

モデルベース開発を活用した 電気・構造設計のリードタイム削減

Lead Time Reduction in Electrical and Structural Design Using
Model-Based Development

谷本将貴*
Masaki Tanimoto

中林弘一†
Hirokazu Nakabayashi

横山裕哉‡
Yuuya Yokoyama

丸山誠司*
Seiji Maruyama

宇佐美太一*
Taichi Usami

*三菱電機㈱ 設計技術開発センター

†同社 コンポーネント開発センター

‡三菱電機エンジニアリング㈱

要 旨

近年のインバーター開発では、高出力化・高周波化・小型高密度化に伴って、電力損失による温度上昇が設計上のボトルネックになっている。従来は電気設計と構造設計を別々に進めて、実機試験で温度上昇を検証していた。この結果、試作回数が増加し、開発リードタイムが長期化していた。今回、製品企画段階から損失計算を自動化・高精度化し、1D熱解析モデルと3D熱解析モデルを活用したモデルベース開発プロセスを構築した。回路シミュレーションによる損失計算と理論式ベースで熱計算を連成し、各部品及び空気の温度を半自動的かつ短時間で計算できる1D熱解析モデルを開発した。これによって、製品企画段階で筐体(きょうたい)の冷却方式の検討と最悪条件の把握を可能とした。また、計算時間と計算精度を両立させて、各部品内の温度分布を計算可能な3D熱解析モデルを開発した。これによって、試作レス、かつ短期間で品質・性能の作り込みを可能とした。

1. ま え が き

モデルベース開発(Model Based Development: MBD)、モデルベースシステムズエンジニアリング(MBSE)は、一般にシミュレーションモデルに限らず、文書や図面に記載されていない抽象化された要求や機能を表現したツリーやブロック図を共通言語として用いて、段階的に詳細化・具体化しながら事前評価を進める開発手法のことを指す。特に、MBDは実行可能モデルによる挙動検証と実装への橋渡しを重視し、MBSEはシステム全体の整合性・トレーサビリティ・ライフサイクル管理を重視する。本稿ではMBDを、1D-CAEと3D-CAEによる実機試験前の設計・検証に取り入れた開発手法と定義する。

一般的な開発プロセスでは、開発上流の製品企画段階で目標性能の検討や仕様分析が不十分な場合、開発下流の試作検証段階で手戻りが発生するという課題がある。開発下流では、部位・技術分野別で詳細設計するため部分最適になりやすいことや、製品システム全体の目標性能達成の目的が試作検証の段階でようやく得られるといった課題がある。近年注目されるMBDは、“システム全体の挙動を高速に把握・比較検討することで製品企画段階での主要諸元の決定精度を高めて、試作回数や開発手戻りを低減する”ことを目的としている。また、構想設計で1D-CAEを活用、詳細設計で3D-CAEを活用というように、位置付けを明確に区別している⁽¹⁾。

MBDを成功させるためには、各開発プロセスでボトルネックになっている工程を抽出して、これを解消できるシミュレーションモデルの構築が必要になる。今回、汎用インバーターでの従来の開発プロセスを題材とし、構想設計の1D-CAE活用と詳細設計の3D-CAE活用によるMBDプロセスを構築した。

2. 従来のインバーター開発プロセスの課題

モーターの回転速度やトルクを制御するための交流電源の周波数と電圧を変換する汎用インバーターには、近年高出力化・高周波化・小型高密度化が求められている。一方、電力損失による温度上昇に対して各部の保証温度を満足するための熱設計が設計上のボトルネックになっている。また、制御対象の定格容量に応じて機種がラインアップされており、複数の開発を同時に効率的に進める手法が求められている。

図1は、従来の開発と目指す姿について、汎用インバーターの開発を例にとって示したものである⁽²⁾。従来の開発では、詳細設計で部品個別に検討することが主流であり、かつ電気設計・電磁界設計、機械・熱設計を別々に進めて、システム的な相互影響を試作評価で確認していた。また、部品や制御条件のパラメーターが多く最悪条件の特定が困難であるため、勘と経験に基づいた設計になっていた。このため、様々な部品や制御条件の組合せによって想定以上の電力損失と温度上

昇が生じて、試作評価回数の増加と開発リードタイムの長期化が課題になっていた。また、顧客からの多様化する要求仕様に対して、検証が必要な制御パターン・負荷条件・冷却ファン条件など組合せが多く、上流工程で網羅的に検討することが困難であった。

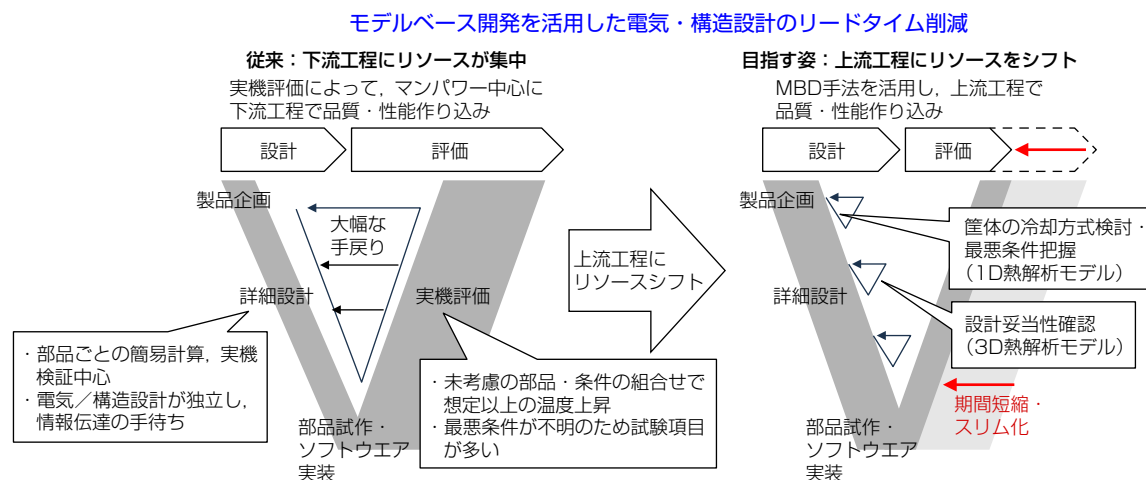


図1-従来の開発と目指す姿

本稿では、製品企画段階から損失計算を自動化・高精度化し、1D熱解析モデルと3D熱解析モデルを段階的に連成するMBDプロセスを述べる。具体的には、製品企画段階では回路シミュレーションによる自動化された損失と、1D熱解析モデルを用いて各部温度を短時間に計算することで、筐体の冷却方式検討と最悪条件を把握できる。また詳細設計段階では、3D熱解析モデルを活用することで、局所温度の特定による設計妥当性確認を短期間で行うことができる。これによって、従来は下流工程に集中していた品質・性能作り込みのリソースを上流工程にシフトする。上流工程では電気設計者と構造設計者の間で検討のサイクルを小さく回すことで、設計者間のコミュニケーションが加速し、迅速な意思決定が可能になる。なお、モデルを用いて設計知識を共有することで、設計思想や知識の継承・拡張に対しても効果を得られる。

3. 損失と温度の連成手法

この章では、損失と温度の連成手法について述べる。

3.1 連成手法の概略

基本方針は“製品企画段階では設計の妥当性や成立性を短時間で評価し、詳細設計段階では高精度な解析で精査する”ことである。今回開発した損失と温度の連成計算手法の概略図を図2に示す。電気設計者は、主回路コンデンサの静電容量、寄生抵抗等の回路条件及び電源電圧、モーター電流等の制御条件を回路シミュレーションや三菱電機製のパワーモジュール損失計算ツール“MELCOSIM”に入力して損失計算結果を出力する。構造設計者はヒートシンクや筐体の形状等の情報を1Dの熱計算モデルに与えて、損失計算結果を入力条件として設定することで温度を計算する。これらの入力設定及び出力結果を一元管理することによって、損失・温度計算を自動化・ライブラリー化して多数条件の計算を短時間で評価することを可能にした。計算で確認した最悪条件や温度上昇が厳しい箇所については、3D熱解析モデルで詳細に温度を確認する。

3.2 損失予測手法

この節では、製品企画段階と詳細設計段階での損失予測手法についてそれぞれ述べる。

(1) 製品企画段階での損失予測手法

汎用インバーターを構成する各部位の損失を計算する手法を図2の①、②、③、④、⑤に示す。まず対象の汎用インバーターの回路条件及び制御条件を設定する(図2の①)。そして汎用インバーターの主回路を模擬した回路シミュレーションによって各条件での主回路各部の電圧・電流の時系列波形を計算する(図2の②)。計算された時系列波形を用いて、

パワー素子及びコンデンサー、リアクトル等の主回路構成部品の損失を計算し、計算結果を集約・一覧化する(図2の③)。パワー素子の損失の計算では、三菱電機製のパワーモジュール損失計算ツールMELCOSIMによる計算結果(図2の④)に対して、パワーモジュールのパッケージが持つ寄生インダクタンスやパワー素子の温度特性等を考慮して素子内の損失発生比率を分配し、回路シミュレーション結果(図2の②)と突き合わせて精度向上を図って、計算結果を出力する(図2の⑤)。これらの手順をツール内で自動化し、使用者が損失を求めたい複数の“回路定数条件及び動作条件”を設定することで、短時間に各条件での各部損失計算結果を得る。

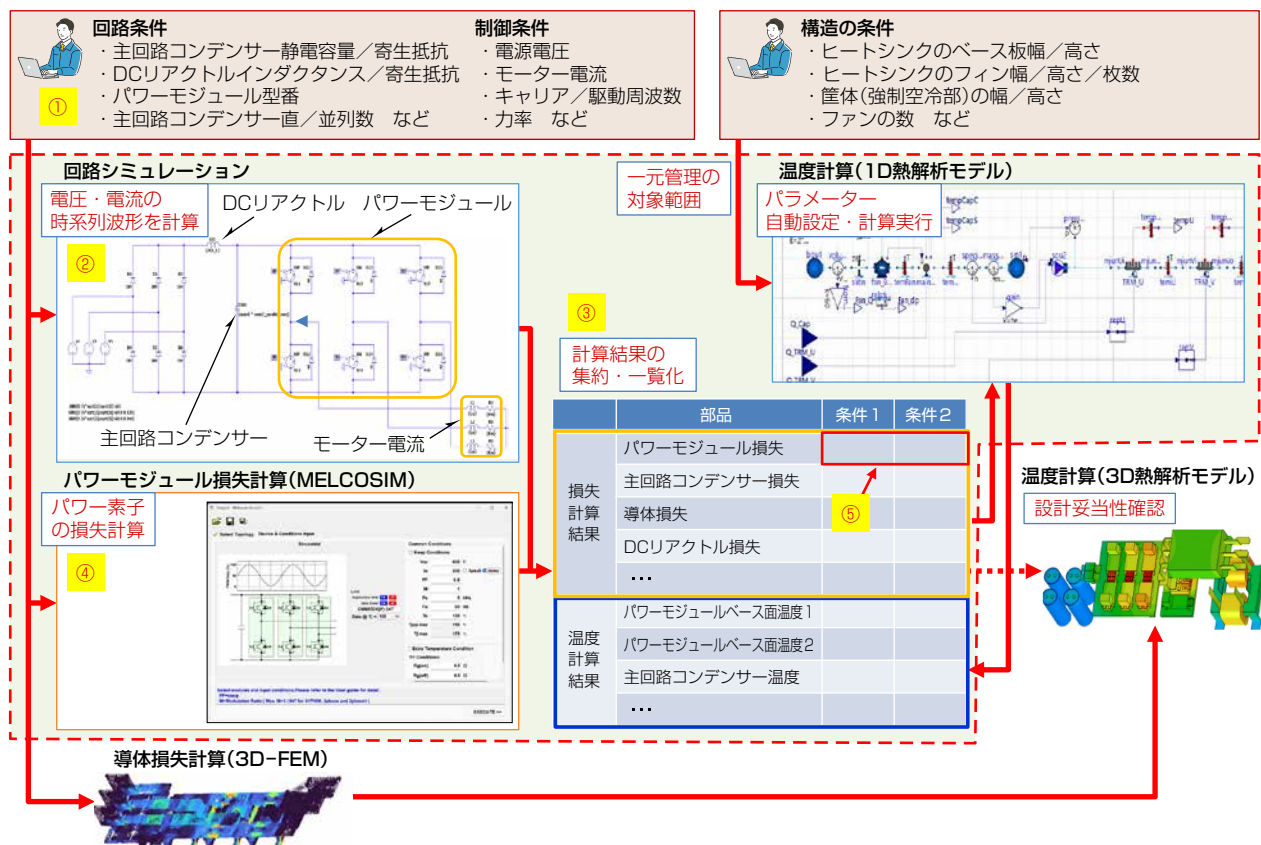


図2- 損失-温度連成計算手法の概略

(2) 詳細設計段階での損失予測手法

各部品間を電氣的に接続する導体の形状は様々であり、発生損失や熱的特性が導体形状に強く依存する。その課題に対してこの手法では、3D-FEM(三次元の有限要素法によるシミュレーション手法)を用いて損失密度分布を計算することで、損失予測精度を高めた。各部電流の時系列波形を用いた3D-FEMは計算時間が長くなることから、この手法では主回路の各部に流れる複雑な電流波形をDC電流値とAC電流実効値に分解し、それぞれ電流解析を行った結果を合成して電流及び損失密度分布を求める。これによって、解析精度を維持しながら計算時間を1/120に短縮し、複数の条件で損失計算の利便性を向上させた⁽³⁾。また得られた損失密度分布データを3D熱解析モデルへ引き継ぐことで、様々な導体形状での温度予測精度を高めた。

3.3 温度予測手法

この節では、製品企画段階と詳細設計段階での温度予測手法についてそれぞれ述べる。

(1) 製品企画段階での温度予測手法

図3は汎用インバーターを側面から見たときの概略の断面図であり、筐体と内装される主要発熱部品とその配置、及び主要発熱部品の空気と熱の流れの概略を示している。汎用インバーターは主に、パワーモジュールとそれを冷却するヒートシンク、主回路コンデンサー、ファンが配置された強制空冷側と、基板や導体等が配置された自然空冷側に分けることができる。構造設計では、主要発熱部品であるパワーモジュールと主回路コンデンサーを冷却するためのファンの仕様や

冷却用のヒートシンクサイズ、部品のレイアウトとそれに伴う筐体サイズを検討する。製品企画段階ではオブジェクト指向のマルチドメインモデリング言語(Modelica^(注1)等)を用いて1Dの熱解析モデルを構築し、装置全体の熱挙動を計算する。強制空冷側は汎用インバーター筐体内部の吸気から排気までの流路、主回路コンデンサー、ヒートシンクの要素を1Dでモデル化し、各要素を熱回路網で連成するモデルを構築した。自然空冷側はパワーモジュールに接続される導体や導体に接続される外装ケーブル等で構成される。導体の形状は詳細設計段階で検討するため1Dの熱解析モデル化の対象外とした。このモデルに3.2節で述べた手法で計算した損失を各部品に入力することで、主要部品の表面温度を数秒～数十秒で算出可能とした。これによって、短時間で複数条件の比較(ファンの風量、ヒートシンク形状等)や最悪条件の当たり付けが可能になった。

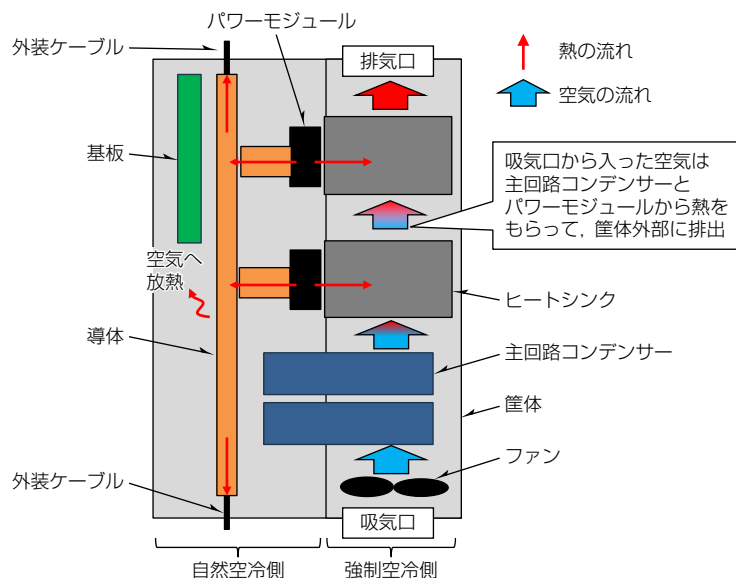


図3-汎用インバーターを側面から見た概略の断面図と主要発熱部品の熱の流れ

(2) 詳細設計段階での温度予測手法

詳細設計段階では3Dの熱流体解析手法(CFD)を用いて各部品の詳細な熱挙動を確認し、各部品の判定温度から設計の妥当性を判断する。CFDのモデル化の際は、精度と計算時間のバランスを考慮し、パワーモジュール、ヒートシンク、主回路コンデンサー、導体等の主要部品の解析メッシュを詳細に設定した。ヒートシンクは圧力損失を等価モデルとしており、主回路コンデンサーは最も高温になる中心温度を把握するために内部構造を含めた等価モデルとした。導体の温度計算では、導体の自己発熱と各部品との接続部からの伝熱を考慮する必要がある。そこで、3.2節で述べた手法で計算した導体の損失密度分布データをCFDモデルにインプットし、パワーモジュールとの接合部からの受熱と、外装ケーブルからの放熱をモデル化した。

(注1) Modelicaは、Modelica Associationの登録商標である。

4. 製品開発への適用

3章で述べた手法を汎用インバーター開発に適用し、実測と計算結果を比較した。図4にパワーモジュールを冷却する2種類のヒートシンクと主回路コンデンサーの表面温度の結果を示す。また、図5にパワーモジュールと外装ケーブルを接続する導体のうちのひとつについて、11点のノードの温度をプロットした結果を示す。いずれも実測と計算の値がほぼ一致しており、モデルベースによる温度予測が可能であることを確認した。

この開発手法を実際の製品開発プロセスに適用した結果、複数の制御条件、ファンの選定、冷却用のヒートシンクのサイズ及び部品のレイアウトと、これらに伴う筐体サイズを製品企画段階で検討することが可能になり、開発上流の品質・性能の作り込みを実現できた。また、詳細設計段階で各部品の温度計算による設計の妥当性を確認することで、手戻りなく温度評価試験を完了し、開発期間を30%削減した。さらにファンの仕様及びヒートシンクのサイズ、導体厚みの適正化を実現した。

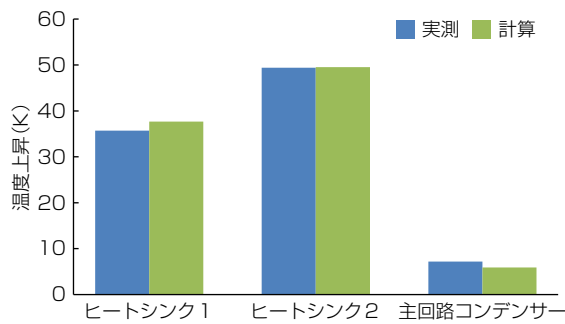


図4-ヒートシンクと主回路コンデンサの表面温度の実測と計算比較

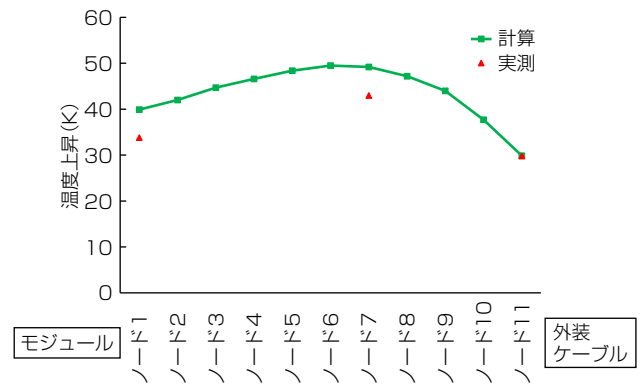


図5-一つの導体のノードの温度の実測と計算比較

5. む す び

損失計算と温度計算の自動化・統合化を核にしたMBDプロセスを開発した。製品企画段階では回路シミュレーションによって損失計算を自動化し、1D熱解析モデルを用いて各部温度を短時間に計算することで、筐体の冷却方式検討と最悪条件を把握した。また詳細設計段階では、3D熱解析モデルを活用することで局所温度を特定し、設計の妥当性を短期間で確認した。これによって、従来は下流工程に集中していた品質・性能作り込みのリソースを上流工程にシフトし、上流工程では電気設計者と構造設計者の間で検討のサイクルが小さく回ること、設計者間のコミュニケーションが加速し、迅速な意思決定が可能になった。また、モデルを用いて設計知識を共有することで、設計思想や知識の継承・拡張が可能になった。

今後は、今回開発した手法を次世代汎用インバーターのラインアップ開発に活用していく。さらに要求から機能・構造までの設計情報を、MBSEを用いて階層化することで、機種開発時の新機能追加の影響確認を効率的に行っていく。

参 考 文 献

- (1) 野間口 大：モデルベース開発，その虚々実々，一般社団法人 日本機械学会 2023年度年次大会，F121-2 (2023)
- (2) 経済産業省：自動車新時代戦略について 日本の電動化政策(xEV戦略)とAICEへの期待 (2018)
https://www.aice.or.jp/up_file/1584606982-937552.pdf
- (3) 電気自動車用インバーターの熱解析手法，三菱電機技報，99，No.1，1-5-06 (2025)