パワーエレクトロニクス機器の要素技術

特集

中村　一夫（なかむら　かずお）　　笹川　清明（ささがわ　きよあき）

1　まえがき

パワーエレクトロニクス（パワエレ）機器は，家電機器から産業・社会インフラまで幅広い分野に浸透し，省エネルギー（省エネ），生産性向上，電力エネルギーの高度利用に貢献している。

富士電機は，産業・社会インフラ，輸送，エネルギー・環境分野に多くの製品群を提供するとともに，その基盤となるパワエレ技術の開発を進めてきた。

本稿では，パワエレの要素技術に関する取組みについて紹介する。

2　要素技術開発の取組み

地球環境問題（地球温暖化，環境汚染など），化石燃料枯渇，少子高齢化・労働人口減少，グローバリゼーション，安心・安全の追求といった社会環境の変化がある。市場では，CO_2 削減，省エネ，自然エネルギーの利用，生産性のさらなる向上，安全性・高信頼性への要求が強い。

そのため，パワーデバイスの小型化・低損失化あるいは高周波回路・実装技術による小型化・高効率化，各制御機能の高度化，生産現場での安定操業を継続するための高信頼性，電源高調波・電磁ノイズ低減といった環境調和をより高い次元で実現することがパワエレ機器に求められている。

富士電機はこれまで，**図1**に示すように，情報機器内蔵の DC/DC コンバータ（50 W クラス），無停電電源装置（500 kVA），圧延機用インバータ（5 MVA 超），アルミニウム電解用整流器（800 MW クラス），高周波加熱用電源（1 MHz，1 MW クラス）など，幅広い用途や容量，周波数にわたり特徴ある製品を市場に提供してきた[(1)]。

パワエレの基盤技術は大別すると，①パワーデバイスとその適用技術である電力変換回路技術，②制御理論と各種パワエレ機器固有の制御，およびネットワーク技術といった制御技術，③変圧器・リアクトル・回転機などのハードウェアに関する電力機器技術から構成されている。富士電機は，上記の特徴ある製品群を提供するとともに，産業・社会インフラ，輸送，エネルギー・環境などの分野に市場ニーズをとらえた魅力ある次世代製品を提供するために，パワエレ基盤技術の強化とパワエレプラットフォーム構築（各機器共通の最適設計技術の拡充）のための要素技術開発を進めている。（**図2**）

図1　富士電機のパワーエレクトロニクス機器群

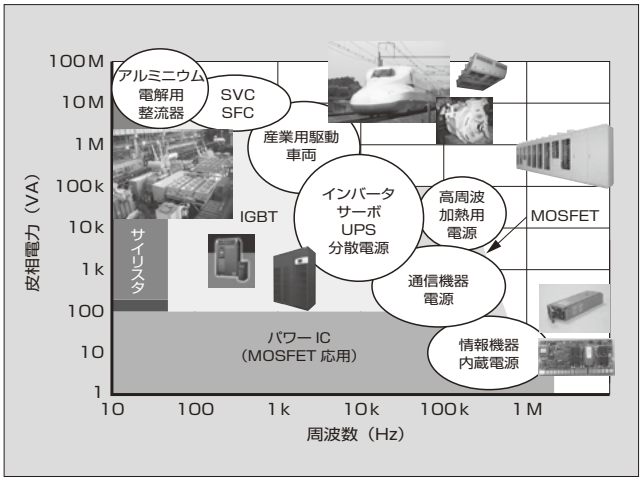
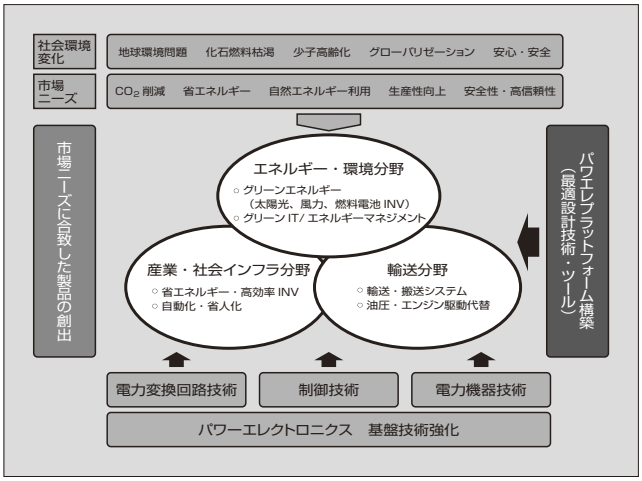


図2　市場ニーズとパワーエレクトロニクス機器開発の取組み



中村　一夫

パワーエレクトロニクス装置を主体としたプラントエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社技術開発本部パワエレ開発センター長。電気学会会員。

笹川　清明

パワーエレクトロニクス製品の開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー株式会社取締役。エレクトロニクス技術センター長。電気学会会員。

本稿では，電力変換回路技術として装置の単機容量拡大のための大容量化技術や小型化を実現する高電力密度化技術を，制御技術としてドライブ機器の高度化を実現するドライブ制御技術を，電力機器技術としてモータ設計技術を，さらにパワエレプラットフォーム技術の課題と最近の取組みについて紹介する。

3　電力変換回路技術

3.1　大容量化技術

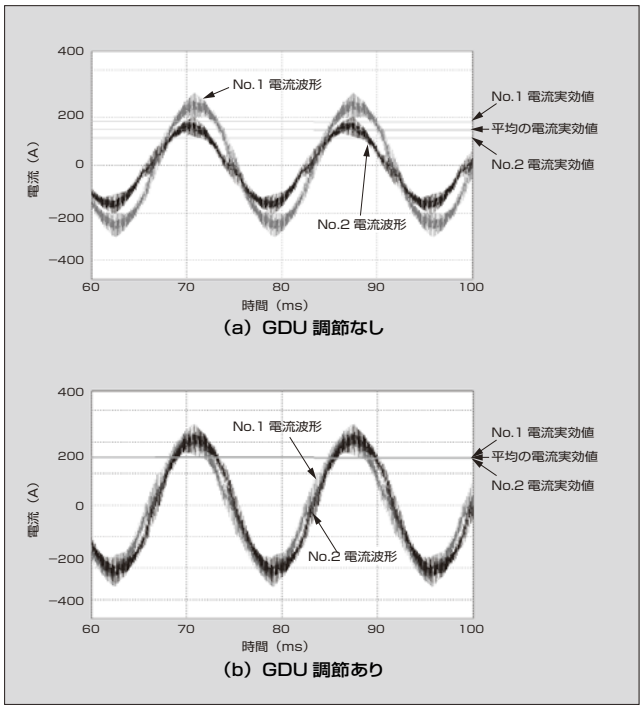
富士電機では，パワエレ応用製品の適用範囲の拡大を目的に，パワー半導体素子の直並列接続，パワーユニット並列化，装置多重化さらにマルチレベル化などの大容量化技術に取り組んでいる。ここでは，直並列接続技術とパワーユニット並列化技術について述べる。

パワー半導体素子の“直並列接続技術”では，非常に簡易な回路構成でありながら，直列接続されたIGBTの素子電圧を，過渡動作期間においても平衡化できる回路方式を開発した。本方式の特徴は，素子のスイッチング特性をほとんど変えることなく直列接続が可能で，スイッチング損失の増大を抑制できることである。富士電機では，高圧IGBTの代替として，高周波でのスイッチング特性が良好な1kVクラス汎用IGBTを本方式の多直列接続により高耐圧化して適用することで，高圧大容量電力変換装置の高性能化を実現している。

また新大容量UPS「UPS7700Fシリーズ」では，パワーユニット並列化技術として，共通パワーユニット（100kVA）を用い，その並列接続による100kVAから，最大600kVAまでの機種拡充と大容量化を実現している。

パワーユニット並列化の課題は，各ユニットの出力電流アンバランスの抑制にある。装置内で同一制御信号により動作する各ユニットの電流アンバランスは各ユニットが個別に持つ，並列接続用を兼ねたフィルタリアクトルL_fの偏差とパワー半導体IGBT用駆動回路（GDU）遅延時間の偏差が主要因となる。**図3**(a)にL_fの偏差とGDU遅延時間の偏差がある場合のインバータ用パワーユニット2並列でのシミュレーション波形を示す。シミュレーション結果では，標準的仕様のL_fとGDUを用いた場合，2並列時で約20%，6並列時では約40%もの電流アンバランスが生じる。そこで，今回の装置ではパワーユニット内のGDU部にユニットの電流偏差分を検出し，IGBTの駆動信号を調節する機能を付加した。具体的には，ユニット出力電流の偏差が正のときだけ，IGBT上下アーム間のデッドタイムを増やすように調節を加えている。そのシミュレーション波形を**図3**(b)に示す。この方法により，L_fおよびGDU遅延時間に偏差がある場合でもユニット電流アンバランスの抑制が可能となり，パワーユニット最大6並列接続を簡易な手法により実現した。

図3　2台並列時のシミュレーション波形

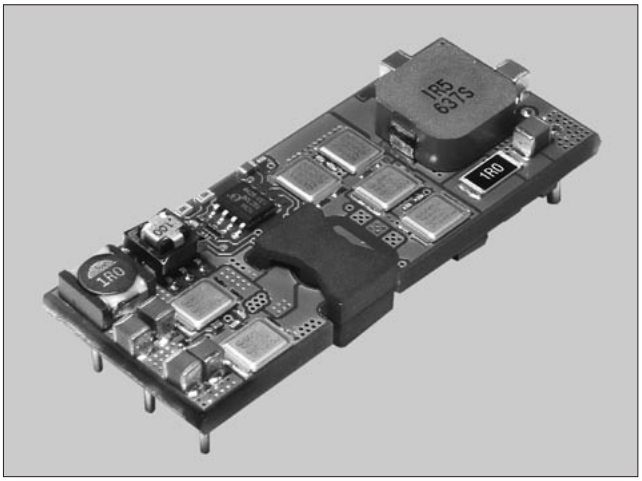


3.2　高電力密度化技術

電源装置に対しては常に小型化が求められているが，近年特に情報・通信分野において，同容量でのサイズ低減や同サイズでの容量アップといった高電力密度化の要求が高まっている。

バスコンバータは通信装置などにおいてフロントエンド電源（AC入力/DC出力）の出力電圧を中間バス電圧（12Vなど）に変換するための絶縁形DC/DCコンバータであり[2]，ブリックと呼ばれる業界標準サイズがある。100Wクラスでは主流であった1/4ブリックサイズに代わり1/8ブリックサイズのものが普及しつつある。富士電機においても1/8ブリックへのダウンサイジングと[3]，さらに同サイズにて100Wから200Wへの出力アップを実現した。**図4**に200Wバスコンバータの外観を示す。外形寸法は22.8（W）×57.8（D）×9.5（H）（mm），定格入力電圧は48V，出力電圧は12Vである。高電力密度化を実現するために，次の技術を適用している。

図4　200Wバスコンバータ



特集

(a)　絶縁トランスの巻線に，多層プリント板の配線パターンを利用した構造とし，薄型化を実現した。さらに配線パターンの形状，配置は漏れインダクタンスや巻線抵抗を最小にするように考慮し，これに伴う損失の発生を抑制している。

(b)　半導体スイッチング素子などの発熱部品からの熱を拡散させるため配線パターンを利用している。このため配線パターンは水平方向（面方向）および垂直方向（層方向）への熱伝達率が極力大きくなるような形状，構成とした。

(c)　主回路電流をスイッチングする部分と制御部分がきわめて近距離で混在する構成となるため，配線パターンによるシールドや，基板の層間を接続するスルーホールを利用した１点アースなどにより，主回路ノイズによる誤動作を防止している。

(d)　トランス二次側の整流回路において，新方式のスナバ回路（電圧抑制回路）を適用することにより損失の小さい，低耐圧半導体部品を使用できるようにした。

現在は容量系列化と，上記技術の他機種への展開を進めている。

4　制御技術

富士電機では，ベクトル制御，オブザーバ理論などの適用技術開発に取り組み，電動機を組み込んだドライブ装置の高性能化を行っている。ここでは，電動機駆動の高性能化として永久磁石形同期電動機（PM モータ）の磁極位置センサレス制御技術を，ドライブ装置の高性能化としてクレーンの振れ止め制御技術を紹介する。

4.1　電動機駆動高性能化技術

鉄道車両・ファン・ポンプなどの分野で，誘導電動機に比べて小型・高効率である PM モータの適用が進んでいる。誘導電動機と同様の電動機本体のセンサレス化・高精度トルク制御のニーズに応えるため，磁極位置検出器を用いないベクトル制御技術に取り組んでいる。ここでは課題とされてきた低速域での性能向上について紹介する。[4]

低速域での安定化の方法として，インダクタンスが磁極位置の関数であることを利用した方式がある。この方式は，高周波を印加したときの電圧，電流情報からインダクタンス変化を検出して磁極位置を推定するものである。低速時でも磁極位置を精度良く推定できる長所があるが，印加する高周波による騒音や突極性の小さいモータに適用できないなどの短所もある。

富士電機では，低速時でも磁極位置を精度良く推定でき，騒音や適用モータの制限のない磁束オブザーバ方式の研究開発に取り組んでいる。磁束オブザーバ方式は，電動機の電圧方程式に基づいて演算した磁束から磁極位置と回転速度とを推定する方式である。**図 5** に示すように，磁極位置・速度推定部を構成することで，磁極位置誤差がゼロとなるように調節動作が働き，磁極位置推定値は真値に一致する。**図 6** は，低速時（2% 速度）のトルク特性である。−150% から +150% のトルク範囲で，良好な特性精度が確保できている。

4.2　ドライブ装置高性能化技術

搬送機械・工作機械などの機械系を負荷とするドライブ装置では，作業効率や安全性の観点から，機械系の振動抑制が重要となっている。ここでは，クレーンの振れ止め制御技術について紹介する。[5]

クレーンの振れ止め制御ではカメラで振れ角を検出するのが一般的である。しかし，画像処理を行うために，モータの制御演算と同じ頻度で振れ角を検出することができず，また検出の遅れも生じ，性能向上の妨げとなっている。

富士電機では，デュアルレート型のオブザーバを適用し，精度が高く，検出遅れの少ない振れ角推定技術の研究開発に取り組んでいる。振れ角オブザーバは，**図 7** の制御システム構成に示すように，モータ制御演算ごとに推定演算を行う高頻度オブザーバとカメラの画像処理時間ごとに演算処理を行う低頻度オブザーバとで構成している。低頻度オブザーバでは，画像処理により演算した時間遅れを含んだ振れ角検出値とクレーンの運動方程式から演算した振れ角推定値との差から，オブザーバのモデル補正量を算出する。高頻度オブザーバは，この補正量に基づいて内部モデルを

図 5　磁極位置とセンサレスベクトル制御構成

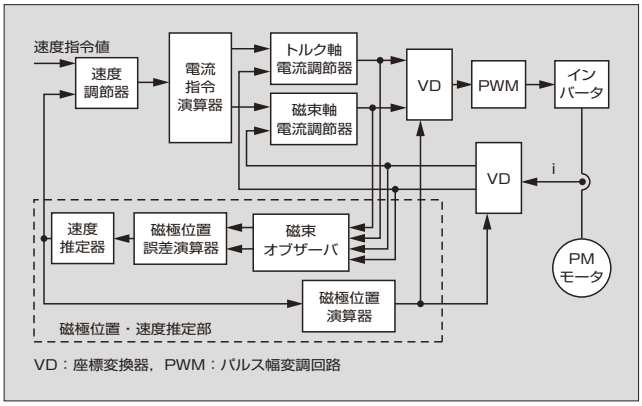


図 6　トルク特性（2% 速度）

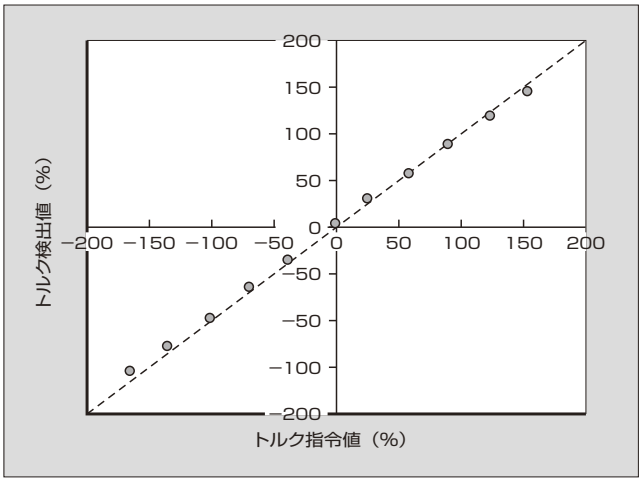


図 7　クレーン振れ止めシステム構成

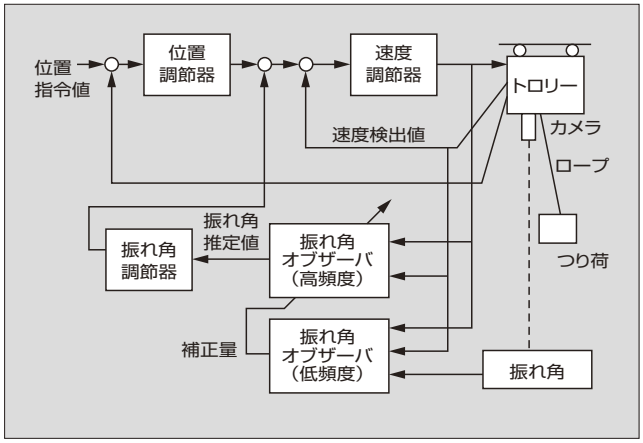
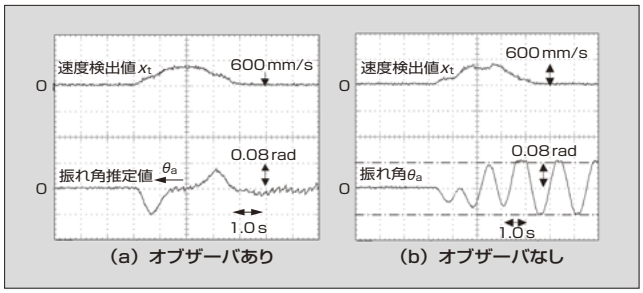


図 8　クレーン振れ止め実験結果



（a）オブザーバあり　　（b）オブザーバなし

適切な値に補正し，振れ角制御に用いる振れ角の推定精度を高めている。**図 8** は，ロープの長さを 15% 短くしてクレーンの運動方程式，すなわちオブザーバの内部モデルに誤差を持たせて行った，実験装置による振れ角制御の評価結果である。このような場合でも，低頻度オブザーバによるオブザーバのモデル補正を有効にすれば，良好な振れ角制御を行えることが確認できた。

5　パワーエレクトロニクスプラットフォーム

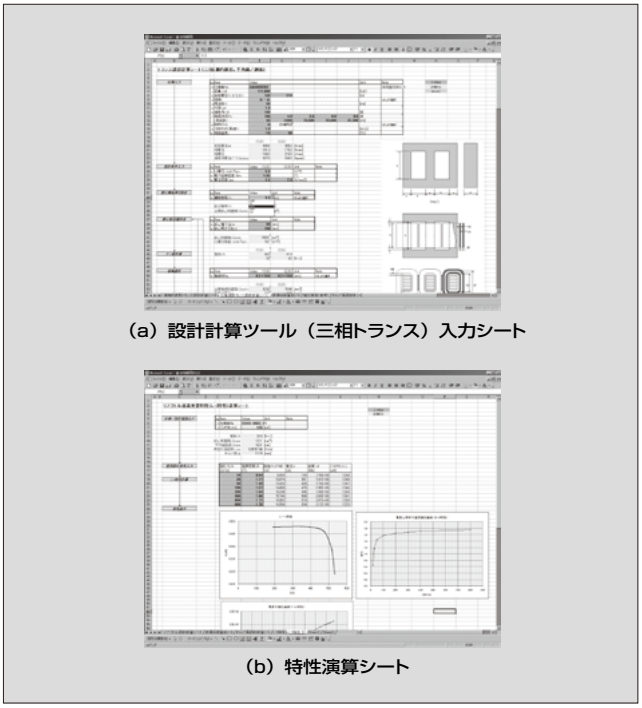
富士電機では，パワエレにおける共通基盤技術の整理と再構築を目指し，電気回路，制御装置，ソフトウェア，冷却，構造および EMC などの設計プラットフォーム技術の強化を進めている。これまで，UPS，インバータ，スイッチング電源，車両駆動装置への適用を行い，小型・軽量化を図るとともに，開発期間の短縮に寄与している。

本章では，パワエレ機器には不可欠な磁気部品に関する設計ツール，カスタム対応に即時に設計対応ができるスイッチング電源などの組込み電源向け設計ツール，さらには高密度化が進む装置のキーテクノロジーとなる冷却に関する設計ツールについて紹介する。

5. 1　磁気部品設計ツール

半導体素子の進歩により，パワエレ機器の高電力密度化が進められる中，主要部品であるトランス，リアクトルなどの磁気部品の体積比率，発生損失が相対的に増加してきている。一方，近年の材料価格の高騰を背景に，より少ない材料で要求される部品性能を満足するため，これまで以上に磁気部品の最適設計，限界設計の追及が必要となっている。

図 9　磁気部品設計ツールの構成



（a）設計計算ツール（三相トランス）入力シート

（b）特性演算シート

富士電機では，磁気部品設計ツールを開発し，高品質でコストパフォーマンスの高いパワエレ機器の開発を推進している。

図 9 に，磁気部品設計ツールの構成を示す。ツールは，要求される電気仕様，使用する鉄心材料と寸法などをデータベースより選択する入力シートと，各種特性を自動計算する特性演算シートで構成している。設計ツールは，直流/交流（単相，三相）リアクトル，インバータに用いられる単相/三相トランスに対応しており，インダクタンス，ギャップ長，損失（鉄損・銅損）などの特性を自動算出する。さらに，鉄心，およびコイル形状と発生損失により，実使用状態での各部温度上昇を算出する機能を備えており，磁気部品に求められる性能，信頼性を最少の材料で実現する最適設計条件を短時間で探索することができる。

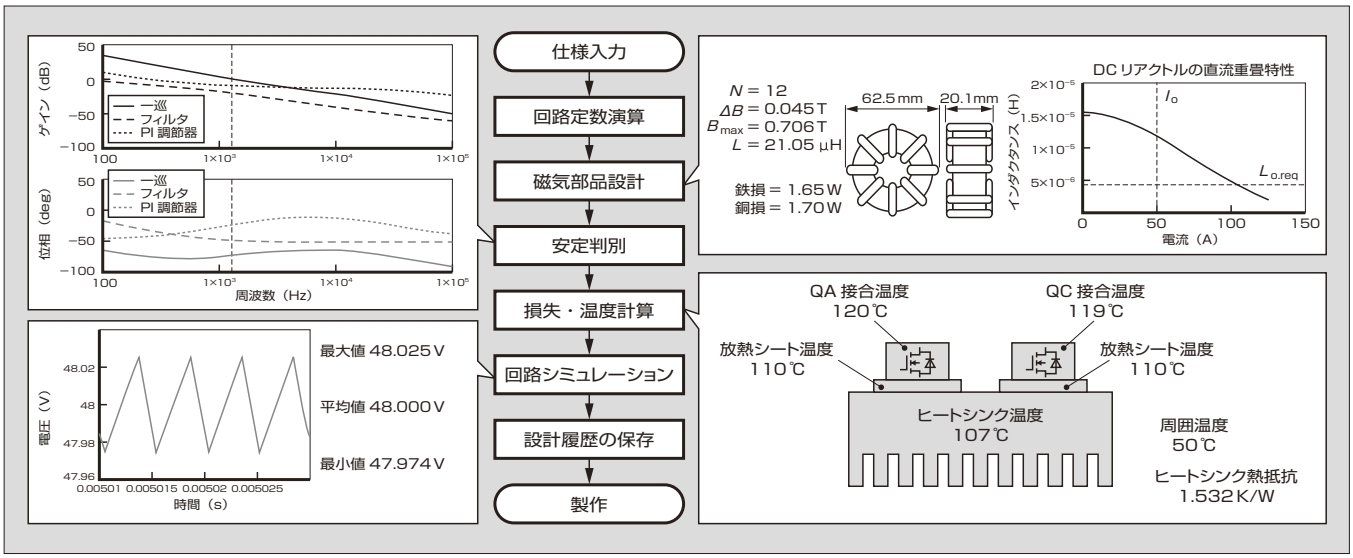
これにより，設計段階における性能予測により，試作・検証回数の削減を実現し，製品開発期間を短縮しただけでなく，材料最少化，部品小型化も実現した。

5. 2　組込み電源向け自動設計ツール

組込み電源はさまざまな仕様に基づくカスタム品が多く，顧客仕様に応じてその都度，設計・製作・評価を実施している。そこで，顧客要求に対してスピーディに製品を提供できるように，組込み電源向け自動設計ツールを開発し，運用している。

本ツールは**図 10** に示すような構成になっており，仕様を入力することで回路定数を自動演算できる。磁気部品の設計においては，得られた回路定数をもとに損失や外形など

図 10　組込み電源向け設計ツール概要



を最小にするような巻数やコア材，線材などを演算・選択する。設計アルゴリズムには富士電機独自のノウハウを盛り込み，さらに繰返し演算などのコンピュータの利点を生かして最適設計を実現している。設計結果はボード線図や回路シミュレーションに反映され，直ちに安定性や回路動作が確認できる。また，各部の発生損失や温度も自動演算され，熱設計に反映している。最後に，設計や解析などの一連の結果を一つのファイルとして保存し，トレーサビリティを確保できるように工夫をしている。

現在では，回路バリエーションも拡充し，さまざまな電源製品で自動設計ツールを活用できるようになっている。ツールを使うことで設計期間の短縮だけでなく，ミスの少ない設計が可能になり，試作機の設計変更や再評価に要していた時間も短縮でき，カスタマイズ対応力が強化されている。例えば，開発期間においては，従来の手法と比較すると平均 20% の短縮ができている。

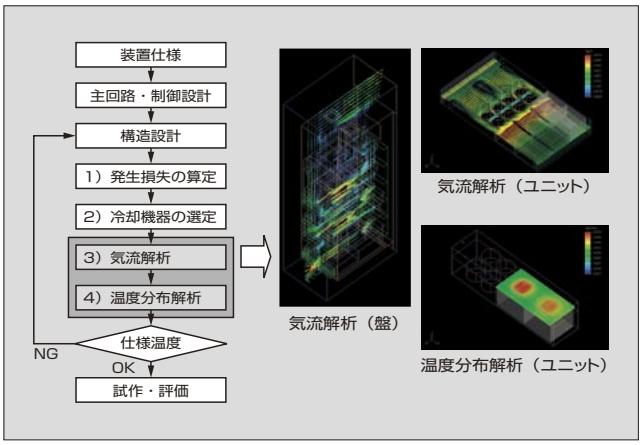
5.3　冷却設計ツール

従来のパワエレ機器の冷却設計は，発熱部から放熱部に至る経路を熱回路として表し，定常温度上昇および過渡温度上昇を計算していた。しかし，高密度で大規模な製品では部品配置や構造が複雑であるため，モデル化レベルや熱伝達率などの境界条件の設定精度によっては，設計値と実機評価結果に大きな乖離（かいり）が生じる場合がある。さらに，半導体モジュール接合部の局所的な温度分布や，放熱フィン内部の微小な空間の風速分布は測定が困難なため，三次元熱流体解析シミュレーションの導入が必要となる。

そこで，短時間で大規模な盤構造内部の気流分布や，半導体モジュールのチップレベルの発熱に対応した温度分布の高精度な算定が行える，三次元 CAD と連携した気流・温度分布解析手法を開発し，冷却設計ツールとしてまとめた。

図11 には，パワエレ機器の冷却設計フローの概要であり，

図 11　冷却設計フローの概要



高精度な発生損失計算とともに定常および非定常の熱流体解析を実施している。これにより，設計時点で正確な温度分布が把握できるため，試作・評価の繰返し回数が減らせ，開発期間を短縮できるようになった。

また同時に，小型・軽量化および低価格化を追及するうえで，信頼度の高い最適化設計が行えるようになった。

今後，これらの設計手法を用いて，ツールとしての機能を充実させ，より短期間で信頼度の高い冷却設計を実施できるように展開していく。

6　モータ技術

6.1　取り巻く環境と技術課題

昨今の省エネ，CO_2 削減のニーズの高まりを背景として，あらゆる電気品に対して効率向上の機運が高まっている。日本の産業部門の年間総電力量約 4,000 億 kWh のうち，モータの消費電力量が占める比率は約 70% との試算があり[(6)]，その効率向上の効果はきわめて大きい。また，工場など個別の需要家にとっては，モータ効率の向上が，CO_2 削減要求への対応，電力料金の抑制，および電力設備の容量

図 12　PM モータ構造

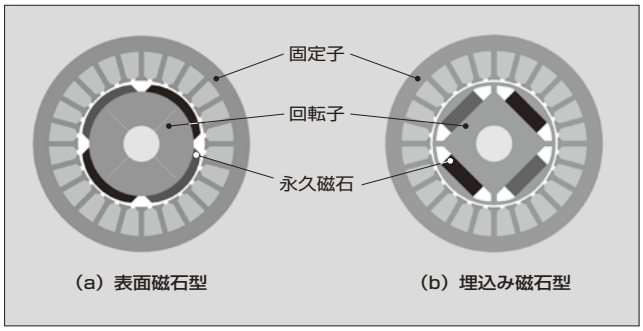
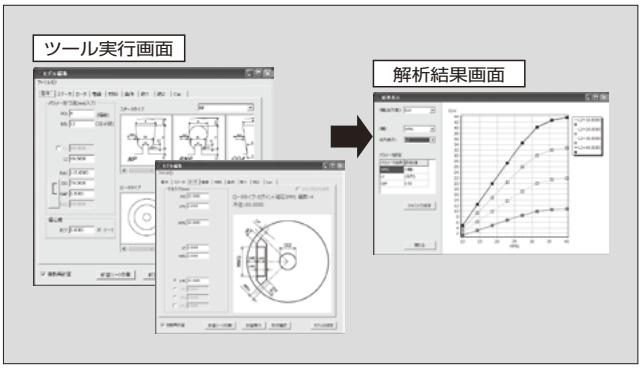


図 13　PM モータ設計プラットフォーム動作画面例



低減につながり，結果として原価低減に寄与する。

以上のようなトレンドを踏まえ，富士電機ではモータ，特に PM モータおよびその駆動システムを，ドライブ事業戦略の重要アイテムと位置付け，技術開発を進めている。PM モータは，**図12**に示すように，モータの回転子内部に永久磁石を配したモータである。産業用モータとして普及している誘導モータと比べ，回転子内部での損失を大幅に低減することによって高効率化を図ることができ，小型化が可能であること，さらに設計自由度が高く機械組込み用途に適することなどの特徴がある。

一方，PM モータの大きな技術課題として，高効率化，材料最少化のための最適設計技術が必要である。特に，設計自由度の高さから専用設計が要求される場合が多く，短期間での設計，性能予測が重要である。また，高性能磁石として多用されるネオジム磁石は抵抗率が低いことから，磁束密度の変化に伴う渦電流が発生することがあり，これによる加熱，温度上昇によって熱減磁しやすくなるという問題がある。したがって，永久磁石の減磁耐量も重要な設計項目である。

これらの課題に対応し，PM モータを普及させる事業展開を支えるため，以下に示す設計プラットフォームを開発し，設計業務への適用を進めている。

6.2　PM モータ設計プラットフォーム

PM モータの設計を短期間で行うため，シミュレーションを取り込んだ設計プラットフォームを構築した。**図13**にその動作画面の一例を示す。特徴は次のとおりである。

(1)　設計条件入力

対話形式でモータの各種パーツ，パラメータが設定できる。

(2)　設計計算

富士電機の蓄積した設計指針，ノウハウをデータベース化して参照するとともに，最新の磁気回路解析ソルバー，数値解析ソルバーによって特性が計算できる。パラメータ探索と高精度設計が効果的に実施できる。

(3)　設計結果の出力

パラメータ探索結果のグラフ表示，図面展開へのシームレスな情報の引渡しができる。

(4)　アドオン機能

永久磁石の減磁耐量を評価し，製品で想定される最も厳しい条件において，永久磁石の動作点が減磁限界点に対してどこまで近づくかを，数値解析によって見積もれる。

設計計算の精度については，複数案件の実機試験にて検証している。

本プラットフォームの利用によって，従来に対して設計期間が約 1/3 に短縮され，かつ設計の最適化ができるので，要求仕様に対する見積リ回答の短期化，ニーズにマッチした製品の提供に貢献している。

7　あとがき

富士電機のパワーエレクトロニクス機器を強化するための要素技術開発の取組みについて述べた。

21 世紀はエネルギーと環境の世紀といわれている。エネルギー・環境問題を解決する基盤技術として，クリーンで制御の容易な電気エネルギーの有効利用に不可欠なパワーエレクトロニクスへの期待は，次世代省エネルギーパワーデバイス技術開発の進展と相まって，ますます高まると考えられる。

今後とも，市場ニーズをとらえた魅力ある製品を提供できるように，パワーエレクトロニクスの技術開発に取り組んでいく。

参考文献

(1)　川村逸生，笹川清明．産業用パワーエレクトロニクスの現状と展望．富士時報．vol.80, no.2, 2007, p.100–105.
(2)　分散電源システムの最新動向 IEEJ Journal. vol.125, no.12, 2005.
(3)　分散給電システム用 DC-DC コンバータ．富士時報．vol.81, no.1, 2008, p.27.
(4)　黒田岳志ほか．磁束オブザーバを用いた永久磁石同期電動機のセンサレス制御．平成 20 年電気学会産業部門大会．1-62, p.299–304.
(5)　金子貴之ほか．センサ検出遅れを補償するオブザーバを用いたクレーン振れ止め制御．平成 20 年電気関係学会関西支部連合大会シンポジウム．S4-5.
(6)　環境省地球環境局「平成 16 年度 第 3 回地球温暖化対策技術検討会」資料．

＊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。