

パワーエレクトロニクス製品におけるソフトウェア設計

Software Design in Power Electronics Products

池田 成喜^{*1} 迫田 慎平^{*1} 山口 和寛^{*1} 吉田 恒平^{*1} 鈴木 孝英^{*1}
Shigeki Ikeda Shimpei Sakoda Kazuhiro Yamaguchi Kohei Yoshida Takahide Suzuki

*1 エレクトロニクス事業部 技術部

要旨

エレクトロニクス事業部では、電動車向けのパワーエレクトロニクス製品の設計をしている。ソフトウェアを用いた制御技術により車両の燃費(電費)向上を実現し環境負荷の低減に貢献している。本稿では、ソフトウェアの固有技術と共通技術について紹介し、パワーエレクトロニクス製品の特長とソフトウェア設計におけるポイントについて解説をする。

キーワード: 電動車、パワーエレクトロニクス製品、組み込みソフトウェア、電源変換制御

Abstract

The Electronics Division designs power electronics products for electric vehicles. Software-based control technology provides key advancements in vehicle fuel efficiency (electricity consumption), contributing to environmental sustainability. This article presents an overview of both proprietary and shared software technologies and provides a detailed explanation of the characteristics of power electronics products, as well as the essential aspects of software design within this field.

Keywords: Electric vehicles, Power Electronics Products, Embedded Software, Power Conversion Technology

1 はじめに

1.1 エレクトロニクス事業部のソフトウェア製品の歴史

エレクトロニクス事業部では、ハイブリッド車(HEV)やプラグインハイブリッド車(PHEV)、電気自動車(BEV)などの電動車に搭載するパワーエレクトロニクス製品(以下、パワエレ製品)の開発を行っている。

パワエレ製品は、電動車には不可欠な機器であり、性能は、電動車の燃費(BEVは電費)や環境性能に大きく寄与する。

エレクトロニクス事業部のパワエレ製品の歴史は、トヨタ自動車(株)の初代プリウス向けのDC-DCコンバータが始まりである。最初のDC-DCコンバータは、ソフトウェアを使用せず、すべて電気回路(ハードウェアのみ)で動作している。2代目プリウスからは、ソフトウェア制御による製品も搭載され、これ以降、エレクトロニクス事業部のソフトウェアの歴史が始まる。

1.2 現在のパワエレ製品概要

現在、エレクトロニクス事業部では、トヨタ自動車(株)向けに車載充電器(以下、充電器)、DC-DCコンバータ、ACインバータのパワエレ製品の開発を行っている(図1.1)。

充電器は、家庭用交流電源やAC充電スタンドなどの充電インフラからPHEVやBEVに搭載されている駆動用高圧バッテリー(以下、高圧バッテリー)を充電する製品である。高圧バッテリーの大容量化に伴い最大電力の増加や幅広いバッテリー電圧レンジに対応した設計が求められている。また充電機能だけでなく、近年ではACインバータの機能も含んだ双方向充電器の開発を行っている。

DC-DCコンバータは、高圧バッテリーから補機と呼ばれる12Vの低圧バッテリー(以下、低圧バッテリー)への電圧変換(充放電)をする製品である。今の自動車には、多くのECU※1が搭載されているが、その電源である12Vを安定供給するという重要な役割を担っている。車の高機能化に伴い、ECUの数が増え、よりニーズの高い製品になっている。

ACインバータは、家電製品を車で使うための製品である。ACインバータを搭載した自動車は世界中で販売されている。各国の家庭用電源電圧や周波数は国ごとに異なり、家電製品の仕様も多様であるため、各国および各家電製品に対応した設計が必要である。一方、家電製品は家庭用電源で動作することを前提に設計している。そのため、車載電源で動作させるには、家電製品の特性を調査し、設計に反映する取組みが必要になる。また、ACインバータは災害時やアウトドアなどで利用できるため、近年そのニーズが高まっている製品である。

※1 ECU…Electronic Control Unit、電子制御ユニット。自動車内のさまざまな機器を電子的にコントロールする装置。

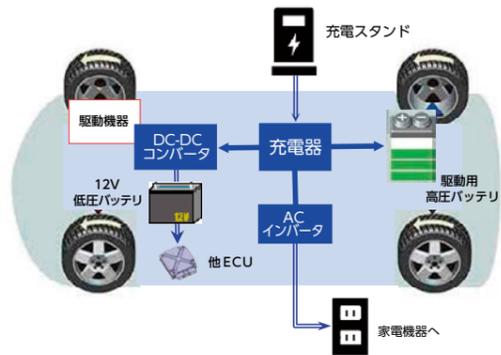


図1.1 エレクトロニクス事業部のパワエレ製品
Fig.1.1 Power Electronics Products of the Electronics Division

2 パワエレ製品におけるソフトウェア設計

2.1 ソフトウェア設計

エレクトロニクス事業部では、ソフトウェア設計に一般的に知られているV字モデルを適用している。このモデルは、V字の左側で設計工程を、右側で設計工程に対応したテスト工程を表している。左側の工程には、客先からの要求を分析する要求分析工程、ソフトウェアを設計するための要件を抽出する要件定義工程、その後の設計工程が含まれる。設計工程では、ソフトウェアの大枠(アーキテクチャ設計)を決め、そこから機能単位に細分化(モジュール設計)する設計方法を定義している。一方、右側の工程は、左側の工程に対応したテスト工程である。モジュールレベルではソフトウェアコードの規模が小さいため、コード全体を網羅する単体テストを実施する。その後、モジュールを結合してアーキテクチャレベルにし、ソフトウェア結合テストを実施する。最終的に、ソフトウェアテストでソフトウェア要求レベルのテストが完了する(図2.1)。V字モデル開発では、右側(テストによる不具合の流出防止)よりも左側(設計段階で不具合を入れない取組み)が重要であり、設計における過去の知見を生かした取組みをしている。

パワエレ製品など電機機器に使用するソフトウェアは、組込みソフトウェアと呼ばれ、汎用マイコン上で動作するソフトウェアである。組込みソフトウェアは、マイコンを搭載した回路基板を通

して、周辺の電気・構造部品をコントロールする役割を担い、電気・構造部品と連携することが求められる。

近年では、車載向け組込みソフトウェアでもリプログラミング※2やOTA※3などソフトウェアの変更が容易になった一方で、ソフトウェア認証・法規対応などソフトウェアの管理や、セキュリティ対策が重要視されている。製品性能には影響しない部分への取組みも大切になっている。

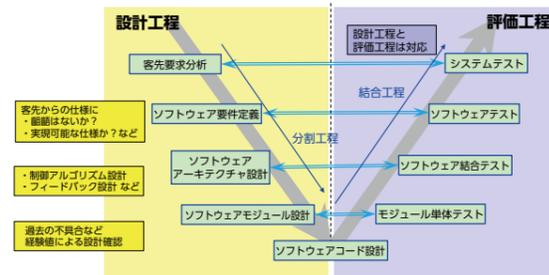


図2.1 ソフトウェア設計のV字モデル
Fig.2.1 V-Model of Software Design

※2リプログラミング(reprogramming)…既存のソフトウェアを再度書き換えたり、更新したりすること。
※3OTA(Over-The-Air)…無線通信を通じて車両搭載機器のソフトウェアの更新を行う技術。

2.2 製品固有の仕様作り

顧客の要求仕様を基に設計の要件定義を行う際には、単に仕様を要件にするだけではなく、詳細に分析することが重要である。要求仕様は、顧客が実現したいことを記述し、設計要件定義は、それを実現可能な仕様へと変換する工程である。しかし、ソフトウェアの構成上、すべての要求を実現できない場合もある。また、新たな仕様を実現することで、新たな不具合が顕在化する場合もある。このような仕様上の問題点(製品への影響)を事前に見つけ要件定義をすることが重要である。

また、組込みソフトウェアは、マイコンからの信号で周辺ハードウェア(電気回路)を動かしているため、マイコンを含めたハードウェアの知識も必要である。電気回路のアナログ部とマイコン周辺のデジタル部の回路知識や、ハードウェアとソフトウェアのバラツキ精度の違いなど、さまざまな状況を考慮し要件定義を進めている。

製品の要件設計は、長年培ってきた過去製品との関連性や製品だけではなく車両全体のシステムへの影響、ソフトウェア設計上の課題などさまざまな視点が求められる。最適な要件設計は私たちが持つ強みの技術の一つである。

2.3 共通の電源変換技術

充電器・DC-DCコンバータ・ACインバータに共通する技術は電源変換技術である。電源変換技術とは入力値である電圧・電流の値をレベルや時間(周波数)などを変換し、出力値を得る技術である。この変換技術は、電動車の燃費や環境性能に直接影響を与える。

充電器は、交流(AC)を入力し、内部で直流(DC)に昇圧した後さらに直流から直流へ電圧レベルを変換する。DC-DCコンバータは直流から直流への電圧レベル変換、ACインバータは直流から交流へ変換する機器である。

電源変換技術は、IGBT、MOSFETなどのパワー素子を高速にスイッチング(ON/OFFを繰り返す)ことで電源変換を行う。この変換中に発生するスイッチングの損失や、変換時のロスを最小にし、機器の効率改善に貢献している。また、マイコンを搭載し、ソフトウェアによりパワー素子をスイッチングすることで、精度の良い安定した出力が可能となる。スイッチングの方法(ON/OFFの時間やタイミング)はソフトウェア制御のアルゴリズムにより決定する。このタイミング設計(制御アルゴリズム設計)が、私たちが最も得意としている技術であり、パワエレ製品開発においても重要な技術である。

2.4 制御アルゴリズム設計とリアルタイム性の追求

パワエレ製品の電源変換技術の性能は、動的性能値で評価する。この動的性能値は、パワエレ製品の定常時の動作や、過渡状態時の電流・電圧・周波数の値であり、その値が目標値に達しているかを評価する。性能を評価する電流・電圧・周波数は、入力値や負荷など自分たちでは制御できない周辺のシステムの変化の影響を受ける。その影響を最小限にし、目標値通りに安定して出力することが制御アルゴリズム設計の重要なポイントである。そのため、周辺システムの変化を捉えて、次の操作

量を決めるフィードバック制御を採用している。フィードバック制御は、制御対象の制御量を継続的に監視し、目標値と比較した制御偏差値を計算する。その偏差値を制御アルゴリズムで解析して適切な操作量を決定する。これを繰り返し、制御対象を所望の状態にする(図2.2)。フィードバック制御において、制御アルゴリズムとしての計算式の導出は性能を左右する重要な要素である。より複雑で細かな計算式を用いてフィードバック制御を実施すれば、要求値に対して精度良く動作する。一方で、電源系の動的性能の要求は数十ミリ秒単位の時間内で目標値に到達することが求められるため、数マイクロ秒単位で出力値を決定する高速なフィードバック制御であることも制御アルゴリズムの重要な要素である。

高性能マイコンを採用することで、高精度で高速なフィードバック制御は可能となるが、その結果マイコンのコストが上昇し、機器全体のコストが高くなる。

したがって、組込みソフトウェアの設計は、マイコン性能を最大限に活用しつつ、動的目標値の達成を考慮することが求められる。

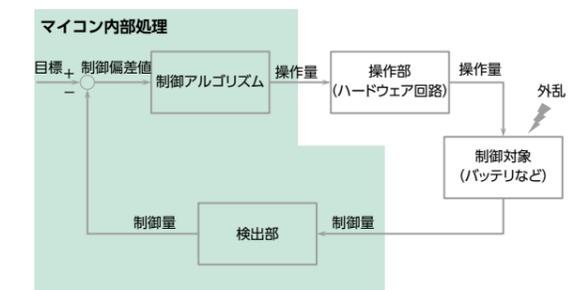


図2.2 フィードバック制御ブロック図
Fig.2.2 Block Diagram of Feedback Control

3 各製品の技術紹介

3.1 充電器製品紹介と技術

3.1.1) 充電器について

充電器は、車両の外部から車内の高圧バッテリーを充電するための機器である(図3.1)。車両に搭載する機器のため、小型・低コスト化が重要であり、制御技術で貢献している。

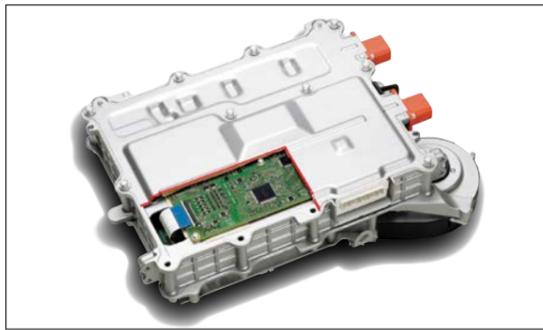


図3.1 車載充電器
Fig.3.1 Onboard Charger

3.1.2) 2つの制御技術

充電器は、入出力の電力要件と絶縁要求からPFC部とDDC部の二段構成となっている(図3.2)。

PFC部は、AC電圧を昇圧し中間コンデンサ電圧がDC電圧となるように電圧制御する。また、入力電流に対して力率※4・高調波電流※5の規制を満たす必要があるため、入力電流が正弦波となるように電流制御も行う。PFC部の入力には家庭用交流電源やAC充電スタンドなどの電源インフラとなるため、電源事情が良好でない国では入力電圧が理想的な正弦波とならず充電が困難になる場合がある。エレクトロニクス事業部では各国の電源事情を調査・層別し数パターン波形を規格外波形※6として定義しており、規格外波形が印加されても充電を継続することができる充電器を設計している。

DDC部は、中間コンデンサ電圧を入力としトランスを介して高圧バッテリーに電力供給する役割を担う。高圧バッテリーへの電力供給は上位ECUからの指令値通りに行う必要があり、そのため出力電力制御が必要となる。また、安定したDC電流を供給するため出力電流制御も行う。高圧バッテリーへの出力電流リップル※7に対しては車両側から要求があるため、これを満たすように設計する必要がある。

目標の出力電流値と実際の出力電流センサ値の差分からフィードバック制御を行い、出力電流リップル要件を満たすよう事前にシミュレーションで制御値の当たり付けを行い、それを元に実機検証にて確認している。

※4力率…交流電源において電力を有効に利用する程度を示す値。

※5高調波電流…入力電流の基本周波数以外の周

波数成分を示す。高調波電流は電源品質を低下させ、他の電子機器の動作不良や変圧器の過熱、振動を引き起こす可能性がある。
※6規格外波形…入力電圧が方形波やノコギリ波、正負側が非対称な波形などを定義。
※7リップル…直流電流に含まれる脈動成分のこと。小さくすることが望ましい。

3.1.3) 協調制御による最適化

PFC部とDDC部の二段構成は中間コンデンサを介して接続されている。小型・低コストを実現するためには中間コンデンサ容量の削減が求められるが各種要件に対するロバスト性の低下が課題となる。そこで中間コンデンサ電圧の変動を監視し電圧が上昇すればPFC部の指令値を絞り、電圧が低下すればDDC部の指令値を絞る協調制御を採用している。

この協調制御により、PFC部とDDC部に別々の指令を出し、二段階構成を協調させ中間コンデンサ電圧の変動を抑制する。それによって小型・低コストかつ高ロバストな製品設計を実現している。

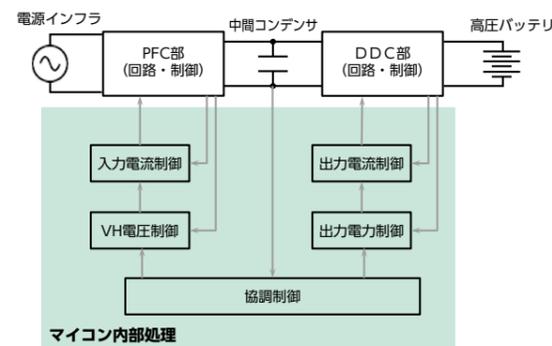


図3.2 充電器回路ブロック図
Fig.3.2 Block Diagram of Charger Circuit

3.2 DC-DCコンバータ製品紹介と技術

3.2.1) DC-DCコンバータについて

DC-DCコンバータとは、高圧バッテリーを12Vに変換し低圧バッテリーとアクセサリへ電力供給する電動車特有の電源装置である(図3.3)。



図3.3 DC-DCコンバータとケース
Fig.3.3 DC-DC Converter and Case

DC-DCコンバータは燃費性能と動力性能に貢献するため、「小型」「低損失」の技術開発に取り組んでいる。低損失実現のためのソフトウェア制御の内容を示す。

3.2.2) 小型への貢献

DC-DCコンバータではトランス・コイルなどの磁性体部品が体積に占める割合が大きい。これらの部品を小型化するためには、スイッチング周波数を高周波化する必要がある。

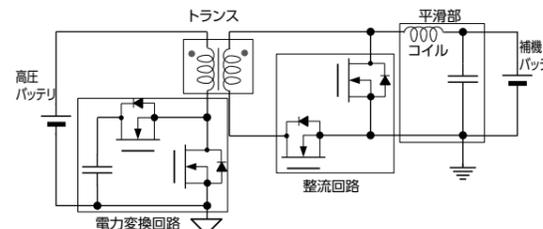


図3.4 DC-DCコンバータ回路ブロック図
Fig.3.4 Block Diagram of DC-DC Converter Circuit

高周波化の背反として、MOSFETのスイッチング損失が大きくなることがあげられる。この課題を解決するために、デッドタイム(交互に動作する2つのスイッチが共にOFFする時間)をソフトウェアで動的に制御している。これによりスイッチング損失を低減し小型化に貢献している(図3.5)。



図3.5 デッドタイム制御
Fig.3.5 Dead Time Control

3.2.3) 低損失への貢献

DC-DCコンバータでは小電流から大電流までの領域においても高効率であることが望ましい。大電流領域における低損失化技術として同期整流が知られているが、小電流領域では低圧バッテリーから電流が逆流するという課題がある。そこで低圧バッテリーから逆流することなくMOSFETで整流可能な独自のソフトウェア制御方式を考案、小電流時での整流素子損失の低減に貢献している(図3.6)。

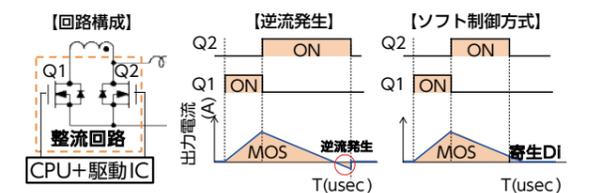


図3.6 ソフトウェア制御方式
Fig.3.6 Software Control Method

3.3 ACインバータ製品紹介と技術

3.3.1) 多様な仕向け設定の対応

ACインバータは充電器やDC-DCコンバータのように車両内で電源供給する機器と異なり、ユーザーが接続する家電製品へ電力を供給する機器である。自動車は、世界の多くの国で販売しているため、ACインバータもその国々の家庭用電源規格に対応しなければならない。販売地域(の家電製品)に合わせて、ACインバータの出力電圧と周波数を変更する必要がある。出力電圧(5パターン)と周波数(2パターン)の組み合わせは多岐にわたるため、ソフトウェアを利用し、新たな組み合わせでもスピーディに対応できる設計をしている。

表3.3.1 仕向け出力電圧と周波数(代表例)
Table 3.3.1 Example of Output Voltage and Frequency

仕向け	出力電圧実効値	出力電圧周波数
日本	100	50/60
中国	225	50
米国	120	60
台湾	110	60



図3.7 ACインバータの使用状況
Fig.3.7 Usage of AC Inverter

3.3.2) ACインバータの制御方式

ACインバータは、さまざまな国のさまざまな特性を持った家電機器を動かさなくてはならない。家電の特性が未知な製品もあるため、従来のフィードバック制御に加え、フィードフォワード制御も採用している。家電機器を安定して動作させるには、歪みの少ない正弦波を家電の運転状況に影響を与えることなく、安定出力するのが理想である。フィードバック制御のみで制御した場合、家電製品の負荷急変(例えば、電動ドリルの回転始動時や堅いものに当たった時の急停止時など)に対応するには、フィードバック制御の応答性を高く設計する必要がある。一方、応答性を高くすると、定常運転時の小さな負荷変動でも過度に応答するため安定しないことがある。そこで、出力したい目標電圧とACインバータ内部の直流電圧の関係からフィードフォワード制御(FF)で大まかに制御量を決定し、出力電圧を低応答性でフィードバック制御(FB)して制御量を補正するFF+FB制御を採用することで様々な負荷条件で安定した正弦波出力を実現している(図3.8)。

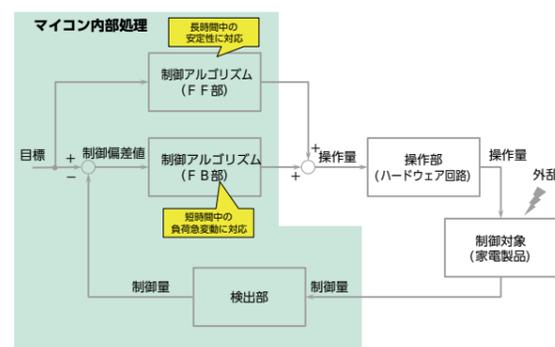


図3.8 ACインバータ制御ブロック図
Fig.3.8 Block Diagram of AC Inverter Control

3.3.3) 家電特性のモデル化

ACインバータの設計では、製品自体の設計と同様に家電の特性を調査する取組みも重要視している。先にも述べたように家電製品は世界中にあり多種多様である。ユーザーは自動車のACインバータで家電製品を使う場合でも自宅と同様の動作を期待している。しかし、すべての家電製品を調査し、動作確認を行うことは現実的ではない。そのため、家電製品の特性をモデル化する取組みをしている。代表的な家電製品を調査して特性を数値化し、シミュレーション用の家電モデルを作成した。モデル内のパラメータを調整することで、多くの家電を模擬するモデルを構築している(図3.9)。

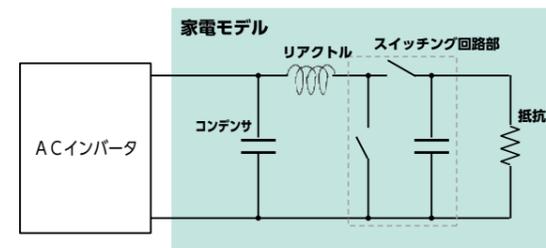


図3.9 家電モデルの構成
Fig.3.9 Configuration of Home Appliance Model

定常動作時の抵抗値や、起動直後の電流値などを測定し、家電製品の動作点をマップ化した。同時に、ACインバータの制御アルゴリズムもモデル化をした。家電製品と制御アルゴリズムを同一マップ上に図示することで動作の可否だけでなく、制御余裕度も検証することができている(図3.10)。

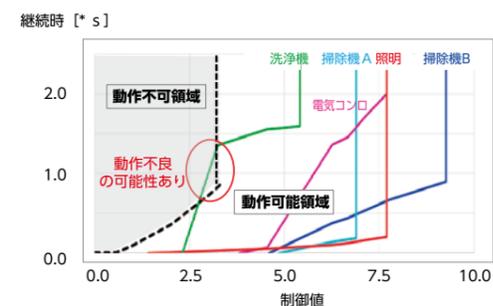


図3.10 ACインバータ動作領域と家電動作点
Fig.3.10 Operating Range of AC Inverter and Operating Points of Home Appliances

4 あとがき

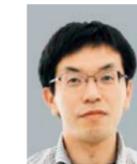
自動車におけるソフトウェアの重要性は年々高まっており、ソフトウェアの規模も増大し、複雑化している。そのため、近年ではモデルを用いて仕様を表現し、可視化するモデルベース開発の手法が用いられるようになってきている。さらに、AIを活用して自然言語の仕様書から直接プログラムコードを生成する技術も存在し、今後一般的になる可能性がある。

しかし、本稿で述べたように、製品技術や電源変換技術は容易に置き換えられるものではなく、我々の強みの技術である。今後もこれらの技術レベルをさらに向上させることが求められる。一方で、この分野でもAIを活用し、強みとなる技術をさらに高めていくことも重要である。これらの技術を融合しながら、今後も高付加価値な制御技術を開発し、制御技術でパワーエレクトロニクス製品や電動車の高効率化と環境性能の向上に貢献していく。

■著者紹介■



池田 成喜 迫田 慎平 山口 和寛 吉田 恒平



鈴木 孝英

開発の経緯と開発者の思い

組み込みソフトウェアはソフトウェア工学の世界において比較的特異な分野である。その独特の性質から、多くのエンジニアは学生時代よりも実務経験を通してこの分野の知識とスキルを習得している。電気・電子・情報工学といった分野のバックグラウンドを持つ者が多いが、組み込みソフトウェアの世界ではこれらの基礎学問とともに幅広い知識が要求される。

現在、ほとんどの機器はマイコンを使用しており、組み込みソフトウェアは今後も重要な技術分野であると考えられる。多くの人が組み込みソフトウェア技術に関心を持ってくれることを望んでいる。