

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 14 日現在

機関番号：13201

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13742

研究課題名(和文) 同一のモータで種別の切替えが可能な自動車駆動用高効率リラクタンスモータの開発

研究課題名(英文) Development of a High Efficiency Reluctance Motor Capable of Changing Motor Type for Automotive Traction Applications

研究代表者

清田 恭平(Kiyota, Kyohei)

富山大学・学術研究部工学系・助教

研究者番号：10796519

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：低コストであるスイッチリラクタンスモータが自動車駆動用モータとして注目されているが、鉄損が主損失である低出力領域の効率特性に課題がある。モータの効率特性の改善方法として、巻線を切り替えることによるモータ極数変換が知られているが、リラクタンスモータでは物理的に極数を変更することができないため、研究がおこなわれてこなかった。

本研究では、巻線を切り替えることで、極数ではなくモータの種類そのもの、すなわちもう一つのリラクタンスモータであるシンクロナスリラクタンスモータに変更することにより、主に低出力時の効率を改善し、より高出力かつ高効率な自動車駆動用リラクタンスモータの実現を目指した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年排ガス規制等により急速に電気自動車への注目が高まり、その駆動源であるモータの低コスト・高効率化が急務である。そのため、低コストであるリラクタンスモータが自動車駆動用モータとして注目されている。このような状況下において、リラクタンスモータにおいて巻線を切り替えることによる特性の変更は世界で初めての事象であり、これによりリラクタンスモータのより高効率化が期待される。効率が改善されることにより、低コストモータであるリラクタンスモータの普及が促進され、電気自動車の低コスト化へとつながると期待される。さらに、他の電動機の変速駆動を行う用途への拡大も期待される。

研究成果の概要(英文)：Reluctance machines are widely attracting attention for the propulsion system of electrical vehicles. However, reluctance machines have major disadvantages such as low efficiency. One of the solution to achieve both the high efficiency and high torque density is changing the motor specification according to the operation point. In reluctance machines, on the other hand, a number of poles are defined by the mechanical structure of the rotor. This research proposed a novel reluctance motor which can switch the motor mode between a switched reluctance motor and a synchronous reluctance motor to enhance the high efficiency region. It is found that the synchronous reluctance motor mode can enhance the efficiency in low power region. This enhancement of the high efficiency region is suitable for electric vehicle application.

研究分野：電気機器学

キーワード：リラクタンスモータ 高効率化 特性切替 スイッチリラクタンスモータ シンクロナスリラクタンスモータ

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

二酸化炭素の排出量を削減する切り札として、電気自動車などの次世代自動車の開発が進められている。電気自動車の実用化の際に問題となる航続距離に関しては、蓄電池の高性能化だけではなく、駆動用モータの高効率化も重要な要素である。現在の電気自動車やハイブリッド自動車では高効率化のために希土類磁石（レアアース：ネオジム、ディスプロジウム）を使用した永久磁石モータが適用されている。しかし、レアアースの供給不安、価格上昇といったレアアース問題が発生することが度々あり、電気自動車の普及のためにはレアアースの使用量削減は喫緊の課題である。

以上のような背景から、脱レアアースモータの研究開発が国内外で進んでいる。その中でもスイッチトリラクタンスモータは、レアアースを全く使用しないため、有力な脱レアアースモータの候補となっている。しかし、スイッチトリラクタンスモータは永久磁石モータに対して出力密度が小さく、低効率であることが課題であった。申請者はこれまで、主に構造面を工夫することにより、永久磁石モータと同等以上のトルク密度・出力密度、およびほぼ同等の最高効率を持つ試作機を設計、製作することに成功している。しかし、実際に自動車駆動用として適用させた場合には、効率面で未だに課題を抱えている。これはスイッチトリラクタンスモータでは、固定子だけではなく回転子にも鉄損が発生するためである。これはスイッチトリラクタンスモータ特有の現象であり、回転子鉄損を低減可能であれば、スイッチトリラクタンスモータの効率向上につながる。

一方、一般的にモータの高効率化の手法として、固定子巻線の接続を切り替えることによりモータ特性を変化させ、結果的に高効率領域の拡大を図る研究が国内外で進められている。この手法は誘導モータや永久磁石モータで実施した例がほとんどであり、スイッチトリラクタンスモータにおける例は報告されていない。これは回転子の極数が鉄心形状により決定されてしまうためである。このため、リラクタンスモータにおいては巻線の接続を切り替えるだけでは特性変更が困難であると考えられてきた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、モータの鉄心構造を変えずに、固定子の巻線を切り替えることのみにより「モータの種類そのもの」を変化させ、リラクタンスモータの効率領域を拡大可能であることを明らかにすることである。ところで、リラクタンスモータの一種として、シンクロナスリラクタンスモータがある。シンクロナスリラクタンスモータは回転子の突極に同期して回転磁束を固定子巻線にて発生させる。よって、原理的に回転子鉄損が発生しない。回転子形状はスイッチトリラクタンスモータと同様である。よって、巻線を切り替えることによって、スイッチトリラクタンスモータをシンクロナスリラクタンスモータとして駆動することは可能である。これによりスイッチトリラクタンスモータ特有の回転子鉄損の低減を図る。

3. 研究の方法

図1に巻線切替えによるモータ種別変更の原理を示す。スイッチトリラクタンスモータの状態（SRM mode）では、巻線の極性が「N極・S極・N極・S極・N極・S極」となるように設定されている。シンクロナスリラクタンスモータの状態（SynRM mode）では、すべての巻線の極性を一方向に揃うように図4破線部の巻線の極性を切り替える。この状態で巻線に三相交流電圧を印加すると、固定子の極数と同じ4極の回転磁界が発生する。これにより、回転子に発生する鉄損を抑制可能である。以後、このモータをデュアルモードリラクタンスモータ（DRM: Dual-mode Reluctance Motor）と呼称する。

図2に提案するDRMの巻線配置を示す。固定子巻線の極性は全て同一方向に統一されている。A相、B相、C相はそれぞれ2種類の巻線（ A_N 相と A_S 相、 B_N 相と B_S 相、 C_N 相と C_S 相）で構成されている。この2種類の巻線の名称は、SRM modeで駆動する時のそれぞれの巻線の極性を示す。このため、6つの電機子巻線は A_N 、 B_S 、 C_N 、 A_S 、 B_N 、 C_S の順に、それぞれ隣り合う極で極性が交互となるように配置されている。

図3(a)に動作モード切り替えに対応するDRM用インバータの構成を示す。先述した6つの電機子巻線はそれぞれ、電源が共通のHブリッジインバータに接続されている。

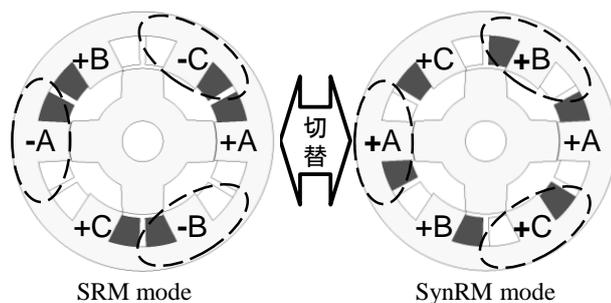


図1 巻線の切替えによるモータ種別の変更原理

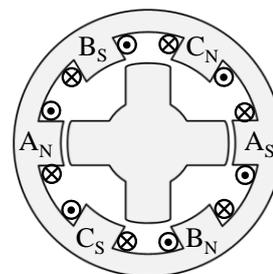


図2 提案 DRM の巻線配置

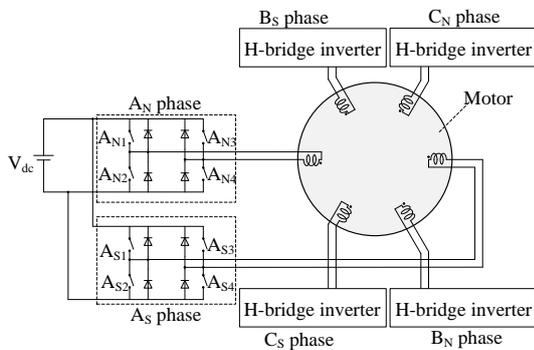
図 3(b) に SRM mode 時の使用スイッチング素子を示す. SRM mode では, Hブリッジインバータのうち A_N 相のスイッチ A_{N1} と A_{N4} , A_S 相のスイッチ A_{S2} と A_{S3} は使用されず, 非対称ハーフブリッジインバータとして駆動する. スイッチ A_{N2} と A_{S4} , A_{N3} と A_{S1} をそれぞれ同期的にスイッチングすることで, A_N 巻線と A_S 巻線はそれぞれ N 極性と S 極性を有する同相の巻線となる. B 相, C 相も同様に制御することにより, 巻線配置は一般的な三相 SRM mode の配置と同一となる.

図 3(c) に SynRM mode 時の使用スイッチング素子, 通電時の固定子コイルの極性を示す. SynRM mode では, A_{N1} , A_{N2} , A_{S1} , A_{S2} と, A_{N3} , A_{N4} , A_{S3} , A_{S4} でそれぞれ同期してスイッチングする. このとき, A_N 巻線と A_S 巻線は N 極性を有する同相の巻線とみなすことができる. B 相, C 相も同様に制御することにより, 巻線配置はオープン巻線構造かつ集中巻線構造の三相 SynRM mode の配置と同一となる.

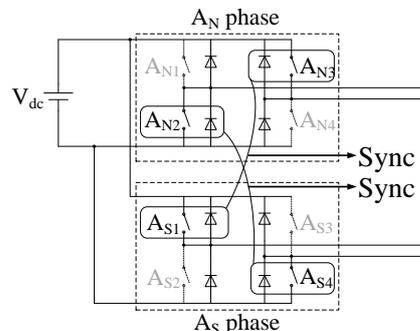
以上のように, 予め全ての巻線の極性を統一し, 各相を 2 分割し個別に電流の通電方向を制御することによって, 任意のタイミングで SRM mode と SynRM mode の切り替えを行うことが可能である.

図 4(a) に SRM mode の磁束変化を示す. 励磁相を黒枠で, 回転子内の磁束経路を矢印で示す. 図中に示すように, ある相のみを励磁させると励磁相同士を貫くように磁束が生じ, 他相に流入することはない. これらは, 正方向に流れる矩形波電流で励磁されるため, 通電時の極性は常に一方向となる. 一方で, 回転子内の磁束の方向に着目すると, 固定子の極に対向する度に回転子内の磁束の流れが大きく変化している. 図中に示した黒点に着目する. 始めの A 相励磁時には回転子歯部から固定子歯部への磁束の流れが発生する. しかし, 次の B 相励磁時は黒点部に磁束が全く通らない. さらに, 次の C 相励磁時には, A 相励磁時とは逆に固定子歯部から回転子歯部へ磁束の流れが発生する. SRM の回転子部では, このような磁束の変化が常に発生するため, 他の同期モータと比べて回転子部にて発生する鉄損は増大する.

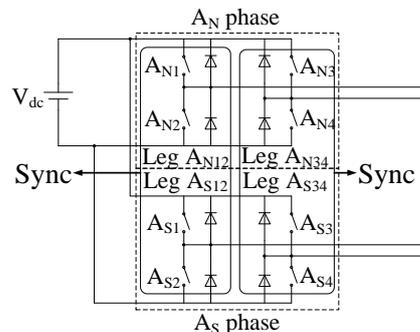
図 4(b) に SynRM mode の磁束分布を示す. 励磁相を黒枠で, 回転子内の磁束経路を矢印で示す. SRM mode と異なり, SynRM mode では固定子コイルの隣り合う極性は全て統一されているため, ある相のみ励磁させると図中に示すように隣り合う相に抜けるように磁束経路が形成される. このとき他相には励磁相とは逆の磁束が流れるため, それに合わせて逆方向に電流を流すことにより, 磁束量を増加させる. これを回転子位置に合わせて電流値を変化させることにより, 結果的に固定子側で 4 極の回転磁界を生成し続けることになる. 図中に示すように回転子内の磁束分布が一様に保たれたまま回転しているため, 回転子突極部に生じる磁極が常に一定となる. また, 回転子突極部はこの回転磁界の磁極に合わせて回転することになる.



(a) 巻線切替えに対応する DRM 用インバータ回路

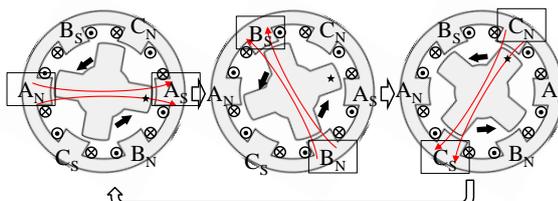


(b) SRM mode 時の DRM 用インバータの動作.

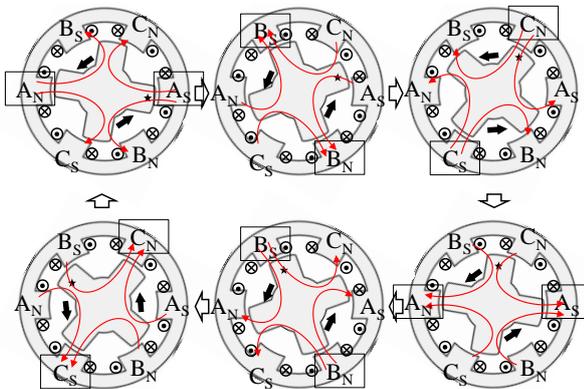


(c) SynRM mode 時の DRM 用インバータの動作.

図 3 DRM 用インバータおよびその動作



(a) SRM mode 時の磁束イメージ.



(b) SynRM mode 時の磁束イメージ.

図 4 各動作モード時の磁束変化のイメージ

4. 研究成果

図4に解析対象のDRM（以下、設計DRM）の概形及び巻線配置を、表1に設計DRMの諸元を、それぞれ示す。設計DRMは先行研究にて設計された自動車駆動用SRM（以下、先行研究SRM）をベースとしている。ただし、鉄心材料を一般的な電磁鋼板である35A300に変更している。また、回転子歯幅部の寸法を14.5 degとしており、その他の寸法は先行研究SRMモデルと同一である。図2で示したDRM巻線配置を基に、本モデルの巻線配置もDRM用インバータによる駆動に対応させている。すなわち、先行研究SRMに存在する各相の電機子巻線をN極の巻線グループとS極のグループに分割して、それぞれインバータに接続される。このとき、一相あたりの電機子巻線は実質的に2並列3直列で接続される形となる。一方で、先行研究SRMでは電機子巻線が1並列6直列で接続されていた。このため、設計DRMでは各極の電機子巻線の直列数を倍の40回巻に増加させ、SRM modeにおける実質的なインダクタンスを先行研究SRMとほぼ同等とし、同一励磁条件下におけるモータ鉄心の磁束密度がほぼ同じ値となるように変更している。

図6に回転数13,900 r/min、出力トルクが6.5Nm付近の時の、SRM modeとSynRM modeの電流波形を示す。実線は A_N 相、 B_N 相、 C_N 相を、破線は A_S 相、 B_S 相、 C_S 相を、それぞれ示す。

図6(a)にSRM modeにおける電流波形を示す。このときの励磁開始角は11度、励磁終了角は20度である。SRM modeではそれぞれ一方方向のみに通電している。また、 A_S 相、 B_S 相、 C_S 相の各電流波形は、 A_N 相、 B_N 相、 C_N 相をそれぞれ完全に反転した電流が流れている。巻線はすべて同一の極性を有しているため、 A_N 相、 B_N 相、 C_N 相と A_S 相、 B_S 相、 C_S 相ではそれぞれ極性が反転していることがわかる。

図6(b)にSynRM modeにおける電流波形を示す。このときの励磁開始角は12度、励磁終了角は20度である。SynRM modeではSRM modeと異なり、双方向に通電されている。このとき、 A_S 相、 B_S 相、 C_S 相の各電流波形は、それぞれ同期的にスイッチングされている関係で、完全に A_N 相、 B_N 相、 C_N 相と重なっている。なお、SynRM modeにおいて、電流最大値がSRM modeより5 A増加している。また、SynRM modeでは大きな3次高調波が電流に発生している。このためSynRM modeにおいて、鉄損低減効果が理想的な電流波形の時より減少している可能性がある。

図7に設計DRMにおける両動作モードの各損失の増加傾向を示す。SynRM modeの銅損はSRM modeの銅損に対し常に増加する傾向である。このため、銅損の支配領域である高出力領域においてはSynRM modeはSRM modeより損失が増加することを示している。一方で、SynRM modeの鉄損はSRM modeの鉄損に対し常に減少する傾向である。こ

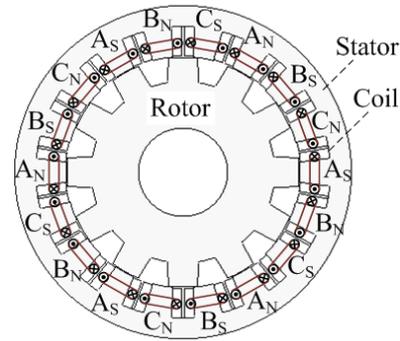
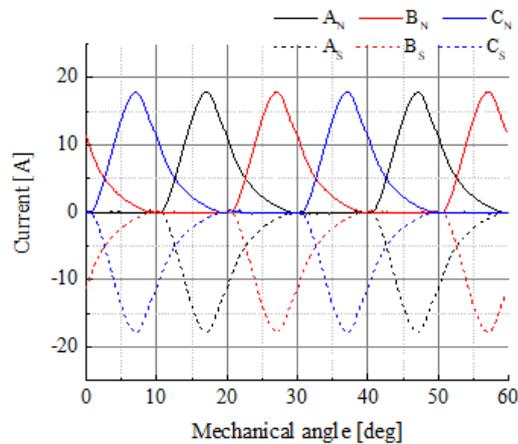


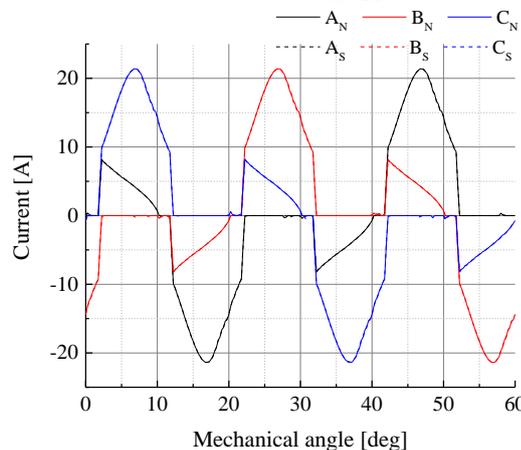
図5 設計DRMの概形。

表1 設計DRMの諸元

| Parameter | Value | Unit |
|-----------------------------|--------|-------------------|
| Outer stator diameter | 264 | mm |
| Axial length | 108 | mm |
| Air gap length | 0.5 | mm |
| Iron stack length | 87 | mm |
| Iron steel thickness | 0.35 | mm |
| Number of turns | 40 | turn |
| Maximum rotational speed | 13,900 | r/min |
| DC side voltage | 650 | V |
| Maximum rms current density | 24.1 | A/mm ² |
| Target maximum torque | > 207 | Nm |
| Target maximum power | > 60 | kW |



(a) SRM mode 時の電流波形。



(b) SynRM mode 時の電流波形。

図6 13,900 r/min、6 Nm 出力時の電流波形。

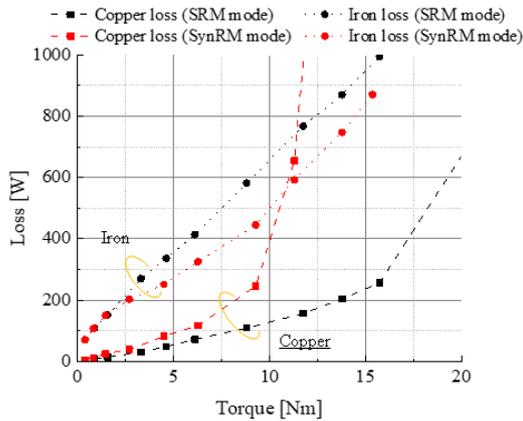


図7 13,900 r/minにおける銅損と鉄損

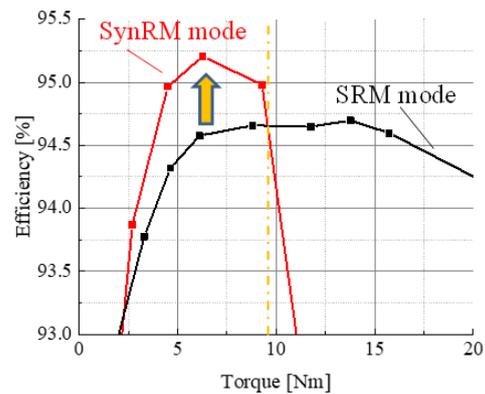


図8 13,900 r/minにおける効率

のため、鉄損の支配領域である低出力領域において、SynRM modeはSRM modeより損失が減少することを示している。なお、10 Nm 付近にて、SynRM modeの銅損が急激に上昇している。これは高速領域において逆起電力が増加することにより電流の立ち上がり方が鈍化するため、励磁幅を広げ通電時間を長くすることにより電流指令値に到達するようにしたためである。

図8に設計DRMにおける両動作モードの効率特性を示す。図に示すように、9 Nm付近を境に低負荷側においてはSynRM modeの効率が上回る。特に6 Nmでは、効率が最大0.64%程度向上する。一方で、高負荷側においてはSynRM modeの効率はSRM modeの効率を下回る。これは図7に示す出力増加時の各損失の量に関係している

実機試験では、実験設備の都合により出力を抑えた小型モデル（以下、実機DRM）により実施する。表2に、設計DRMと実機DRMの各パラメータの変化を示す。設計DRMでは、積厚が87 mmで出力が60 kWであるため、実機DRMでは積厚が1/3の29 mmのときに出力が1/3の20 kWとなる様に、それぞれ巻数を設定する。これにより、インダクタンスは3/4に、電流量は2/3に、鎖交磁束は1/2に、それぞれ変化する。一方で起磁力、磁束密度について、それぞれ一定条件下で出力を変更するため同一の値となる。そのため磁束密度によって決まる鉄損の値も、積厚やモータ出力に対して線形に変化する。なお、銅損に関してはコイルエンド分の銅線量は積厚に関係なく固定子のスロット形状により決定するため、積厚が小さくなるほど相対的に銅損が増加することになる。よって、試作DRMモデルの出力の変更に対して、出力トルク、及び各損失の換算が可能であることが明らかである。

図9に試作DRMを示す。固定子外径は264 mm、積厚は29 mmである。負荷試験時、モータ出力軸を負荷側発電機と接続させる。表3に回転子の対向時、非対向時のインダクタンス測定結果を示す。SynRM modeのインダクタンスは、SRM modeのインダクタンスに比べ対向時で3.65 mH低下している。これはSRM modeに対するSynRM modeの突極比の低さに起因するものであり、対向時の状態でその差が最も顕著となる。また、実測値と解析値との誤差について、SRM modeの対向時で7%、非対向時で20%、SynRM modeの対向時で25%、非対向時で25%、それぞれインダクタンスが増加している。先に述べたように測定時の磁束漏れ等が原因でインダクタンスが増加したと考えられる。

本研究では、静止特性まで明らかにした。今後、実負荷試験による検証が必要である。

表2 設計DRMと試作したDRM

| | Designed DRM | Fabricated DRM |
|-----------------------|--------------|----------------|
| Stator outer diameter | 264 mm | |
| Coil-end length | 10.5 mm | |
| Iron core material | 35A300 | |
| Iron stack length | 87 mm | 29 mm |
| Number of turns | 40 turns | 60 turns |
| Resistance | 71.1 mΩ | 86.9 mΩ |
| DC voltage | 650 V | 325 V |
| Output power | 60 kW | 20 kW |

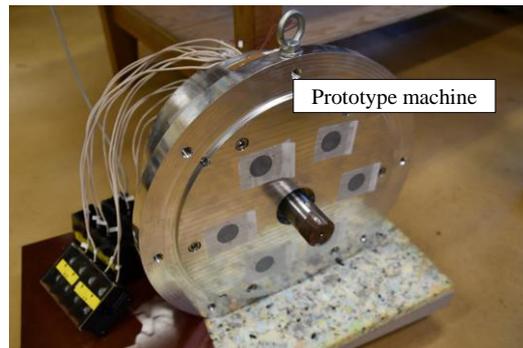


図9 試作したDRM.

表3 試作したDRMのインダクタンス比較

| | | measured | 3D-FEM |
|------------|------------------------|----------|---------|
| SRM mode | Inductance (aligned) | 7.21 mH | 6.76 mH |
| | Inductance (unaligned) | 1.30 mH | 1.08 mH |
| SynRM mode | Inductance (aligned) | 3.56 mH | 2.84 mH |
| | Inductance (unaligned) | 1.26 mH | 1.01 mH |

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Kyohei Kiyota, Kosuke Ichianagi, Kenji Amei, Takahisa Ohji | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 Principle of a Novel Dual-mode Reluctance Motor for Electric Vehicle Applications | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of International Electric Machines & Drives Conference | 6. 最初と最後の頁 2120-2125 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/IEEMDC.2019.8785207 | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 一柳孝輔, 清田恭平, 飴井賢治, 大路貴久 | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 電動機特性切り替え可能なリラクタンスモータの基礎的検討 | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 平成30年度電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集 | 6. 最初と最後の頁 A3-22 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 一柳孝輔, 清田恭平, 飴井賢治, 大路貴久 | 4. 巻 5-065 |
| 2. 論文標題 デュアルモードリラクタンスモータの巻線切り替え時の過渡解析 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 平成31年電気学会全国大会講演論文集 | 6. 最初と最後の頁 109-110 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kyohei Kiyota |
| 2. 発表標題 Principle of a Novel Dual-mode Reluctance Motor for Electric Vehicle Applications |
| 3. 学会等名 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEEMDC) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 一柳孝輔, 清田恭平, 飴井賢治, 大路貴久 |
| 2. 発表標題 電動機特性切り替え可能なリラクタンスマータの基礎的検討 |
| 3. 学会等名 平成30年度電気関係学会北陸支部連合大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 一柳孝輔, 清田恭平, 飴井賢治, 大路貴久 |
| 2. 発表標題 デュアルモードリラクタンスマータの巻線切り替え時の過渡解析 |
| 3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

| | | |
|---|--------------|---------------|
| 産業財産権の名称 三相リラクタンスマータの制御方法及び三相リラクタンスマータ制御装置 | 発明者 清田恭平 | 権利者 同左 |
| 産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-130193 | 出願年 2019年 | 国内・外国の別 国内 |

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | | |
|---------------------------|-----------------------|----|
| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|