

配電線の誘導電流と ZigBee を利用した 配電システム監視システムの提案

山之上卓[†] 森邦彦[†] 高田等[†] 八野知博[†]
畠山雅登^{††} 中島秀貴^{††} 下馬場秀徳^{††} 河村清紀^{††}

ZigBee センサを利用した配電システムの監視システムを提案する。この監視システムは、配電システムの様々な地点における電流値などの情報を監視するものである。各地点には電流計測装置などを装着した ZigBee センサ端末を配置する。この端末を駆動するため、配電線の誘導電流を利用する。各地点のデータを収集する地点における通信の輻輳問題を回避する方法や、センサを簡単に配電線に取り付けるための機構についても述べる。

A Proposal for Monitoring System of Power Distribution System Using Inductive Current and ZigBee

Takashi Yamanoue[†] Kunihiro Mori[†] Hitoshi Takata[†]
Tomohiro Hachino[†]
Masato Hatakeyama^{††} Hideta ka Nakashima^{††}
Hidenori Shimobaba^{††} and Kiyonori Kawamura^{††}

A monitoring system of power distribution system, which uses inductive current and ZigBee, is proposed. This system monitors current values and/or others at many places of a power distribution system. ZigBee terminals, which are equipped with a current sensor and/or others, are deployed at the places. Inductive current of the distribution system is used to drive the terminals. A way which avoids a congestion at the sink node of the monitoring system and a mechanism which makes to attach a terminal to the wire of the distribution system easy are also shown.

1. はじめに

電力会社の配電システムは物理的に広範囲にわたって敷設され大量の顧客へ電力を供給するために利用されている。配電システムは大量の電柱、電線、トランスなどを含んでおり、事故や自然災害の発生によりその一部に障害が発生したとき、どこで障害が発生したかを把握することさえ容易ではない¹⁰⁾。また電力小売自由化により、配電システムの管理・運用はより複雑になっている。このような問題を解決する一つの手段として、配電システムのよりきめ細かな監視の実施が考えられる。これは「スマートグリッド」¹¹⁾を実現するための手段のひとつにもなる。既に配電システム上の特定の地点の電流や電圧の実時間監視が行われているが、監視を行うための装置は高価であり、その装着も容易ではなく、監視したデータを収集するための通信線の敷設が必要となっていた。このため、より多数の地点に装置を設置し、よりきめ細かい監視を安価に行うことは困難であった。この問題を解決するため、ZigBee⁷⁾を利用した配電システムの監視システムを提案する。この監視システムは以下の特徴を持つ

- ・ 多数の地点の配電線の電流を実時間で計測可能。電圧も計測可能。
- ・ 計測値を、無線を使ったネットワークで拠点に集めるため、通信のための配線設備が不要であり、設置も容易。
- ・ 配電線の誘導電流を無線センサの駆動電力として使うため、電源不要であり、電池交換の手間も不要。
- ・ 太陽電池や風車等を用いないため、天候に左右されず、配電線に一定以上の電流が流れている限り、いつでも無線センサに電力供給できる。
- ・ 各々の無線センサに対する個別設定が容易である。
- ・ 普段は異常が発生したノードの情報のみデータを収集する。

2. システム概要

図1は配電線監視システム全体の例を示す。ここで、無線センサ(a,b,c,d,e,f)が配電線の各所に取り付けられている。各無線センサは他の無線センサのどれか一か所以上から電波が届く場所に設置する必要がある。また、無線センサのどれか一か所以上から電波が届く場所にデータ収集部を置いている。無線センサとデータ収集部は内部にZigBee 端末を含んでいる。データ収集部が無線センサのどれかを指定して、その無線センサが取り付けられた箇所の電流量通知を要求するコマンドを無線で送信すると、

[†] 鹿児島大学
Kagoshima University
^{††} 九州電力株式会社
Kyushu Electric Power Co., Inc.

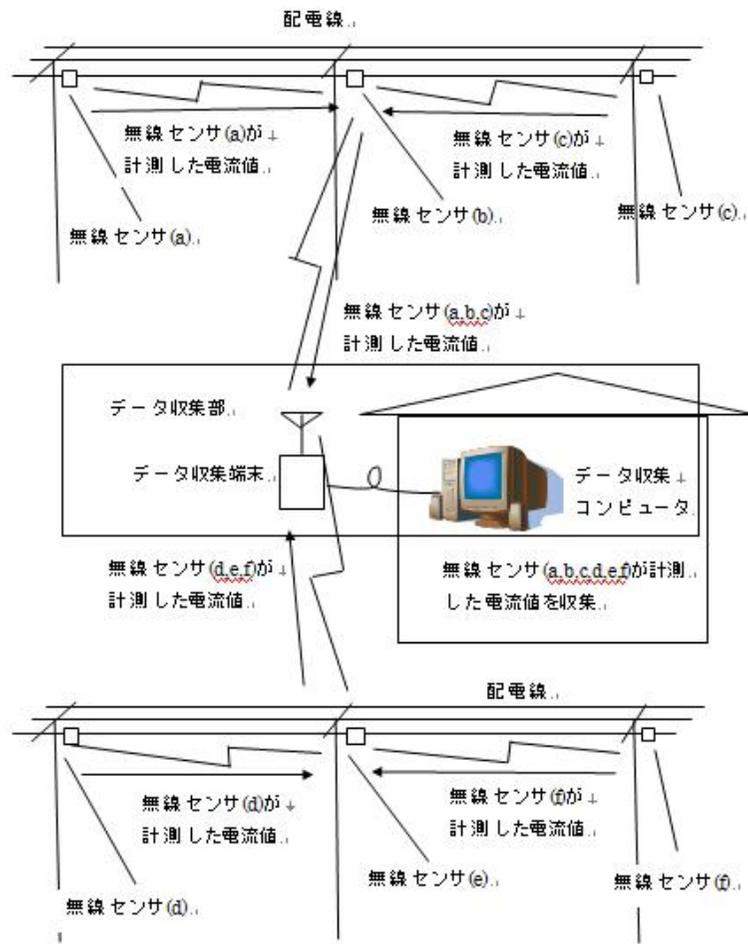


図 1. 監視システムの概要

ZigBee のメッシュネットワークを使ってそのコマンドが無線センサ間でバケツリレーされ、指定された無線センサに届く。そのコマンドを受け取った、指定された無線センサは、その時点の電流値を計測し、そのデータをデータ収集部に送り返す。データを送り返すときも、メッシュネットワーク上のデータのバケツリレーが使われる。

このバケツリレーにおいて、各無線センサがどのデータをどの無線センサに送るべきかは、AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector)¹⁾アルゴリズムにより自動的に決定される。ZigBee 端末にはマイクロコンピュータとフラッシュメモリも搭載されており、後で述べるデータ収集手順を実施すると共に、一定期間の計測データを保存できるようになっている。

3. 無線センサの構成

図 2 は無線センサ内部のブロック図の例を示している。図 3 は無線センサ内の電流計測部と電源供給部の回路例を示している。電源供給部のコイル部と整流部の間に共振用コンデンサを加え共振回路を構成することにより、配電線を通る電流が少なくても無線センサに電源を供給できるようにしている。電源供給部と電流計測部のどちらもコイル部と整流回路を含み、コイル部で得られた交流を直流に変換する。電源供給部の DC-DC コンバータにより、配電線に通る電流の変化が大きくても、安定した値の直流電圧を ZigBee 端末基盤に与えることができる。

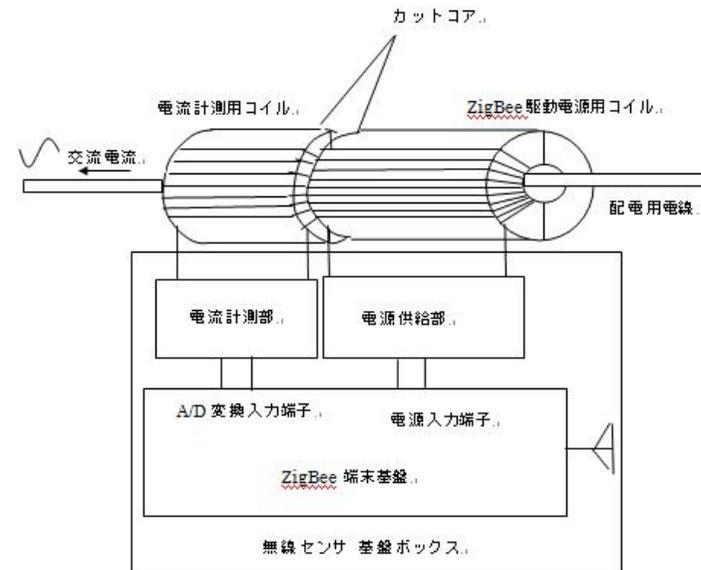


図 2. 無線センサ内部のブロック図

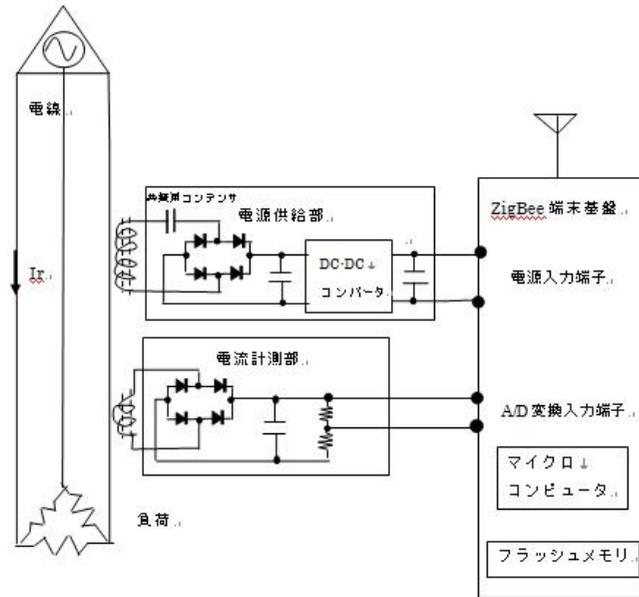


図3. 無線センサ内の電流計測部と電源供給部の回路例

電流計測部の分圧部は ZigBee 端末の AD-変換入力の入力電圧範囲に電流計測値を合わせるために使用する。整流部のコンデンサに貯まった電荷を放電するためにも使われる。

図1におけるデータ収集部も ZigBee 端末を含んでおり、この ZigBee 端末もメッシュネットワークの一つのノードになる。

4. 配電線へ無線センサを装着するための機構

配電線は通常人の手の届かない高い場所にある。また、絶縁被覆がほどこされていない配電線もあり、無線センサを直接手で装着するのは危険である。配電線に関する作業をより簡単に、安全に実施するため、絶縁がほどこされた、長い柄を持ったマジックハンドのような道具（絶縁ヤットコ）が開発されている。

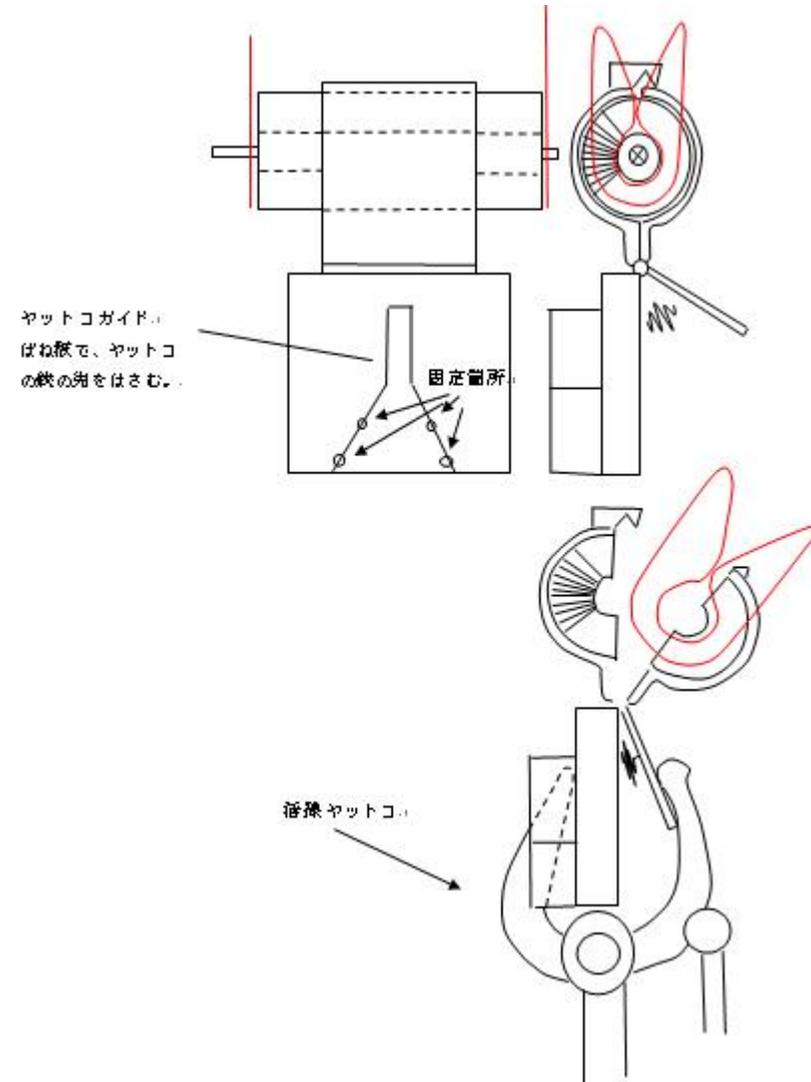


図4. 配電線へ無線センサを装着するための機構

絶縁ヤットコを使って無線センサの装着を行うための、無線センサの形状や装着機構

も考案した。図4はこの機構を加えた無線センサの外観の例を示している。無線センサ基盤へ電源供給するコイルと電流値を計測するためのコイルにカットコアを使用し、パネ鉄を使うことにより、配電線を加工することなく、安全に、簡単に装着できる。

5. グループ構成手順とデータ収集手順

すべての無線センサから、データ収集部に直接データが定期的送られると、データがデータ収集部に集中し、データ収集部はその受信能力の制限により、すべてのデータを受け取ることができなくなる可能性がある。このため、全ノード数に比例した一定期間以下の周期ですべてのノードのデータ収集を行うことはできない。ノード数が増えれば増えるほど、データ収集間隔を長くする必要が生じる。このような状況を緩和するため、以下に述べるグループ構成手順とデータ収集手順を行う。

5.1 グループ構成手順

個々の無線センサとデータ収集部を「ノード」と呼ぶ。メッシュネットワークに参加したノードの集合を「グループ」と呼ぶ。データ収集部を「集約ノード」と呼ぶ。

1. 最初に集約ノードがグループに参加する(図5)。



図5. データ収集部のグループへの参加

2. グループに新たに参加するノード(新規ノード)は、集約ノードに対して「グループ参加要求信号」を送信する。この信号は、AODV アルゴリズムを利用し、集約ノードに向かって(直接集約ノードに到達しない場合は、他のノードを経由して)、伝達される。集約ノードがこの信号を受信したとき、集約ノードはこの要求に対する「応答信号」を返信する。新規ノードはこの応答信号を受信するまで、定期的にグループ参加要求信号を送信する。新規ノードが応答信号を受信できた場合、AODV アルゴリズムにより、新規ノードから、集約

ノードまでの、閉路(ループ)を持たない経路が構成される。また、このとき、新規ノードはグループに参加する(図6)。

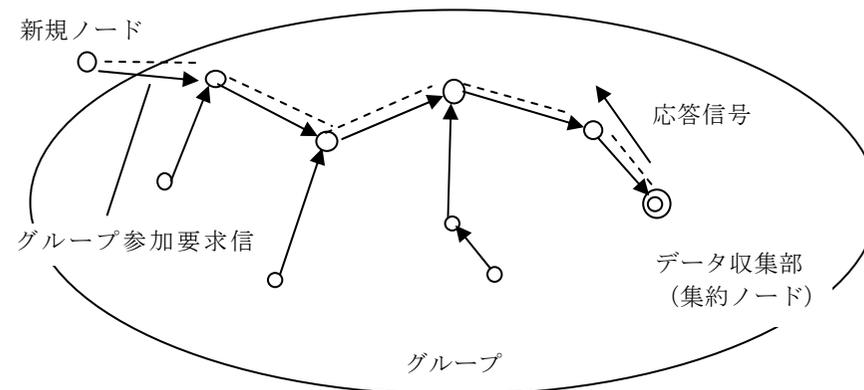


図6. 新規ノードのグループへの参加

3. すべてのノードが参加し終わったとき、集約ノードを根とする「木」が構成される。すべてのノードは、AODV を構成するための表を備えている。このため、自分の「子ノード」がなにか? 「親ノード」がなにか?を知ることができる。ここで、子ノードとは、自分からみて葉の方向に直接接続されているノードであり、親ノードとは、自分からみて根の方向に直接接続されているノードである。

5.2 データ収集手順

データ収集は以下のように行う。

1. 葉ノード(端のノード)と節のノードは、それぞれの親ノードに対して定期的に、そのノードで計測されたデータを送信し、親ノードは、子ノードに応答信号を送信する。子ノードは、計測したデータを一定期間分、自分のフラッシュメモリに保存する。親ノードでも、(自分が集約ノードでない場合)、自分自身の計測データと、それぞれの子ノードのデータを一定期間分、自分のフラッシュメモリに保存する。
2. 子ノードが親ノードから一定期間以上応答信号を受信できなかった場合、親ノードに障害が発生したものと解釈し、子ノードから集約ノードに対してグループ参加要求信号が再度送信され、木の構造が更新される。
3. 親ノードが子ノードの1つから一定期間以上計測データを受信できなくなった場合、子ノードに障害が発生したものと解釈し、子ノードの ID と共に「障

害発生信号」を集約ノードに送信する。このとき、親ノードに保存されていた障害が発生した子ノードの過去のデータも集約ノードに送信される。

4. 任意のノードが異常なデータを計測した場合、そのノードは、そのノードの ID とともに異常なデータを集約ノードへ送信する。

3 と 4 により、異常が発生した場合のみ、集約ノードにその情報が通知される。このことにより、集約ノードへ通信が集中することが少なくなる。集約ノードは、必要に応じて、任意のノードに対して、そのノードに保存されたデータを要求し、要求されたノードは対象のデータを返信する。このことにより、グループ全体の経時的な変化を集約ノードに集め、無線センサ（ノード）が設置された配電線全体の経時的な状態の変化を計測することができる。

6. 実現のための課題

本監視システムを実現するため、ZigBee 端末の電波伝搬特性の計測⁸⁾、誘導電流による ZigBee 端末の駆動実験、ZigBee のアナログ入力端子を使った電流計測実験、複数の ZigBee 端末を経由した計測データの収集実験などを行った。

電波伝搬特性の計測の結果、屋外の見通しの良い場所では 250m 離れた場所であっても無線センサ間で通信を行うことが可能であった。無線センサ間に鉄骨プレハブの建物があっても通信可能であった。鉄筋コンクリートの建物が間にあった場合でも状況によっては通信が可能な場合があった。しかしながら、マルチパスフェージングの影響も大きいことも分かった。マルチパスフェージングの問題はダイバーシティアンテナなどを使うことによって回避できることが分かっている⁶⁾。

誘導電流による ZigBee 端末の駆動実験では、図 2 の ZigBee 駆動電源用コイルとして、フェライトコアに銅線を 100 回巻いたコイルを 5 個直列接続したものを利用したとき、電線に 10A 以上の電流を流すことによって駆動が可能であった。実際に使用するためには、より小さいものが望ましいが、比透磁率が使用したフェライトコアより高いものが存在するため小型化は可能と思われる。

電流計測実験では、図 2 の電流計測用コイルとして ZigBee の駆動で用いたものと同じコイルを 1 個用いたとき、ZigBee 端末で得られた電流値と実際の電流値の間はほぼ線形の関係にあり、2 次曲線や 3 次曲線のあてはめで、精度を高くできることがわかった。

7 個の ZigBee 端末を経由させて、ZigBee 端末で計測した電流値を離れた場所に連続して送信することもできた。

このように、実験では、本監視システムが実現できそうな手ごたえをえることができたが、現場で利用できるようにするためには、現場と同じ環境で長期間に渡って故障

することがない端末装置の開発と実地検証が必要となる。システム全体のソフトウェアの開発も必要である。

7. 関連研究

現在、配電システムの少数の部分にセンサ内蔵開閉器を設置し、システムの電圧や電流を計測している。このシステムでは、計測したデータを集めるための通信回線を確認する必要がある。また、センサ内蔵型開閉器は高価でその設置は簡単ではない。これらの問題があるため、多くの場所の状態を実時間で計測するのは困難であった。三菱電機ビルテクノサービス株式会社は太陽電池を用いた無線センサシステム³⁾を發明している。太陽電池を使った場合、長期間、太陽が当たらない場所での電力が供給できない。配電線の場合、ビルの谷間など、太陽光が当たりにくい場所があるため太陽電池が利用できない場合がある。

熊本電波高専の大田教授のグループは送電線の計測用非接地電源装置の開発を行っている¹⁾。この計測用非設置電源装置は電線に流れる電流により計測システムに必要な直流低電圧を供給するものであり、本システムの電源供給部と類似している。しかしながら資料を見る限りこのシステムは共振用コンデンサを用いる工夫を行っていない。また、ZigBee を使ったデータ配信については述べられていない。

三菱電機は ZigBee を用いた情報収集システム⁴⁾を發明している。この發明は ZigBee を用いて各所にちらばったデータをバケツリレー方式で収集する部分が類似している。無線センサをグループ化してもよいことについても述べている。しかしながら、グループ化する手法に関する記述がない。

中央電力研究所の研究では支持物等の傾斜、断線などに伴う腕金類のひずみ変化、電線・支持物の固有振動数の変化など、様々な要因を計測対象としている⁹⁾。ZigBee の電波伝搬特性の研究についても行われており、我々と同様の結果が得られている。しかしながら、この研究では誘導電流による ZigBee 端末の駆動については述べられていない¹⁰⁾。シンクノード問題の解決方法についても述べられていない。

無線センサでデータを収集する「シンクノード」に関する問題は各所で研究されている。とくに、シンクノードは負荷が高くなり、その消費電力をいかに少なくするか、という観点から研究が行われている場合が多い。このような研究の一つとして、hEPAS⁵⁾を取り上げ、比較してみる。hEPAS ではノードが一定の割合で各階層の集約ノードになり、その情報を周りに周知する手順をとる。このため、各ノードは、確率を計算する処理が必要となる。これに対して本發明のアルゴリズムでは、センサノードがグループに参加するときと、どれかのノードに障害が発生したときのみ、AODV を使って、集約ノードを検索し、そのとき、自動的に階層が構成される。

8. おわりに

配電線に流れる誘導電流によって駆動される ZigBee を用いた配電システムの監視システムに関して述べた。今後、実現に向け、研究開発を行っていく予定である。

謝辞 本システムの研究にご協力いただいた、秋田一成氏、長友賢悟氏、小山彰一氏、関谷祐一氏および関係者の皆さまに感謝する。

参考文献

- 1) 大田一郎, 西山英治, 松田豊稔, 川野光則, 桑波謙史, “高圧送電線の計測システム用フローティング電源回路の開発”, 電気学会論文誌 D, Vol. 123, No. 6, pp.754-761, 2003.
- 2) [RFC 3561](#): *Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing*, 2003.
- 3) 三菱電機ビルテクノサービス株式会社「無線センサネットワークシステム」特許出願 2005-378863, 2005.
- 4) 三菱電機株式会社「無線センサネットワークシステム」特許出願 2005-143462 (特開 2006-323440), 2005.
- 5) Y. P. Chen, A. L. Liestman, and J. Liu, “Energy-Efficient Data Aggregation Hierarchy for Wireless Sensor Networks,” Proc. Qshine 2005, August 2005.
- 6) 竹田義行(監修), “ワイヤレス・ブロードバンド時代の電波/周波数教科書”, インプレス, 2005.
- 7) 鄭立, 「ZigBee 開発ハンドブック」, リックテレコム, 2006.
- 8) 長友賢悟, 秋田一成, 山之上卓, 畠山雅登, 中島秀貴, “ZigBee センサの電波伝搬特性”, 火の国情報シンポジウム, C-8-5, 鹿児島 1 to 2 Mar. 2007
- 9) 矢花修一, 斎藤潔, 宮下充史, 他, “配電設備を対象とした災害時の早期異常検知システムの提案 (その1)”, 電力中央研究所報告, 研究報告 NO08011, pp.1-17, 2009.
- 10) 宮下充史, 星康一, 斎藤潔, 他, “配電設備を対象とした災害時の早期異常検知システムの提案 (その2) 配電柱間マルチホップ通信システムの試作と評価”, 電力中央研究所報告, 研究報告 R08007, pp.1-13, 2009.
- 11) 蓬田 宏樹, “スマートグリッド”, 日経エレクトロニクス, 2009年6月1日号, 2009.