

## 平成 23 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「コンパクト、高効率、高出力の車両用永久磁石式発電機と制御装置の開発」

### 研究開発成果等報告書

平成 24 年 3 月

委託者 関東経済産業局

委託先 PM ジェネテック株式会社

# 目次

## 第1章 研究開発の概要

|     |                        |   |
|-----|------------------------|---|
| 1-1 | 研究開発の背景・研究目的及び目標       | 1 |
|     | (1) 研究の目的              |   |
|     | (2) 研究の概要              |   |
|     | (3) 実施内容               |   |
| 1-2 | 研究体制                   | 5 |
|     | (1) 研究組織及び管理体制         |   |
|     | (2) 管理員及び研究員           |   |
|     | (3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名 |   |
|     | (4) 他からの指導・協力者         |   |
| 1-3 | 成果概要                   | 7 |
| 1-4 | 当該研究開発の連絡窓口            | 8 |

## 第2章 本論

|     |               |    |
|-----|---------------|----|
| 2-1 | 電圧制御機構の開発     | 9  |
| 2-2 | ソレノイドコイルの開発   | 11 |
| 2-3 | 制御装置のユニット化    | 14 |
| 2-4 | 発電機の改良開発      | 15 |
| 2-5 | 電圧制御システムの製作   | 16 |
| 2-6 | 発電機および制御装置の改良 | 17 |
| 2-7 | 車載評価用車両のスペック  | 19 |

|     |      |    |
|-----|------|----|
| 最終章 | 全体統括 | 20 |
|-----|------|----|

# 第 1 章 研究開発の概要

## 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

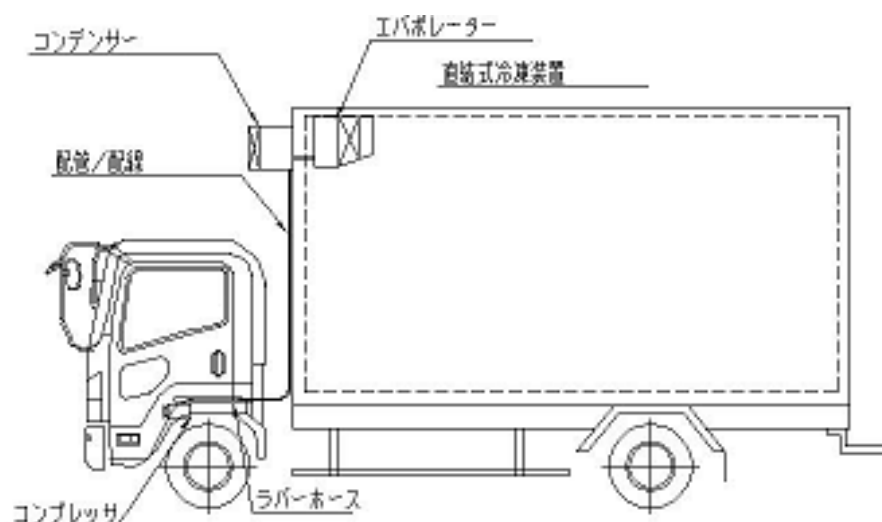
### (1) 研究の目的

本研究開発では、コンパクト、高効率、高出力の車両用永久磁石式発電機と制御装置の開発を行い、冷凍車、機械装置付き車両（PTO車）に搭載されている機械駆動式コンプレッサー、油圧ポンプを電動化し、これら車両の能力向上及び燃費改善することを目的とする。

冷凍車、PTO車では、機械駆動式コンプレッサー、油圧ポンプがエンジンに取り付けられ、アイドリング時や低速域で用いられているため、コンプレッサー等の効率が非常に悪い。永久磁石式発電機の最大の欠点である電圧変動を、巻き線とソレノイドコイルを組み合わせた簡易型制御装置で安定化させることで、エンジンのアイドリング時や低速域でも出力、効率の良い永久磁石式発電機を開発し、コンプレッサー等を効率の良い領域で運転することにより、性能向上及び燃費改善を実現させる。

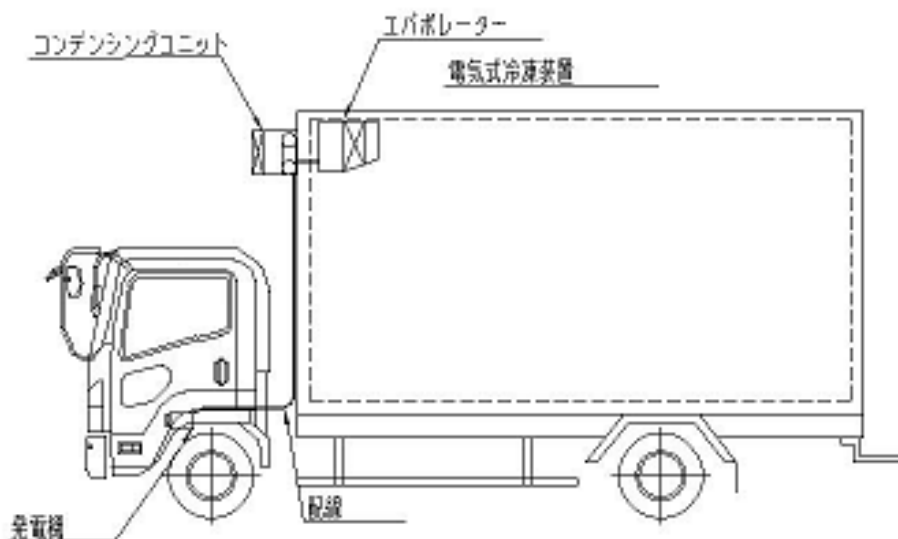
本研究開発では、電気駆動式冷凍装置を開発し、エンジンのアイドリング時や低速域での性能向上及び燃費改善を図る。研究の目標として、電動コンプレッサーの吐出出力 5.5KW に対し、アイドリング出力で 2.5KW/1,500RPM、全負荷最低回転にて 5.5KW/3,000RPM の出力を目標とする。さらに、開発した電気駆動式冷凍装置を冷凍車に搭載し、性能向上を図る。エンジン起動後から所定温度到達時間を 60 分/大気温度 35℃とし、ドア開放 2 分後の所定温度復帰時間を 10 分以内とする。これらの結果、燃費向上の目標値を 30%以上とする。

### ● 従来の「エンジン直結式」冷蔵冷凍装置



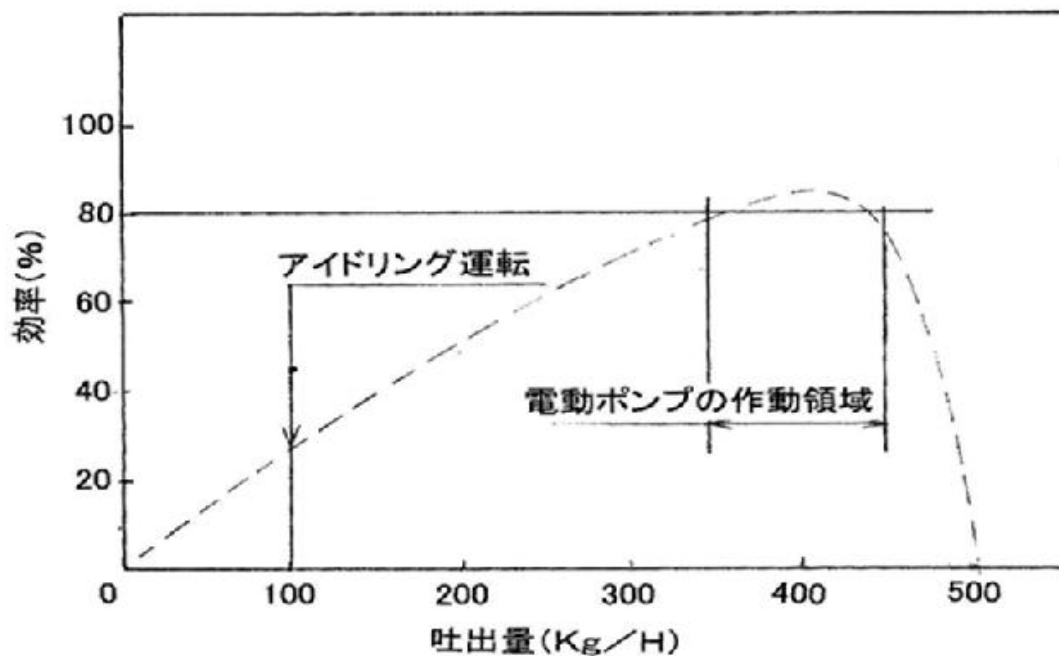
配管接続が 2-3 箇所あり、平均でフロンガス約 2 グラム/年の漏れが生じている。

● 電動コンプレッサを利用した発電式冷蔵冷凍装置



配管接続は全て溶接されており、フロン放出ゼロを実現することができる。

● 冷凍車用コンプレッサの運転効率



コンプレッサをベルト駆動する従来式ではアイドリング回転で 30%の効率でしか運転できない。これを電動機で効率 80%の領域で ON-OFF 運転すれば 20%以上の効率改善が実現される。

## (2) 研究の概要

冷凍車では機械駆動式コンプレッサーをエンジンに取り付け、冷凍庫へ供給する圧縮冷媒を作っているが、エンジンのアイドル時、低速域では50%以下の効率しか得られず、十分な冷凍性能が得られていない。また、コンプレッサーから冷凍機までの冷媒輸送に使われている配管が長く接続箇所も多いため、循環量が低下し冷却性能が悪く、冷媒の輸送途中で温度上昇する等の問題があった。そのため、庫内温度低減のためドライアイス（CO<sub>2</sub>）や保冷材を積み込んでおり、現在、保冷材2,000t/年、ドライアイス1,500t/年が使用されている。さらに、エンジン直結式冷蔵冷凍装置では「過負荷対策」が必要であり、①オイルセパレーター、②気液熱交換器、③サブコンデンサー、④吸入圧力調整弁（副合弁）を設けなければならず、複雑な冷媒回路となっている。

電気駆動式コンプレッサーも試行されてきたが、電磁石式発電機は回転子の磁力密度が小さく、必要な大電力を供給できなかった。また、低速域での出力が大きく、発電効率、電圧の安定性に優れた永久磁石式発電機とその制御装置の研究開発もされてきたが、発電機の制御装置が簡潔、安価にできず、現在も機械駆動式装置が主流となっている。

平成22年度の事業採択より前に、開発し基礎試験を行った永久磁石式発電機及びその制御装置は、簡単な制御機構で電圧一定化に成功し、冷凍車の電気駆動式冷凍装置に応用できる見通しがついた。本研究開発では、永久磁石式発電機の電圧一定制御の研究開発を行い、電気駆動式冷凍装置を備えた冷凍車に搭載し、燃費向上、高出力化を図る。また、本装置を冷凍車用発電機、自動車用機械駆動装置用として制作し、実用化を目指す。当社の永久磁石式発電機による電気駆動式冷凍装置を完成させることにより、コンプレッサー、エバポレーター、コンデンサー等の電気制御による最適運転プログラムの構築が可能となり、脱フロン先兵として電気駆動式冷凍装置を利用し環境対応に速応することができる。

永久磁石発電機は、回転子に永久磁石を用いるので電力が不要で、磁力は電磁石よりも大きいため高出力が得られる。また、回転子の構造が極めて簡単で、発熱が少ないという利点がある。

しかし、一方で、発電機の回転、負荷の変動に応じて発電電流の電圧が大幅に変化するため、これを制御し、一定電圧化する必要がある。また、エンジンの高速回転時に、電圧が速度に比例して異常上昇するという問題がある。

永久磁石発電機の利点を活かし、欠点を補うため、電力のスイッチング、弱め磁界、磁束制御などを用いたが、装置が複雑で大型なものとなり、高コスト・重量増という問題があった。また、このような制御機構では電流ロスが生じ、発電効率を高めるには限界があった。

## (3) 実施内容

### ①コンパクト・高出力な永久磁石式発電機及び制御装置の開発

小型パワートランジスターを使用し、簡潔な永久磁石式発電機及び制御装置を開発する。制御巻き線系のインピーダンスと主巻系のインピーダンスを選定し、パワートランジスターに流れる電流を最小にする主巻側と制御側の相互インダクタンスを決め、制御性と通過電流を最低にするソレノイドコイルのインダクタンスを決定する。シミュレーション最適設計を行い、実験により検証する。

制御装置は、部品の発熱に対し、熱を外部に放散させることが重要なため、発熱部材から筐体までの固体間の熱伝導率を大きくするとともに、固体から空気への熱伝達率を大幅に大きくすることで目的を達成する。この方針に沿った高放熱コンポジット基板材料、高速・大電流基板の開発を行い、目標値を達成する。

さらに、基板内に収める制御装置の耐震性を改善する最適設計を行い、制御基板については、放熱・冷却構造、低抵抗配線化、高電圧化対応技術を実現する。また、パワートランジスターと高性能電子部品を含む制御装置は、低熱膨張率、高熱伝導基板材料が極めて重要なため、エポキシ樹脂材とセラミックス材の中間に、熱膨張率がそれぞれの材料の中間値を持つ材料を配置することで適合性を向上させることができるとの知見に基づき、複合材の研究を行う。

本制御装置では、電圧の一定保持用としてチョークコイル（ソレノイドコイル）を用いる。最適なチョークコイルのコア材質、巻き数を選定する。大きなインダクタンスのチョークコイルを用いると蓄積エネルギーが大きくなり制御系の電流が連続的に流れるが、電圧が不安定になる。そこで、最適なコンデンサーを併用し電圧の安定化を行う。さらに、チョークコイルは飽和磁束密度以上で使用するとインダクタンスが小さくなり制御性を失うので、安定して使用できるための研究開発を行う。チョークコイルをできるだけ小型にするため、コアの飽和磁束密度の大きな材料を使いたい。現在、最も飽和磁束密度の大きな材料は方向性珪素鋼板で、大きさに制約がある。そこで、巻き線の工夫を行い、できるだけ小型化する研究を行う。

発電機本体について、永久磁石発電機の特性はステーター巻き線の巻き数と磁石の磁力強さ、パーミアンス係数で決まるので、シミュレーション計算で仕様を決定する。不確定部分については、ローターとステーター間のクリアランスを変更できるように設計し、最適仕様を選定する。

制御装置のキーテクノロジーは、出力巻き線と出力側ソレノイドコイルのインダクタンス及び制御側巻き線とソレノイドコイルのインダクタンスの比率、及び出力側、制御側がパワートランジスターで連結された時の相互インダクタンスの調整である。部品の製作前、シミュレーション計算により仕様を推算し、実験時にはソレノイドコイルのコア間のクリアランス調整、コイル巻き数の変更により、インダクタンスを変化させ、最適値を決定する。

なお、ダイレクトドライブ方式の冷凍車に永久磁石式発電機及び制御装置を組み込んで実験を行い、各種データを取得・解析し、永久磁石式発電機及び制御装置の最適な設計に反映させる。

## ②電気駆動式冷凍装置の開発、実験

冷凍運転開始後、早急に目標の庫内温度に達するための圧縮冷媒の創生に必要な出力特性が得られる電動コンプレッサ装置の開発を行う。低速域での発電機の出力を確保するためには起電電圧の上昇が必要なので、巻き線の増加等の試験を行う。発電機回転の出力特性に合わせ、インバーターにて電動コンプレッサを運転できるようにし、冷凍庫に取り付けた温度センサーの信号により冷凍庫の温度管理を行う。冷凍庫の急冷動作では、必要に応じてコンプレッサの最高効率点で電動運転させ、冷気を多量に送れるようにする。また、冷凍庫内の細かな温度制御を実施するための最適条件を決定する。

なお、ダイレクトドライブ方式の冷凍車に電気駆動式冷凍装置を組み込んで実験を行い、各種データを取得・解析し、電気駆動式冷凍装置の最適な設計に反映させる。

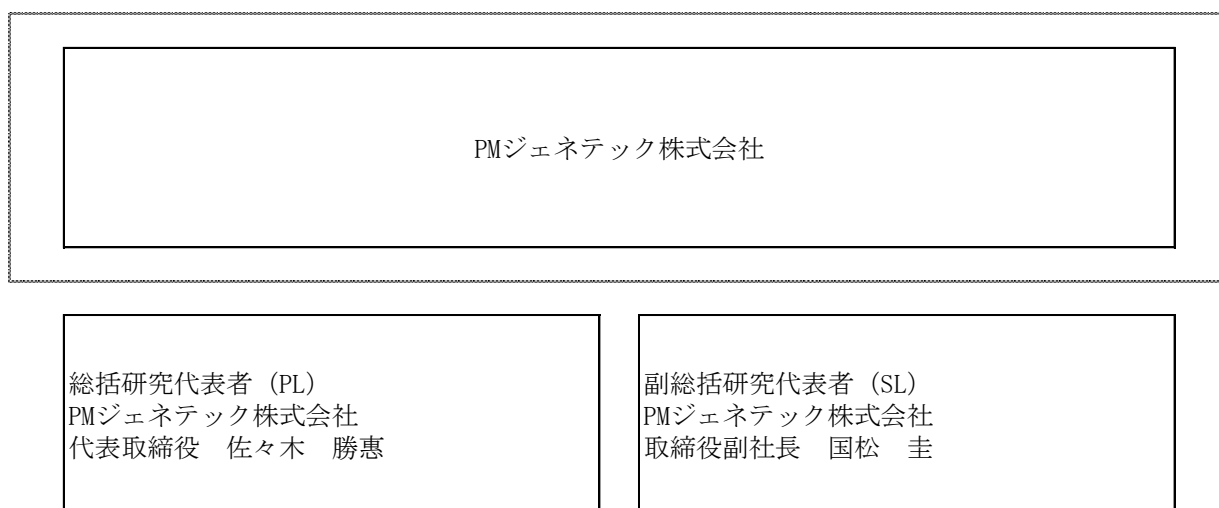
### ③プロジェクトの管理・運営

- ・ 事業管理機関・PM ジェネテック株式会社において、本プロジェクトの管理を行う。プロジェクトの研究経緯と成果について取りまとめ、成果報告書 2 部及び電子媒体 (CD-ROM) 1 式を作成する。
- ・ 研究開発推進委員会を委託契約期間内に 2 回程度開催する。

## 1-2 研究体制

### (1) 研究組織及び管理体制

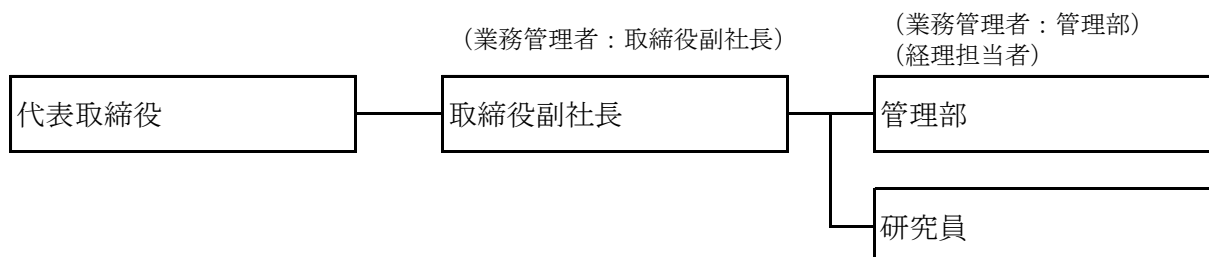
#### 1) 研究組織 (全体)



#### 2) 管理体制

##### ①事業管理機関

[PM ジェネテック株式会社]



#### (2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】PM ジェネテック株式会社



①管理員

| 氏名    | 所属・役職  | 実施内容 (番号) |
|-------|--------|-----------|
| 国松 圭  | 取締役副社長 | ③         |
| 高橋 大輔 | 管理部    | ③         |

②研究員

| 氏名       | 所属・役職  | 実施内容 (番号) |
|----------|--------|-----------|
| 佐々木 勝恵   | 代表取締役  | ①②        |
| 国松 圭 (再) | 取締役副社長 | ①         |
| 赤池 宏一    | 研究員    | ①②        |
| 海老原 公章   | 研究員    | ①②        |
| 守屋 保志    | 研究員    | ①②        |

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名  
(事業管理機関)

PM ジェネテック株式会社

(経理担当者) 管理部 高橋 大輔

(業務管理者) 取締役副社長 国松 圭

管理部 高橋 大輔

(4) 他からの指導・協力者

研究開発推進委員会 委員

| 氏名     | 所属・役職                                       | 備考                                     |
|--------|---------------------------------------------|----------------------------------------|
| 佐々木 勝恵 | PM ジェネテック株式会社 代表取締役                         | <input checked="" type="checkbox"/> PL |
| 国松 圭   | PM ジェネテック株式会社 取締役副社長                        | <input checked="" type="checkbox"/> SL |
| 赤池 宏一  | PM ジェネテック株式会社 研究員                           | <input checked="" type="checkbox"/>    |
| 海老原 公章 | PM ジェネテック株式会社 研究員                           | <input checked="" type="checkbox"/>    |
| 守屋 保志  | PM ジェネテック株式会社 研究員                           | <input checked="" type="checkbox"/>    |
| 高橋 大輔  | PM ジェネテック株式会社 管理部                           |                                        |
| 石井 彰三  | 国立大学法人東京工業大学 大学院 理工学<br>研究科 工学系 電気電子工学専攻 教授 | アドバイザー (謝金)                            |
| 加藤 久   | 加藤特許事務所 所長、弁理士                              | アドバイザー (謝金)                            |

### 1-3 成果概要

本研究開発は、当社が独自開発した永久磁石式発電機の電圧一定制御の実用化開発を行い、これを電気駆動式冷凍装置を備えた冷凍車に搭載し、燃費率の向上、高出力化を図るものである。計画期間2年の委託業務の初年度は、発電機電圧制御装置およびソレノイドコイルの開発を完成させた。すなわち、制御装置の回路を改良し装置本体のコンパクト化を実現し、ソレノイドコイルの温度上昇を抑える最適なコア材質・抵抗値・巻き数などを確定させた。

初年度の実施項目は次のとおりである；

1. 神奈川県産業技術センターから引き継いだ改良回路・制御装置をコンパクト化するため、試験準備
2. 制御装置の部品配置、筐体製作、FET冷却のためのファン設計
3. 効率的な熱対策となるFETヒートシンクの企画、設計、製作、データ計測
4. チョークコイル、スナバ回路について、各種仕様の企画、設計、製作（サイズ、コア材質、抵抗値、巻き数、熱対策など）
5. チョークコイル側抵抗、および、スナバ回路の発熱の問題を解決するため、発電機回転数・負荷を変動させながら、各仕様の回路についてデータ計測
6. 制御回路、制御プログラムの改良、ドライバインターフェイス設計・プログラム設計
7. 各種仕様でのデータ計測を通じた、最適部品の選定（ダイオード、センサー、スイッチ、コンデンサ、FET制御用抵抗、ファン、ヒートシンク、制御装置起動用電源等）
8. 制御装置本体の絶縁試験・耐電圧試験
9. 発熱対策の一として、熱をダミー負荷装置で消費させコイルや制御側スナバ抵抗の熱を抑止させる手法の検討とデータ計測
10. 1系、2系それぞれの出力回路に合わせ制御整流センサーを2種類とする（2系に分離）ための企画、設計、製作

本永久磁石式発電機の制御装置の主な機能は次の通りである；

1. 本制御装置は、本体（発電機-出力用コイル-制御用コイル）に接続し機能する。
2. 整流された電圧を計測し、電圧に応じPWMのデューティ比を変化させ、FET（Field effect transistor）にてスイッチングし整流側の電圧値を一定に保持するための装置である。
3. 装置内部には、マイコン基板、FET回路2系統、ヒートシンク&ファン、スナバ&抵抗回路2系統を装置ボックス（縦290mm、横180mm、高さ80mm）内に搭載している。
4. 主制御（電圧一定制御）以外に、温度測定、発電機回転数計測、電流計測等を行い装置全体の制御を行う。
5. 温度測定には、J型熱電対を使用し、FETヒートシンク等の温度測定し一定温度を超えると装置の停止を行い、回転数計測には反射型フォトカプラを使用し、発電機の回転数が適応外の場合装置全体の停止を行う。

6. 電流計測には、超小型精密計測用電流センサーを使用し電力計算を行う。

研究開発開始時期の遅れ、多数に上るコイル仕様の組合せ試験に予定以上の時間がかかったことにより、初年度は、冷凍装置の開発に着手することができなかったが、発電機の仕様決定、ソレノイドコイルおよび制御装置の組合せを決定することには成功した。但し、当初計画の発電機回路では、高速運転時の高電圧電流の制御の際に発熱し、効率向上に限界があると考えられた。そこで、発電機本体の巻き線仕様を変更することにより、発熱を抑え、自在に電圧をコントロールする制御装置を開発することとした。これにより、発電機の基本出力性能を落とすことができる（発電機回転数に応じた発電電圧を低く設計することができる）と見込み、より小型化、簡略化された発電機、回路を設計することとした。第2年度は、この新たな発電機的设计・試作を行い、すぐに冷凍装置の稼動実験に着手することによって、実用化開発のポイントとなる車載試験を実施することを目的とした。2ヵ年の計画年度中に当社製永久磁石式発電機を利用した電気駆動式冷凍車を完成させる計画で第2年度に継続した。

第2年度の実施項目は次のとおりである；

1. 小型、簡略化発電機、回路の設計、基本性能評価実験
2. 昇圧・降圧制御回路・システムの設計、プログラミング
3. 「委託業務実施計画書」実施内容 ② 「電気駆動式冷凍装置の開発、実験」
4. 電動駆動式を前提とした発電機的设计変更、実験等による、電動コンプレッサーの企画、設計。
5. 温度センサーを含む全体システムの効率運転を可能とするための制御プログラムの製作。
6. これらすべての車載走行試験。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

PM ジェネテック株式会社（最寄り駅：JR 京浜東北線・山手線 新橋駅）

〒105-0004 東京都港区新橋 2-11-10 いせ源ビル 3F

TEL： 03-3519-2216 FAX： 03-3595-0031

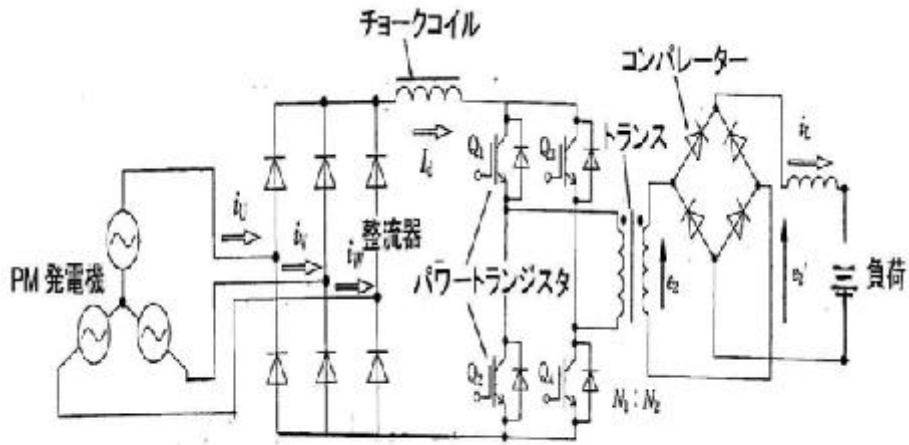
## 第2章 本論

## 2-1 電圧制御機構の開発

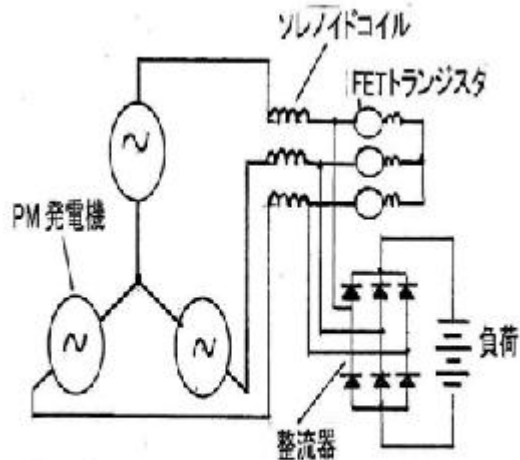
本研究開発における永久磁石式発電機の電圧一定制御のための制御装置の開発項目は次の3点であった。

- (1) 発電機本体、チョークコイル、制御装置等の最適な組合せを決定すること。
- (2) 制御装置の部品配置、筐体製作、FET冷却のためのファン設計
- (3) 効率的な熱対策となる FET ヒートシンクの企画、設計、製作、データ計測

次の図に示すとおり、永久磁石式発電機の電圧制御における従来方式（従来型 DC-DC コンバータによる電圧一定制御）と比較して、本研究開発における電圧一定制御システムは、簡易制御装置により一定電圧制御を可能としていることが一目瞭然である。

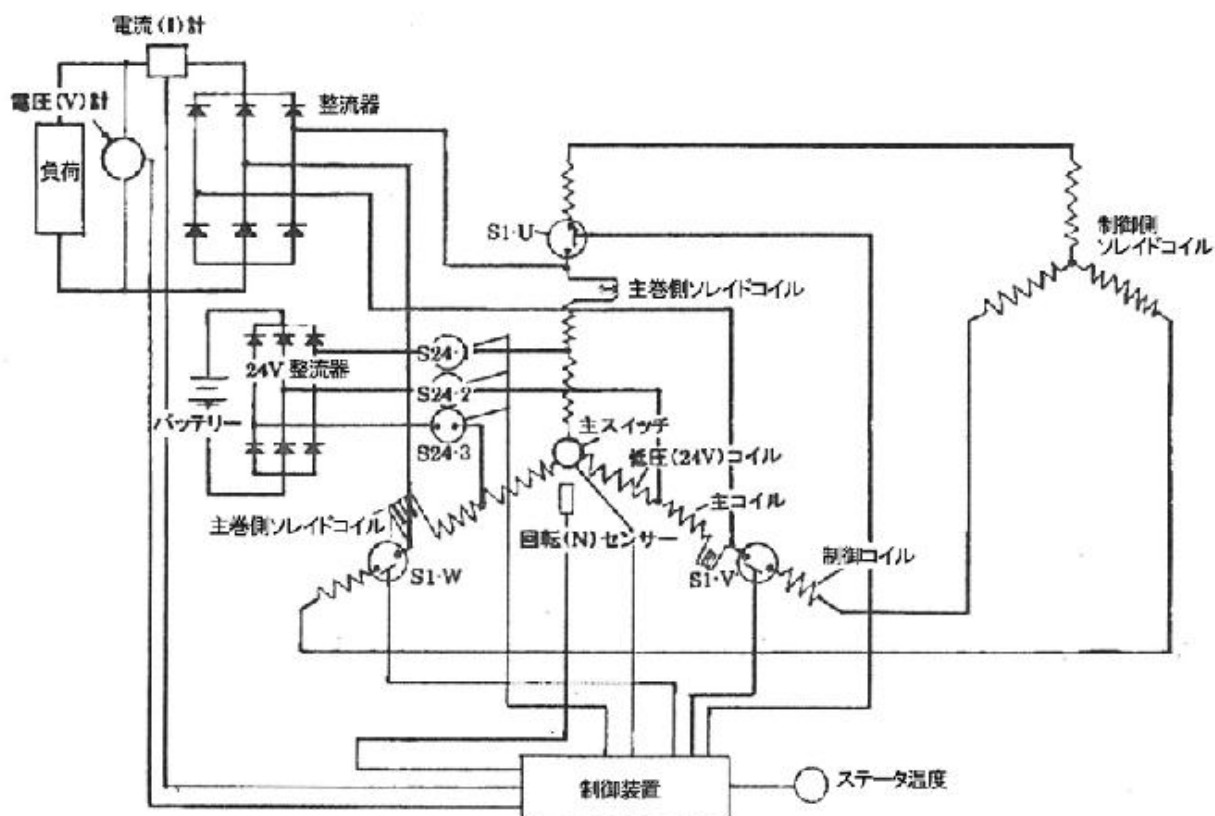


従来型 DC-DC コンバーターと PM 発電機



簡易制御装置で一定電圧にした PM 発電機(当社製)

本研究開発において、初年度に確定した永久磁石式発電機・制御装置の回路図面は次の通りである。なお、ソレノイドコイルの仕様詳細については次項に記述する。



当初計画の回路による永久磁石式発電機の場合、比較的低電圧な定格電圧（14V、24V程度）であれば優位な効果があげられることが確認されたが、定格電圧がある程度高くなると（200V-ACなど）、発電機回転数の上昇とともに出力巻き線、制御巻き線における発電電圧がひじょうに高くなり、高耐圧性のスイッチング素子（FET）を使わなければならないことが判明した。また、巻き数を大きくすると電圧が上がり、その反面、巻き数をある程度大きくしないとインダクタンスが大きくなり、垂下特性の電流が小さくならないため、特に巻き数をより大きくすべき制御巻き線については、たとえば最高回転数において2460V（実効値）にも達することとなる。

そこで、出力巻き線、制御巻き線のそれぞれにロータの磁束と鎖交しないソレノイドコイルを加えることにより、出力巻き線および制御巻き線の巻き数を制限しつつインダクタンスを大きくし、垂下特性の電流を小さくするという着想を得て、初期回路を製作し、実験したところ、その有効性を確認することができた。

## 2-2 ソレノイドコイルの開発

小型のパワートランジスタを使用し、簡潔な永久磁石式発電機及び制御装置を開発するものである。制御装置のキーテクノロジーは、出力巻き線と出力側ソレノイドコイルのインダクタンス及び制御側巻き線とソレノイドコイルのインダクタンスの比率、及び出力側、制御側がパワートランジスタで連結された時の相互インダクタンスの調整である。部品の製作前、シミュレーション計算により仕様を推算し、実験時にはソレノイドコイルのコア間のクリアランス調整、コイル巻き数の変更により、インダクタンスを変化させ、最適値を決定する。

本研究開発における最大のポイントは、制御系巻き線系のインピーダンスと主巻系のインピーダンスを選定し、パワートランジスタに流れる電流を最小にする主巻側と制御側の相互インダクタンスを決め、制御性と通過電流を最低にするソレノイドコイルのインダクタンスを決定することであった。そのため、まず、シミュレーション計算で最適設計を行い、実際にソレノイドコイルを製作したうえで実験により検証するというプロセスで実施することとした。

実際にソレノイドコイルを製作し、それぞれのソレノイドコイルのL値をRCメータを用いて測定したところ、シミュレーション値とは大きく異なり、また、コアやコイルによってばらつきが生じることがわかった（下記表参照）。

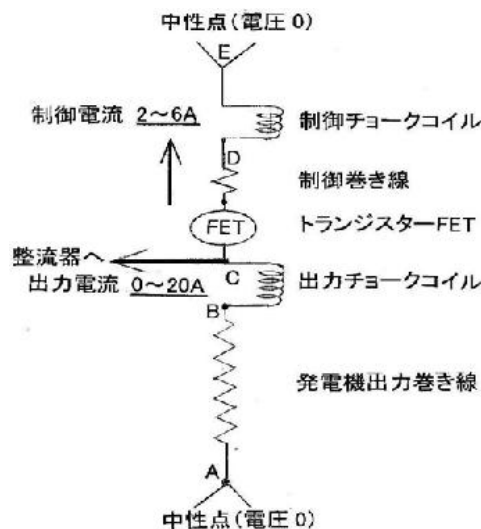
|      | シミュレーション<br>結果 | 試作機実験結果 |        |         |        |
|------|----------------|---------|--------|---------|--------|
|      |                | 1       | 2      | 3       | 4      |
| 404T | 29.8mH         | 29.5mH  | 31.2mH | 33.8mH  | 35mH   |
| 400T | 29.2mH         | 26mH    | 12.3mH | 14mH    | 18.9mH |
| 384T | 26.9mH         | 4mH     | 25.7mH | 23mH    | 7.9mH  |
| 382T | 26.7mH         | 21.7mH  | 24mH   | 25.1mH  | 25.4mH |
| 320T | 18.7mH         | 33.8mH  | 25.4mH | 38.9mH  | 32.1mH |
| 300T | 16.4mH         | 23.1mH  | 4mH    | 11.1mH  | 24.7mH |
| 200T | 7.0mH          | 20mH    | 18.1mH | 27.5mH  | 14mH   |
| 150T | 4.1mH          | 10.3mH  | 12.1mH | 16mH    | 18.2mH |
| 117T | 25mH           | 32mH    | 34mH   | 15.8mH  | 25mH   |
| 100T | 18.2mH         | 12mH    | 6.5mH  | 21mH    | 26.3mH |
| 87T  | 13.8mH         | 17.8mH  | 18.5mH | 16.5mH  | 13mH   |
| 76T  | 10.5mH         | 16.4mH  | 14.5mH | 18mH    | 14mH   |
| 76T  | 7.6mH          | 10.3mH  | 11mH   | 9.5mH   | 7.1mH  |
| 70T  | 8.0mH          | 8.6mH   | 7.75mH | 8.9mH   | 8.0mH  |
| 60T  | 6.58mH         | 14.5mH  | 5.5mH  | 6.1mH   | 8mH    |
| 53T  | 5.13mH         | 4.6mH   | 11.5mH | 8.2mH   | 5mH    |
| 34T  | 2.12mH         | 2.0mH   | 2.15mH | 2.8mH   | 3.05mH |
| 34T  | 2.75mH         | 3.2mH   | 2.8mH  | 3mH     | 3.15mH |
| 30T  | 1.64mH         | 2.4mH   | 2.1mH  | 1.85mH  | 0.7mH  |
| 23T  | 0.8mH          | 1.55mH  | 1.25mH | 1.1mH   | 0.75mH |
| 19T  | 0.95mH         | 1.2mH   | 1mH    | 1.75mH  | 0.85mH |
| 10T  | 0.68mH         | 0.5mH   | 0.9mH  | 0.85mH  | 0.75mH |
| 8T   | 0.31mH         | 0.45mH  | 0.51mH | 0.35mH  | 0.4mH  |
| 6T   | 0.107mH        | 0.23mH  | 0.19mH | 0.095mH | 0.15mH |

(測定周波数は 100MHZ)

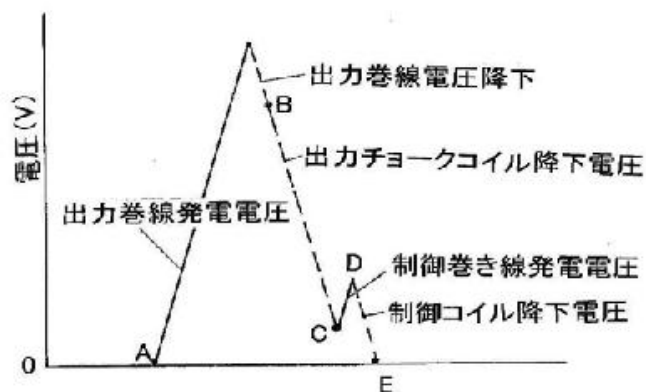
そこで、シミュレーション値と測定結果とが近似し、かつ、ばらつきの少ない設計のソレノイドコイルを実際の実験対象として採用することとした。なお、この数値の乖離とばらつきの原因は、試作段階で簡易な手巻きの巻き線を使用しているためであると推測する。実際の製品量産化段階では機械巻きにより品質一定化が図られるため、製品品質の不安定化といった問題が生じることはない。本研究開発においては、研究費用の低減、迅速化のため、この手巻きソレノイドコイルのうち、値の乖離・ばらつきの少ないソレノイドコイルを用いて実験することとした。

本研究開発における永久磁石式発電機の電圧一定制御機構においてソレノイドコイルが果たす役割を図式化すると次のとおりである。

● スターター巻き線、FET、ソレノイドコイル（チョークコイル）の構成



● 上記制御機構各部の電圧





本制御装置では、このように、電圧の一定保持用としてチョークコイル（ソレノイドコイル）を用いるが、最適なチョークコイルのコア材質、巻き数を選定する必要がある。大きなインダクタンスのチョークコイルを用いると蓄積エネルギーが大きくなり制御系の電流が連続的に流れるが、電圧が不安定になる。そこで、最適なコンデンサを併用し電圧の安定化を行う。さらに、チョークコイルは飽和磁束密度以上で使用するとインダクタンスが小さくなり制御性を失うので、安定して使用できるための研究開発を行う。チョークコイルをできるだけ小型にするため、コアの飽和磁束密度の大きな材料を使いたい、現在、最も飽和磁束密度の大きな材料は方向性珪素鋼板で、大きさに制約がある。そこで、巻き線の工夫を行い、できるだけ小型化する研究を行う。

なお、コア材質にパーマロイを用いることや、鋼板の厚みを何種類か製作し磁束密度の違いを検証した。パーマロイコアは採用することができず、珪素鋼板の設計を工夫することにより対応可能であることがわかった。

ソレノイドコイル選定のための最終試験結果は次のとおりである。

| No. | 条件                                     | 主電圧           | 制御電圧  | 制御電流(A)   |
|-----|----------------------------------------|---------------|-------|-----------|
| 1   | 主巻き線 34T、制御巻き線 70T<br>主巻き線と制御巻き線側に FET | 50V<br>→ 150V |       | 0.04~0.25 |
| 2   | 主 34T、制御 70T、制御側に 250mH<br>ソレノイド       | 16V           | 81V   | 0         |
| 3   | 同上                                     | 14V           | 13V   | 2         |
| 4   | 主 104T、制御 70T、制御側 250mH ソ<br>レノイド      | 42V           | 36V   | 0         |
| 5   | 同上                                     | 10.8V         | 12.8V | 1.79      |
| 6   | 主 34T、制御 70T、制御側 50Ω                   | 23V           | 46V   | 0         |
| 7   | 同上                                     | 21V           | 29V   | 1.06      |
| 8   | 主 70T、制御 34T、制御側 50Ω                   | 46V           | 22V   | 0         |
| 9   | 同上                                     | 11V(23%)      | 20V   | 1         |

初期の試験で主巻き線と制御巻き線間にスイッチング素子の FET を接続して試験したところ、制御巻き線系の電流を FET によりデューティ制御により電流を増加させると電圧増加する傾向が出た。これについて協議した結果、FET により周波数が上昇し、制御巻き線の電圧が上昇したと判断した。

そこで制御性を確認するため、FET の代わりにソレノイドコイルを用いて制御系電流を減少させることにし、旧発電機の巻き線を利用し、5 段階のインダクタンスを作り、試験した。その結果、主巻き線側に小さな巻き線数（34 ターン）を置き、制御側に大きな巻き線（70 ターン）を置いて種々

の試験を行ったが主巻き線の電圧が変化しないという事態が発生した。そこで、主巻き線の巻き線数を 100 ターン、制御巻き線側を 70 ターンとし、電流を 1.0A 流したところ、主巻き線の電圧の制御性は 67%減まで達成された。

制御巻き線側の交流波形の外乱を除く為、制御巻き線側の電流制御を抵抗体を用いて実験したところ、主巻き線に 34 ターン、制御巻き線に 70 ターンの組み合わせでは主巻き線の電圧降下が確認されなかった。そこで、主巻き線を 70 ターン、制御巻き線を 34 ターンとし、1.0A の制御電流で実験したところ主巻き線の電圧降下は 77%まで減少した。

電圧の降下性が確認できたので、FET による電流制御と、電流波形の平滑化を盛り込んだ制御回路の作成に取り掛かることにした。

以上の結果により、制御巻き線、主巻き線を振り分け、組み合わせながら、最適値を見出す実験をすることにした。当初予想してきた結果とは若干異なるが、電圧の制御性が確認できたのでこの結果に基づいて、No.9 を採用し、制御装置の完成を図ることとした。

404 ターンのソレノイドコイルでは出力 7A 程度しか出なかったため、次に、乖離・ばらつきの少ない 382 ターンのソレノイドコイルを使用して出力・制御試験を行ったところ、下記の表の通り、必要な出力を得られ、さらに、出力した全負荷を消費させれば発熱の問題も生じないことがわかった。

### 2-3 制御装置のユニット化

制御装置は、部品の発熱に対し、熱を外部に放散させることが重要なため、発熱部材から筐体までの固体間の熱伝導率を大きくするとともに、固体から空気への熱伝達率を大幅に大きくすることで目的を達成する。この方針に沿った高放熱コンポジット基板材料、高速・大電流基板の開発を行い、目標値を達成した。

さらに、基板内に収める制御装置の耐震性を改善する最適設計を行い、制御基板については、放熱・冷却構造、低抵抗配線化、高電圧化対応技術を実現する。また、パワートランジスタと高性能電子部品を含む制御装置は、低熱膨張率、高熱伝導基板材料が極めて重要なため、エポキシ樹脂材とセラミックス材の中間に、熱膨張率がそれぞれの材料の中間値を持つ材料を配置することで接合性を向上させることができるとの知見に基づき、複合材の研究を行った。

なお、制御用半導体の FET に関しては、当初、APP28M120P2 (1200V - 28A) を用いたが、電流値 30A に満たないため、実験途上で焼損した。そこで、次に、1XFK30N10092 (1000V - 30A) を用いたが、前回と同様に焼損した。FET では、これ以上、高電流に耐えられる部材が存在しないため、IGBT の IMPH50D-060 (600V - 50A) を使用することとした。

## 2-4 発電機の改良開発

発電機本体について、永久磁石発電機の特徴はステーター巻き線の巻き数と磁石の磁力強さ、パーミアンス係数で決まるので、シミュレーション計算で仕様を決定する。不確定部分については、ローターとステーター間のクリアランスを変更できるように設計し、最適仕様を選定する。

まず、本研究開発において、平成 22 年 10 月に、6kw 出力タイプの発電機試作機 1 台を製作した。これは、冷凍車市場においてもっとも需要の大きい 4 トン車クラスの冷凍車において用いられるタイプの発電機である。この新たに製作した 6w 出力タイプの発電機を用いて、出力特性の測定と電圧一定制御試験に着手した。しかし、本制御回路では、制御電流が 5 アンペアを超えると著しい発熱がみられ、明らかに発電効率の低減が生じていた。なお、この事実は上記表の制御電流の大きさにも反映されている。そこで、当社は、制御回路の改良開発に取り組むとともに、同時並行で、出力タイプのより小さい発電機においてこの制御回路をそのまま用いることができるかどうか実験することとした。果たして、当社がもともと所有していた出力タイプの小さい (3kw 出力タイプ) 発電機であれば、この制御回路においても、制御電流最大 2.7 アンペアで制御可能であることがわかった。

但し、将来的に高出力の発電機に対するニーズが生じることが明らかであるため、制御回路の改良開発を並行して行った。まず、発電機出力巻き線と出力ソレノイドコイルはそのままにし、制御巻き線と制御ソレノイドコイルを 2 系統に分離した。並列回路において 1 つの制御を担わせることによって電流を半減させることができるためである。これにより、2-2 の実験結果の通り、スナバ消費電力を抑え、必要な出力をえることができた。

なお、このプロセスを経たことによって、発電機ステーター巻き線の出力巻き線をも 2 系統にし、これを直列・並列に回路接続を切り替えることにより発電機出力レベルを大きく変更させるという着想に至った。

発電機の必要要件は種々あるが、もっとも重要な要素は、エンジンアイドルリング時に十分な出力性能を得ることであり、すなわち、発電機回転数 1600 回転/分で 3.0kw の出力が確保できていればよい。

上述の通り、当社の既存の発電機を用いると制御側回路が 2 系統となってしまうため、逆に、発電機本体の出力巻き線を 2 系統に分離することによって制御側回路を単純化し、かつ同時に、低速回転時の高出力を確保することができるよう低速回転時には直列結線により発電させ、高速回転時には並列結線により発電させるというコンセプトによる発電機設計を行った。

この発電機を実際に製作し、出力等の測定をしたところ、1600 回転/分時に 2.3kw の出力が得られた。しかし、これでは製品実用化にあたり十分な出力とは言えないため、出力巻き線の巻き数を増加させ、発電機ステーターに組み込んだ。

前記発電機の出力巻き線は 6 ターン直列結線だったところ、8 ターンに増加させたことによって、発電機回転数 1600 回転/分時に 3.0kw の出力を得た。

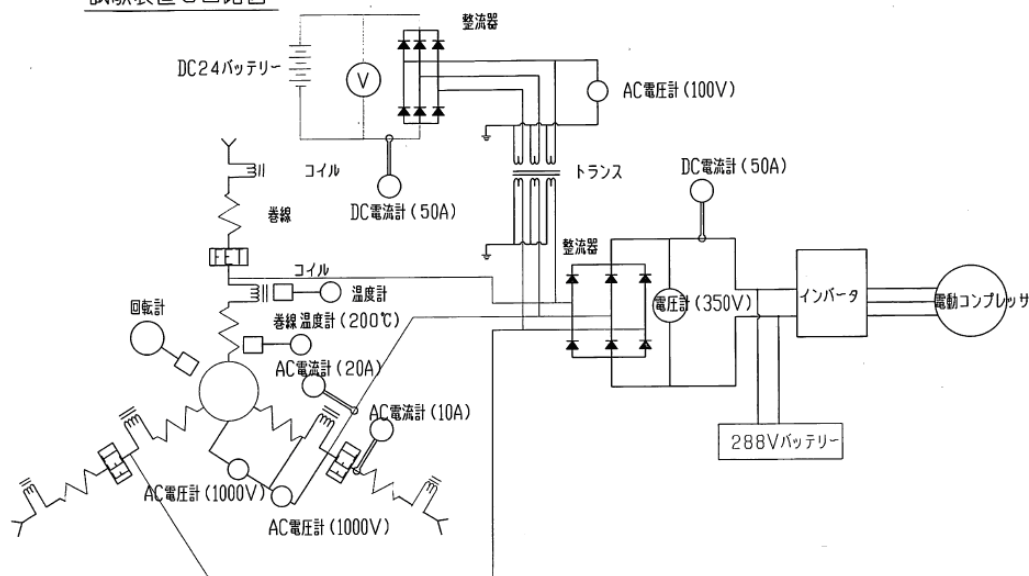
しかしながら、発電機設計のシミュレーション値と試作機実測データとの間に大きな乖離があるため、原因を追及することとした。また、実用化製品としては、低速回転領域において直列結線、高速回転領域において並列結線というように走行中に結線を切り替える製品設計は極めて複雑な制御機構となるため、より単純化を図る必要があった。

まず、出力未達の主要因は、発電機の小型化、軽量化を図るがあまりステーターのヨーク（外周の厚み）が薄く磁漏が生じていることであると考えられた。そこで、この点については、発電機ステーター、ハウジングの再設計を行い、解決することとし、制御機構は単純化させることとした。

## 2-5 電圧制御システムの製作

制御回路、制御プログラムの改良、ドライバインターフェイス設計・プログラム設計を実施して、制御装置ユニットを完成させた。各種仕様でのデータ計測を通じた最適部品の選定（ダイオード、センサー、スイッチ、コンデンサ、FET 制御用抵抗、ファン、ヒートシンク、制御装置起動用電源等）を行い、さらに、制御装置本体の絶縁試験・耐電圧試験を行ったうえで、ユニットを完成させた。なお、発熱対策の一として、熱をダミー負荷装置で消費させコイルや制御側スナバ抵抗の熱を抑止させる手法の検討を予定していたが、ステーター巻き線の変更を行ったため不要となった。

試験装置と回路図



- ・ 高効率、高出力発電機を用い、電動コンプレッサーを最高効率点で運転し、冷凍車の温度管理を十分できるシステムを構築すること
- ・ 開発装置を用い、自動車に必要な耐久、信頼性を確保すること
- ・ 冷凍車のアイドリングストップを実現し、ドライアイス、保冷材の不要な装置を実現すること

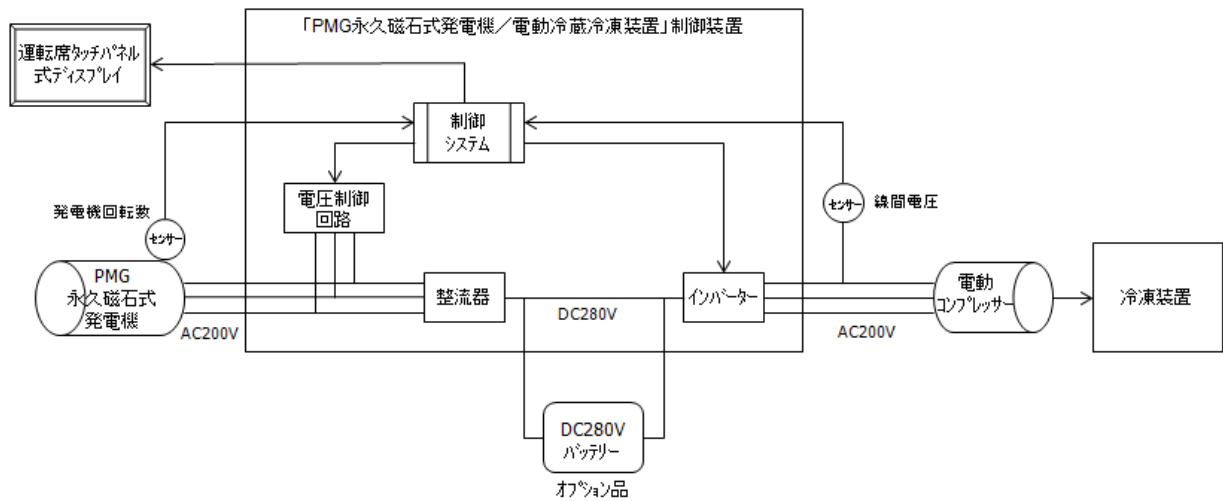
本研究開発における永久磁石式発電機の電圧一定制御において、制御装置は、発電機本体（発電機—出力用コイル—制御用コイル）に接続し機能する。すなわち、整流された電圧を計測し、電圧に応じPWMのデューティ比を変化させ、FET（Field effect transistor）にてスイッチングし整流側の電圧値を一定に保持するための装置である。装置内部には、マイコン基板、FET回路2系統、ヒートシンク&ファン、スナバ&抵抗回路2系統を搭載しており、コンパクトな装置ボックス（縦290mm、横180mm、高さ80mm）内に搭載している。主制御（電圧一定制御）以外に、温度測定、発電機回転数計測、電流計測等を行い装置全体の制御を行う。温度測定には、J型熱電対を使用し、FETヒートシンク等の温度測定し一定温度を超えると装置の停止を行い、回転数計測には反射型フォトカプラを使用し、発電機の回転数が適応外の場合装置全体の停止を行う。電流計測には、超小型精密計測用電流センサーを使用し電力計算を行うものである。

## 2-6 発電機および制御装置の改良

本研究開発において、永久磁石式発電機の電圧一定化回路として、当社は、発電機の「無負荷時に電圧が高く、発電電流が大きくなると電圧が減少し、やがて0ボルトに垂下する」という出力特性を利用し、異なる2つのタイプの巻き線を直列に接続し、「出力」と「制御」の役割をそれぞれの巻き線に分けて担わせることとした。すなわち、「出力」用巻き線は巻き線数が少なく電圧の垂下特性が緩やかなもの、「制御」用巻き線は巻き線数が多く電圧の垂下特性が大きなものである。これらの両巻き線を直列に接続し、FETで「制御」用巻き線に流れる微小電流量をコントロールすることにより、出力電流の発電電圧を一定化するという考え方である。出力用の高電圧電流を直接スイッチングするのではなく微小電流で大きな電圧垂下特性を有する制御巻き線側の電流量だけをコントロールするため、スイッチング素子を小型、安価なものとするのができると考えたものである。

事業期間の初年度に本制御回路の製品実用化に取り組んだが、当初計画のこの発電機回路では、高速運転時の高電圧電流の制御の際に発熱し、効率向上に限界があると考えられた。そこで、事業期間の第2年度より、制御回路を工夫し、より小型化、簡略化された発電機、回路を設計することとした。これにより、ターン数の少ない主巻き線をステーターに組み込むことができ、結果、発熱を大幅に抑えることに成功した。また、発電機の構造設計の見直しを行うことにより、永久磁石の量を当初設計より65%削減しコストダウンに成功した。ローターについては、当初設計では高速回転時にステーターとの接触による発熱・発火が生じていたが、高速回転に耐えうる形状への変更に成功した。さらに、ステーターのヨーク幅を厚くする設計変更を行い、磁漏を減ったことにより、主巻き線のターン数を少なくすることに成功した。

第2年度において改良開発した発電機および制御装置の回路構成図は次の通りである。



■ 製品仕様 (2種類) :

- ・ 発電機出力 3kw、コンプレッサー能力 2.2kw (1.5~2 トン冷凍車クラス)
- ・ 発電機出力 6kw、コンプレッサー能力 3.0kw (4 トン冷凍車クラス)

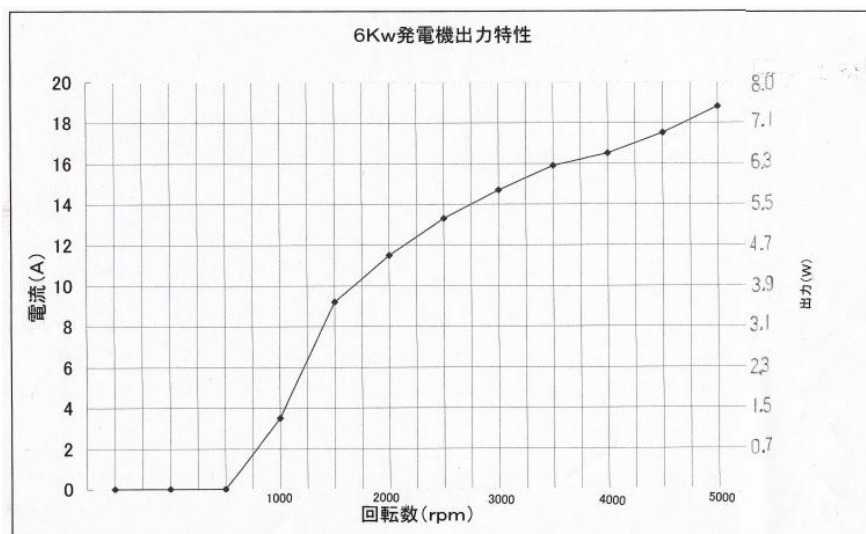
■ 運転席タッチパネル式ディスプレイ操作・表示項目 :

- ・ 操作項目 : 庫内温度
- ・ 表示項目 : 庫内温度、外気温度、霜取り温度、コンプレッサー回転数・圧力、発電機出力データ、冷凍車走行データ

■ 制御システムの機能

- ・ 永久磁石式発電機の発電電圧の一定制御
- ・ インバーターの周波数制御 : コンプレッサー負荷に応じて発電電流の周波数を制御することにより最大能力での運転を可能とする

改良した発電機の出力性能は次の図の通りである。エンジンアイドリング時 (600~800RPM、発電機回転数 1500~2000RPM) に 10A 以上の負荷電流を得ることができ、中型 4 トン車クラス以上の冷凍車で十分な冷凍性能を得ることができた。



## 2-7 車載評価用車両のスペック

本研究開発で、車載評価用に用いた冷凍車は次の通りである。

車 両： 三菱自動車製 FK71H 中型 4 トン車 冷凍車専用シャーシ

コンテナ： 東プレ製 FH4275 外寸： L5900 x W2320 x H2150

断熱 スチレンフォーム ALL 75m/m

積 載 量： 3250kg



PMG 永久磁石式発電機の搭載する冷凍車の冷蔵冷凍装置は次の 2 種類である。

| ユニット 型式   |            | 22L冷凍車             | 42L冷凍車              |
|-----------|------------|--------------------|---------------------|
| 庫内温度設定範囲  |            | -30℃ ~ +30℃        | -30℃ ~ +30℃         |
| 冷却能力      | 庫内温度<br>0℃ | 2790W(2400kcal/h)  | 5500W(4730kcal/h)   |
|           | -20℃       | 1920W(1650kcal/h)  | 3150W(2750kcal/h)   |
| 製品重量      |            | 90kg               | 135kg               |
| 運転時電圧/電流  |            | 24V/10A(AC200V/5A) | 24V/20A(AC200V/10A) |
| コンプレッサー   |            | C-9RHN173L3A(三洋)   | 2F15K4E-TF5(コフランド)  |
| コンデンサー    |            | CD20NZ             | CD46NZ              |
| エバポレーター   |            | KS2L               | KS4L                |
| 使用冷媒(封入量) |            | R404a [ 1.5kg ]    | R404a [ 2.3kg ]     |
| 霜取り方法     |            | 自動/手動              | 自動/手動               |

# 最終章 全体総括



以上の通り、本研究開発によって、極めて簡易な回路・システムによる永久磁石式発電機の電圧一定制御が実現した。この制御システム・装置を実用化することにより、電気式冷蔵冷凍装置では唯一、エンジンアイドリング時にコンプレッサーを最高周波数で稼働させることのできるシステム（高出力発電機）の開発に成功した。本研究開発では、永久磁石式発電機の電圧一定制御のみならず、電気式冷蔵冷凍装置の効率よい運転制御システムを構築した。これは、コンパクト、高効率、高出力の車両用永久磁石式発電機および制御装置を安価に量産できることに目処がついたため実現するものである。この装置を実用化することによって、エンジン直結式と比較した発電機式冷蔵冷凍装置の次のメリットを実現することができる。

- ✓ 電動コンプレッサー導入により低速運転時の最高効率点での運転が可能。
- ✓ 冷媒を運ぶ長いラバー配管が不要で、ガス漏れなどの故障が生じない。
- ✓ 故障率の極めて高い機械式コンプレッサーに代えて、電動コンプレッサーを振動の少ないコンテナに設置できる。
- ✓ 故障率が極めて低いため補助冷却剤（ドライアイス等）が不要。コスト削減、積荷重量の増加を実現。
- ✓ コンプレッサーの過負荷対策が不要であり、シンプルで故障率の低い冷媒回路を実現。
- ✓ コンプレッサー、エバポレーター、コンデンサーの電気制御による全体的な最適運転プログラムの構築を実現。


さらに、永久磁石式発電機の電圧一定化のみならず、冷蔵冷凍装置についても電気制御をするため、この全体制御システムから得られる車両・メンテナンス情報を活用した次のような付加情報サービスを実現することができた。

- ✓ 積荷品質管理（庫内温度・湿度をチェック）
- ✓ セキュリティ管理（GPS 位置測位機能を利用し、積荷管理）
- ✓ 車両運行状況管理（燃費、コンテナ開閉時刻・時間など）
- ✓ 冷凍装置のメンテナンス情報をモニタリング
- ✓ 緊急事態対応（位置情報の自動通報等）、地回情報指示、その他付加サービス

以上のとおり、本研究開発により、冷凍車、PTO 車両の装置電動化に必要となる高出力・高効率・低コスト永久磁石式発電機とその電圧一定制御装置の実用化に目処がついた。この装置を導入することにより、バックアップバッテリーを併用して冷凍車で初めての「アイドリング・ストップ」を実現するものである。

本製品の実用化開発を完了させ製品を市場に展開するため、引き続き、走行評価試験、ノイズ試験、モニター実走行試験、アイドリングストップ試験を実施する計画である。

以上

リサイクル適性 

この印刷物は、印刷用の紙へ  
リサイクルできます。

