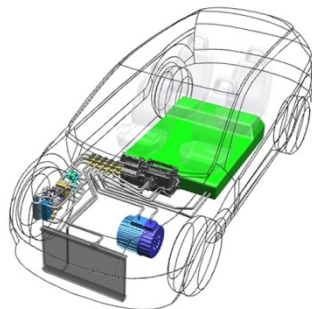


冷媒回路とクーラント回路を組み合わせた 電気自動車用暖房システムの開発

Development of Heating System for Electric Vehicles Combining Refrigerant and Coolant Circuits



小林 崇幸*¹
Takayuki Kobayashi

足立 知康*¹
Tomoyasu Adachi

山本 裕之*²
Hiroyuki Yamamoto

塩崎 亮*²
Ryo Shiozaki

加藤 雅大*²
Masahiro Kato

浅田 祐貴*²
Yuki Asada

世界的な地球温暖化抑制対策のためCO₂排出規制、燃費改善が各国で掲げられるなか、従来の内燃機関車から電気自動車への転換が世界的に進められている。車両用空調機は、内燃機関車においては暖房熱源としてエンジンの排熱を用いてきたが、電気自動車ではエンジンがないため熱源が不足する。通常、冷凍サイクルを用いたヒートポンプ運転により外気から吸熱し熱源としているが、低外気温度時には従来冷媒の物性上、暖房性能が不足する。そのため、一般的には電気ヒータによる暖房性能の確保が行われており、電気ヒータ関連の部品費が車両全体のコストを高めている課題がある。そこで、三菱重工サーマルシステムズ株式会社(以下、当社)は電気ヒータを用いることなく、冷媒とクーラント回路を組み合わせることで、低外気温度条件における車室内快適性向上に寄与できる電気自動車用空調システムを構築したので、本報にて紹介する。

1. はじめに

電気自動車の暖房運転時の課題には次の2つがある。一つは、低外気温度時のヒートポンプ運転を従来冷媒(R1234yf)にて行う場合、十分な暖房性能が得られず車室内快適性が得られないことである。もう一つは、外気からの車室外熱交換器の吸熱性能が着霜(凝縮水が霜となり熱交換器表面に付着する現象)によって低下するため、十分な暖房性能を連続的に発揮することができないことである。

そこで当社は、低外気温度時に外気からの吸熱を行わず、圧縮機動力のみを熱源とすることで、電気ヒータを用いることなく連続的な暖房性能が確保できる電気自動車用空調システムの構築に取り組んでいる。本報ではそのシステム構成及び暖房システムについて紹介する。

2. 電気自動車用空調システムの構成

従来の車両用空調システムは、冷媒と空気の熱交換を行う冷媒回路の媒体ループを1つだけ持つシステムである。一方、本報にて検討するシステムは、冷媒と熱交換を行った熱媒体(クーラント)を用いて空気と熱交換を行うシステムであり、冷媒回路とクーラント回路の媒体ループを2つ持つため、二次ループシステムと呼ばれる。

従来のヒートポンプ運転では、外気からの吸熱を行うために車室外熱交換器にて外気温度以下の冷媒と外気との熱交換を行う。暖房性能は下記の式(1)で示すことができる。

$$\begin{aligned} Q_r &= \Delta h \times Gr \\ Gr &= \rho \times N_c \times V_c \times \eta v \\ \rho &= f(T_s) \end{aligned} \quad \dots(1)$$

*1 三菱重工サーマルシステムズ株式会社 車両空調機事業部 技術部 主席技師

*2 三菱重工サーマルシステムズ株式会社 車両空調機事業部 技術部

ここで

Q_r :暖房性能, Δh :凝縮器出入口エンタルピ差, Gr :冷媒流量

ρ :圧縮機吸入冷媒密度, N_c :圧縮機回転数, V_c :圧縮機押し退け量

η_v :体積効率, T_s :圧縮機吸入冷媒温度

従来の車両用空調システムでは、外気温度が低くなり吸熱側冷媒温度が低くなると、圧縮機吸入冷媒密度 ρ が低下する。そのため、車室内が快適となる暖房性能 Q_r を得るためには凝縮器出入口エンタルピ差 Δh を大きくするか、冷媒流量 Gr を増加する必要がある。しかし、従来冷媒では高压側冷媒圧力を変化させてもエンタルピ差は大きく変わらず、冷媒流量 Gr も用いる圧縮機の押し退け量 V_c や回転数 N_c で決まってしまうため、外気温度が低下するにつれて増加する必要な暖房性能を確保するためには大型の圧縮機が必要となってしまう。そこで本報では、低外気温度時においても、圧縮機吸入冷媒密度を低下させないために、低压側冷媒圧力を高く維持し、暖房性能の確保を図るシステムを構築する。

図1にシステム回路図を示す。二次ループシステムには冷媒ループとクーラントループの2種類のループがあり、冷媒ループは、電動圧縮機、高压側冷媒熱交換器、電子膨張弁、低压側冷媒熱交換器、アキュムレータにて構成されている。また、冷媒ループには従来の一次ループ式ヒートポンプシステムのように、複数の低压側冷媒熱交換器や高压側冷媒熱交換器、冷媒回路上に冷媒切替えバルブを用いておらず、非常にシンプルな機器構成となっている。

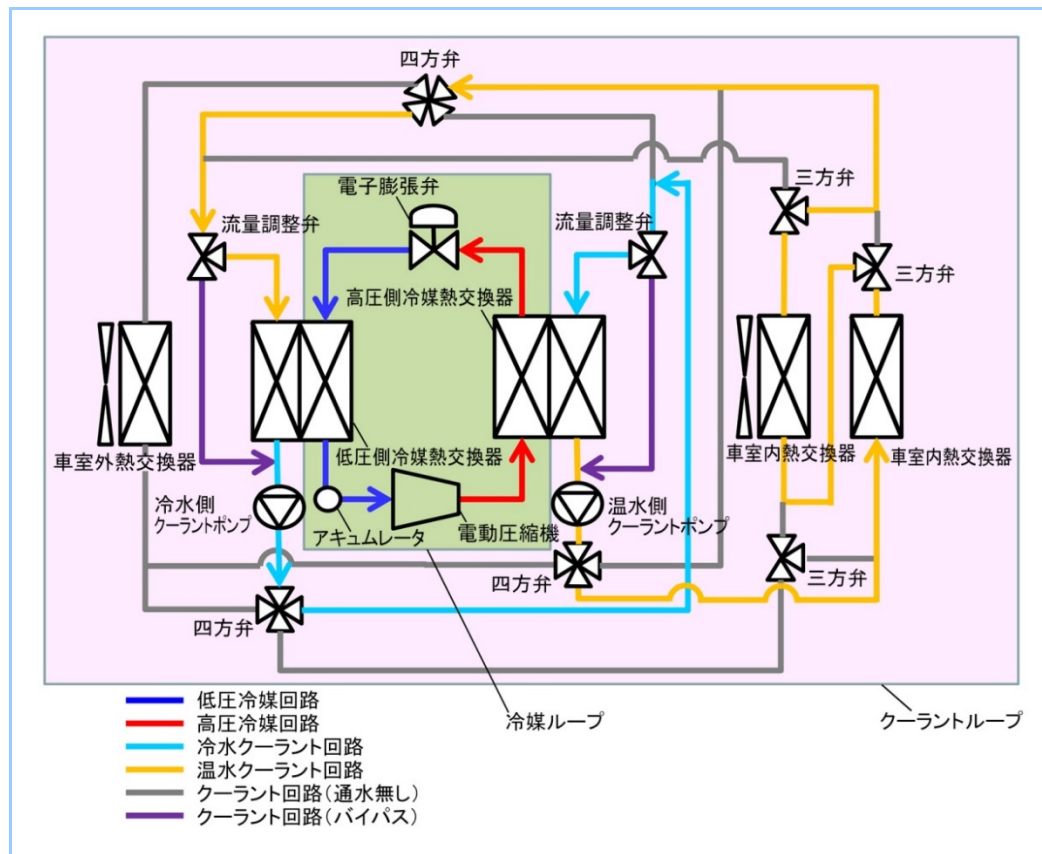


図1 電気自動車用空調システム(二次ループシステム)回路

クーラントループは、冷水側クーラントポンプ、温水側クーラントポンプ、車室内熱交換器、車室外熱交換器と、クーラントループを切り替える複数のバルブ(三方弁, 四方弁, 流量調整弁)にて構成されている。電気自動車の仕様によっては、バッテリーやモータ等の熱管理対象機器へのクーラント通水を行うループを持つ。

このループにて冷房運転, 暖房運転, 除湿暖房運転, 等の従来の車両用空調機の運転が可能である。いずれの運転時にも、冷媒ループの回路構成, 及び冷媒の流動方向は同一であるが、一

方、クーラントループは運転モードに応じて各クーラントバルブにてループを切り替えている。

3. 二次ループシステムによる暖房技術

当社が開発した二次ループシステムは、圧縮機の動力のみを熱源とした暖房運転を行う。低压側冷媒熱交換器と高压側冷媒熱交換器のクーラントループを同一回路上一本化することで、電気ヒータ等を必要としない暖房運転を可能とした。これをヒータモード運転と呼ぶ。暖房性能は下記の式(2)で示すことができる。

$$\begin{aligned}
 Qr' &= \Delta h' \times Gr' \\
 Gr' &= \rho' \times Nc' \times Vc' \times \eta v' \\
 \rho' &= f(Ts') \quad \dots(2)
 \end{aligned}$$

ここで

- Qr':暖房性能, $\Delta h'$:圧縮機出入口エンタルピ差, Gr':冷媒流量
- ρ' :圧縮機吸入冷媒密度, Nc':圧縮機回転数, Vc':圧縮機押し退け量
- $\eta v'$:体積効率, Ts':圧縮機吸入冷媒温度

図2に低外気温度時のヒートポンプ運転とヒータモード運転の作動点の比較をモリエル線図上に示す。ヒートポンプ運転では圧縮機吸入密度が小さく、暖房性能が小さくなる。一方、ヒータモード運転では、温水クーラントを低压側冷媒熱交換器に通水することで、圧縮機吸入冷媒温度Ts', 圧縮機吸入冷媒密度 ρ' , 冷媒流量Gr'を高めることができ、暖房性能Qr'を確保できる。但し、ヒータモード運転では外気からの吸熱を行わないため、圧縮機出入口エンタルピ差 $\Delta h'$ のみが暖房性能に寄与する。

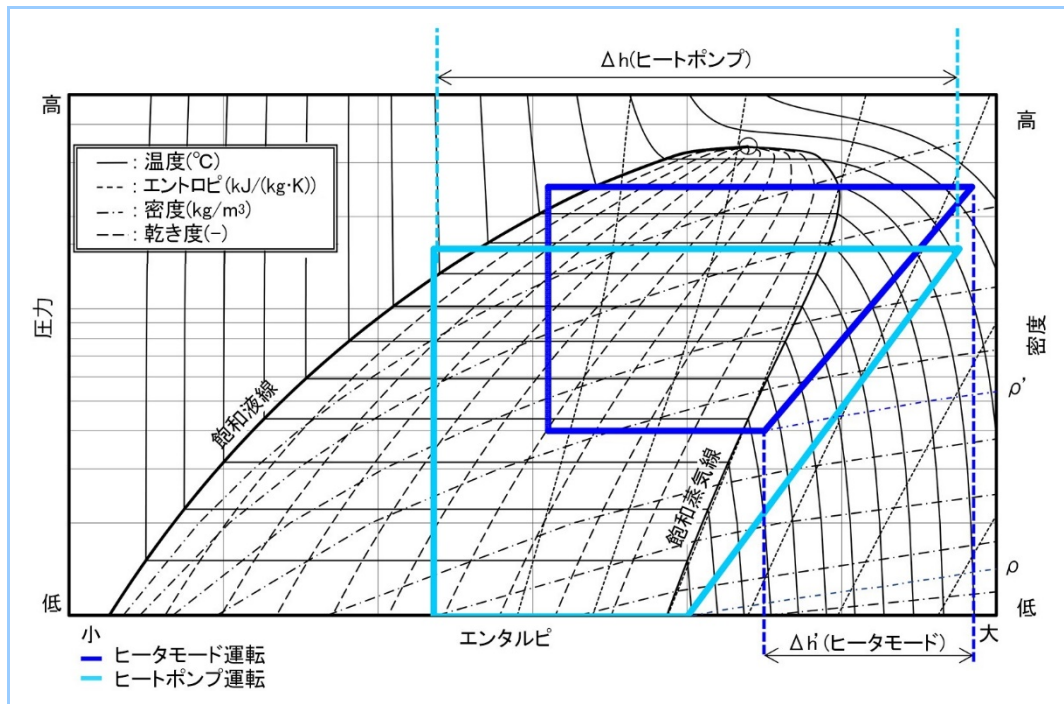


図2 ヒータモード運転とヒートポンプ運転の作動点比較(モリエル線図)

例えば、暖房性能が不足する場合は、低压側冷媒熱交換器への温水クーラント通水量を増加することで低压側冷媒圧力を上昇させる。また、車室内熱交換器への通水温度を高めるため温水温度を高くしたい場合は、高压側冷媒熱交換器への冷水クーラント通水量を増加させることで温水クーラントへの伝熱量を増加させる。

また、二次ループシステムのヒータモード運転では、車室外熱交換器に通水しないため、着霜する条件であっても運転することができ、除霜運転のように暖房運転を中断せずに、連続的な暖房運転が可能となる。

ヒートポンプ運転とヒータモード運転とは、外気温度、クーラント温度、冷媒温度、冷媒圧力と要求性能によって切り替えることが可能である。また、各弁を切り替えることでユーザの要求に応じたクーラント温度を達成しつつ、高圧側冷媒圧力、低圧側冷媒圧力を適切に調整することができる。

図3, 4には低外気温度時の暖房立ち上がり運転における制御性に関する実機での試験結果を示す。

図3の左グラフは低圧側冷媒熱交換器(蒸発器)の冷媒圧力とクーラント流量の関係を示す。低圧側冷媒熱交換器について、運転開始時には低圧側冷媒圧力が低い場合は低圧側熱交換器をバイパスする流量を止めるようにクーラント流調弁を制御し、低圧側熱交換器への温水の通水を最大とすることで低圧側冷媒圧力を上昇させる。その後、設定圧力となるように低圧側熱交換器への通水量とバイパス量を調整することで冷媒圧力を維持する。

図3の右グラフは、高圧側冷媒熱交換器(凝縮器)の冷媒圧力とクーラント流量の関係を示す。高圧側冷媒熱交換器について、運転開始時には高圧側冷媒圧力を高くするため、高圧側冷媒熱交換器のバイパス流量を高めるようにクーラント流調弁を制御する。その後、設定圧力となるように高圧側冷媒熱交換器への通水量とバイパス量を調整することで冷媒圧力を維持する。このように冷媒圧力センサ値に応じてクーラントバルブを調整することで、システムの冷媒圧力を外気温度によらず調整することができる。その結果、図4のように暖房立ち上がり運転において、自動運転制御により、車室内熱交換器の目標暖房性能を確保できることを実機試験にて確認した。

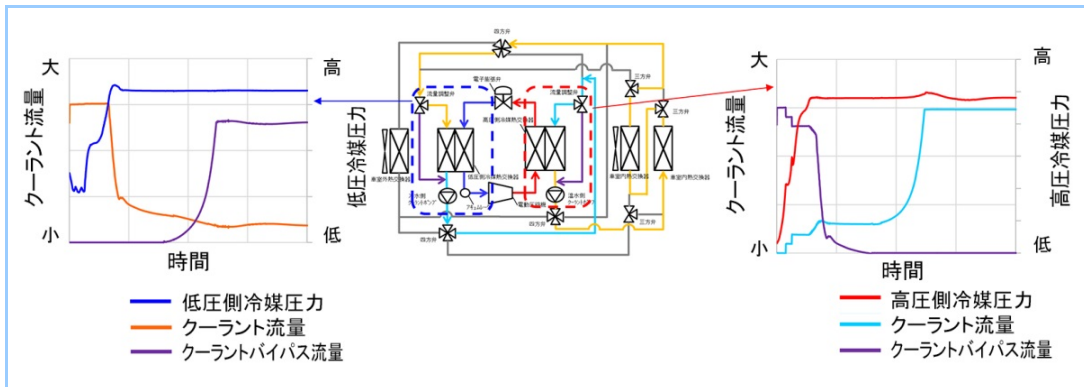


図3 暖房立ち上がり運転(クーラント流量による冷媒圧力制御)

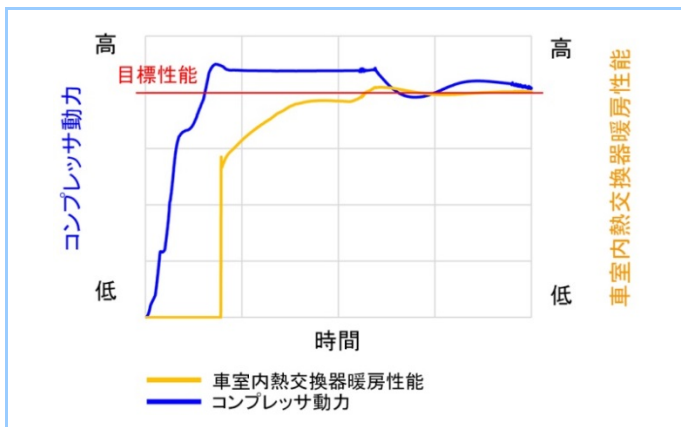


図4 暖房立ち上がり運転(暖房性能)

4. まとめ

冷媒とクーラント回路を組み合わせた二次ループシステムを用いて、電気自動車用空調システムを構築し、低外気温度時の暖房性能確保、及び車室外熱交換器の着霜が起こらない連続暖房運転を実現した。これにより電気自動車の低外気温度における車室内快適性を向上させた。

今後は、車室内の快適性にとどまらず、バッテリーや駆動系モータ等の熱管理のために二次ループシステムを適用し、適温のクーラントを通水することにより、バッテリーの運転状態（急速充電時の冷却、低温時の加温）への対応、モータ冷却による廃熱回収の実現、暖房効率改善の技術開発を進める。本技術は電気自動車の消費動力を低減し、航続距離の延長を図り、CO₂ 排出量削減に貢献できると考えている。

参考文献

- (1) 中川信也ほか、電動車用ヒートポンプシステムの開発、三菱重工技報, Vol.56 No.4 (2019)
- (2) 片山康雄ほか、プラグインハイブリッド車用ヒートポンプシステムの開発、三菱重工技報, Vol.54 No.2 (2017)