

特集 ハイブリッド車用電動コンプレッサのEMI※1事例*

※1 EMI (Electromagnetic Interference: 電磁妨害) Reduction in EMI Noise of an Electric Compressor for Hybrid Electric Vehicles

蛭間 淳之
Atsuyuki HIRUMA

進藤 祐輔
Yusuke SHINDO

Recently, hybrid electric vehicles (HEV) and electric vehicles (EV) have been rapidly growing in production amount, and this trend will continue in the future. To use the air conditioner in vehicles even the Automatic Engine Stop & Start System (Idle Stop System) is in stop-mode, these vehicles have come to use an electric compressor instead of an engine-driven compressor. However, conventional electric compressors had a critical EMI noise generation problem at the start-up of the compressor motor in vehicles. Therefore, we have investigated and analyzed this EMI noise to solve this problem. In this paper, we present the generation mechanism of the EMI noise from the electric compressor, and a newly developed control method of the inverter to reduce the common-mode noise level of the motor.

Key words: electric compressor, inverter, EMI, stray capacitance, common-mode voltage, neutral point voltage

1. はじめに

CO2排出削減や省エネルギーのニーズが高まる中、ハイブリッド車（HEV）や電気自動車（EV）などの電動化車両が数多く製品化されて来ている。今後もこの電動化の流れは加速して行くものと思われる。そこに使われるエアコン用コンプレッサの動力は、HEVにおいてはアイドルストップ時に空調性能が損なわれないように電動方式が主流となって来ている。EVの場合もエンジンがないことから、電動方式となっている。

これら電動コンプレッサの電源は、コンプレッサの消費電力が数kW程度と大きいことから、車両走行に用いられる高電圧バッテリーが使われている。このモータを駆動するためのインバータは、高い電圧を高速でスイッチングするため、ラジオなどに悪影響を及ぼすEMI（電磁妨害）を発生する場合がある。

ここでは、電動コンプレッサについてその特徴を簡単に紹介し、開発初期の頃に検討したEMIの事例を参考にしながら、インバータ駆動されるモータのノイズ発生メカニズムについて解説し、電動コンプレッサ用モータが冷媒中にあるという特殊環境とノイズ発生との関連性を明確にし、ノイズを抑制するインバータの波形合成方法について報告する。

のコンベンショナルな車両と共通にエンジン搭載可能なことが重要な搭載要件となる。

電動コンプレッサにはモータとインバータが追加されるため、搭載を共通化するためには、これら追加部品的大幅な小型化が必要となる。小型化する上で重要なポイントは、モータとインバータの冷却である。これを解決するためモータとインバータはエアコンに使われている冷媒を利用した冷却方式を採用した。

Fig. 1に電動コンプレッサの断面図を示す。モータとインバータが冷媒で冷却されており、特にモータは冷媒雰囲気中に配置され、冷媒により直接冷却する構造にしている。こうした工夫により電動コンプレッサの

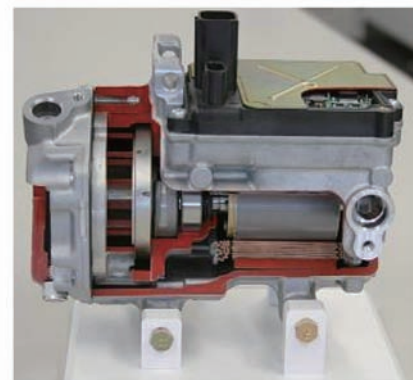
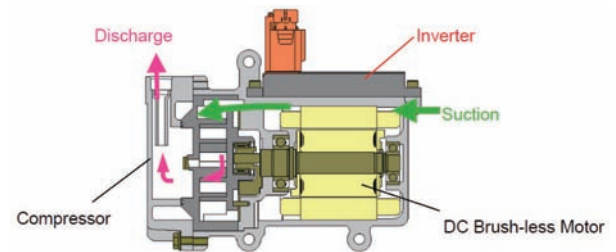


Fig. 1 Structure of electric compressor

2. 電動コンプレッサの構成¹⁾

2.1 冷媒冷却による小型化

エンジン動力車両のエアコン用コンプレッサは、エンジン本体に搭載されベルトで駆動されている。これに対してハイブリッド車用の電動コンプレッサは、こ

*2011年9月5日 原稿受理

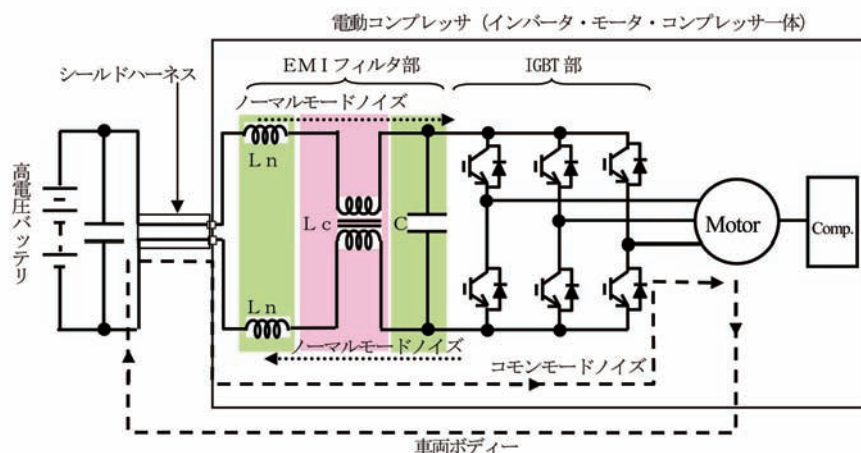


Fig. 2 Inverter circuit and noise path

外形は、ベルト駆動コンプレッサとほぼ同一とすることが可能となり、共通の搭載が可能になった。

このように冷媒冷却方式は、冷却性に優れ小型化に寄与する有用な冷却技術であるが、後述するようにこのことがEMIに大きく影響することになる。

2.2 インバータ回路構成

インバータ主回路は、一般的な3相電圧型インバータでありその回路構成をFig. 2に示す。スイッチング素子はIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor: 絶縁ゲートバイポーラトランジスタ) を使用している。素子の電圧、電流定格はそれぞれ600V, 30Aでインバータ容量としては約5kWである。インバータのPWM (Pulse Width Modulation: パルス幅変調) 波形合成は、正弦波三角波比較方式とし、そのスイッチング周波数は10kHzとしている。

高電圧バッテリーとIGBT部の間には、EMIフィルタ部がありインバータのスイッチングに起因したリップル電流低減やEMIの抑制を行っている。直流電源は、車両走行用の高電圧バッテリー (DC288V, 245V, 等) をそのまま使用している。

モータの制御は、永久磁石モータをロータ位置センサなしでベクトル制御を行うセンサレスベクトル制御方式を採用した。このことで、センサ信号のハーネスを削減でき、モータをコンプレッサ圧力容器内に配置することが可能になった。

EMIフィルタ部は、Fig. 2に示すようにLCフィルタで構成されている。ノーマルモードノイズを低減するためのノーマルモードコイル (Ln) とコンデンサ (C)、コモンモードノイズに対しては、コモンモードコイル (Lc) で構成されている。

3. 電動コンプレッサのEMIノイズ

3.1 コモンモードノイズ

電動コンプレッサの開発途上、コンプレッサ「起動時」にだけAMラジオにノイズが発生することが課題だった。これは、センサレスベクトル制御を行う上で起動時にモータのロータを位置決めする必要があり、通常の擬似正弦波通電とは異なる直流通電を行っていたが、この通電の相違とノイズとの関連が開発当初は解明されていなかった。

一般的に伝導ノイズは、ノーマルモードノイズとコモンモードノイズに大別される。Fig. 2に示すようにノーマルモードノイズは、電源配線を電源電流と同じ経路で流れるのに対してコモンモードノイズは、モータ巻線の浮遊容量などを介して車両のボディーを流れる。

ノイズの原因がノーマルモードかコモンモードなのかを簡単に識別するには、対象となる機器を電氣的に絶縁する方法である。

Fig. 3に電動コンプレッサをボディーから絶縁した場合としない場合での伝導ノイズレベルを測定した結果を示す。電動コンプレッサをボディーから絶縁することで伝導ノイズレベルが約20dB低減している。この絶縁によりAMラジオからのノイズレベルも大幅に低減した。以上からこの電動コンプレッサからのノイズの殆どがコモンモードノイズの成分であることがわかる。

ノイズを低減するには、コモンモード電流経路を遮断するコンプレッサの絶縁搭載が望ましいが、エンジンに直接搭載される振動加速度と高温の条件を満足できる絶縁構造は困難であった。

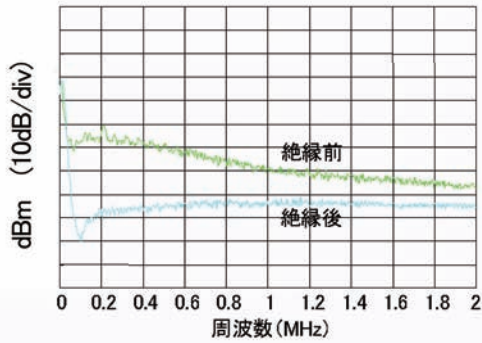


Fig. 3 Comparison of noise levels before and after isolation from vehicle-body-earth

3.2 コモンモード電圧の発生要因

このようなインバータ駆動されたモータ機器から発生するコモンモードノイズについての理論解析については、小笠原教授らが詳しく研究している²⁾。文献によれば、モータ巻線とステータコアとの間には浮遊容量Cが存在し、この浮遊容量にインバータの高いdv/dtのPWM電圧が印加されるとそのスイッチング期間にコモンモード電流*i_c*を生じ、これがコモンモードノイズを引き起こす。

このコモンモード電流*i_c*の経路は、Fig. 4に示す全モータ巻線とステータコア間の浮遊容量をCとし、各相の印加電圧を*V_u*、*V_v*、*V_w*、モータ中性点電位を*V_c*とすると

$$i_c = C \times \frac{d}{dt} \left\{ \frac{V_u + V_v + V_w}{3} \right\} \dots \dots (1)$$

となる。(1)式に表される (V_u + V_v + V_w) / 3は、

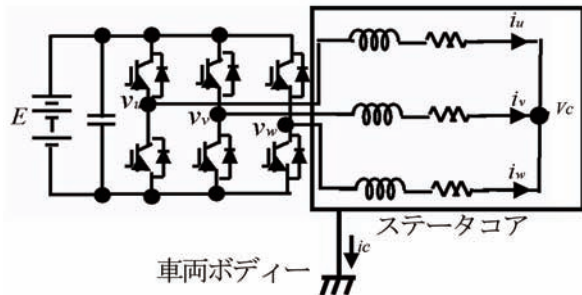


Fig. 4 Simplified model of inverter and motor

モータの3相中性点電位*V_c*であるので、

$$i_c = C \times \frac{dv_c}{dt} \dots \dots \dots (2)$$

と表すことが出来る。この式からコモンモードノイズは、

- (a) モータの浮遊容量C
- (b) モータの中性点電位*V_c*変動

のみで決定されることがわかる。興味深いことは、モータ電流値や巻線インピーダンスは一切影響しないことである。

3.3 電動コンプレッサのモータ浮遊容量特性

まず、電動コンプレッサモータの浮遊容量特性について確認を行った。Fig. 5がモータの3相巻線一括とステータ間の静電容量(浮遊容量)の周波数特性を測定したものである。この特性から分るように、多くのモータが空気中で使われることに対して、電動コンプ

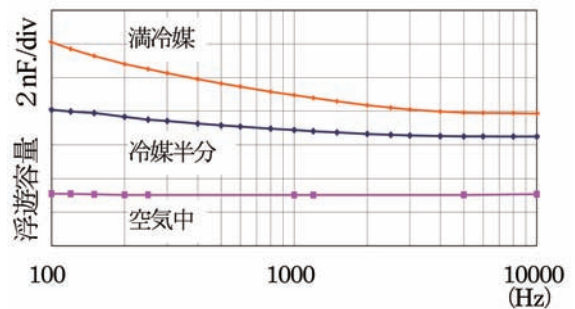


Fig. 5 Stray capacitance characteristics of motor

レッサの場合は、モータが冷媒中に存在することで浮遊容量が数倍大きくなる。これは、巻線とステータ鉄心間が冷凍機油で満たされており、この冷凍機油の比誘電率が空気より大きいためにモータの浮遊容量Cが比例して大きくなってしまふ。参考までに冷媒およびオイルの比誘電率は

- 冷媒 (HFC134a) : 1.03
- オイル (ND11) : 3.19

となっている。このため、通常のもたに対して浮遊容量Cが大きく(2)式から高周波のコモンモード電流が流れ易くなりノイズに対しては不利となることがわかる。

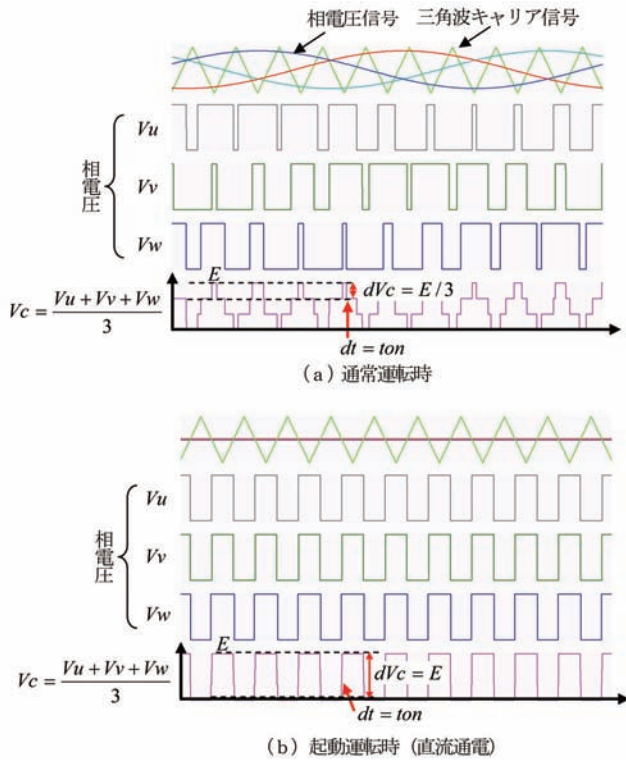


Fig. 6 Change in modulated phase voltage and neutral point voltage of motor

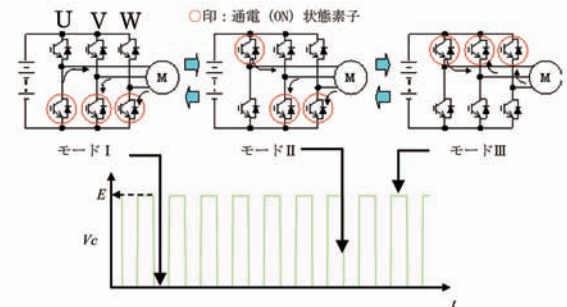
以上のことから電動コンプレッサは他の一般パワエレ機器よりも、EMIに配慮した設計が必要となることがわかる。

3.4 波形合成とモータ中性点電位変動

インバータのPWM波形合成は、Fig. 6 (a) のような3相正弦波の相電圧信号と三角波キャリア信号の大きさを比較し、この信号交点でインバータのスイッチングを切り替える正弦波三角波比較方式が一般的である。同図下に(1)式に基づいてモータの中性点電位Vcを計算したものを示している。通常は、各相が同時にスイッチングすることが殆どないことから、中性点の電圧変動Vcは、直流電圧Eに対しE/3ずつ階段状に変動していく。この変動によるdVc/dtにより浮遊容量Cを介してコモンモード電流icが流れる。

課題となったコンプレッサ起動時の直流通電時には、モータ逆起電圧がないことと巻線インダクタンスの影響がないことによりインバータ相電圧振幅が小さい。この状態をFig. 6 (b) に示す。この図からわかるように各相のスイッチングタイミングがほぼ同時に重なってしまう。この状態の中性点電圧変動は、3相分が同時にスイッチングすることになりほぼ直流電源電圧Eの振幅で変動し、dVc/dtは通常運転時の約3倍となる。

(a) 3相変調方式



(b) 1相変調方式

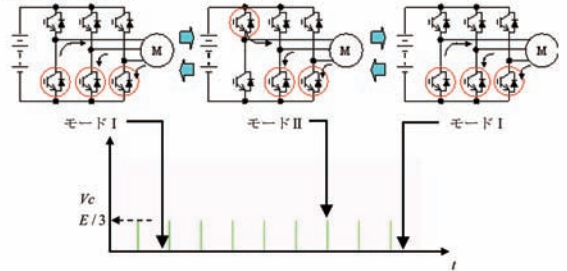


Fig. 7 Comparison of neutral point voltage between 3-phase and 1-phase modulations at start-up

この結果大きなコモンモード電流が流れてノイズレベルを悪化させていた。

4. 中性点電位変動の抑制法と実験結果

3章で電動コンプレッサは、①冷媒による浮遊容量の増加、②起動時に中性点電圧変動が大きい、という特徴が明らかとなり、このことがEMIを悪化させる要因であることがわかった。そこでここでは(1)式に着目し、中性点電圧変動を抑えることを考える。Fig. 7 (a) は先に説明したFig. 6 (b) の3相変調方式でのIGBT素子のON/OFF状態をスイッチングモード毎に示して

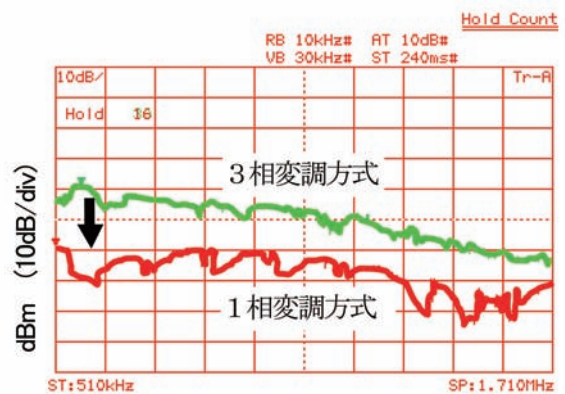


Fig. 8 Comparison of conducted noise levels at start-up

いる。モードⅡで巻線への直流通電を行うが、この状態を継続すると電流が増加し過ぎてしまうため、モードⅠとモードⅢを使ってモータ電流を還流させモータ電流の増加を抑えている。ここで注目すべきことは、モードⅠとモードⅢは、モータから見ると何れもモータ巻線がIGBTを介して短絡された同じ状態であることである。モータにとってモードⅠとモードⅢが同じならばどちらか一方のモードを使っても同じことになる。これをFig. 7 (b) に示す。V, W相2相の下側IGBTをONのまま固定して、U相のみをスイッチングしていることになる。こうしても (a) の3相変調方式も (b) の1相変調方式も同様の直流通電を行うことが可能である。

このときのモータ中性点電圧 V_c を見て見るとその振幅がEからE/3へと1/3に低減されていることがわかる。

そしてこのときの伝導ノイズをスペクトラムアナライザで測定し比較した結果がFig. 8である。1相のみスイッチングを行う1相変調方式は、従来の3相変調方式よりもノイズレベルが約20dBと大幅に低減し、ラジオノイズも改善することが出来た。

5. おわりに

ハイブリッド自動車に搭載された電動コンプレッサのEMIノイズの事例について紹介した。ここでは

- ① 電動コンプレッサモータが冷媒中にある特殊性によりモータのコモンモードインピーダンスが低下しコモンモード電流が増加、EMIが悪化する。
- ② コモンモード電圧の発生メカニズムに基づき、これを低減する制御法の採用でコモンモード電流を抑制した。(約20dB改善)

近い将来、パワーデバイスの進歩が期待される一方、スイッチングスピードの高速化によりEMIの課題と解決が重要技術になって来ると思われる。更にモータも2次元から3次元構造化、多スロット化で巻線浮遊容量の増加も懸念される。このようにそれぞれの技術進歩が相互に影響して来るので、これからのパワーエレクトロニクス機器の開発は、制御、モータ、デバイスが融合・連携してトータルで無駄のない開発が必要になって来ると思われる。

<参考文献>

- 1) 酒井, 乾, 水藤: 「ハイブリッド車向け電動コンプレッサ空調システム」, 2007モータ技術シンポジウム
- 2) 小笠原, ほか: 「電圧形PWMインバータが発生する高調波漏れ電流のモデリングと理論解析」電学論D, 115巻1号 '95

<著 者>



蛭間 淳之
(ひるま あつゆき)
電気機器事業グループ 電気
技術企画室
インバータ、モータの開発に
従事



進藤 祐輔
(しんどう ゆうすけ)
EHV機器技術1部 第3技術室
インバータ電子回路開発に従事