

分散スマートタップ群を用いた協調的計測による電力フロー推定 2 —ネットワークトモグラフィによる電気配線のトポロジー推定—

Electric Power Flow Estimation by Cooperative Distributed Smart-taps2
—Estimation of Electric Circuit Topology by Network Tomography—

林宗一郎¹
Soichiro Hayashi

加藤丈和²
Takekazu Kato

松山隆司²
Takashi Matsuyama

京都大学工学部電気電子工学科¹

Kyoto University Faculty of Engineering, Undergraduate School of Electrical and Electronic Engineering
京都大学大学院情報学研究所²

Graduate School of Informatics Kyoto University

1 はじめに

我々は、電力ネットワークと情報通信ネットワークを統合した新しいエネルギーネットワーク基盤として、エネルギーの情報化を提唱し、研究開発を行っている [1, 2]. エネルギーの情報化では、従来からある、家電ごと、あるいは分電盤や電力計によるエネルギー消費の個別計測・制御技術とは異なり、どこから供給された電力をどこでどれくらい利用しているか、という配線経路上の電力損失を含めた電力ネットワーク全体の電力を計測・制御することを目的としている。

ある電力がどこから供給されて、どこで使われるかを区別することは、物理的には不可能である。そこで我々は、電力ネットワーク上に分散配置した多数の電力計測・制御装置（スマートタップ）による協調的計測に基づいて、仮想的に電力ネットワーク内の電力の流れ（本稿ではこれを電力フローと呼ぶ）を推定する、分散協調型の電力フロー推定手法を提案する。

本稿では、電力フロー推定の第一歩として、電源と複数の家電に取り付けたスマートタップ群を協調的に動作させ、情報通信の分野におけるネットワークトモグラフィの技術 [3] を用いて、電力配線のトポロジー推定と、配線経路上の電力損失を推定する手法について述べる。

2 ネットワークトモグラフィによる電力フロー推定

2.1 モデル設定とアプローチ

本研究では、図1に示すように、提案手法の有効性を評価するための単純化した状況として、電力供給源（以下、ソースと呼ぶ）は1つとして、そこに N 台の電気機器（デバイスと呼ぶ）がつながっている状況を前提とする。また、ソースと各デバイスにはスマートタップが接続され電流・電圧を計測できるものとし、ソース、デバイス間の配線路のトポロジーは未知であるとする。

本研究の目的は、各スマートタップの計測データから、配線路のトポロジーと経路上の電力損失を推定することである。この問題は、電力を通信量、配線上の電力損失をパケットロスと置き換えると情報通信の分野におけるネットワークトモグラフィの問題 [3] と類似している。ただし、情報通信ネットワークの場合にはデータの送り元や宛て先をもって送信されるのに対し、電力ネットワークの場合には、電流がキルヒホッフの法則にしたがって

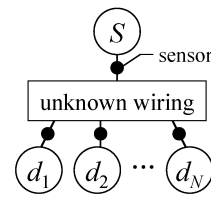


図1 配線モデル

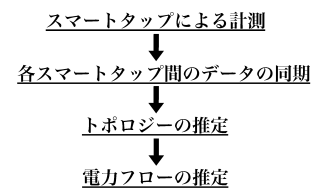


図2 電力フローを求めるステップ

分流、合流しながら流れ、それぞれの電力の区別がないという違いがある。本研究では、電力ネットワーク固有の特徴である各デバイスにかかる電圧とそこに流れる電流の相互関係を利用する事で、電力ネットワークにおけるネットワークトモグラフィに基づく推定を行う。

本研究で提案する電力フローの推定手順の概要と問題を図2に示す。なお、ここでは簡単化のために、各デバイスは連続的な電力変動は少なく、各デバイスの状態が離散的 (on/off 等) に変化し、複数のデバイスで同時に状態変化が起きない場合について考える。

2.2 スマートタップ間の時間的同期方法

各スマートタップで計測したデータ間の関係をキルヒホッフの法則に基づいて解析するためには、その瞬時性より、それらのデータが時間的に同期している必要がある。しかし、家庭内の全家電に取り付けたスマートタップで同期をとりながらデータを送信するのはコストや通信の帯域の問題から現実的ではない。そこで、各スマートタップからのデータの時間的な対応付けを求めることにより仮想的な同期を与える。

デバイスの状態変化は、そのデバイスを流れる電流の変化に顕著に表れる。また、あるデバイスの電流が変化すると、配線抵抗による電圧降下の影響で経路を共有するほかのデバイスにかかる電圧も変化する。この影響は電流が大きくなるほど電圧降下が大きくなるという負の相関をもち、この相関がもっとも小さくなるタイミングに各デバイスのデータの時刻を合わせることで、デバイス間の同期を与えることができる。

2.3 トポロジー推定のアルゴリズム

配線経路のトポロジーは、家庭内の配線構造を考えると、ソースを根、配線を枝、デバイスを葉とする二分木でモデル化できる。また、家庭内の配線の長さや電源の周波数から集中定数回路として近似でき、各枝に抵抗を

もつ二分木として表現出来る。

いま、ある1つの葉（デバイス）の電流が変動したときのことを考える。このとき、他の葉の電流は変動しないものとする。根からこの葉までの経路上の配線抵抗により電圧降下がおき、共通経路を持つ他の葉の電圧も変動する。この変動は共通経路が長く配線抵抗が大きい、言い換えれば元の葉との距離が近いほど大きくなる。

ここで、本研究では、トポロジーの初期状態を高さ1の N 分木とし、ある葉の電流変化に対する他の葉の電圧変化の相関より最も近い葉の組を求め、それらを併合して $(N-1)$ 分木、 $(N-2)$ 分木、... のように2分木になるまで繰り返し更新することで全体のトポロジーを推定する。

ここで、ソース及び各デバイスの電流電圧の実効値を V_s, I_{d_k} と表し、1周期後の実効値をそれぞれ'を付けて表す。このとき、電流の変化は $\delta I_s = I_s - I'_s$ と表され、デバイス k の電流変化に対するデバイス l に電圧の変化は以下の式で表される。

$$x_{k,l} = -\frac{\delta V_s - \delta V_{d_l}}{\delta I_{d_k}} \quad (1)$$

$x_{k,l}$ は、 k 以外のデバイスの電流変化がないときの、デバイス k, l の共通経路の配線抵抗に相当する¹。

ここでは、この $x_{k,l}$ を各葉の間の近さを表す尺度として用いる。すなわち、 $x_{k,l}$ の値が大きな葉の対 (d_k, d_l) ほどその電力共有経路において共有する抵抗が大きく、二分木の中で近い位置関係にあると考えられる。また、電圧変動が検知出来ないほど小さい場合には、 $x_{k,l}$ もほぼ0となるためトポロジーの推定には影響しない。

以下、 $x_{k,l}$ を利用したトポロジー推定の手順を記す。なお、初期状態では、深さ1のノード数 n はデバイス数 N と等しく、トポロジーは高さ1の N 分木である。

1. 大きさ n の正方行列 X_n を作る。各要素は0とする。 X_n は各ノード間の電流電圧変動の相関を表す行列であり、 $X_n(k, l)$ はノード d_k の変動に対するノード d_l の変動を表す尺度とする。
2. あるノード d_k で電流変化が起きた時刻を t とする。このとき、他のノード $d_l (l = 1, \dots, n (l \neq k))$ について、式 (1) より $x_{k,l}$ を求め、 $X_n(k, l)$ の値とする。
3. $(p, q) = \arg \max_{(i,j)} X_n(i, j)$ を求め、新たな深さ1の分岐ノード d_{pq} を作成し、ノード d_p, d_q を d_{pq} の子とする。このとき、深さ1のノード数 $n := n-1$ となる。また、 d_{pq} の電流は、 d_p と d_q に流れる電流の和とし、他の葉の電流変化に対する電圧変動は d_p, d_q と等しいものとする。
4. $n > 2$ であれば、1へ戻り、 $n = 2$ ならば、終了する。以上をいずれかのデバイスの状態が変動する度に行うことで、その時点で求まる最適トポロジーを2分木として得る。

¹厳密には、ある葉の電流が変動すれば他の葉の電流も変動するので、上の式の右辺に $\delta I_{d_m} / \delta I_{d_l} (m = 1, \dots, N, m \neq l)$ の項が存在する。しかし、他の葉の電流の変動が、変動させた葉の電流変動に比べ、十分に小さいとみなせるため、 $\delta I_{d_m} / \delta I_{d_l} \approx 0$ を仮定する。

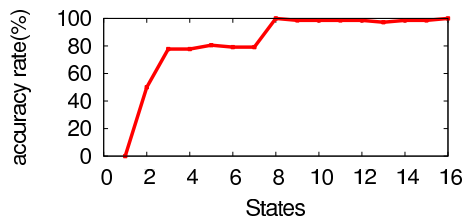


図3 トポロジー推定の精度

2.4 配線抵抗値と電力フローの推定

2.3節の方法で求まるトポロジーにおいて、ソースから各デバイスまでの経路について、キルヒホッフの法則に基づく回路方程式を解くことで配線の各部分の抵抗を求め、それぞれでの消費電力を求めることで、全体の電力フローを得る。

3 実験結果

提案手法でトポロジー推定を行った結果を示す。実験では2種類のトポロジーの配線路を用意し、ソースには家庭用商用電源を、デバイスとして4つの家電（ドライヤー、照明器具、電気ストーブ、ディスプレイ）を接続した。また、配線路としては様々な長さの家庭用延長コードを用いた。各家電の状態は on, off の二種類とし、それぞれの状態が変化した時刻は既知とする。それぞれの家電の on, off の組み合わせの16状態を24通りの順序で状態遷移させて、トポロジー推定を行った。

図3に推定結果を示す。グラフの横軸は状態遷移の数、縦軸はその時点でのトポロジー推定の正解率を表す。この結果より、全ての状態の組み合わせの状態遷移を行わなくても、3状態で8割、全状態数の半分ではほぼ正確にトポロジーを推定出来ていることが分かる。

4 おわりに

本研究では、ネットワークモグラフィに基づく電力フロー推定の第一歩として、電源と家電に分散配置したスマートタップ群の協調的計測によって、簡略化したモデルにおいて配線路のトポロジーと配線抵抗を推定する方法を提案した。

今後の課題として、複数デバイスが同時に状態変化する場合や連続的な負荷変動がある場合、電力源が複数ある場合などの複雑な状況での推定方法を検討していく。

参考文献

- [1] 松山隆司：“エネルギーの情報化 (i-energy) ～電力ネットワークと情報ネットワークの統合による安全・安心なエコライフの実現を目指して～”，ITU ジャーナル, **38**, 12, pp. 6-13 (2008).
- [2] 加藤, 林, 松山：“分散スマートタップ群を用いた協調的計測による電力フロー推定1～間歇的電流計測からの連続的電力変動推定～”，電子情報通信学会総合大会 2010 (2010).
- [3] E. Lawrence, G. Michailidis and V. Nair: “Network delay tomography using flexicast experiments”, Network, **68**, Part 5, pp. 785-813 (2006).