

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630103

研究課題名(和文)スイッチドリラクタンス発電機の試作、試験

研究課題名(英文)Development of switched reluctance generator

研究代表者

千葉 明 (Chiba, Akira)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：30207287

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、従来、申請者らがハイブリッド自動車用モータについて適用した斬新な着想、工夫を発電機に適用し、発展を試みるものであった。ハイブリッド自動車に搭載されているレアアース永久磁石を用いた発電機を目標とした。この永久磁石発電機より小型で同等の高効率・高出力なSR発電機を設計、試作した。SR発電機は永久磁石を用いないため大型で低出力・低効率であるという従来の認識を覆した。特に、ハイブリッド自動車の運転パターンを解析し、連れ周りによる鉄損が発生しない利点があることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this research, an extension of a novel idea of designing a motor for hybrid electrical vehicles is applied to a generator with rare earth permanent magnets. The target is the permanent magnet generator used in hybrid electrical vehicles. A developed switched reluctance generator has small outer dimensions with respect to the permanent magnet generator.

It is found that the developed SR generator is compact in dimensions, in addition, efficiency and output power are competitive to the permanent magnet generator. Moreover, it is found that iron loss is caused by permanent magnets in the permanent magnet generator, but this loss can be avoided in SR generator, thus, there exist an advantage in SR generator.

研究分野：自動車工学

キーワード：発電機 スwitchドリラクタンス SR ハイブリッド自動車

## 1. 研究開始当初の背景

近年、レアアースの供給不安、価格の変動といったレアアース問題が発生している。二酸化炭素の排出量を削減する切り札と見込まれるハイブリッドなどの次世代自動車の生産に問題が発生しつつある。バッテリーも問題であるが、図1に示すモータ、発電機なども希土類磁石(レアアース:ネオジム、ディスプロジウム)を用いている。特に低燃費であるストロング HEV では発電機が必要で、モータと同様に小型かつ高効率・高出力が求められ、レアアース磁石が適用されている。

レアアース原材料の価格が急激に上昇し(2005年から2012年で価格が約10倍)、図2に示すように磁石が材料コストの8割以上を占める予測がある。そのため、脱レアアースモータの研究開発が国内を中心として進んでいる。そのなかでスイッチドリラクタンス(SR)モータは効率、寸法、トルクなどで優れた特性があることが明らかになりつつある。しかし、発電機としての検討は、国内では東北大学や長崎大学、国外ではマンチェスター大学や北京工科大学など数多く存在するが、ハイブリッド自動車用発電機の特性を満たすものは存在しない。

### 研究期間内に何をどこまで明らかにしようとするのか

研究期間内に、ハイブリッド自動車に搭載されている IPMSG より小型でありながら、同等の効率、出力密度、電流をレアアースなしで実現する SR 発電機の構成を明らかにする。

### 当該分野における本研究の学術的な特色・独創的な点及び予想される結果と意義

研究代表者らは、2008年から HEV 用の SR モータの研究を行っており、トルク、効率の面で永久磁石モータと同等以上の特性を持つ試作機を設計、製作することに成功している。研究代表者らの独創的な発想は(1)

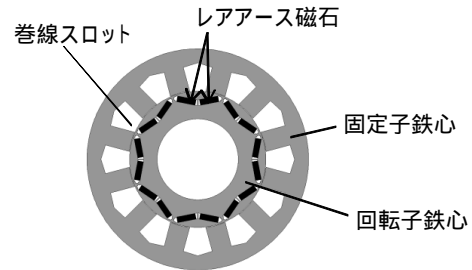


図1 永久磁石発電機の構成

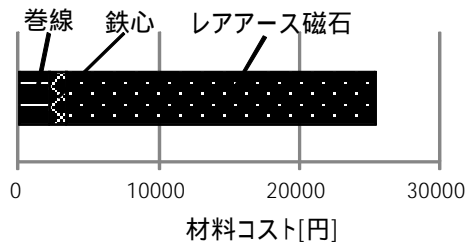


図2 永久磁石発電機の原価コスト推定

多極化によるトルク向上、(2)低鉄心材料による高効率化、(3)電流連続による運転速度の拡大、であり、その学術的成果は電動機関係で最も難関である IEEE- IAS の電動機委員会の2011年第一位論文賞を受賞した。SR 発電機は従来の半分以下の材料コストで生産することができ、産業界へのインパクトが高く、世界各国をリードする学術研究となることが予測される。

## 2. 研究の目的

近年、二酸化炭素の低減と有害ガスの低減、燃料の節減などの目的でハイブリッド自動車(HEV)の需要が高まってきている。最も燃費が優れた HEV にはモータに加えて**発電機**が設置されストロングハイブリッドを構成している。モータと同様に発電機においても**小型**かつ**高効率**・**高出力**が求められ、希土類(レアアース)を使用した永久磁石が用いられている。しかし近年のレアアース問題により、永久磁石の価格が上昇し、入手も困難になる恐れがある。

本研究はレアアースを全く使用しない、HEV 発電機と同一の寸法で、同等あるいはそれ以上の効率、出力を持つ**スイッチドリラクタンス (SR) 発電機**を設計、試作、確認をすることを目的としている。**小型・高効率・高出力の SR 発電機は国内外に他に例がなく、非常に挑戦的である。**

### 3. 研究の方法

本研究は、以下の3つの部分に分けて研究を遂行することを計画した。

(1) **目標とする IPMSG の寸法・重量・特性を満たす SR 発電機の設計・解析**(目標とする IPMSG の動作点を明らかにし、設計した SR 発電機の過渡応答解析を行う。そして最適な SR 発電機の極数、材料、寸法、電流制御を決定し、目標と同等以上の特性が得られることを示す。)

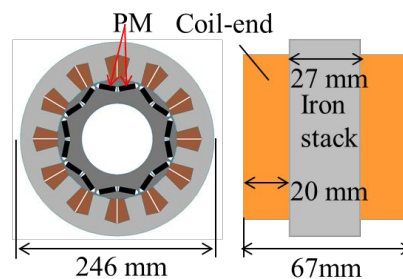
(2) **設計した SR 発電機の試作、実機考証**(設計した SR 発電機が実際に目標とする IPMSG 特性を満たすかを検証、漏れ磁束や鉄損が解析結果とどのように異なるかを考察する。)

(3) **HEV に設計 SR 発電機を搭載する際における、新たな課題の解決**(設計 SR 発電機のポイントを特定し目標 IPMSG とより多くの動作点で特性が同等以上となるような発電機の構成を提案する。)

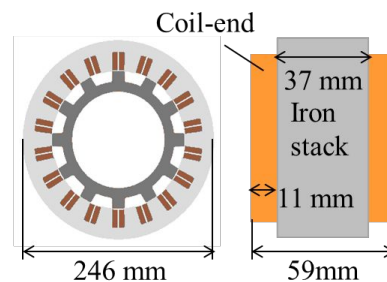
### 4. 研究成果

図3 (a)は目標とするハイブリッド自動車に搭載されているレアアースを使用した永久磁石型発電機の断面と外寸を示している。固定子の外径は264mmであり、コイルエンドを含んだ軸長は67mmである。

一方、図3 (b)は本研究で設計を行ったスイッチドリラクタンス形発電機である。固定子外径は永久磁石機と等しく246mmであり、軸長は59mmと12%の小形化を実現している。従来、永久磁石機と同等を実現することすら困難と言われていたが、レアアース磁石を全く使用しないで、永久磁石機より小形化したことは、報告者らが知る限り、これまでなかった。回転速度を上げることにより小型化する例はあったが、システム全体の構成を変えてしまう問題があった。等しい回転速度での運転を行う目的で、レアアースを使用した永久磁石機より小形化できることを示したの



(a)目標とする永久磁石発電機



(b)設計した SR 発電機

図3 ハイブリッド車用永久磁石発電機と設計試作した SR 発電機

表1 比較

|                               | SRG                    | IPMSG                 |
|-------------------------------|------------------------|-----------------------|
| 最高回転数                         | 10000 r/min            | 10000 r/min           |
| 最大出力                          | 42 kW                  | 42 kW                 |
| 体積                            | 2.8 L                  | 3.2 L                 |
| 重量                            | 9.6 kg                 | 9.6 kg                |
| 10000 r/min, 42 kW時の特性(2DFEM) |                        |                       |
| 電流実効値                         | 53.8 Arms              | 54.2 Arms             |
| 電流密度                          | 10.6 A/mm <sup>2</sup> | 8.2 A/mm <sup>2</sup> |
| 発電効率                          | 97.9%                  | 97.9%                 |
| 出力密度                          | 15.0 kW/L              | 13.2 kW/L             |

は本研究の大きな成果である。

表1はこの2つの発電機の詳細を比較している。この発電機は加速時に使用され、1万 r/min程度で最大出力42kWを出力する。体積はスイッチドリラクタンス機が小型化しているものの、重量はほぼ等しい9.6kgである。この重量は固定子鉄心、巻線、回転子鉄心と永久磁石からなる。42kW出力時の電流実効値はほぼ54Aと等しく、計算された効率もほぼ同等である。

図4は2つの発電機の効率を比較している。1万 r/minでは2つの発電機の効率はほぼ同等であったが、回転速度が低くなると永久磁

石発電機（IPMSG）の効率が低いことをわかる。この原因は、スイッチドリラクタンス発電機を極度に小型化したために効率が犠牲になったためである。しかし、このように低速運転時の効率が低下しても、ハイブリッド自動車として使用した際には、永久磁石がないため、永久磁石モータとほぼ同等の運転効率になる。

図5はUS06というテストパターンで走行した際の車速と発電機の回転速度をプロットしている。この発電機の回転速度は、車速とエンジン速度から決定する。米国においては、オークリッジ国立研究所が基本的なデータを取りその動作を明らかにしている。残念ながら、我が国の走行パターンの試験結果はなく、米国の走行モードとなっている。

図から車が加速するタイミング、すなわち、運転手がアクセルを踏み込んだときに発電機の回転速度が上がっていることがわかる。また、一定速度で運転しているときは、ある程度の速度で逆回転してアイドリングしている。この際、永久磁石による回転磁界が発生しており、鉄損を発生する。スイッチドリラクタンス機であれば、永久磁石がないため、アイドリング回転するときは、ベアリング損失だけの小さいエネルギー損失ですむ。

表2はUS06モードで運転したときの運転効率を計算した結果である。永久磁石機はIPMSGであり、スイッチドリラクタンス発電機はSRGである。永久磁石機は回転主軸が空転しているときの空転時鉄損が大きい。一方、運転時の損失は少ない。これらを加算した総損失は2つの発電機でほぼ等しい値で有る。

### 新しい原理の発展や斬新な着想と波及効果

本研究は、従来、研究代表者らがハイブリッド自動車用モータについて適用した斬新な着想、工夫を発電機に適用し、発展を試みるものであった。ハイブリッド自動車に搭載されているレアアース永久磁石を用いた発電機を目標とした。この永久磁石発電機より小型で同等の高効率・高出力なSR発電機を設計、試作した。SR発電機は永久磁石を用いないため大型で低出力・低効率であるという従来の認識を覆した。特に、ハイブリッド自動車の運転パターンを解析し、連れ周りによる鉄損が発生しない利点があることを明らかにした。

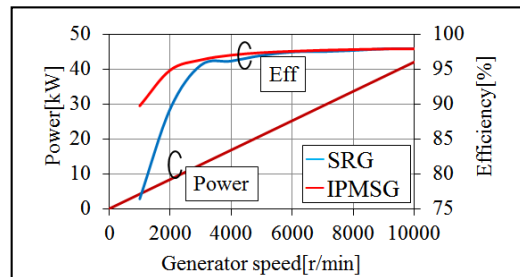
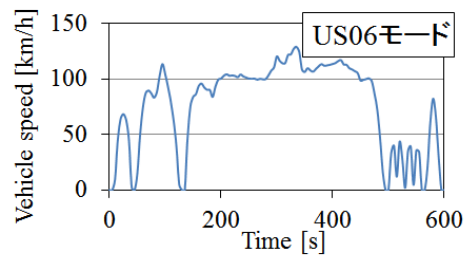
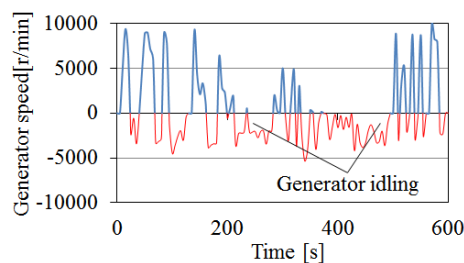


図4 効率比較



(a)車速



(b)発電機速度

図5 発電機の動作回速度

表2 運転効率

|       | US06モード |         |
|-------|---------|---------|
|       | SRG     | IPMSG   |
| 総発電量  | 1021 Wh | 1050 Wh |
| 運転時損失 | 34.2 Wh | 29.3 Wh |
| 空転時鉄損 | 0 kJ    | 5.3 Wh  |
| 総損失   | 34.2 Wh | 34.7 Wh |
| 発電総効率 | 96.8%   | 96.8%   |

本研究が成功した脱レアアース発電機は研究代表者らが知る限り世界初の快挙である。従来のIPMSGと比べて**半分以上の材料コスト**で生産することができるため、次世代自動車産業への波及効果も大きい。また自動車以外の用途の適用も可能であり、学術的にインパクトがあるだけでなく、広く産業界へ貢献できる。

また、本研究の成果として、本分野で最も

難関といわれる IEEE Transactions on Industry Applications に論文が一件掲載になった。本研究の成果が世界的のトップレベルにある。また、国内会議等でも適宜、進捗、結果の報告を行っている。以下の項目はその報告のリストである。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3 件)

Katsuhiko Urase, Noboru Yabu, Kyohei Kiyota, Hiroya Sugimoto, Akira Chiba, Masatsugu Takemoto, Satoshi Ogasawara, Nobukazu Hoshi, "Energy Efficiency of SR and IPM Generators for Hybrid Electric Vehicle", IEEE Transactions on Industry Applications, 掲載決定 2015 査読有り DOI: 10.1109/TIA.2014.2387478

Katsuhiko Urase, Kyohei Kiyota, Hiroya Sugimoto, and Akira Chiba, "Energy Efficiency Comparison of SR and IPM Generators for Hybrid Electric Vehicle", IEEE Energy Conversion Conference and Exposition (ECCE), pp.5085-5091. 2014 査読なし 10.1109/ECCE.2013.6647387

Kyohei Kiyota, Katsuhiko Urase, Takeo Kakishima, and Akira Chiba, "Motor and Generator Developments of Switched Reluctance Machines Competitive to IPM Machines in Third Generation Hybrid Electric Vehicle", JSAE EVTeC, pp.1-6 May 2014 査読なし <http://evtec.jp/>

[学会発表](計 3 件)

藪登, 浦瀬克彦, 千葉明 「IPM 発電機の無負荷試験による鉄損の測定と SR 発電機の風損推定」平成 26 年電気学会全国大会 5-015 pp.25-26 2014 年 3 月 20 日 愛媛大学城北キャンパス(愛媛県松山市)

浦瀬克彦, 清田恭平, 杉元紘也, 千葉明 「ハイブリッド自動車用 SRG のモード走行でのエネルギー比較」平成 25 年電気学会産業応用

部門大会 Y-92, 2013 年 8 月 28 日 山口大学 吉田キャンパス(山口県山口市)

千葉明, 清田恭平、浦瀬克彦、柿島岳夫 「自動車用スイッチドリラクタンスモータの試験結果と考察、関連技術の動向」日本能率協会 モータ技術シンポジウム 2013 年 7 月 19 日 東京ビックサイト(東京都)

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

千葉 明(東京工業大学・大学院理工学研究科・教授)

研究者番号: 30207287

(2)研究分担者

杉元 紘也(東京工業大学・大学院理工学研究科・助教)

研究者番号: 60613552