

パワーエレクトロニクス機器のモデルベースシステムズエンジニアリング

Model Based Systems Engineering for Power Electronics Equipment

吉田 収志 YOSHIDA, Atsushi

近年のデジタル化の進展は目覚ましく、工場のスマート化が進展する中で、製品のタイムリーな市場投入には開発期間の短縮が求められる。富士電機では、DX への取組みの一つとしてデジタル化と開発プロセスの革新に取り組んでいる。パワーエレクトロニクス機器の開発プロセスに、モデルベースシステムズエンジニアリングを導入し、機構、電気回路、制御ソフトウェアを含む鉄道車両用ドアシステムを例にシステムシミュレーション環境を構築し、開発の早期におけるシステムの妥当性検証に活用できることを確認した。手戻り防止、開発期間短縮、信頼性向上が期待できる。

The recent rapid progress of digitalization has led to the development of smart factories, where shorter development times are required to launch products in a timely manner. Fuji Electric is working on digitization and development process innovation as one of its initiatives for DX. We have applied model based systems engineering to the development process of power electronics equipment and confirmed that this enhanced process can be used to validate the system in the early stages of development by building a system simulation environment for, as a verification example, a door system used in railcars, which includes mechanisms, electrical circuits, and control software. As a result, it is expected to prevent rework, shorten development time, and improve reliability.

1 まえがき

近年のデジタル化の進展は目覚ましく、Industrie 4.0 がドイツで提唱されたことを契機に、工場のスマート化が進展している。日本においても Society 5.0 が打ち出され、世界でIoT (Internet of Things) 化やDX (デジタルトランスフォーメーション: Digital Transformation) への取組みが加速している。一方、お客さまの要求が多様化する中、製品のバリエーションは増加し、開発工数も増加する傾向にある。このような状況の下で、製品を限られた期間でタイムリーに市場投入するには、開発期間の短縮が必要である。この要求に応えるためには、モデルベース開発 (MBD: Model Based Development) と、それを活用したモデルベースシステムズエンジニアリング (MBSE: Model Based Systems Engineering) ⁽¹⁾ がその解決策として有効であり、産業界において適用が進んでいる。

富士電機では、DX への取組みの一つとしてデジタル化と開発プロセスの革新に取り組んでいる。これまでも、フロントローディング設計やコンカレント設計などの設計プロセス改革や、CAE (Computer Aided Engineering) ⁽²⁾⁽³⁾ 技術の高度化、適用範囲の拡大など、研究開発の生産性向上に向けて継続して取り組んできた。

さらなる進化のために、モデルベースシステムズエンジニアリングの導入を目指し、機構、電気回路、制御ソフトウェアを含む鉄道車両用ドアシステムを例にモデルベース開発を適用し、さらにシステムズエンジニアリングを実現するシステムシミュレーション環境を構築してその有効性を検証したので、その内容について述べる。

2 モデルベース開発とシステムズエンジニアリング

2.1 モデルベース開発

モデルベース開発とは、電気回路や機構のシミュレーション環境において、再利用できるようにパーツ単位でモデルを多数用意しておき、これらのパーツを組み合わせることで効率的に製品の事前検証を行う開発を指す。

機構部は機構モデル、電気回路は電気回路モデル、制御ソフトウェアは制御ソフトウェアモデルをそれぞれ構築した。これらを組み合わせることでシステムモデルとし、連携もしくは連成シミュレーションを行う開発環境を構築した。それぞれのパーツモデルを使用したシステムモデルのイメージ図を図1に示す。

2.2 システムズエンジニアリング

システムズエンジニアリングは、まず開発サイクルの初

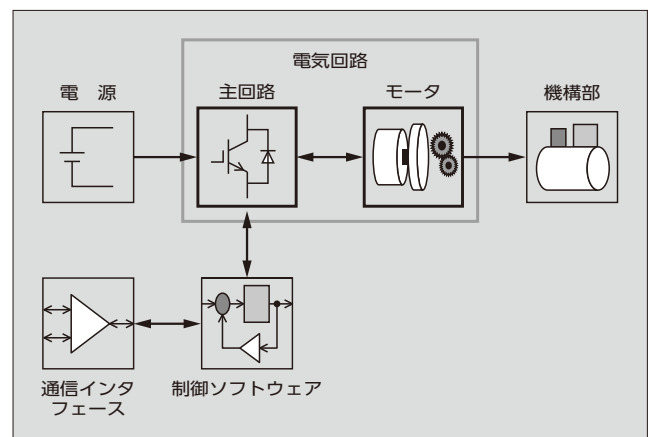


図1 パーツモデルによるシステムモデルのイメージ図

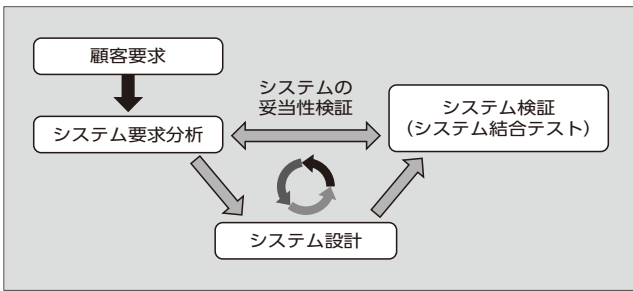


図2 システムズエンジニアリングの概要

期の段階で、顧客要求を明確化して機能要求に読み替え、その上で複数の分野にまたがる機能要求を全て考慮しながら、システム全体に問題がないかその妥当性を確認するエンジニアリングを指す(図2)。

③ 開発工程における課題

従来の開発工程を図3(a)に示す。パワーエレクトロニクス(パワエレ)機器においては、機構設計を含むハードウェアの設計、電気回路設計および制御ソフトウェア設計が必要なケースが多い。機構設計を含むハードウェア設計は、部分試作と検証を複数回繰り返しながら設計を進めることが多く、開発期間が長期化することが多かった。電気回路設計や制御ソフトウェア設計は、ハードウェア設計と並行して開発を進めるが、ハードウェアの設計変更があると手戻りが生じるため、長期化することが多くあった。これらの問題を解決し開発期間を短縮するために、モデルベース開発およびシステムズエンジニアリングの適用により上流工程で妥当性検証することが有効である。

さらに、システム設計時に行う最初の要件定義やシステム検討が不十分であると、ハードウェア設計と制御ソフトウェア設計の後、それぞれ単体での検証では問題がなくても下流工程での結合試験や実機を使用した評価試験で不具

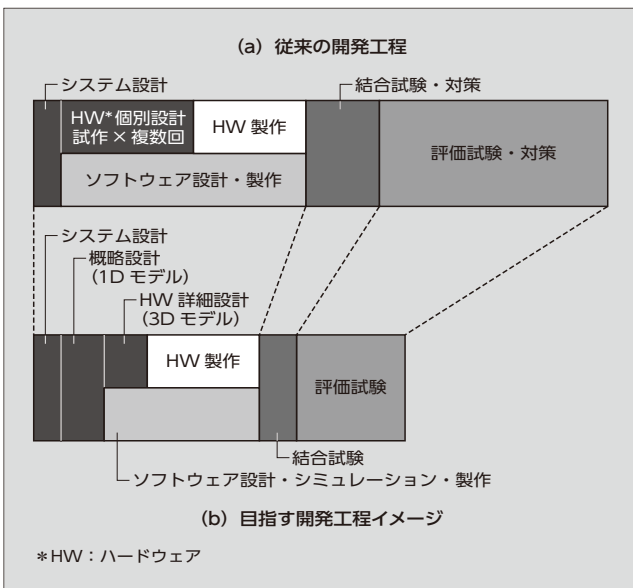


図3 従来の開発工程と目指すもの

合が発生し、その対策のために大きな手戻りが発生することとなる。従来品をベース仕様として設計変更し、バリエーション開発を行う場合にも、設計変更の影響範囲を見極められず、手戻りが発生し、結果的に開発期間が長期化することがある。開発期間の短縮化という課題に対しては、システムズエンジニアリングを使ってシステム設計時にシステム全体での整合や協調が取れているかを検証することが有効である。

④ 富士電機が目指すモデルベースシステムズエンジニアリング

③章で述べたようにパワエレ機器の多くは、開発する上で機構設計や電気回路設計、制御ソフトウェア設計のそれぞれが必要である。これらを協調設計し、システムの妥当性を検証した上で、それぞれの詳細設計を行えば、図3(b)のように開発の下流工程で発生していた不具合対策のための工数や手戻りをなくすることができ、結合試験や評価試験の期間の長期化を防ぐことができる。

図4に、今回実施したモデルベースシステムズエンジニアリングによる開発工程を示す。開発の上流で、顧客要求を基に要求分析し、要件定義、システム設計を行い、モデルを利用してシステム検証する。こうして決定したシステム仕様から、システムの概略設計および検証を行い、概略仕様を確定してさらにソフトウェア、ハードウェアの詳細設計および検証を行う。これらの検証を、モデルベース開発ではモデルを使って実行する。

モデルベースシステムズエンジニアリングを採用することにより、信頼性の高いシステム設計を実現し、フロントローディング設計によって開発の早期に設計の妥当性検証することで、開発期間を短縮する。バリエーション開発では、仕様変更による影響範囲を見極め、必要な設計変更と検証を行い、開発効率を上げる。

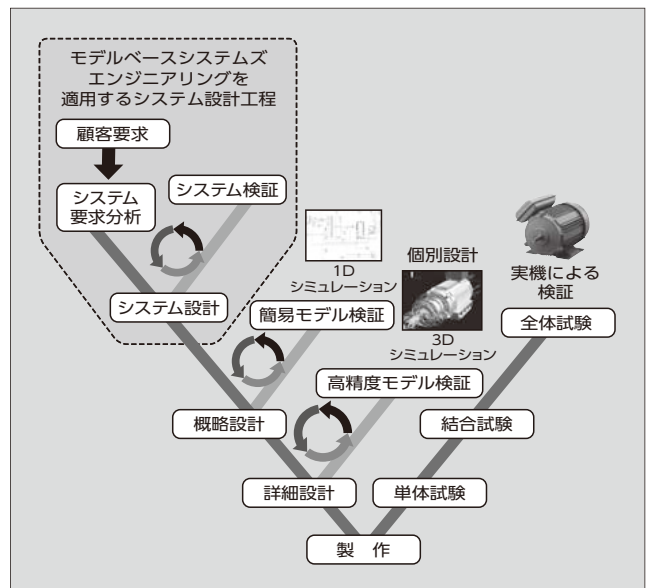


図4 モデルベースシステムズエンジニアリングによる開発工程

5 モデルベースシステムズエンジニアリングによる妥当性検証

富士電機が提供する鉄道車両用ドアシステム(図5)は、ドアをモータにより開閉制御するシステムで、国内外で多くの採用実績があり、標準仕様を基に顧客要求に合わせたバリエーション開発を行っている。これを例としてモデルベースシステムズエンジニアリングの手法に則ったシステム設計およびシステムシミュレーションによる妥当性検証の結果について述べる。

顧客要求を分析して機能要求に読み替え、システム仕様を決定し、ドアシステムの妥当性を検証した。検証のために図6に示すシステムモデルを構築した。MATLABおよびSimulink^(注2)を用い、機構部を1Dモデル化してシステムシミュレーションを行った。

(1) 鉄道車両用ドアの開閉動作

ドアシステムには、鉄道の定時運行を確保するために、開動作や閉動作は所定の時間に収まることが要求される。さらに、人の手や身体が挟まった際の衝撃や押付け力が大き過ぎるとけがなどを招く危険性があるので、開閉速度は所定の速度以下であることなどの鉄道車両の安全性確保の

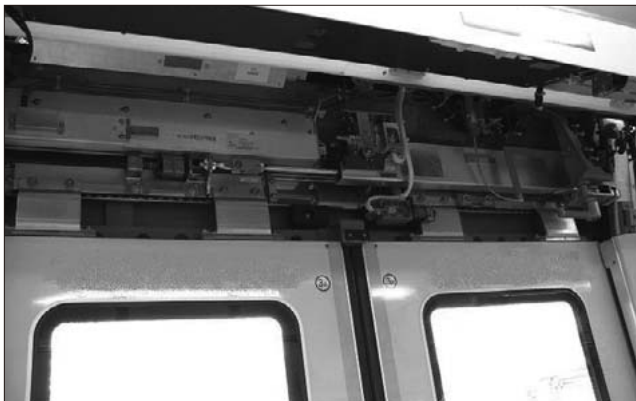


図5 鉄道車両用ドアシステム

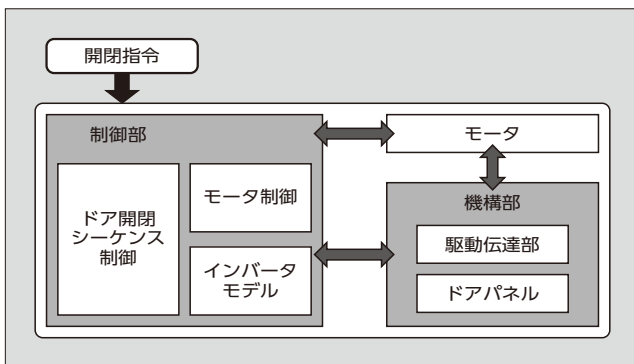


図6 ドアシステムモデル

〈注1〉 MATLAB : The MathWorks, Inc. の商標または登録商標

〈注2〉 Simulink : The MathWorks, Inc. の商標または登録商標

視点からの要求もある。開閉動作における速度パターンとドアのサイズや質量に問題はないか、それらの相関関係に問題はないかなど、制御ソフトウェア、電気回路、モータおよび機構部を、それぞれの要求仕様や機能仕様を満たすように協調設計を行うことが重要となる。

(2) ドアシステムの協調設計

協調設計の例として、ドア部分の最大荷重と開閉時間のトレードオフの改善を取り上げる。

ドアの静止時につり具で構成する複数のローラには、掛かるドアパネルの質量に相当する荷重が分散している。一方、開閉時にはドアパネルの動きに伴い、つり具とドアパネルの重心との位置関係によりモーメントが発生し、特定のローラに加速度に応じた大きな動荷重が発生する。そのため、開閉時間を短くしようとして加速度を大きくすると動荷重が大きくなってしまふ。適切な加速度や最大速度を決定し、開閉動作時における最大動荷重が設計目標値以下となること、および開閉時間が顧客要求を満たすことをシステムシミュレーションで検証した。

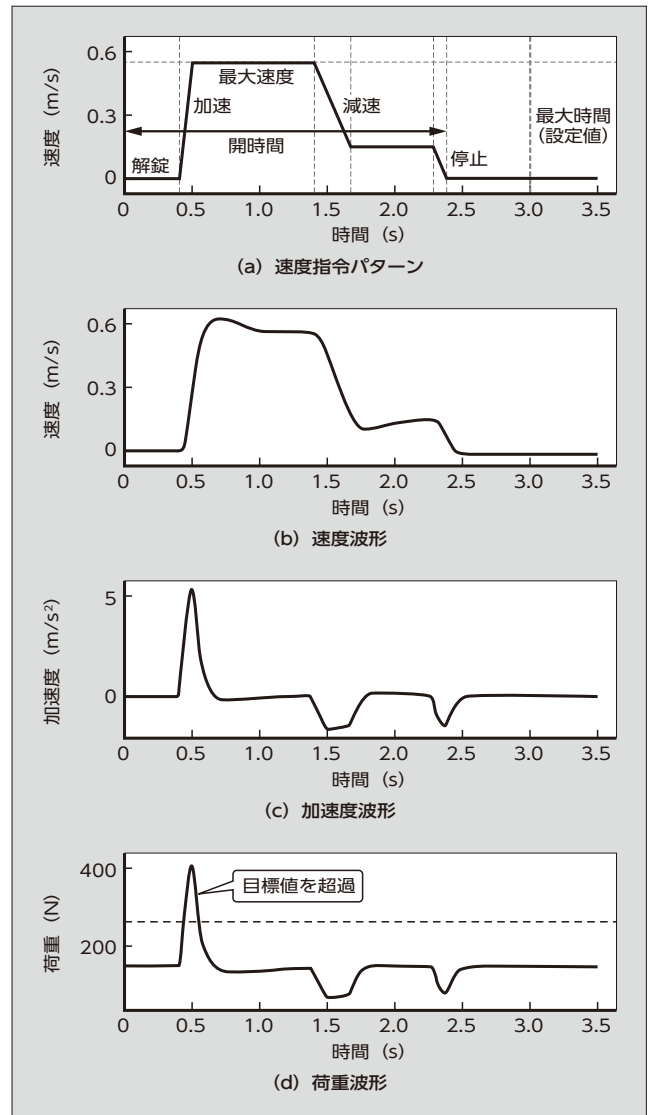


図7 初期設計時の速度指令パターンとシミュレーション波形

(3) 速度指令パターンの設計と動作結果

従来の基本仕様を基に決定した初期設計時の速度パターンとシミュレーション波形を図7(a)~(d)に示す。この時、最大開扉時間は3sに設定した。

図7(a)に示す初期設計時の速度指令パターンは、最大速度に短時間で到達して最大速度のまま一定時間進んだ後、減速動作に入りいったん速度を緩めた後で停止動作に移行し、最大開扉時間3sに対し比較的短い約2.5sで停止する。この速度指令パターンに対し、ドアの応答した速度は図7(b)のように変化し、これに伴う加速度の変化を図7(c)に示す。その結果、最大動荷重は図7(d)に示すように、設計目標値を超えている。したがって、この速度指令パターンでは、開扉時間は機能要求を満たすものの、最大荷重は機能要求を満たさないため、この速度指令パターンは不採用となる。

(4) 速度指令パターンの設計変更と動作結果

動荷重を低減するには、ドアパネルの質量を低減する、あるいは加速度を低減する必要がある。しかし、ドアパネルを含む機構部の設計変更で対応しようとすると、各部の

設計変更および検証の工数が大きくなるなど影響範囲は大きい。そこで、機構部は変更せずに最大荷重および開扉時間の機能要求を満たす速度指令パターンを検討した。

開扉時間が機能要求を満たす範囲内で、最大速度や加速時間を決定し、動作時の荷重が機能要求を満たすように設計変更した。その具体的な例を図8(a)~(d)に示す。

図8(a)のように開閉には目標時間を有効に使うことで最大速度および加速度を低減した速度指令パターンに変更した。これにより、図8(b)にあるように実際の速度変化は緩やかになり、図8(c)のように最大加速度を減少させた。その結果、図8(d)のように最大加速度時の最大動荷重は、設計目標値以下となり、最大荷重と開扉時間の両方の機能要求を満たした。

このように、モデルベースシステムズエンジニアリングおよびモデルベース開発により、開発の上流工程においてシミュレーションを活用し、影響範囲の見極め、最適条件の決定、ならびに効率的な協調設計を行うことができる。また、さまざまな条件の評価が実機なしで可能であり、評価試験の短縮と信頼性の向上を図ることができる。

6 あとがき

富士電機のDXの取組みの一つとして、デジタル化と開発プロセスの改革を推進している。本稿では、パワーエレクトロニクス（パワエレ）機器のモデルベースシステムズエンジニアリングについて述べた。

今後は、鉄道車両用ドアシステムのほかに、ドライブシステムなど実際のパワエレ機器の開発設計や顧客要求に応じたバリエーション開発に適用し、開発期間短縮、信頼性向上に貢献する。

さらに、開発したシステムモデルは、実車両でのデータのフィードバック、解析シミュレーションの高度化および高精度化を重ね、デジタルツインとして運転の最適化やメンテナンス効率の最適化などアフターサービスでの活用も実現していく所存である。

参考文献

- (1) モデルベースシステムズエンジニアリング導入の手引き。独立行政法人 情報処理推進機構, 2013-8. <https://www.ipa.go.jp/files/000033609.pdf>, (参照 2021-07-07).
- (2) 玉手道雄ほか. シミュレーションによるパワーエレクトロニクス機器のEMCフロントローディング設計. 富士時報. 2009, vol.82, no.3, p.165-169.
- (3) 滝沢聡毅, 徳田寛和. パワーエレクトロニクス装置設計の高度化技術. 富士時報. 2007, vol.80, no.2, p.106-109.
- (4) 渡邊雅英ほか. 製品開発を支えるシミュレーション技術の現状と展望. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.1, p.4-10.
- (5) システムズエンジニアリングハンドブック第4版. 慶應義塾大学出版会. 2019.
- (6) 辻村勲ほか. 輸送品質向上を目指したJR東日本E235系車両(山手線)向けドアシステム. 富士電機技報. 2018, vol.91,

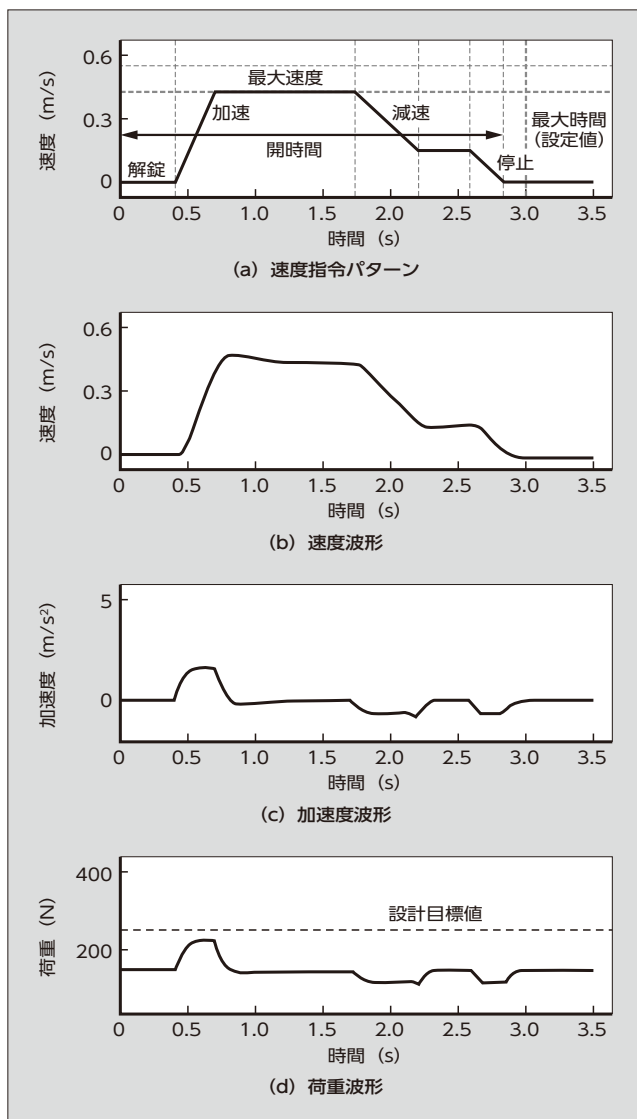


図8 調整後の速度指令パターンとシミュレーション波形

no.1, p.55-59.



吉田 収志

パワーエレクトロニクス製品の研究開発に従事。
現在、富士電機株式会社技術開発本部デジタルイ
ノベーション研究所デジタルプラットフォームセ
ンター主席。電気学会会員。





*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。