

環境対応車（HEV，EV）用インバーター一体型電動コンプレッサ

Inverter-Integrated Electrically Driven Compressors for Eco-Cars (Hybrid and Electric Vehicles)

西井伸之
Nobuyuki Nishii

倉橋康文
Yasufumi Kurahashi

小川信明
Nobuaki Ogawa

要 旨

既存のエンジン駆動タイプのコンプレッサに代わる、小型・軽量・高効率のインバーター一体型電動コンプレッサを開発し、環境対応車への新規事業参入を実現した。インバータ部については、小型、高耐熱、高耐振性を実現するため、大型セラミックコンデンサやIPM (Intelligent Power Module) などの新規部品開発を行い、吸入冷媒を用いた冷却構造の採用や、基板の振動解析を行うことで、大幅な小型化と過酷環境下での作動性を実現した。コンプレッサ部については、ルームエアコン用の要素技術をベースに新ディメンジョンのスクロール圧縮機構と新モータを開発し、小型、軽量、低騒音化を達成した。さらに、コンプレッサ制御については、インバーター一体型のメリットを生かし、さらなる快適性を確保できる制御技術を実現した。

Abstract

We have developed inverter-integrated electrically driven compressors as substitutes for conventional engine-driven types, and successfully entered the new business for eco-cars. For the inverters, new components including large ceramic capacitors and an Intelligent Power Module (IPM) have been developed to achieve reduced size and high heat resistance and vibration resistance. Introduction of cooling structures using suction cooling and vibration analysis of substrates have led to reduced size and improved operation under severe conditions. For the compressors, a scroll compression mechanism with new dimensions and a new motor have been developed based on elemental technology for room air-conditioners, which led to smaller size, light weight and reduced noise reduction. Control technology to ensure more comfort has been realized by utilizing the merits of inverter-integrated types.

1. はじめに

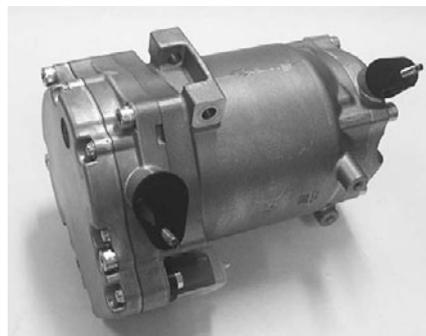
従来の自動車用コンプレッサでは、ベルトを介してのエンジン動力によって駆動されているため、電気自動車やハイブリッド車では、エンジンが無かったり、アイドルストップによって駆動源が無くなるといった問題が発生する。この課題を解決するため、駆動源をエンジンによらず、高電圧バッテリーを駆動源とする電動コンプレッサが使われ始めている。さらに、近年ではインバータが一体化された電動コンプレッサが主流になりつつある。しかしながらインバータを一体化した電動コンプレッサは、次のような課題を有していた。

- ① サイズアップによる搭載性の悪化
- ② インバータ冷却によるコンプレッサ効率の低下
- ③ 高温、高振動環境下での電子部品の信頼性低下

このような課題を解決するため、集中巻モータの採用によるコンプレッサの小型化と、大型電子部品の小型化や、EMC (Electromagnetic Compatibility) 対策部品の削減、そして回路の合理化によるインバータの小型化を実現した。

また、ルームエアコンで培った高効率コンプレッサをベースに、吸入損失の少ないインバータの冷却構造の採用により、業界トップレベルの効率を実現した。

さらに高耐熱部品の採用、プリント基板の最適固定構造検討により、インバータの耐熱、耐振性を向上させる



第1図 開発コンプレッサの外観写真

Fig. 1 Externals photograph of development compressor

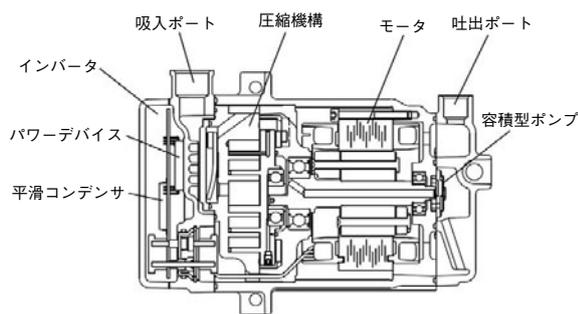
とともに、新しい制御技術により、さらなる快適性の向上を実現することができた。

これらの技術開発により、第1図に示すようなインバーター一体型電動コンプレッサを製品化した。

2. インバーター一体型電動コンプレッサの構成

今回開発したインバーター一体型電動コンプレッサの断面図を、第2図に示す。

圧縮形式は1回転中の圧縮トルク変動が小さく、低振動・低騒音という特徴を有するスクロールタイプを採用した。圧縮機構は、モータの回転運動を伝達するクランク軸と自転防止機能を有するオルダムリングにより旋回



第2図 コンプレッサの断面図
Fig. 2 Cross section of compressor

運動する旋回スクロールと相対する固定スクロールによって構成されている。また、旋回スクロールの背面側には圧力をかけ、固定スクロールに押接させながら冷媒ガスの圧縮を行う構成とし、圧縮途中の漏れを制御している。

圧縮機本体は、容器の内部に吐出圧力が作用する高圧型であり、スクロールで圧縮排出された吐出ガス冷媒によりモータを冷却している。吐出ポート側のクランク軸端には、容積型ポンプを設け、モータおよびオイル分離機構により、吐出ガスと分離され容器内に貯留されたオイルを圧縮機構に給油し、潤滑やシールに利用することで、高い信頼性を確保している。

モータにはDCブラシレス集中巻モータを採用することで、軸方向の小型化に加え高効率化を実現した。

インバータ部分は圧縮機構部側の吸入ポート付近軸方向端部に配置し、自身の薄型化と吸入冷媒によって冷却を行うことで、小型化を図っている。

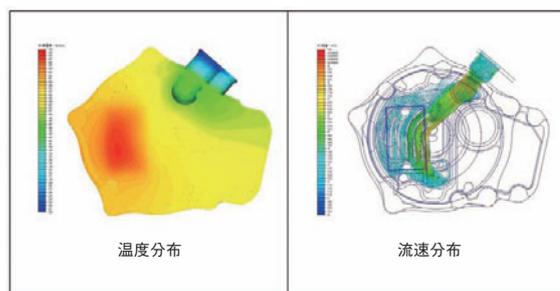
3. インバーター一体化技術

ハイブリッド車においては、従来のエンジン駆動タイプのコンプレッサと同じような、高温で搭載スペースの制約の多いエンジンに搭載するため、インバータの冷却性を確保し、インバータ自体の小型化が求められ、さらに高温・振動環境下での信頼性の確保が必要である。

今回の開発においては、この一体化に対する課題対策に非常に多大な工数を費やした。以下に、その課題対策として開発したインバータの要素技術について説明する。

3.1 インバータ冷却

インバータの冷却においては、エンジンルーム内での使用雰囲気からの受熱と自身の発熱、さらにモータ負荷が大きく冷媒循環量の少ない、冷却性の厳しい運転状態を考慮する必要がある。また、吸入冷媒による冷却にお



第3図 熱流体解析
Fig. 3 Thermo-fluid analysis

いては、過度の冷却性向上は、吸入冷媒の受熱と吸入圧力損失増加による効率低下につながるため、各電子部品の許容温度を考慮した対応が必要となる。

今回の開発においては、構造と、制御の両面からその対応策を検討した。

まず構造面においては、第3図に示すような熱流体解析により、温度分布から冷却状態、流速分布から圧力損失状態を確認しながら、冷却構造の仕様を検討した。

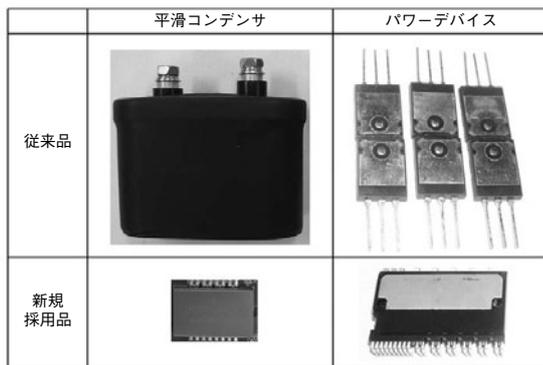
検討の結果、インバータ全体を均等に冷却するより、インバータ内電子部品で発熱量の大半を占める、パワーデバイスを集中的に冷却することで、効率よく各電子部品を許容温度以下にできることがわかった。したがって、冷媒通路は比較的スムーズな流路形態とし、吸入圧力損失を最小限にとどめることができた。

次に制御面においては、少しでも冷却性を緩和するために冷却性が著しく低下するような厳しい運転状態を避けるような制御を検討した。

インバータの発熱はモータ負荷が大きくなれば増大し、冷却性は吸入冷媒の流量が増えることで向上するため、モータ負荷が大きく冷媒循環量の少ない状態となると著しく冷却性が低下する。この状態を回避するため、あらかじめモータ負荷に応じて冷却性を確保できるコンプレッサの最低回転数を決定しておき、その回転数以下では運転しないような制御を折り込んだ。この制御により、過度の冷却性向上や部品耐熱向上が不要となった。

3.2 電子部品の小型化と削減

従来、平滑コンデンサとしては、電解コンデンサや、フィルムコンデンサが用いられ、パワーデバイスとしては車載用IPMが無かったためディスクリット部品が用いられていた。しかし、これらの部品は非常に大きく、かつコンデンサに関しては耐熱性の面でも課題を有していた。これに対し今回は、第4図に示すよう、平滑コンデンサとしては、大容量のセラミックコンデンサを、またパワーデバイスについては、IPMを自動車用として新規



第4図 平滑コンデンサ・パワーデバイスの小型化

Fig. 4 Down sizing of smoothing capacitor and power device

に開発、採用することで、それぞれ部品サイズを従来の約1/20, 1/2にすることができた。

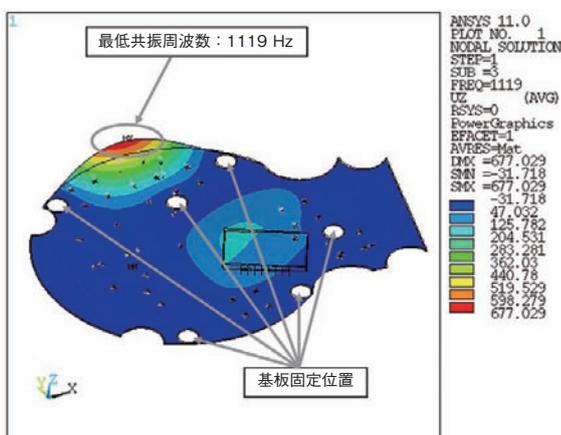
さらに、インバータケースのアルミ化によるシールド構造の採用や4層基板による配線パターンのシールド効果により、EMCノイズの輻射を低減することができ、一般的EMC対策として用いられるコイル部品を削減することで大幅な小型化を実現した。

3.3 電子部品の耐熱・耐振対応

前述のように、インバータの冷却性を向上させることはコンプレッサの効率低下を招くことになるため、100℃を超える高温下で使用可能な電子部品が必要となる。

しかしながら、前述の平滑コンデンサや、フォトカプラのように従来の部品では容易に高温対応できない部品も存在していたので、これらの部品については、新規に開発、採用を行うことで、高温下での使用を可能とした。

また、耐振性に関しては、プリント基板の形状や固定



第5図 固有値解析

Fig. 5 Eigenvalue analysis

位置によっては、基板の共振が数百Hzに発生する。エンジン直付けではこれが大きな問題となるため、共振をエンジン振動で影響されない1 kHz以上の高い周波数領域に移す必要がある。

そのため、今回は電子部品を実装した状態で、第5図に示すようなプリント基板の振動解析を実施し、1 kHz以下の周波数領域には共振をもたない基板の固定位置を決定した。

4. モータ技術

電動コンプレッサを小型化するにはモータの小型化が鍵を握る。モータの小型化には、コア径・コア積厚・コイルエンドのおおの小型化が必要である。

今回の開発においては、希土類の集中巻構造を採用することで小型化を達成することができたので説明する。

4.1 小型化

コンプレッサ全体の小型化にあたっては、インバータをコンプレッサ軸方向に配置する関係上、極力コア積厚の小型化を図り、コア径を大きくすることで必要トルクを確保した。そのコア径は、モータ部の容器外径が圧縮機構部の容器外径を超えない範囲で極力大きく設定した。

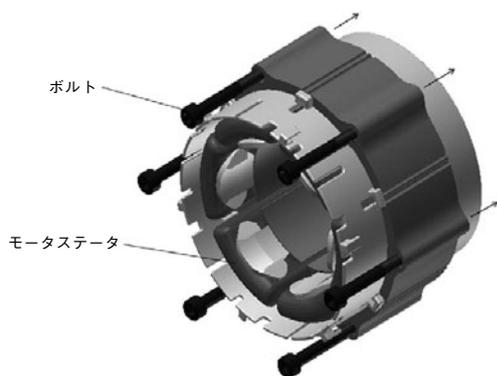
ステータの巻線方式は、大きく分類すると分布巻と集中巻に分けられる。分布巻ステータは、回転磁界を正弦波状にできるため、従来からルームエアコン用コンプレッサモータに採用されてきた。しかしながら、複数のスロットにまたがって巻線を配置するため、コイルエンドが大きくなるという課題があるため、今回の開発においては、集中巻を採用した。さらに今回はコアの積厚を下げるため、希土類磁石を採用した。これらにより従来のフェライト磁石を使った分布巻モータと比べ、モータ全長は約1/2で構成することができた。

4.2 低騒音化

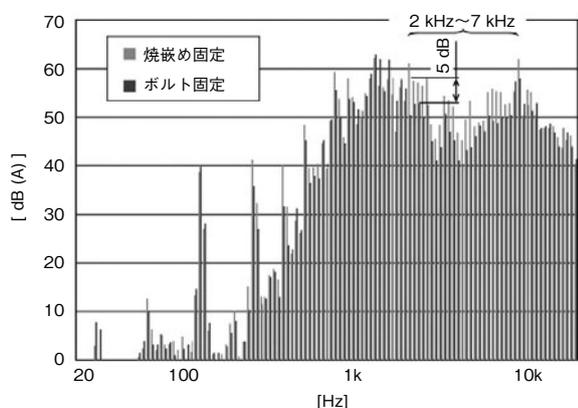
一方、集中巻モータは、前述のように発生磁界が不均一になるため振動騒音が大きくなるという欠点がある。特にステータ外周を容器内面に焼嵌め（やきばめ）などにより固定した場合は、コア振動がダイレクトに伝達され、乗員に不快感を与える要因となる。

そこで今回の開発においては、第6図に示すように、ステータコアを積厚方向にボルト固定することで、コア外周と容器内面に隙をもたせ、径方向の振動伝達を抑制し、振動騒音の低減を図った。

第7図に、従来のステータコア焼嵌め固定とボルト固



第6図 ステータの固定方法
Fig. 6 Fixed method of stator



第7図 騒音測定結果
Fig. 7 Noise level

定での騒音測定結果を示す。焼嵌め固定に比べ、2 kHz～7 kHz帯域で約5 dBの騒音低減ができた。

5. コンプレッサ制御

ルームエアコンで培ったセンサレス正弦波駆動技術の採用によって低振動、低騒音化および高効率化を図る一方で、車両特有の過酷使用に対応した起動性や、コンプレッサの停止を極力回避する新たな制御を開発し、車両特有の環境下での快適性の向上を実現した。

ここでは、その主要開発技術について説明する。

5.1 快適保護制御

ルームエアコンや従来のエンジン駆動タイプのコンプレッサでは、インバータ温度やコンプレッサの吐出温度などの異常高温時には、コンプレッサを停止させる保護を行っている。

しかし、車の室内空間は非常に熱負荷が大きく、コン

プレッサを停止させると、短時間で室内温度が変化するため、乗員に不快感を与えるという課題があった。

今回、新たな保護方式の開発を行うことで、エンジン駆動タイプのコンプレッサでは、コンプレッサを停止させていた負荷領域でも、極力コンプレッサを停止させないことで快適性の悪化を回避した。

具体的には、インバータ温度保護、吐出温度保護、過負荷保護に、この方式を折り込んだ。

具体的にインバータ温度保護について説明する。

インバータ温度は、発熱と、冷却の差によって決まる。発熱はコンプレッサ吐出圧力によって決まる。また、冷却は、コンプレッサ吸入温度と冷媒流量によって決まる。この関係を式で表すと次式のようになる。

$$T_i \propto f(P_d) - f(T_s, G) \dots \dots \dots (1)$$

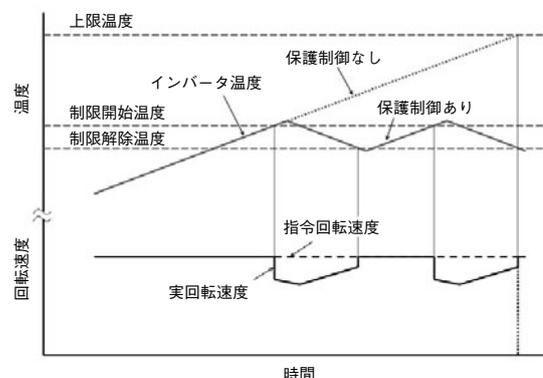
- T_i ：インバータ温度
- P_d ：コンプレッサ吐出圧力
- T_s ：コンプレッサ吸入温度
- G ：冷媒流量

この関係式により、例えば、冷媒が不足するなどの異常時には、冷媒流量が低下するため、インバータ温度が上昇することとなる。

そこで、インバータ温度が過熱保護停止すべき温度近くになるとコンプレッサの回転速度を制限、減速することにより、コンプレッサ吐出圧力を低下させることができる。その結果、(1)式により、インバータ温度の上昇が抑制され、コンプレッサの停止を回避することが可能になる。

インバータ温度による過熱保護作動状態を第8図に示す。

コンプレッサの吐出温度保護やモータの過負荷保護などについても同様の制御を行うことにより、コンプレッサ停止を極力回避することが可能になり、快適性の向上を実現できた。



第8図 インバータ過熱保護制御
Fig. 8 Inverter overheat protection control

5.2 起動制御

前述のように車両用コンプレッサは、停止すると短時間で車室内温度が変化して、快適性を損なうため、何らかの要因で停止させた場合には短時間で、素早く元の運転状態に戻す必要がある。

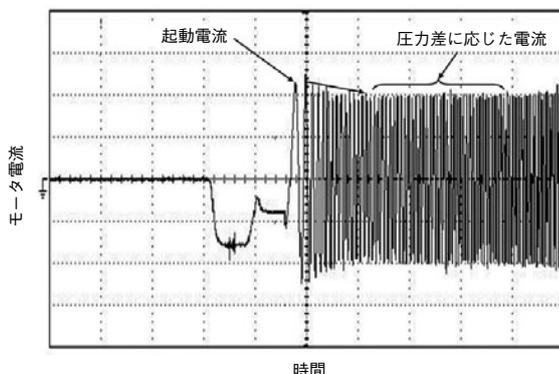
従来のエンジン駆動タイプのコンプレッサにおいては、クラッチがONすることで、コンプレッサの吸入、吐出に圧力差がある場合でもエンジンが非常に大きな駆動力をもつため、瞬時に元の運転状態に戻すことができていた。

それに対し、ルームエアコンで使用されているような電動コンプレッサ制御ではさらに、吸入、吐出に圧力差がある場合は圧力が均衡するまで待って起動を開始し、時間をかけて徐々に回転速度を上げていた。これは、車両用としては大幅に快適性を損なうものであった。

今回、エンジン駆動タイプと同じように、吸入、吐出に圧力差がある場合でも短時間で所定の回転速度まで起動させる制御を開発した。

まず吸入、吐出に圧力差がある場合の起動制御については、第9図に示すように起動時に想定される最大の圧力差に見合うモータのトルクを発生させるための起動電流を流すことで起動させ、その後素早いフィードバックにより、実際の圧力差に応じた電流値に制御することで、圧力差がある場合でも円滑な起動を実現することができた。

次に、短時間での立ち上げ制御については、コンプレッサの耐久性を向上させることと合わせて、位置決め運転、同期運転、センサレス運転の最適化設計を行った結果、運転指令を受けて5s以内に最高回転速度での運転を実現できた。



第9図 起動時の電流波形

Fig. 9 Current waveform at time of start

5.3 低騒音化制御

モータの制御に不可欠なモータ電流を検出するため

に、従来はモータに流入する電流を複数の電流検出素子で直接検出していたが、近年では、小型化、低コスト化のために、高電圧電源の母線に流れる電流を検出する方法が用いられている。

しかし、母線に流れる電流は極めて短時間であり、電流検出が可能な通電期間を確保するため、通電期間を補正して、電流検出を行う必要がある。

このためモータに流入するリップル電流が増加し、モータの固定子巻線、コンプレッサメカ、コンプレッサ容器などに作用し、騒音を悪化させていた。

今回の開発品では、モータ駆動素子の特性に合わせて、モータ電流のインバータとモータ間の電流の向きにより、補正による通電期間を変えることで、トータル通電期間を短くし、リップル電流を抑え低騒音化を実現している。

6. まとめ

以上述べた技術を折り込んだ電動コンプレッサは、日産自動車(株)のハイブリッド車「フーガHEV」と、電気自動車「リーフ」に搭載されている。

今後、ますます環境、エネルギーの面から環境車の市場拡大が進む中、低コスト化や小型、軽量化などの車両ニーズに応えるべく、さらなる電動コンプレッサの技術革新を行ってゆきたい。

執筆者紹介



西井伸之 Nobuyuki Nishii
ホームアプライアンス社 エアコンビジネスユニット
Air-Conditioner Business Unit, Home Appliances Company



倉橋康文 Yasufumi Kurahashi
ホームアプライアンス社 エアコンビジネスユニット
Air-Conditioner Business Unit, Home Appliances Company



小川信明 Nobuaki Ogawa
ホームアプライアンス社 エアコンビジネスユニット
Air-Conditioner Business Unit, Home Appliances Company