差異から動作状態を推定可能にした。しかし、ここで紹介している参考文献 [6, 7] で提案されていた方法では教師あり学習を用いているため、家庭内で利用されるさまざまな電気機器の構成や動作状態での高調波パターンを事前に各家庭で計測する必要がある。

2.3 研究目的

インバータ機器とノンインバータ機器が混在する状況下で、家庭内に一度入って各電気機器に計測装置を設置する必要のない完全な非侵入型モニタリングの実現を考える。つまり、一度も家庭内に入ることなく、各電気機器に計測装置を設置せずに、引込線口付近で得られる 1 つにまとまった情報のみから各電気機器の動作状態を推定する手法を検討する。

3. 高調波パターンの類似性に基づく各電気機器の動作状態推定手法

本研究の目的である完全な非侵入型モニタリング手法を説明する。3.1 節では、提案する手法が効力を発揮するために、高調波パターンに求められる前提条件について述べる。3.2 節では、提案手法の概要を述べる。3.3 節以降では、提案手法の詳細を説明する。

3.1 高調波パターンに関する前提条件

ノンインバータ機器と、昨今普及の著しいインバータ機器が混在する場合に適用できる手法を考えるため、インバータ機器が生成する高調波パターンは、2.2 節で述べた関連研究と同様の以下の前提条件を満たしているとする。

前提条件 1 各電気機器は固有の高調波パターンを持ち、それらは使用される電源に依存する [7]。つまり、各電気機器固有の高調波は市場に出ている製品の型番の数は多くならない。

前提条件 2 各電気機器は独立にオン/オフ動作を行う。つまり、特定の電気機器のオン/オフ動作に依存して、その他の特定の電気機器もオン/オフ動作することはない。

前提条件 3 引込線口付近の測定器では、各電気機器固有の高調波の線形和を得る。

3.2 提案手法の概要

提案手法は、主に以下の 3 つのステップから構成される。ただし、提案手法は、入力として与えられる高調波パターン以外に総消費電力の差分が推定対象電気機器の中で最小の定格電力より大きい場合のみ適用する。推定対象電気機器が稼働するのに必要な電力が消費されていない場合は、全ての対象電気機

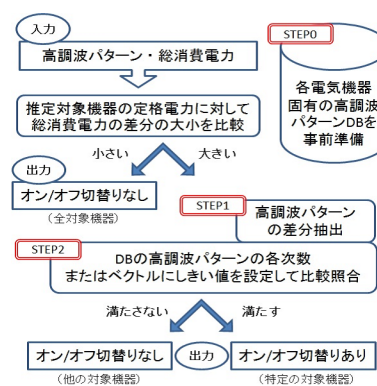


図 2: 提案手法における推定手順

器のオン/オフ切り替えがなかったと識別することを提案手法のフローと共に図 3.2 で示す。

STEP0 高調波パターンのデータベース作成

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様々な電気機器の高調波パターンを測定し、各電気機器固有の高調波パターンが登録されたデータベースを事前に準備しておく。

STEP1 総負荷電流の高調波パターンの差分抽出

一般家庭の引込線口付近に設置した測定器で総負荷電流を継続的に測定し、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抽出する。

STEP2 高調波パターンの比較照合

t 時点と $t-1$ 時点との高調波パターンの差分とデータベースに登録されている各電気機器固有の高調波パターンを比較照合することで、どの電気機器がオン/オフ動作しているのかを推定する。

3.3 高調波パターンの差分とデータベースの比較照合

前節までに得た、各電気機器固有の高調波パターンデータベースと、引込線口付近で得られる t 時点と $t-1$ 時点の高調波パターンの差分を比較照合する。ここでは、2 つの照合方法について述べる。

3.3.1 高調波パターンの各次数にしきい値を設定する照合方法

高調波パターンとは、引込線口付近で測定される総負荷電流の第 1 次（基本波）～第 13 次の奇数次高調波成分である。この奇数次高調波成分は測定される電流値とその位相差から算出される実部（RE）と虚部（IM）に分かれ、それぞれが第 1 次～第 13 次の奇数次のみに値を持つので、合計 14 次数分となる。ここで、各電気機器がオン/オフ動作したと識別するために 14 個の各次数にしきい値を設定し、そのしきい値を超えるか超えないかで電気機器のオン/オフを判別するものである。ここで、各次数での計測誤差として正規分布を考え、抽出された各次数の値における平均値から標準偏差 2σ を許容誤差としたしきい値（平均値 $\pm 2\sigma$ ）を与える。

3.3.2 高調波パターンの形（ベクトル）にしきい値を設定する照合方法

ある時点で測定される高調波パターンは計 14 個の次数があるので、最大 14 次元のベクトルを得ることになる。このベクトルと、各電気機器固有の高調波パターンのデータベースによ

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
3	V 相	居間	冷蔵庫

るベクトルとの類似性を見る。ここで、ベクトル間の類似性を見る際に一般に用いられるコサイン類似度を使用する。

コサイン類似度を用いることで高調波パターンのベクトルの方向に関する類似性を見ることができるが、ベクトルの方向が似ていても、その大きさが極端に異なる場合は、推定対象電気機器以外がオン/オフ動作した可能性がある。そこで、前節と同様に、各電気機器のオン/オフが切替るすべての場合のベクトルを抽出し、それに正規分布を仮定する。そして、抽出したベクトルの大きさの平均値から標準偏差 2σ を許容誤差としたしきい値 (平均値 $\pm 2\sigma$) を与える。このしきい値を超えるか超えないかで推定対象電気機器がオン/オフ動作したかを識別する。

4. 評価実験

4.1 推定対象電気機器

1章で述べたように、本研究は省エネ活動や節電に貢献できると考えている。一般に使用時間の短い電気機器の動作状態を推定しても省エネ活動や節電にあまり効果が期待できない。そこで、本実験では、長時間使用される電気機器を推定対象電気機器とした。表 1 に測定した電気機器のリストを示す。

4.2 実験データ

本実験データとして、電力中央研究所が 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の測定を行った結果を使用した [8]。このデータは、推定方法の性能評価を行うため、総負荷電流の高調波パターンと各推定対象電気機器の消費電力から構成されている。このデータにおける高調波パターンとは、13 次までの奇数次電流値とその位相差から構成されている。なお、測定間隔は 1 分であり、全体のデータ量は 100,749 である。

本実験における計算機への入力値は、測定される電流値とその位相差から以下の式で算出される高調波次数の実部の値 (RE)、虚部の値 (IM) を使用した。ただし、 $I = (\text{第 1 次電流値}, \text{第 3 次電流値}, \dots, \text{第 13 次電流値})$, $\theta = (\text{第 1 次位相差}, \text{第 3 次位相差}, \dots, \text{第 13 次位相差})$ である。

$$RE = I \cdot \cos(\theta \cdot \pi / 180) \quad IM = I \cdot \sin(\theta \cdot \pi / 180)$$

4.3 各電気機器固有の高調波パターンの実験用データベース作成

実験データには、引込線口付近で測定される総負荷電流に加え、測定される推定対象電気機器の消費電力も含まれている。そこで、各推定対象電気機器がオン/オフ動作した場合の時間差分の高調波パターンを実験データから抽出し、抽出された高調波パターンにおける各高調波次数の実部、虚部の値から平均値を算出したものを、推定対象電気機器固有の高調波パターンとした。この固有の高調波パターンを推定対象電気機器である、エアコン、テレビ、冷蔵庫において作成したものを本実験用のデータベースとした。

4.4 評価指標

提案手法の正確性と網羅性の質的な観点から適合率と再現率を、推定性能の量的な観点として評価指標に採用する。適合率と再現率は以下のように算出した。

適合率 正解したデータ数 / 推定した結果の全てのデータ数

再現率 正解したデータ数 / 真の正解データ

5. 実験結果

5.1 関連の高い入力属性の選択

推定対象電気機器の高調波パターンで特徴的な値を示す高調波次数の実部、虚部を抽出し、本実験では関連の高い上位 3 属性を順に組み合わせて入力属性とした。実験データから、各電気機器の消費電力と各高調波次数の実部、虚部の相関係数を算出し、関連の高い上位 3 つの高調波次数を選択した。エアコンは [RE1, RE3, IM3] の 3 つを選択した。テレビは [RE5, RE7, RE13] を選択し、冷蔵庫は [RE1, IM1, IM3] を選択した。

5.2 高調波パターンの各次数にしきい値を設定する照合方法による実験

高調波パターンの各次数にしきい値を設定して比較照合を行う推定実験を行った。その実験結果を表 2 に示す。

5.2.1 実験結果および考察

エアコン表 2(a) のエアコンにおける実験結果より、オフからオンへの切替りの推定では、適合率・再現率共に約 90% 以上の高い推定精度を示した。この時、しきい値設定次数を RE1 の 1 つのみから RE1, RE3, IM3 の 3 つの組み合わせにした場合、再現率が 9.2 ポイント減少した。実際、RE1 のみにしきい値を設定した場合に適合率・再現率共に 90% 以上を示しているため、しきい値設定次数の組み合わせを増やす必要がないとも考えられる。オンからオフへの切替りの推定では、しきい値設定次数を RE1 のみにした場合に、オフからオンへの切替りに比べると適合率が 76.7% と低い精度を示した。

テレビ表 2(b) のテレビにおける実験結果より、エアコンの実験結果に比べると適合率・再現率共に低い値を示した。しきい値設定次数に着目すると、RE5 の 1 つのみに設定した場合、オン/オフどちらへの切替りの場合でも再現率は 80% 以上の比較的高い精度を示している。しかし、適合率は 57.7% と 40.4% と低い精度である。エアコンに比べて推定精度が低い結果になった。冷蔵庫表 2(c) の冷蔵庫における実験結果より、適合率・再現率共に、テレビよりは高い結果となったが、エアコンよりは低い結果となった。エアコン、テレビの実験結果と同様に、しきい値設定次数の組み合わせを増やすことで適合率が高くなるが、再現率は低い。また、テレビの場合と同様に、しきい値設定次数に着目すると、RE1 の 1 つのみに設定した場合、オン/オフどちらへの切替りの場合でも再現率は約 90% 程度の高い精度を示しているのに対し、適合率は約 60% 程度と低い。

5.3 高調波パターンの形 (ベクトル) にしきい値を設定する照合方法による実験

高調波パターンの形 (ベクトル) にしきい値を設定して比較照合する推定実験を行った。その実験結果を 3 に示す。

5.3.1 実験結果および考察

エアコン表 3(a) のエアコンにおける実験結果より、オフからオンへの切替りとオンからオフへの切替りに対して、しきい値設定次数の違いに関係なく適合率・再現率共に約 90% の高い精度を示した。表 2(a) の実験結果と比較すると、オンからオフへの切替りの推定で、適合率が最大で 14.4 ポイント上昇している。この場合の再現率と、オフからオンへの切替りの推定における適合率・再現率は同程度であった。

表 2: 高調波パターンの各次数にしきい値を設定した実験結果

(a) エアコン						
オン/オフ切替	オフ オン			オン オフ		
しきい値設定回数	RE1	RE1,RE3	RE1,RE3,IM3	RE1	RE1,RE3	RE1,RE3,IM3
適合率	93.1%	98.8%	98.8%	76.7%	82.3%	87.1%
再現率	99.0%	95.8%	89.8%	97.3%	97.3%	97.3%

(b) テレビ						
オン/オフ切替	オフ オン			オン オフ		
しきい値設定回数	RE5	RE5,RE7	RE5,RE7,RE13	RE5	RE5,RE7	RE5,RE7,RE13
適合率	57.7%	61.6%	67.5%	40.4%	52.5%	64.9%
再現率	84.1%	76.8%	72.8%	89.1%	79.9%	72.1%

(c) 冷蔵庫						
オン/オフ切替	オフ オン			オン オフ		
しきい値設定回数	RE1	RE1,IM1	RE1,IM1,IM3	RE1	RE1,IM1	RE1,IM1,IM3
適合率	63.4%	67.4%	73.5%	57.5%	86.1%	87.7%
再現率	91.3%	90.3%	88.5%	87.7%	80.9%	79.6%

表 3: 高調波パターンの形 (ベクトル) の方向と大きさにしきい値を設定した実験結果

(a) エアコン						
オン/オフ切替	オフ オン			オン オフ		
しきい値設定回数	RE1	RE1,RE3	RE1,RE3,IM3	RE1	RE1,RE3	RE1,RE3,IM3
適合率	93.1%	96.7%	96.8%	76.7%	96.7%	99.5%
再現率	99.0%	94.3%	86.2%	97.3%	93.8%	93.8%

(b) テレビ						
オン/オフ切替	オフ オン			オン オフ		
しきい値設定回数	RE5	RE5,RE7	RE5,RE7,RE13	RE5	RE5,RE7	RE5,RE7,RE13
適合率	57.7%	64.5%	70.9%	40.4%	58.6%	74.9%
再現率	84.1%	66.8%	63.1%	89.1%	78.7%	75.8%

(c) 冷蔵庫						
オン/オフ切替	オフ オン			オン オフ		
しきい値設定回数	RE1	RE1,IM1	RE1,IM1,IM3	RE1	RE1,IM1	RE1,IM1,IM3
適合率	63.4%	96.8%	97.1%	57.5%	88.2%	89.0%
再現率	91.3%	88.4%	87.9%	87.7%	83.9%	83.0%

テレビ表 3(b) のテレビにおける実験結果と、表 2(b) の実験結果を比較すると、オン/オフの切替りに関係なく適合率・再現率は同程度を示している。特に、しきい値設定回数を 3 つの組み合わせにした場合、どちらのしきい値設定による比較照合方法でも適合率・再現率は約 70%を示している。この推定精度はエアコンに比べると低い。

冷蔵庫表 3(c) の冷蔵庫における実験結果より、しきい値設定回数の組み合わせを増やすことで、再現率を 80%以上に保ちつつ、適合率を約 90%まで高くなる結果を得た。表 2(c) の実験結果と比較すると、特にしきい値設定回数を 3 つの組み合わせにした場合、再現率は同程度を示した一方で、適合率が高くなり、最大で 23.6 ポイント上昇している。

6. おわりに

本研究では、インバータ回路が生成する高調波パターンを用いて、その高調波パターンの時間差分に着目することで特徴的な成分を抽出させ、学習を必要としない家庭内の電気機器の動作状態推定を行った。その結果、提案手法を用いることで、ある程度の推定が可能であることを示すことができた。

今後は、提案手法を照明器具など他の電気機器の動作状態推定に適用し、その性能を検証する必要がある。また、実用に向けて、提案手法を他の家庭での測定データにも適用して性能評価を行う必要がある。

参考文献

- [1] Hans Schaffers, Nicos Komninos, Marc Pallot, Brigitte Trousse, Michael Nilsson, Alvaro Oliveira. Smart Cities and the Future Internet: Towards Cooperation Frameworks for Open Innovation. Lecture Notes in Computer Science, vol.6656, pp.447-462, 2011.
- [2] Ellen Kathrine Hansen. Home, Smart Home. IEEE Spectrum, vol.47, no.8, pp.34-38, 2010.
- [3] Hyun Sang Cho, Tatsuya Yamazaki, Minsoo Hahn. Determining Location of Appliances from Multi-hop Tree Structures of Power Strip Type Smart Meters. IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol.55, no.4, pp.2314-2322, 2009.
- [4] George W.Hart. Non-intrusive appliance load monitoring. Proceedings of the IEEE, vol.80, no.12, pp.1870-1891, 1992.
- [5] L.Carmichael. Nonintrusive Appliance Load Monitoring System. EPRI Journal, pp.45-47, 1990.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 中野 幸夫. 電気機器使用実態モニタリングシステムの開発 (その 5). 電力中央研究所報告, 2005.