

要素技術

Chapter 3

電力のパケット化とルーティング技術

Power Packetization and Routing Technology

引原隆士（京都大学）

スマートグリッドに関連した用語が新聞の紙面で飛び交い、昨今基盤技術として先進の技術からは顧みられることが少なくなっていた電力・エネルギー分野が、情報技術の適用によって新しいフロンティアとして着目され、新しいエネルギー技術、持続可能社会実現への入り口として脚光を浴びている。動力を電気エネルギーに変換する発電機の発明は19世紀に遡る。現在の交流電力の大規模ネットワークは、この発電機間を電力を融通する線路で繋ぐと同一周波数に収斂する性質に依存している。この性質を維持しつつ必要な電力を供給する大規模システムの運用において、ICT技術がブレークスルーを与える技術となり得るであろうか？ スマートグリッドなどの技術がエネルギーシステムに革新を与えるか否かは、この点を抜きに議論することはできない。本稿は、人の生活環境、すなわち建物内からボトムアップに電力分野を通信・情報分野と融合させる手法として、電力パケットを導入する方法とそのルーティングの可能性を、周辺技術の現状に基づき述べる。

エネルギーネットワークの概要と 情報化の動き

既存の電気エネルギーネットワークに再生可能エネルギーによる分散電源や蓄電機器を情報通信ネットワークと統合して導入し、高効率で新しいエネルギー供給系を構築することを目指す、いわゆるグリーンICTの研究が昨今急に盛んになっている。その1つの手法が、マイクログリッド、スマートグリッ

ドである。この電気エネルギーネットワークを見直す機運の原点を探せば、世界経済のグローバリズムに基づく電力の自由化と、その後に2000年代に入って米国、欧州で国境を越えて立て続けに起きた広域の停電（ブラックアウト）などで生じた大規模ネットワークの信頼性の崩壊にあったと考えられる。大停電の後、我が国では専門の人を除けば対岸の火事ぐらいにしか意識されていなかったが、米国ではIEEEはもちろん物理学会でもこの大停電のメカニズムに関する物理的な理解とそのコントロールが議論され、ICTによる機器の情報化とネットワーク化を1つの方向性として打ち出した。このことが、米国の政権の交替のプロパガンダとして、ICTによる情報収集と制御が遅れていることで資本投下が可能でフロンティア分野の創出として、そして、経済危機後の経済対策として、ICT技術による仮想空間とエネルギーという物理空間との統合の動きを加えたエネルギー戦略として徐々に具体的になってきた。

高度にネットワーク化された交流電力による電気エネルギーシステムは、発電機を電力を送る線路で接続すると同一の周波数に収斂するという性質に依存している。これを同期現象という。このような発電機を多数結合したシステムの運用は、多数の回転振子をつないでその回転を一定に保つ制御と同等であり、素人でもその複雑さは容易に理解できる。一般にこのような系は複雑系と呼ばれその振舞い自体が研究対象となっているが、望ましい状態で運用し制御する技術の理論はいまだに確立していない。

電気エネルギーネットワークは、電源、送電線路と負荷からなるアナログ回路である。この回路は電力を

特集 エネルギーの情報化

電源から負荷に高効率で伝送することを目的として設計されている。この電源電圧を一定に維持して電力を送る（定電圧送電方式の）回路では、電源となる発電機のネットワークを介した同期の維持が交流電力伝送の大前提であり、電源間の電力伝送はそれらの相互の位相差で決定される。電力システムとは、このような電気エネルギーネットワークの定常状態を維持し、運用する電気回路システムである。

さて、ICTの飛躍的な進歩が物理層に対して空間的および時間的に詳細な情報収集を可能にしている。電気エネルギーネットワークでは負荷消費が統合的に『見える化』でき、電力ネットワークの各所の状態がGPSによる時間的基準を用いて空間的絶対位置関係のもとで同時計測可能になり、それらの連携により新しいネットワーク運用技術が生まれるのではないかという技術論が展開され始めている。

本稿は電力供給企業が高度に管理運営する超高压、高压の系統を対象として議論するものではない。それらが適切に運用されて各家庭まで電力が伝送され、系統の供給電源は各家庭が有する高度に質を保たれた電源となっている。その上で、その供給電力を利用しながらこれまでの大容量の発電機とは異なる小容量の電源である分散電源を利用して生成された電力を、蓄電系および負荷の間に人の生活要求に合わせてICTにより最適に運用する技術として電力のパケット化と電力のルーティングの導入を提案する。特に、情報伝送と電力伝送の同時性を確保することにより、物理的条件で支配される実世界の物理量と仮想世界の計算値の不整合をなくすことの必要性について述べる^{☆1}。

電力の基礎

電圧、電流および電力について議論する基礎的な準備として解説をしておく。電気エネルギーは家庭

内ではそのプラグに機器を接続してスイッチを入れると何の複雑な取り決めもなく電流が流れ、電力が供給される。直流では単に高い電圧端子の電源側から低い電圧端子の負荷側に電流が流れ、その結果として電力が供給される。一方交流においては、ある基準に対して同一周波数、同一位相であれば振幅の大きい方から小さい方に電力が供給されるが、同一周波数、同一電圧においては位相が進んでいる方から遅れている方に電力が供給される。電力伝送に預かるキャリアである交流は、そのソースである発電機出力の同期を前提とする。交流電圧がどれほど負荷に仕事として電力を供給するかは、電圧に対する電流の位相 ϕ に支配される。ここに力率(power factor)という概念が加わる。要するに、ある振幅、位相、周波数電圧が加えられたとき、電流が流れるアナログ回路の構造が決定されたとき、伝送できる電力はキルヒホッフの法則に従う。その中で、キャリア成分だけ取り出したとき、電圧と同位相の電流($\cos \phi$ 成分)が運ぶ電力が有効電力であり、進みもしくは時間的に遅れた位相にある電流($\sin \phi$ 成分)が運ぶ電力が無効電力となる。電力には周期に対する平均値を用いる場合と、瞬時値を用いる場合がある。

■ 電力パケットとルータに関する研究

電力パケットによるエネルギー伝送の概念は、1990年代にすでに提案されている。たとえば豊田による電力供給側の技術として提案したものなどがある¹⁾。図-1の概念図に示すように、単位となる電力のパケットに情報ネットワークを介してタグ付けし、電力をタグに応じて振り分けすると同時に、バッファとなる貯蔵装置に蓄えられた電力を必要に応じて電力をネットワークに供給する概念を提案した。この電力の振り分けを行う機器としてルータが提案され、電力パケットの数量制御により電力の伝送が可能としている。ルータは、発電機器の電力をスケジューリングしながら蓄電装置に貯め、負荷状態に応じて送電する。この考え方はインターネットのTCP/IP技術にならった物理層のデバイスを提

^{☆1} 本稿に述べる内容は、NICTの委託研究「情報通信・エネルギー統合技術の研究開発」で実施している研究課題の一部、および知的クラスター創成事業「京都環境ナノクラスター」におけるSiCパワーデバイス開発の基礎研究に基づくものである。

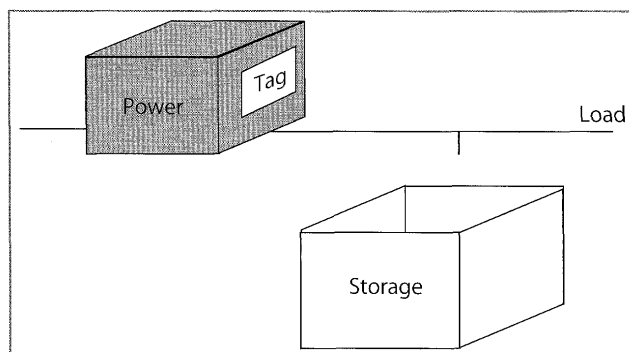


図-1 電力パケットの概念

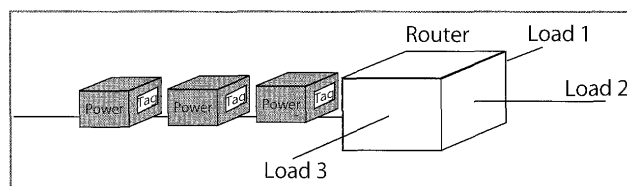


図-2 電力ルータの概念

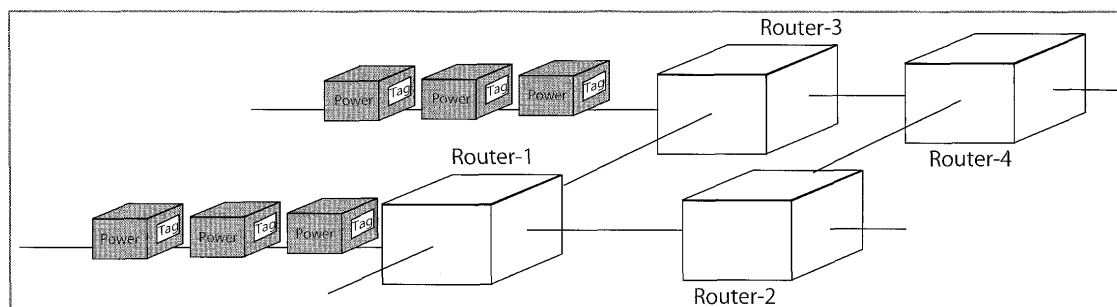


図-3 ルータによるループ系統の概念

案したものである。

豊田の研究を受けて、マトリクスコンバータを用いた電力系統連系用直接変換(交流—交流直接変換)機器にルータ機能を持たせる提案がある²⁾。これは、アナログ電話のクロスバー交換機概念を適用したもので、小容量で多入力多出力(MIMO)の自由度を確保することができる。この制御を情報タグに基づいて行うことが提案されている。製品レベルでは、双方向のUPSを電力系統に適用し、バッファ機能を持たせることで電力の量的なルーティングを図る電力ルータがある³⁾。この機器は、交流直流変換、蓄電、直流交流変換を経る装置UPSと同じ動作をする。しかしながら、これらは電力のパケット化を物理的に実現しているとは言えず、電気エネルギーネットワークとICTの併用により電力の流れを制御するシステムと言える。このような物理層の研究とは別に、藤井らは電力パケットの利用を前提に、主として供給側で電力パケットを利用した電力流通システムを構築できる可能性を、回路シミュレーションに基づいて検討している⁴⁾。

さて筆者らは、電力を伝送する電圧波形をペイロ

ードとするパケットに、ソース情報、アドレス情報などからなるタグを付け、ネットワーク上の分岐を前提とした小容量の電力のルータ(図-2)による伝送を提案し、装置開発を行っている。バッファ機能を持つ分路装置は分路の1つに蓄電装置があると考ええる。このようなルータを用いて家庭内で図-3のようなループ回路を構成し、相互に電力パケットを双方向に伝送しながら負荷の要求に応じて電力を伝送する物理層の構成の可能性を検討している。

提案する電力パケットは、先の提案とは電力へのタグ付けの方法と対象とするネットワークの点で大きく異なる。筆者らの提案は、建物、事業所内への導入を想定し、受電端から内部のEnergy on Demand (EoD)を実現することを目的としている。電力パケットに付与するタグを図-1の通り物理層の電圧波形そのものに付与し、電力と情報の伝送を統合化する。電力と情報の統合化は、完全にすべてのレベルで行うことはできない。しかしながら、少なくとも家庭内に太陽光や燃料電池等の発電機器が導入されたとき、その電力と電力会社から購入する電力を、機器レベルで分離できるもしくは確実な比

特集 エネルギーの情報化

率が指定できることが必要となる。これは、利用者側の論理である。そのために、情報処理上の算術で等価的に量を分離するための仮想的タグ付けではなく、物理量に直接タグ付けし、そのタグに基づいて電力をルーティングする技術を確認する技術は、実際の物理を扱う上で避けて通ることはできない。

■ 周辺技術の発展

電力のパケット化とルーティングに関連する周辺技術の発展の状況を次に見る。まず、情報通信技術において、計算機的能力や無線 LAN, 3G, ZigBee, PLC (Power Line Communications) など情報通信技術の大きな向上が挙げられる。個々の機器が通信機能を有することができると同時に、これらを介した遠隔のデータ収集および制御が可能になっている。次に、インターネット環境の変化がある。多くの機器の状況がネットワーク上で管理され、それらの状態が簡易に「見える化」できるようになった。プレゼンテーション層で HEMS (Home Energy Management System) の「見える化」の運用が可能となっている。GPS (Global Positioning System) などの基準を利用した分散システムの協調などもリアルタイムで可能になりつつある。電源では、太陽光、風力、燃料電池といった分散電源と、HEV (Hybrid Electric Vehicle), EV (Electric Vehicle) に促された二次電池の開発が急加速し、その利用がすでに始まっている。分散電源と二次電池の開発は、身近な所に発電要素があることを意味し、家庭内でもこれらを組み合わせたエネルギーマネジメントが可能になっている。家庭内は上述したように電力供給側の管理区域外にあり、電力供給側は電力の遮断や質に対して責任を負っていない。逆に言うと、管理がなされていない。読者も家庭内でブレーカが切れるという経験があるであろう。ところが、家庭が負荷から電源に変わり始めたとき、自由裁量であった機器の設置や管理に制限が必要となっている。すなわち電気エネルギーネットワークは、一方向流(潮流)として一定の供給電力を取り合うだけでなく、負荷としての逆方向流(逆潮流)を送ることが可能な容量内

でその取り分を競う状況となっている。これでは、仮想的にいくら需給を調整しても、現実の物理量としての電力が流れないという事態が生じる。この状況は、電力の自由化で生じた事業所の電力を取り巻く環境の変化と同様である。

一方、物理層の最も物理寄りでは、次世代半導体として、Si よりそのバンドギャップが大きいワイドバンドギャップ半導体、特に SiC (Silicon Carbide) を用いたデバイスの開発が進み、広く商用の利用が可能な状況になっている⁵⁾。一般に電力用パワーデバイスは動作時の損失を減らすために、オン・オフという二状態を用いるスイッチ素子として用いる。SiC パワーデバイスも電力用のスイッチ素子である。Si に比べて SiC MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) は同耐圧クラスなら導通抵抗が 1/10、スイッチング損失も 1/10、動作周波数は 10 倍以上といった優位性がある。また高温特性にすぐれ、Si の 180 度に比べて、倍以上の環境でも通常の動作が確認されている⁶⁾。中でも SiC JFET (Junction Field Effect Transistor) は高周波特性にすぐれ数 MHz のスイッチング周波数を大容量で達成できる⁷⁾。これらの先進的な特性を実現する素子がこの 10 年間に開発されたことは大きな意味を持つ⁵⁾。すなわち、これまでとは格段に効率の良い変換素子を含む回路で、これまでにない高い周波数で電力変換を行い、さらに耐圧からも温度特性からも小型集積化が可能になる。これが、電力伝送と通信伝送の同時性の実現を可能にする。同じ変換器による同じ変調電力で、通信と電力伝送を実現できたとき、電力は物理量としてプロセッシングでき、交換器による回線の切替えにより伝送先の高速、高効率な選択が可能となる。同時に、SiC パワーデバイスは非常に高い効率の変換が可能となる。Si のパワーデバイスでは直流-交流変換でほぼ 90% 程度の効率しか得られない。そのため、変換を複数回経ると効率は極端に悪くなる。これらの課題が SiC パワーデバイスの出現で克服されていったとき、これまでのアナログ回路による電力伝送がデジタル回路による ICT を付加した伝送に

変更されていく可能性がある。

このような技術環境の変化は、最新デバイスや技術を民生においてまず展開する我が国では、末端の家庭内およびその周辺の変える可能性が高い。この機運が、ICT による新しい電力の管理運用技術の物理層との統合への手段を与えている。このことを見失うとおそらく我が国はこの技術の流れから脱落する。

■ 電力のカラーリング

電気エネルギーネットワークにおいて、電源から供給される電力の行き先を追跡することを電源の色に分類することに例えてカラーリングと呼ぶ。電力のカラーリングの発想は線形回路理論の電源に関する重ね合わせの理^{☆2}が現実の系で成立するかという議論である。重ね合わせの理の延長線上で既存の電力システムの検討がなされている⁸⁾。上述したように電気エネルギーネットワークは広域のアナログ交流回路である。Bialek らは発電機あるいは電源から供給される電力を負荷ごとに分ける、あるいは負荷に供給される電力を発電機ごとに比例配分できる可能性を、回網の電圧、電流の関係を支配するキルヒホッフの法則に基づいて示した(図-4)。非線形結合系である電気エネルギーネットワークにおいて、線形の重ね合わせは保証されない。

この考え方は時間の瞬時瞬時に状態がキルヒホッフの法則に従えば、その線形近似が適用可能な範囲においては過渡状態でも成立し、高い周波数、異なる周波数など電力伝送のキャリアも問わない。しかしながら、伝送路はその電力伝送の制約となり、非線形性が現れると入力情報によって算出される出力が物理的に実現できる保証はない。交流電力の伝送は位相差で支配され常に電力と位相が非線形な関係を有するため、仮想的な線形性の仮定に限界がある。広域の大容量の電力システムにおいて電力自由化により実現されている方式は、時分割(30分のオーダ

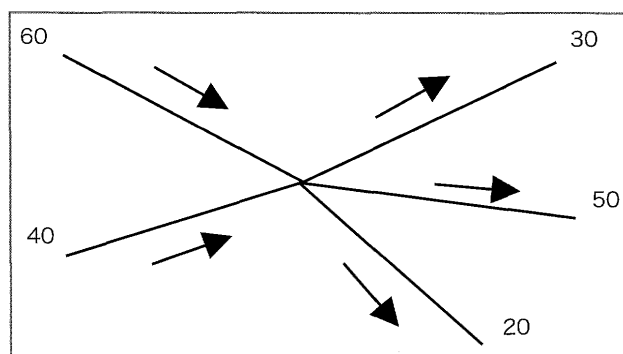


図-4 Bialek によるトレーシングの基本的考え方⁸⁾

一)で、電力の要求量を調整し、シミュレーション等でその際の系統の状況を把握し、情報の管理者がそれを満たす最適な回路を実現するために回線を切り替える。しかしながら、実際に使用する電力にどの電源の電力が使われるかを識別し、電源に応じて分離することは不可能である。中央管理システムのない家庭内において、多くの電源、蓄電装置および負荷を最適に運用する技術として EoD が提案されている。このとき、商用の電源と太陽光発電等の自然エネルギーのどちらを用いて電力供給するかといった回路の物理法則と異なる EoD を実現するためには、それぞれの電源の電力が特定できるカラーリングを実現することが必要となる。また、現実には力率が変化する機器が多く、重ね合わせを保証する線形性は担保されない。したがって、その意味でも本当の物理量にカラーを付けてその電源を特定しなければ、電源ごとの電力の負荷への割り付けは不可能となる。

マルチ入出力電力ルータと電力パケットの提案

本章では、マルチ入出力の電力ルータと電力パケットについて述べる。

■ ホームネットワークにおける電力パケットと通信方式

提案する電力パケットおよびそのルーティング手法は、家庭内で電力にタグと行き先情報を与え、そ

☆2 複数の電源と抵抗から構成される回路網において、回路網中の任意の電流は個々の電源が回路網全体に与える電流の和になるという性質を言う。

特集 エネルギーの情報化

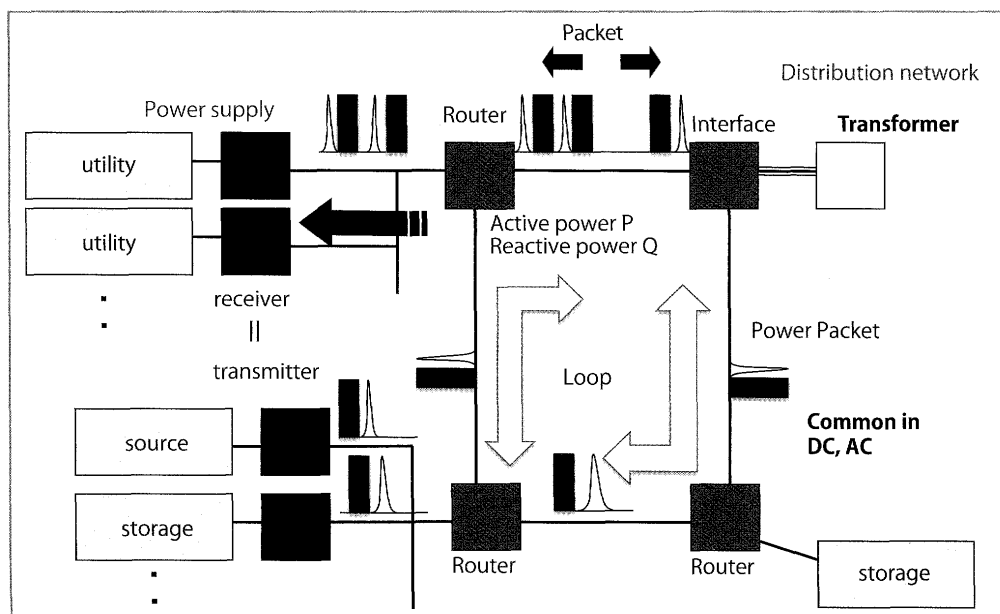


図-5 Home Network における電力パケットの伝送

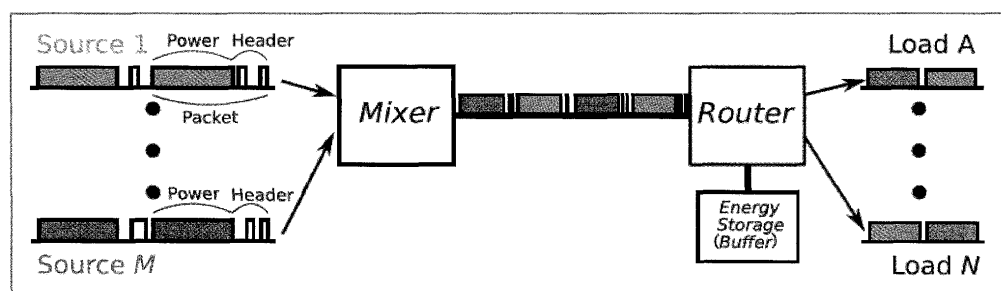


図-6 電力パケットとルータ

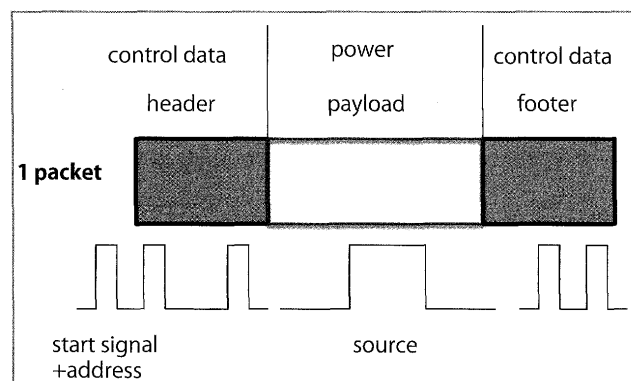


図-7 電力パケットの構成

の情報に基づいて必要な電力を機器、電源、蓄電池、およびルータ間で双方向に伝送するものである。図-5 にその概念図を示す。その取り扱いのイメージを図-6 に示す。各パケットは図-7 のようなヘッダ、ペイロード、フッタからなる。このパケットの生成により、ペイロードの電力が同ライン上の通信

とともに伝送され、その伝送線路の分配器がそれを受け取る許可を得ているときのみ、スイッチによりラインを繋ぐことができる。その際に高速のスイッチングによるルーティングが必要になる。許可を得ていない分配器はその電力を受けて伝送することを禁じる。

電力の伝送を直流、交流にかかわらず、そのペイロードにヘッダ、フッタを付加してパケット化すると、この単位の電力の個数によって必要な電力を送ることができる。同時に電力のカラーによる負荷への分配が時間分割で可能となる。また電力変換回路と同様高周波のスイッチングでパルスを生成し、その個数で送る電力を制御するパルス密度変調を行うことができれば、伝送電力のデジタル化と同時に、マルチチャネル化が容易になる。電流が流れている状態でスイッチングするハードスイッチングを行う

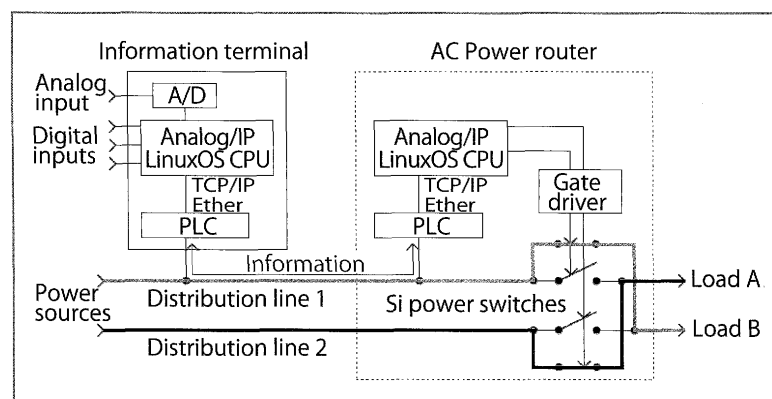


図-8 ac ルータの構成

と、スイッチによる損失が増える。このため可能な限りゼロ電圧もしくはゼロ電流でスイッチングするソフトスイッチングを行うと、パワーは搬送波とその目標周波数に集中させることができる。通信方式としては種々の方法が考えられる。CDMAなどの方式でノイズ対策を取り、セキュリティを確保することが必要である。しかしそれ自体は現在ある技術の適用で済む。また、接続した複数のターゲットの中の特定のターゲットに集中的に大きな電力を送ることなども現在の携帯電話ですでに用いられている電力制御技術を適用することができるであろう。一方、ペイロードに上述のパルス密度変調のような変調を用いれば、平均電力ではなく瞬時電力をさらに細かく調整することができる。このような変調を高い周波数で行うためにはデジタル制御が不可欠であり、その際にアナログーデジタル変換や1ビットアンプ等の変調で用いられている $\Delta\Sigma$ 変調方式などが有効となる。これらの技術は、いずれも実用に供されている技術であり、それ自体が新しいわけではない。したがって、ここでキーとなる技術が、パワープロセッシングの技術であるということが再確認できる。

従来ホームネットワークは、外部の配電網を電源とする負荷回路である。しかしながら、現在この考え方は崩れ、その内部に複数の電源を備え、また直流、交流が混在した系となっている。電力の遮断を回避するためには、このネットワークをループ状とすることにメリットがある。ルータは、電源系から

の電力の混合、ルータ間の電力のやりとり、負荷への分配を双方向に行うことになる。そのやりとりの情報は、各電力パケットに付与されたものだけが用いられ、情報ネットワークで別に与えられるものは想定しない。ルータがその情報に応じてルーティングを行うことを実現したとき、本当の意味で電力パケットとルータが実現することになる。高周波高効率な電力用半導体素子および変換回路の開発がそのキーテクノロジーとなる。

■ ルータの開発

これまでの研究において、交流用、直流用電力ルータのプロトタイプ機器を開発し発表した⁹⁾。図-8に交流用ルータのシステム図を示す。また、直流用ルータの概念図を図-9に示す。これらのプロトタイプの装置により、上述のパケットの伝送に関してすでに原理の実現性を確認した。その結果、電源側および負荷側の相互の通信により、負荷による電源選択および、電源による送電先制御が回路的に可能であることを確認した。現在、これらの回路にSiCパワーデバイスを実装する段階に研究を進めている。ただし、現時点では、高速スイッチングが可能なSiCパワーデバイスのデバイス容量は1から2kW程度であり、このルータの適用可能な容量範囲に限界がある。これより、ルータが導入できる範囲が自ずと家庭内や事務所内に限定される。

特集 エネルギーの情報化

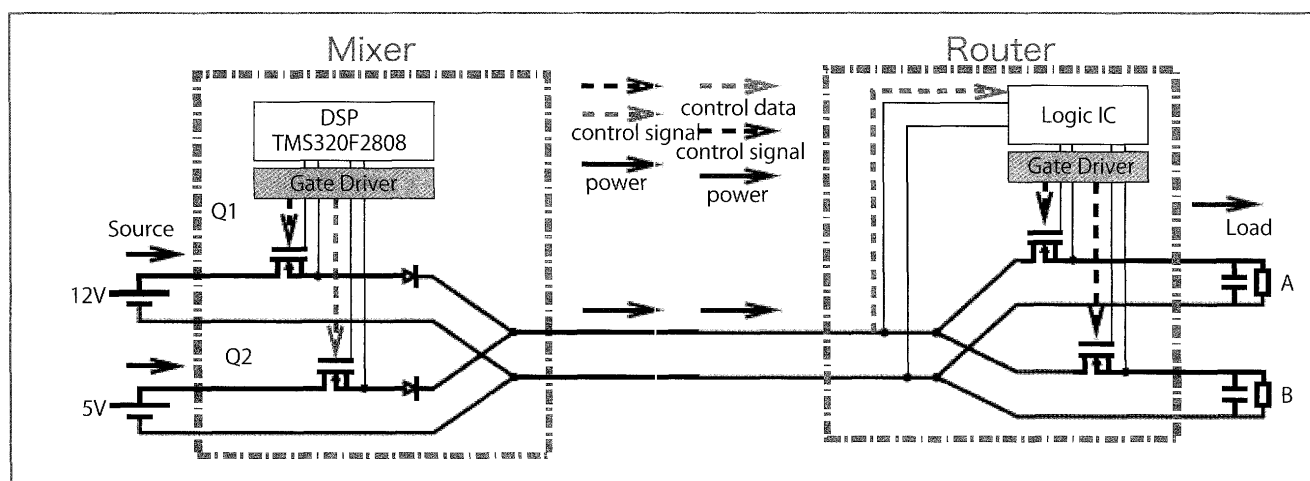


図-9 dc ルータの構成

■ 今後の課題

電力パケットを電力伝送に用いる電気エネルギーシステムを導入したとき、その伝送領域と電力供給会社の電力網との接続点を分離する必要がある。この接続点に内外のインタフェースを置き、外部から見たときに内部の状況にかかわらず可能な限り一定の負荷もしくは電源に見えるような制御が求められる。このインタフェースにおいて電圧と電流の位相を調整し、その関係を電力の供給側に負担を負わせない形で作ることができれば、分散電源の家庭への導入が容易になる。同時に、システムの導入が容易になる。このような、電力パケットをルータにより伝送し電力を供給する範囲を、家庭内からその外まで広げることができるかどうかは法律による制限があるため、今後の議論が必要となるが、同時に技術的にどこまで可能かという実験もいまだ実現されていない。今後まずは独立した建物、地域でこの電力伝送方式を検討し、その可能性を確認していく必要がある。

本稿は、電力パケットの生成および電力ルータの開発に関してまとめたものである。この技術は、情報通信・エネルギー統合技術のキーテクノロジーの1つになるであろうと考えられる。しかしながら、本稿でもお分かりいただけるように、この開発は材料・デバイスから通信、電力、システムという電気電子工学の学問分野すべてにわたる研究開発を必要とするものであり、既存の技術の簡単なつぎはぎで

は辿り着けない領域にある。こういった基礎研究を経ずに机上のみの議論で検討することは裏付けのない技術として排除されることになる。そのような研究が技術の将来の可能性を閉ざしてしまう危険性があることも重々理解しておく必要がある。

参考文献

- 1) 豊田淳一：開放型ネットワークの可能性，電学誌，Vol.117，No.6，pp.345-348 (1997)。
- 2) 鎌倉輝男，林健太郎，黒川浩助：マトリクスコンバータを用いた系統連系用ルータ機器の開発，平成18年電気学会電力・エネルギー部門大会，185 (2006)。
- 3) スマートグリッドON！—蓄電池とセンサが創る次世代電力網—，日経エレクトロニクス，2009年10月19日号。
- 4) 井上 淳，藤井康正：分散型電源普及時の電力流通システムに関する研究，電力技術・電力系統技術合同研究会 PE-09-127 (2009)。
- 5) 荒井和雄，吉田貞史：SiC 素子の基礎と応用，オーム社 (2003)。
- 6) Funaki, T. et al., : Power Conversion with SiC Devices at Extremely High Ambient Temperatures, IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.22, No.4, pp.1321-1329 (2007)。
- 7) Takuno, T. et al. : HF Gate Drive Circuit for a Normally-On SiC JFET with Inherent Safety, 13th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2009), Barcelona Spain, (Sep. 8-10, 2009)。
- 8) Bialek, J. : Tracing the Flow of Electricity, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol.143, No.4, pp.313-320 (1996)。
- 9) 宅野嗣大，小山めぐみ，引原隆士：多入力多出力電力変換回路による電力パケットルーティング，2010年電子情報通信学会総合大会，BS-8-4 (2010)。

(平成22年6月6日受付)

引原隆士

1987年京都大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程研究指導認定退学。京都大学工学博士。2001年京都大学大学院工学研究科電気工学専攻教授。主として、非線形動力学およびその工学的応用、電力変換制御の研究に従事。