インバータ温度分布シミュレーション高速化に関する検討

原田 浩一* 田中 三博* 大山 和伸*

Kouichi Harada*, Mitsuhiro Tanaka*, Kazunobu Ohyama*

Abstract- エアコンの開発プロセスに適合した高速の熱解析手法について報告する。製品開発の初期段階では、部品レイアウトおよび放熱方法の指針を立てることが肝要であり、厳密な精度は必要としない。試作段階での放熱対策では温度精度が必要である。そこで、開発プロセスの進捗に応じて段階的に解析を行うことにより、開発プロセスに適合した解析時間と温度精度を実現した。エアコン用インバータの熱設計に本手法を適用し、モデル作成時間は2分の1、計算時間は16分の1に短縮する結果を得た。

キーワード： インバータ、熱流体シミュレーション、熱設計、エアコン

Keywords : Inverter, CFD, Thermal design, Air conditioner

1. はじめに

現在、携帯電話やパソコンなどの電子機器、自動車などの分野において熱流体シミュレーションによる電装品の熱設計が広く実施されている。また、設計者を対象とした電気電子機器向け熱流体解析ソフトが普及してきている^[1]。

エアコンにおいて、ファンや熱交換器の気流解析の高度化に関する報告がこれまでに数多くなされている。しかし、インバータの熱設計/温度分布シミュレーション（熱シミュレーション）に関する報告はあまりなかった。

近年、ユーザの年間電気代低減や地球温暖化防止の観点から、省電力化要求に応えたインバータ化により消費電力が低減されてきた。さらに現在、グローバルにエアコンが普及してきており、インバータ化も進展している^[2]。室外機の設置スペースに制約のある大型機についてもインバータ化率が増大している。室外電装品の小型化への要望からインバータの発熱密度が増大しており、エアコンでも、インバータの熱設計が重要になってきている。

本報告では、エアコン用インバータの開発効率化をめざして、開発プロセスに適合する熱シミュレーションの高速化への取り組みについて報告する。

2. エアコンにおけるインバータの放熱

図1に示すように、エアコンは屋内に設置される室内機と屋外に設置される室外機から構成される。室外機は圧縮機、熱交換器、ファン、電子膨張弁、四路弁等の機能部品で構

成されており、圧縮機、ファンを駆動するインバータも室外機内に配置される。

このため、インバータは、塵埃、雨水、虫/小動物の侵入の可能性があり、板金/樹脂等で覆われ、放熱しにくい構造となっている。コスト、サイズの観点から、インバータ冷却のために専用のファンを持つことは困難であるため、図1のように、室外機のファンを利用したインバータ放熱対策が一般的である。

パワーモジュール、整流ダイオードは、取り付けたヒートシンクに直接風を当てて放熱するようにし、その他の部品については、わずかに通風することで、外部に熱を放出している。

図1 エアコンの構成

* ダイキン工業株式会社
〒525-8526 滋賀県草津市岡本町字大谷 1000-2
DAIKIN INDUSTRIES, LTD.
1000-2 Okamoto-cho Kusatsu, Shiga, 525-8526

3. 熱シミュレーションの高速化

〈3・1〉 熱設計の現状と課題 従来、インバータの熱設計は主にヒートシンクに取り付けられたパワーモジュール、整流ダイオードに対してのみ行なわれていた。他の部品については、試作評価の段階で温度がNGとなるケースが少なくなかった。上記のようなケースでは、大幅な設計変更を要したり、有効な対策を見出すための試行錯誤を繰返すことにより、多くの費用と工数を費やすことが多かった。

このような課題を解決するため、熱流体解析ソフトを用いてインバータの熱シミュレーションを行い、熱設計のフロントローディング化や放熱対策することが検討されてきた。

しかし、インバータは、リアクトル、コンデンサなどの大型部品、およびチップ抵抗などの小部品を実装したプリント基板から構成されているため、部品点数が多い、部品形状が複雑、大小部品が混在しているという特徴がある。そのため、インバータにそのまま熱シミュレーションを適用すると、モデル作成、計算に多くの時間を要し、実際の開発プロセスにおける放熱を考慮した構造検討や試作品に対する対策立案にタイミング良く結果を出すことができなかった。

熱設計のフロントローディング化や放熱対策に熱シミュレーションを設計者がストレスなく活用するためには、開発プロセスの各段階において必要な精度を持ちながら、高速な熱シミュレーションが必要である。

〈3・2〉 開発プロセスと熱シミュレーション 図2に示すように製品開発の初期構想設計段階では、部品レイアウトおよび放熱方法のおおまかな指針を立てることが肝要であり、温度については絶対的な精度を必要としない。一方、機能試作評価段階での対策では、部品の許容温度を大きく超えることがないかどうかを判定できる温度精度が求められ、商品化試作段階では放熱対策部品の最適化を図るのに十分な精度が求められる。

図2 開発プロセスと解析プロセス

そこで、今回、開発プロセスの進捗に応じて段階的に熱シミュレーションを行なうことにより、開発のプロセスに

適合した解析時間と温度精度を実現する解析プロセスを検討した。本解析プロセスにおいては、解析を気流解析、概略温度解析、気流・温度解析、詳細解析の4段階に分けて行なう。各解析プロセスの比較を表3に示す。

表3 解析プロセス比較

プロセス 要素	①気流 解析	②概略温度 解析	③気流・ 温度解析	④詳細解析
解析対象	気流 のみ	輻射・ 対流・伝導	気流・輻射・対流・伝導	
モデル形状 物性	単純形状、均一物性 (直方体、円筒)			複合形状、 異方性物性
発熱量	不要	グループに まとめて設定		個別に設定
温度精度	—	±1.0℃		±5℃

本解析プロセスの“気流解析”では、気流のみの解析を行い、インバータ内部の気流分布を把握する。この場合、部品の内部構造/物性および発熱量のモデル化が不要となるため、モデル作成が短時間で行え、計算時間も短くなる。発熱部品近傍の気流の分布を見ることにより、放熱が十分であるかどうかを知ることができる。さらに、温度については、図4に示すような部品単体の発熱量、風速と温度の関係および、空気流量と類似機種過去の測定データから大まかに推測することが可能である。構想設計時に、さまざまな構想案について解析を繰り返して構造と気流分布の傾向を把握し、熱設計の指針を得る。

(a) 部品単体のモデル

(b) 風速－表面温度

図4 周辺風速と部品表面温度の関係

“概略温度解析”では、気流の計算結果を用いて、対流伝熱、輻射伝熱のみを計算し、概略温度を計算する。気流と連成して解く場合に比べ、大幅に計算時間が短縮する。モデルには物性、発熱量を設定するが、形状は気流解析と同じモデルを使用する。計算結果は多少の温度誤差を含むが、構想設計には十分適用可能である。

“気流・温度解析”では、構想設計に用いたモデルをそのまま使用し、気流と温度を連成して計算する。連成して計算することで対流の影響も加味した結果が得られる。気流と温度を別々に計算する場合と比較して計算時間は長くなるが、機能試作の段階で、試作期間中に計算を実行し、結果を試作品の放熱対策に活用することができる。

試作以降の開発プロセスでより精度を必要とする最適化を行う場合や部品内での温度分布を求める場合には、部品内部まで詳細に表現したモデルで温度と気流を連成して計算する“詳細解析”を行う。

〈3・3〉 適用事例 ビル用マルチエアコンの室外機インバータに本報告の熱シミュレーション手法を適用した。解析ソフトには、電気電子機器用熱流体解析ソフト「Icepak」を使用した。図5に示すように、インバータは室外機内に配置された板金製のボックスに収納されている。インバータは、インバータ基板、リアクトル、制御基板、入力端子台からなる。ボックスは板金によって、背面側と前面側に仕切られ、前面側に制御基板、入力端子台が配置され、背面側にインバータ基板、リアクトルが配置されている。インバータ基板の上部のパワーモジュール、ダイオードブリッジは発熱量が大きいため、ヒートシンクを利用して冷却している。ヒートシンクのフィンがボックスの外部に露出しており、ファンの風がフィンに当たることで、パワーモジュール、整流ダイオードの発熱がボックスの外部に放熱される。

図5 インバータの構造

ボックスの底面にはスリット状の開口部が設けられており、ボックスの前面上部には横長方向に開口部が設けられている。ファンによって生じる圧力差により、底面スリットから空気が流入し、前面開口部から排出される。この空気の流れによって、ボックス内の部品が放熱される。このためボックスの熱設計においては、ボックス内に流れる風量と気流分布が重要である。

気流解析モデルは、部品の内部構造を省略し、外形のみを簡略化してモデル化する。物性、発熱量の設定はこの段階では不要である。概略温度解析モデルは、気流解析モデルと同じモデルに物性と発熱量を設定する。詳細解析モデルは、部品の内部構造までモデル化し、各部に発熱量を割り当てて設定する。

図5のインバータを対象にした概略温度解析モデル、詳細解析モデルを図6に示す。概略温度解析モデルでは、インバータ基板のパターンは、すべて形状を無視し、基板全体の発熱として設定している。基板上の部品は、主要な部品のみをブロックとしてまとめ、合計の発熱量をまとめて設定している。リアクトルは、巻線とコアを区別せず、外接直方体をモデルとしている。経験的に温度分布が実物に近くなるような熱伝導率を設定し、最大温度を巻線温度と定義している。ヒートシンク部温度は、解析モデルで境界条件として固定値設定している。

(a) 概略温度解析モデル

(b) 詳細解析モデル

図6 インバータの解析モデル

詳細解析モデルでは、リアクトルの巻線とコアをそれぞれモデル化し、計算で求めた発熱量を割り当てている。インバータ基板については、主要な発熱部品の本体を形状どおり作成し、リード部は等価な熱抵抗を持つ平板としてモデル化している。基板パターンは、電力系統と信号系統に分け、電力系統パターンについては、形状通り作成し、計算で求めた発熱量を設定している。信号系統のパターンは、形状をモデル化せず、基板の平面方向の等価熱伝導率としてモデルに反映している。ハーネス（電線）は、流入空気の流れに対して影響が大きい引込み部分のみをモデル化し、他の部分のハーネスは省略している。

本事例における詳細解析モデル、概略温度解析モデルそれぞれのモデル作成時間、計算時間を図 7 に示す。詳細解析モデルは作成に 3 日以上かかるが、概略温度解析は気流のみ解析するのであれば詳細モデル作成時間の $1/6$ 、温度分布まで解析する場合でも $1/2$ となった。計算時間については、詳細解析モデルで 14 時間かかるのに対し、概略温度解析モデルでは、気流のみであれば詳細モデルの $1/20$ 以下、温度まで解析する場合でも $1/16$ 以下の計算時間となった。

図 7 解析時間の比較

図 8 に気流解析のみの場合と詳細解析の場合の気流分布計算結果を示す。気流のみの解析結果でも詳細解析結果でも、気流分布は同様の傾向を示している。底面スリットから流入した気流は、拡散することなくリアクトルまで達しており、インバータ基板付近は 0.1 m/s 程度の微風状態となっていることがわかる。

(a) 気流のみ解析

(b) 詳細解析

図 8 気流分布の比較

図 9 にインバータ基板、リアクトルの温度分布結果を、図 10 に主回路電解コンデンサ、リアクトル巻線の温度を示す。詳細解析モデルでは、主回路電解コンデンサ温度の実測値と計算値の差は 2℃である。概略温度解析モデルの誤差は、詳細解析モデルの誤差よりも大きい、5℃以内に収まっている。リアクトル巻線温度については、詳細解析モデルでの誤差は 3℃である。概略温度解析モデルでは 10℃の誤差がついているが、開発プロセスにおける構想設計時にはこの程度の誤差があっても、熱シミュレーションを構造検討に利用することが可能である。

(a) 概略温度解析

(b) 詳細解析

図 9 温度分布の比較

主回路コンデンサ温度

リアクトル巻線温度

図 10 部品温度の比較

4. まとめ

本報告では、インバータの開発プロセスに適合する高速な熱シミュレーション手法について述べた。本手法では、開発プロセスの進捗に応じ、気流解析、概略温度解析、気流・温度解析、詳細解析の 4 段階に分けて解析を実施した。その結果、モデル作成時間は 1 / 2、計算時間は 1 / 16 となった。短時間で解析結果を求められるようになったことにより、熱シミュレーションをインバータの構想設計、放熱対策に活用することが可能となった。

今後、モデル作成時間のさらなる短縮や部品モデルのデータベース化を図り、製品開発／設計に本解析プロセスの適用を進める。

文 献

- [1] 伊藤 謹司、国峰 尚樹：「トラブルをさけるための電子機器の熱対策設計」、日刊工業新聞社
- [2] 大山、松野：「エアコンにおけるパワーエレクトロニクスの変遷」、電学誌 125 巻、12 号、pp.772-775 (2005)

【質 疑】

同志社大学・井上氏

【質問 1】 従来の解析方法はどのようなものか？

【回答 1】 従来は、試作機の形状が決まってから、詳細なモデルを作成し、気流と温度を同時に計算していた。そのため、開発プロセスの後半でしか解析を使えなかった。

【質問 2】 「表 3 解析プロセス比較」に記載の温度精度は、目標値か、それともこの範囲内に必ず収まるのか？

【回答 2】 温度精度は目標値ではなく、結果。計算温度は、表 3 に記載した温度精度で求められている。

【質問 3】 詳細解析のモデルはどうやって導いているか？ 実測値からモデル化するのか？

【回答 3】 発熱量については、まず使用条件と回路情報から運転時の電流を求め、次にその電流に対応する各部品の発熱量を定められた手順に従って計算し、設定している。類似機の実測値も参考にしている。空気流量などの境界条件については、類似機の実測値や室外機全体の解析結果を基に設定している。

【質問 4】 Icepak のしくみ／設定は？

【回答 4】 まず筐体、各部品の形状を入力する。次に入力した各部品に熱伝導率などの物性を設定する。そして、発熱部品に別途求めた発熱量を設定し、メッシュ作成と計算を行なう。

【質問 5】 外的要因（太陽光、風など）も考慮できるか？

【回答 5】 外部からの熱の出入りの形で、境界条件として設定が可能である。

大阪工業大学・木村氏

【質問 1】 メッシュは自動生成か？ 詳細モデルと概略モデルは同じメッシュの粗さになるか？

【回答 1】 メッシュは自動的に生成される。適切なメッシュになるようパラメータを変更して調整する。詳細モデルの方が概略モデルよりメッシュ数は多くなる。

【質問 2】 概略モデルとして部品をまとめる時の目安

は？

【回答 2】 機能的に同じグループに属し（例えば制御回路電源など）、互いに近接する部品を 1 つのブロックにまとめている。

【質問 3】 各部品モデルの中に、さらにモデル（発熱量、熱抵抗、熱容量のような）があるのか？ 概略モデルでの発熱量と温度の扱いはどのようになるか？

【回答 3】 概略モデルは、部品モデル全体に 1 つの発熱量と熱伝導率を設定している。温度は部品によって最大温度、または平均温度で評価している。詳細モデルでは、内部構造を考慮したモデルを作成し、各部分に相当する発熱量を設定している。