パワーエレクトロニクスの革新技術

海田　英俊（うみだ　ひでとし）

1　まえがき

エネルギー源を確保しつつ，二酸化炭素（CO_2）削減による地球温暖化防止や環境保護などの課題を解決していくことが社会的に求められている。現代社会は電気エネルギーの利用をベースに構築されていることから，効率の高い電力源によるリスク分散や無駄のない適切な電気エネルギーの利用を実現していくことが必要となる。発電機制御や電車などの社会インフラストラクチャーから工場の設備，自動車，家庭電化製品，携帯電話の電源まで幅広く使用されているパワーエレクトロニクス技術は，世の中にとってなくてはならない技術であり，かつ非常に重要な役割を担っている。

本稿では，パワーエレクトロニクスを一つのコア技術として業界をリードする富士電機の取組みを紹介する。

2　パワーエレクトロニクスの課題

代表的なパワーエレクトロニクス機器をパワーデバイスごとにグルーピングしてマッピングしたものが**図1**である。IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）の高性能・大容量化の先駆的活動によって，UPS（Uninterruptible Power Systems）やインバータから大容量の無効電力補償装置，フリッカ補償装置のようなサイリスタ，GTO（Gate Turn Off thyristor）の領域まで IGBT 化し，低損失で高性能の機器を製品化してきた。さらに最近では高圧インバータに代表される中規模機器の高圧対応を進めている。**図2**は汎用インバータの装置体積の推移である。パワーデバイスの進歩によって損失が大きく改善されたことで，装置体積はモータとほぼ同等のレベルに到達している。また，情報関連機器や携帯機器の領域では，高速低損失 MOSFET（Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor）の適用が進み，小型高性能化が顕著である。

1990 年代に入りパワーエレクトロニクスの中心課題は，エンジンや機械系，あるいは発電機や電池の機能を等価的に置き換え，電子制御化して高性能を実現することであった。その過程で制御性能の向上や小型低価格化，LAN（Local Area Network）によるシステム化が進み，さまざまな分野に適用が拡大した。富士電機はこうした背景下，常に新デバイスの開発とそれに基づいたパワーエレクトロニクス機器を業界に先駆け開発・供給し続けてきた。

21 世紀に入りパワーエレクトロニクス機器の課題は高度情報化と省資源・環境調和の同時実現であり，社会的要請に応える新しいデバイス，新しいパワーエレクトロニクス機器の発信基地となるべく，富士電機では下記の技術目

図1　パワーデバイスとパワーエレクトロニクス機器群

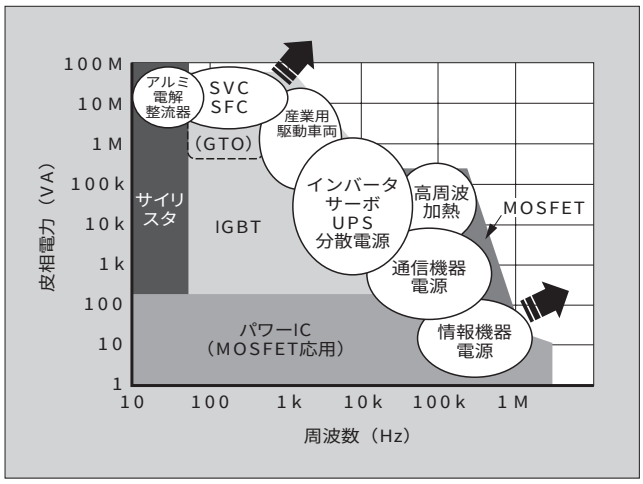
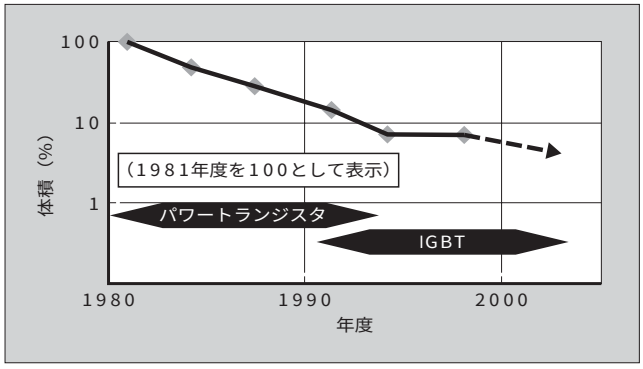


図2　汎用インバータの装置体積の推移



海田　英俊

マイクロプロセッサを応用したパワーエレクトロニクス技術の開発に従事。現在，（株）富士電機総合研究所エレクトロニクス技術研究所長。工学博士。

標に取り組んでいる。

(1)　新しいキーコンポーネントによる技術革新

(2)　新技術による小型低損失化

(3)　知能化への注力

3　新技術の動向

エネルギーの損失を抑えながら，最高度の性能を発揮させるための技術開発を進める中で，今までにない新しい技術を幾つか開発した。以下にその一部を紹介する。

3.1　新しいキーコンポーネントによる技術革新

パワーエレクトロニクスは新しいパワーデバイスが出現するたびに大きく飛躍してきた。富士電機では，今までにない新しいキーコンポーネントとして，逆阻止 IGBT を開発している。既存のパワーデバイスや回路との機能比較を**表１**に示す。既存のパワーデバイスは，**表１**のように逆方向の電圧や電流を印加しないようにするか，さもなければ還流ダイオード（表中の Di）を付加しなければならない。一部の GTO を除く一般の高速な自己消弧素子，すなわち GTO，パワートランジスタ，MOSFET，IGBT はすべて逆阻止能力を持っていないため，今まで逆阻止能力を要する回路方式が省みられることはなかった。しかも，既存のパワーデバイスを使用する従来の電力変換回路は，AC-DC ないし DC-DC 変換を複数段組み合わせて所望の機能を実現せざるを得ない制約があった。逆阻止 IGBT ではそのような制約がなく，今までにないさまざまな回路方式や直接変換による画期的な損失低減を期待できる。

直接変換の代表例であるマトリックスコンバータには双方向スイッチが使用される。これを従来は**図３**のような既存の IGBT とダイオードとの組合せで構成していた。これに対し，逆阻止 IGBT で双方向スイッチを実現するには２個逆並列接続するだけでよい。双方向スイッチ９組で構成する三相マトリックスコンバータを業界に先駆けて実証したのでその入出力波形例を**図４**に示す。任意の周波数，電圧の三相交流に直接変換するマトリックスコンバータの入力電流は良好な正弦波であり，しかも電圧降下は 1/2，損失は 2/3 に低減することが確認できた。このマトリックスコンバータの制御は，従来は複雑でインバータとは異なる技術が必要であるとされていた。そこでの課題を解決するために仮想 AC-DC-AC 変換方式を開発[(1), (2)]し，マトリックスコンバータのスイッチングパターンを整流器とインバータのスイッチングパターンから数学的に合成することで最新のインバータ制御技術を直接適用可能にしている（**図５**参照）。

表１　パワーデバイスの制御能力比較

素子/回路		電流制御能力 順方向	電流制御能力 逆方向
既存素子	GTO，パワートランジスタ，IGBT	開閉	禁止
既存素子	GTO（Di），パワートランジスタ（Di），MOSFET，IGBT	開閉	導通
逆阻止IGBT		開閉	阻止

3.2　新技術による小型低損失化

電気エネルギーを変換する装置に要求される条件は，高

図３　双方向スイッチの比較

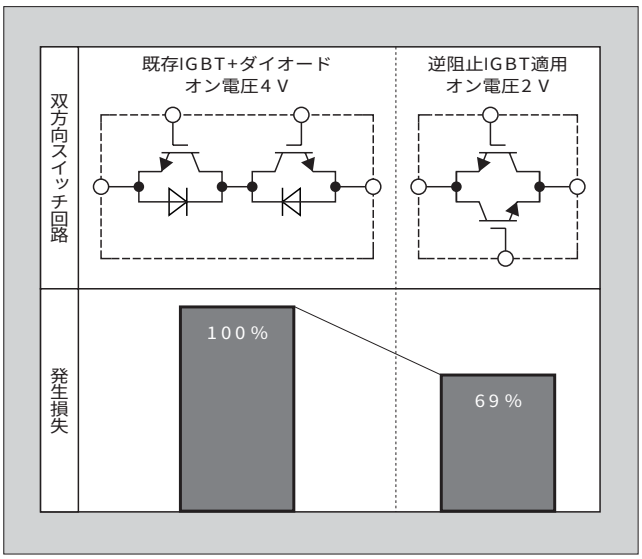


図４　マトリックスコンバータの構成と動作波形例

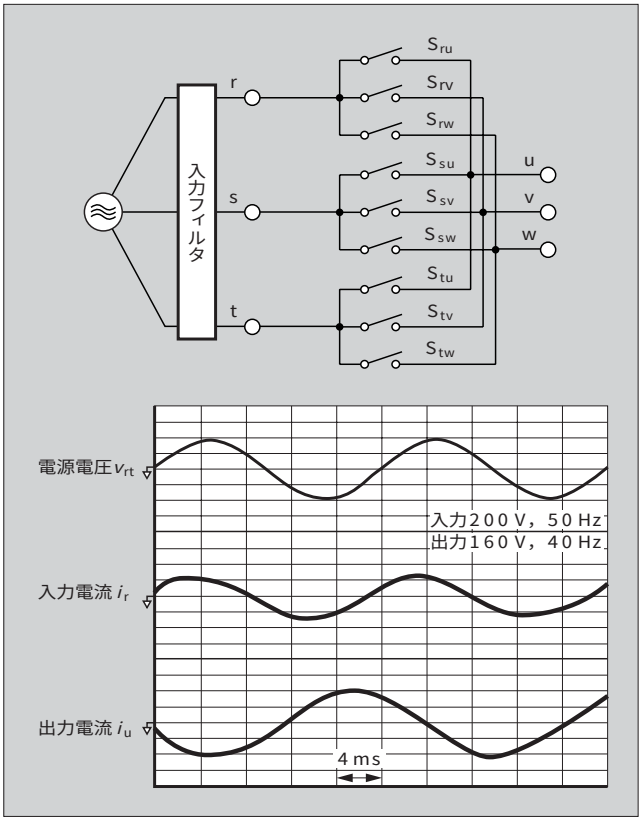
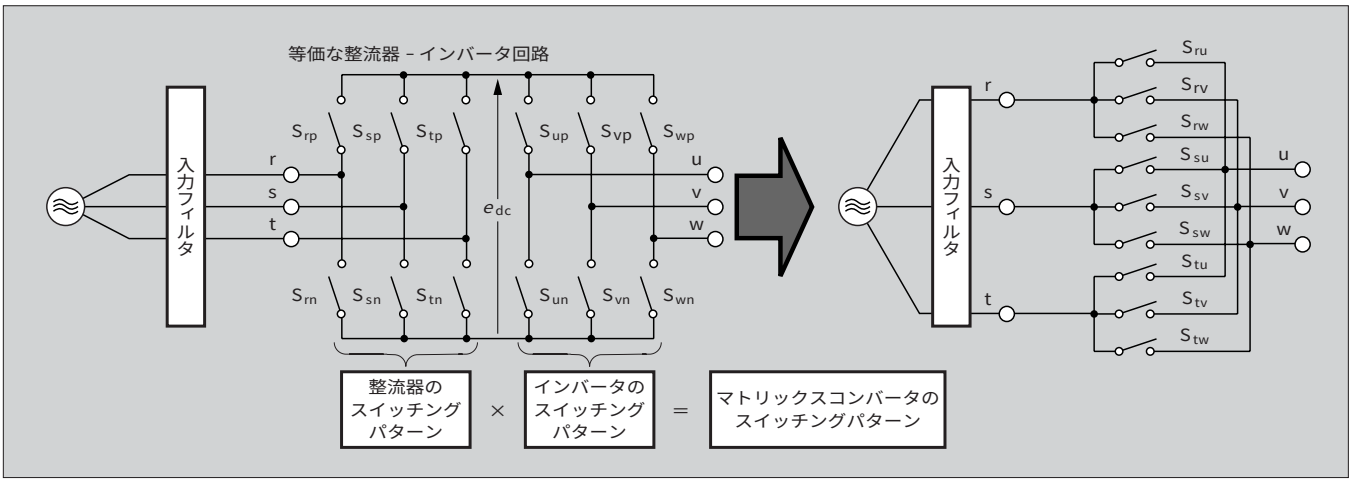


図５　仮想 AC-DC-AC 方式の原理



い制御性を有し，装置自体の損失が少ないことである。富士電機は高速制御や超高精度を実現する制御技術を保有しており，さらに既存技術の理論限界を打破する高性能・高効率を実現するべく変換回路技術の開発を鋭意進めている。ここでは効率が重視される電源技術について紹介する。

電源などに使われる AC-DC 変換回路は，従来はダイオード整流器が効率やノイズの面で最も有利とされていた。しかしダイオード整流器は高調波が多く発生する欠点があり，電源高調波規制に適合できない。そこで近年は力率改善回路が使われ始めているが，スイッチングによるノイズ，損失増大を伴う欠点があり，解決は急務となっている。

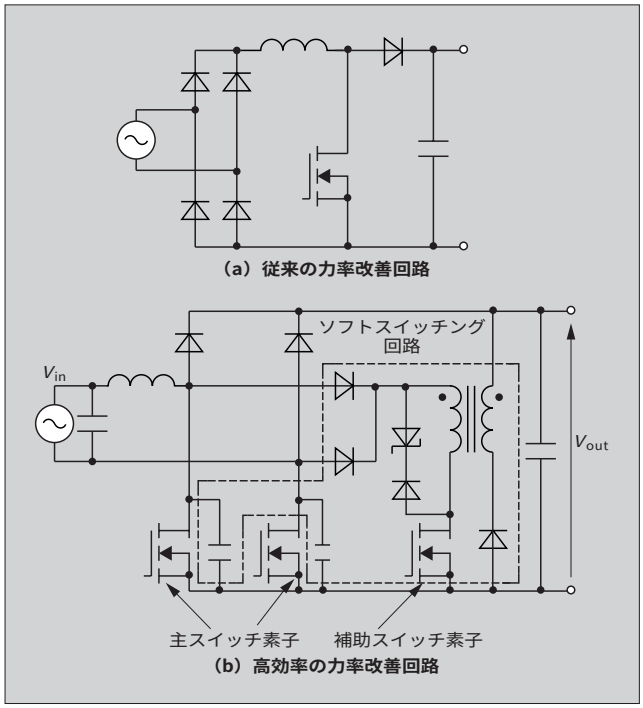
図６に単相力率改善回路の例を示す。**図６**(a)は一般的に使われている回路である。この回路の効率はおよそ 95 %どまりであり，約 5 %の損失の大半をダイオードの電圧降下損と MOSFET のスイッチング損が占めている。これらの損失を低減した例が**図６**(b)の高効率力率改善回路である。主スイッチの MOSFET の逆導通期間にゲートを順バイアスとして整流による損失を半減させる制御技術と，補助スイッチの MOSFET の働きで主スイッチのスイッチング損失をゼロにするソフトスイッチング技術を組み合わせることで，全損失は**図６**(a)の 1/2 に激減し，同時に低ノイズ化も実現している。MOSFET は低オン抵抗化が急速に進んでいることから，今後の飛躍的なオン抵抗の低減によって，ダイオード整流をしのぐ高効率化を期待できる。

次に，三相用力率改善回路例を**図７**に示す。提案方式は双方向スイッチ回路を巧みに応用することで，IGBT にかかる電圧を一般的に使われている三相 PWM コンバータの 1/2 にしている。これによって安価な低耐圧 IGBT を用いながらも，電源電圧 200 V と 400 V への対応を実現している。さらに，低圧化による損失半減の効果によって，装置体積半減（当社従来比），400 V 時における効率 97.4 %と業界トップクラスの成果を得ている。

3.3　知能化への注力

最近のパワーエレクトロニクス機器は，標準のネットワーク機能を搭載して情報化，システム化に対応している。

図６　単相力率改善回路



情報化が進んだ今日における次の課題は知能化であろう。オートチューニングのように特定のルールに基づく最適化は定型的な調整作業の自動化を実現しているが，高度な性能が要求される先端的用途では依然として熟練者の技が必要となっている。特に熟練者の判断に頼っている部分は処理の体系化が進まず，アルゴリズムになりにくい。そこで，これを解決する研究の一環として，数学的な手法やメタヒューリスティックな手法の応用技術を開発している。ここでは調整に関する自動化技術の例を紹介する。

未知の制御対象の構造の同定は，熟練者の判断能力に頼っている作業の一つである。この課題に対し，特異値分解法を応用した制御対象の同定例が**図８**である。制御対象の伝達関数の同定結果に伝達関数の次数を判定する処理を施すことで，構造を特定することが可能となっている。

制御対象の構造が決定されると，次に適切な制御の選択

図７　ワールドワイド対応三相力率改善回路

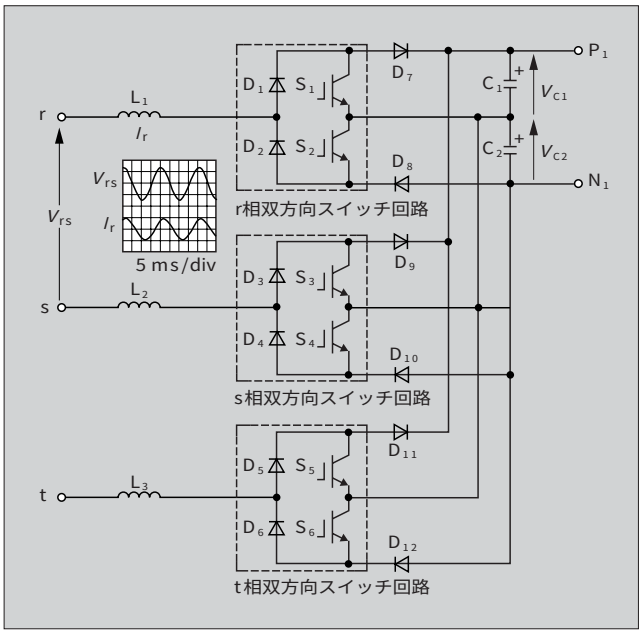
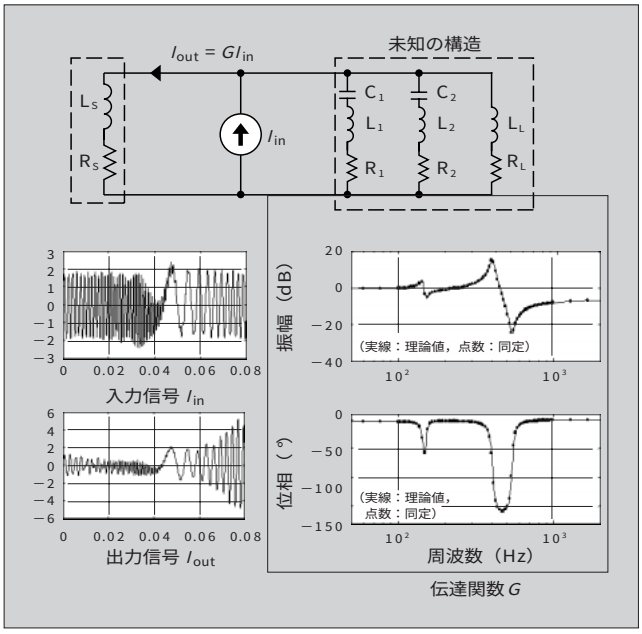


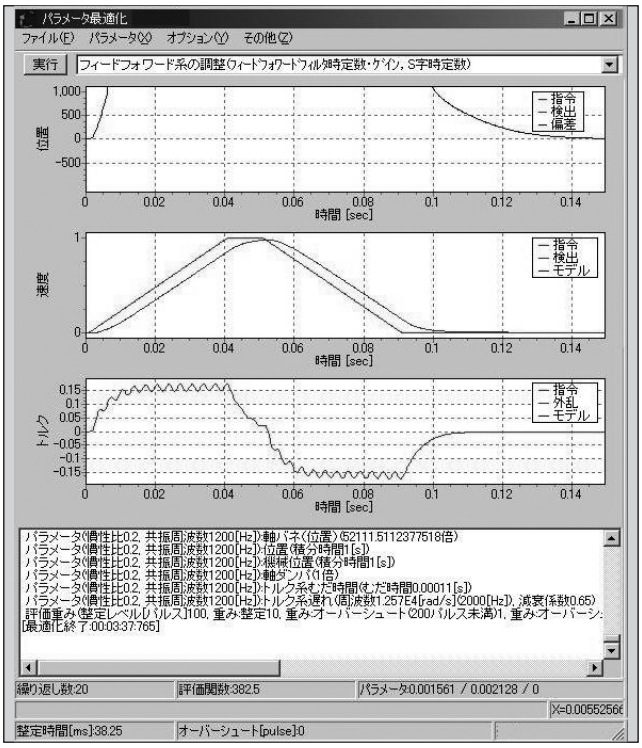
図８　特異値分解法に基づく制御対象の同定



と調整に入ることができる。ところが，実際の装置では多数の調整要素が複雑に絡み合っている。そこで，同時に一つか二つのパラメータしか調整できない人間の代わりに，メタヒューリスティックな手法の適用を試みている。**図９**は制御系の調整例である。この手法は多くのパラメータを同時に操作できるので，多くの試行回数を重ねることなく調整結果を得ることができる。

以上の研究はまだ熟練者の域には到達していないが，経験による判断方法の解明や新しい手法と組み合わせることによって，今まで熟練者に頼っていた作業をアルゴリズムに変換して自動化を進めることができると考えている。

図９　メタヒューリスティックな技法による自動調整



4　あとがき

パワーエレクトロニクス技術の概要と富士電機における革新技術の取組みの一部を紹介した。新しい課題への挑戦は緒についたばかりであるが，今後の取組みとして，インバータや UPS，燃料電池や太陽電池による分散電源といった富士電機が得意とする分野では，効率や性能で常に業界をリードする新技術の開発に注力し，環境と調和のとれた住みやすい社会の実現に向けて貢献する所存である。同時に，今までにない新たな応用技術の開拓や新分野への適用についても総合技術力を生かして積極的に推進し，パワーエレクトロニクスの先端を切り開きながら社会の発展に寄与していきたい。今後とも関係各位のご指導・ご支援をお願いする次第である。

参考文献

(1)　伊東淳一ほか．仮想 AC/DC/AC 変換によるマトリックスコンバータの PWM 発生法．平成 15 年電気学会全国大会講演論文集．vol.4, no.066, 2003, p.93-94.

(2)　佐藤以久也ほか．マトリックスコンバータの電圧利用率改善法．平成 15 年電気学会全国大会講演論文集．vol.4, no.067, 2003, p.95-96.

(3)　小高章弘ほか．マトリックスコンバータの素子発生損失とジャンクション温度のシミュレーション結果．平成 15 年電気学会全国大会講演論文集．vol.4, no.068, 2003, p.97-98.

(4)　松原邦夫ほか．ソフトスイッチング回路を適用した高効率力率力率改善回路．平成 15 年電気学会全国大会講演論文集．vol.4, no.054, 2003, p.73-74.

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。