

令和 3 年 6 月 28 日現在

機関番号：33924

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04112

研究課題名(和文) モータ駆動システムにおけるインバータ励磁時のコア損特性の解明

研究課題名(英文) Core Loss Property Analysis in Inverter Excitation of Motor Drive System

研究代表者

藤崎 敬介 (Fujisaki, Keisuke)

豊田工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80373869

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：モータコア損のビルディングファクタの研究として、リングによる正弦波励磁、インバータ励磁、モータの正弦波励磁、インバータ励磁のコア損を計測した。元来モータコアとして使用される電磁鋼板は、JIS, IECにより正弦波励磁での鉄損計測であった。しかしモータコアとして使用される場合にはPWMインバータ励磁となる。このため、モータ形状によるコア損増加要因と、インバータ励磁によるコア損増加要因とは異なるものといえる。その結果、インバータ励磁による鉄損増加は4%であったが、モータ形状によるコア損増加は17%であった。つまりモータコア損低減のためには、モータコア形状の研究が重要といえる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでのモータコア損計測評価は、実使用条件のインバータ励磁下でのコア損計測を中心に行われていたが、これにより両者の分離が明確になり、モータの研究、設計の指針といえる。モータコア形状だけでなく、インバータ励磁方法に対しても総合的に議論できるようになった。

研究成果の概要(英文)：To research on a building factor of motor core loss, an iron loss of ring core in sinusoidal excitation and inverter excitation as well as a motor core loss in sinusoidal excitation and inverter excitation are measured. An electrical steel used in the motor core is usually evaluated by sinusoidal excitation due to the rule of JIS and IEC. However, the electrical motor is usually used in the inverter excitation. Therefore, the core loss increase of motor design and the one of the inverter excitation should be considered to be a different issue. The measured iron loss data show that the core loss increase of inverter excitation is only 4%, but the one of the motor design is 17%. So the motor shape research is said to be more important than the inverter excitation research. The guideline for the motor core loss reduction is clearly shown by this research.

研究分野：工学

キーワード：モータコア損 鉄損 インバータ励磁 キャリア周波数 ビルディングファクタ 正弦波励磁

1. 研究開始当初の背景

モータやパワーエレクトロニクスといった電力変換技術は、電気工学の主要技術課題として省エネ・環境負荷低減の要請のもと損失現象および高効率低損失化の解明が学術的にもこれまで数多く研究がなされた。モータやパワーエレクトロニクス技術が個別で使用されているときはそれでも十分であったといえる。

しかし、パワーエレクトロニクス励磁によるモータ駆動システムが、電気自動車をはじめ機関車、船、飛行機といった移動手段全般に応用されるようになると、機上置きであるがために従来以上のモータ駆動システムの小型高効率が要求されるようになった。そのためその損失現象および高効率低損失は、モータおよびパワーエレクトロニクスそれぞれ個別で議論するのではなく、両者の相互作用を踏まえて総合的に研究すべき課題となったものといえる。

モータの損失は、現象論的に機械損、銅損、鉄損に大きく分けることができるが、インバータをはじめとしたパワーエレクトロニクスで駆動する場合には、機械損への影響は原則として少なく、銅損のほうは電磁氣的に線形な特性でもあり解明がよく進んでいる。しかし、パワーエレクトロニクス励磁時の鉄損特性つまり磁気特性現象は、磁性材料の非線形性、磁気異方性、ヒステリシス性、結晶の粒・形状や方位分布といった複雑な現象を包含しているために、解明するためには正弦波励磁や材料特性といった基礎現象に遡って行う必要があり、十分に研究が行われているとは言い難い状況にある。

つまり、「インバータ励磁時のモータ損失」において十分に解明されていないのは、磁気特性をベースとした特性解明であり、以下の問いかけに対し解明する必要があるものといえる。

2. 研究の目的

上記の今回の問いに対しては、インバータ励磁時のコア損特性だけを解明するだけでは十分ではなく、コア損失の要因が材料起因なのか、モータ形状・設計によるものなのか、またはインバータ励磁・制御によるものなのか、その要因分析を行う必要がある。要因分析が進めば、モータコア損を低減するためには材料を変える必要があるのか、モータ設計に注力すべきか、それともインバータ励磁・制御方法を検討すべきなのか、方向性を定めることができる。そのために、材料特性とモータ特性および正弦波励磁とインバータ励磁といった切り口でステップを踏んだ学術的な特性解明が重要であるといえる。

そこでまず、表1のごとく励磁対象と励磁方法とに対し①～④の4つの事象を考える。これまで、①、③、④は既に研究されているといえるが、②はまだ十分に研究されていない。そこで本提案では②について研究を行うことにする。

表1. インバータ励磁におけるモータコア損解明のための本研究の位置付け

励磁方法 \ 励磁対象	磁性材料	電気モータ
正弦波励磁	①正弦波励磁時の材料特性 (JIS,IECで規格化)	②正弦波励磁のモータコア損 (今回の研究)
インバータ励磁	④インバータ励磁時の材料特性 (これまでの研究)	③インバータ励磁のモータコア損 (実際のモータ駆動)

註：JIS (Japanese Industrial Standard, C2556, 1996), IEC (International Electrotechnical Commission, 60404-3, 2nd ed., 1992)

これまで行われてきた、①、③、④の計測結果からは、材料特性における正弦波励磁とインバータ励磁との損失比較、およびインバータ励磁における材料とモータコア損との比較を行うことができる。しかし、以下の理由により上述の要因分析を十分に行うところまで来ていない状況である。

- 1). 本提案にて②を行うことができれば、①と②とを比較することでモータコア形状の影響が、②と③

とを比較することでインバータ励磁の影響が、評価することができ上記の要因分析をより明確にすることができる。特に②と③とを比較すれば、インバータ制御や装置を変えたりするとどこまでコア損が低減できるかの上限値が明確になり、インバータ制御や電力用半導体材料も含めたインバータ全体の新しい研究開発の方向性を定めることができる。

- 2). 通常電磁鋼板といった磁性材料は、JIS, IECの規格により評価されそのデータの入手は容易であるため、モータコア損の評価はまず②で行うべきである。
- 3). これまでのインバータ励磁のコア損計測において、材料特性とモータコア損特性とで異なる傾向が出ている^{4,7)}。キャリア周波数特性がその一例で、モータ形状の影響と材料特性との影響を区別する上でもモータの正弦波励磁のコア損を得る必要がある。
- 4). ①と④、②と③との損失比較を行うことができ、インバータ励磁による損失増加について、材料の場合とモータの場合とに分けて議論できる。材料要因とモータ要因とに分離でき、これまでにない研究の方向性をより明確にすることができる。

3. 研究の方法

今回提案の②を行うために、リニアアンプ (NF:HSA4014:3 台) を購入し図1のごときモータシミュレータを構築する。永久磁石モータを駆動させることで、正弦波励磁時のモータコア損を計測する。電流および回転数をリアルタイムで測定しベクトル制御理論により電圧、周波数の指令値を算出し、リニアアンプにて出力させる。無負荷時には負荷部はつけないが、負荷時にはモータをトルク計および負荷機（ここでは市販の永久磁石モータを可変抵抗器に接続させて発電機として使用）に接続させ回転させる。各相の電圧、電流および電力を同時に計測する。

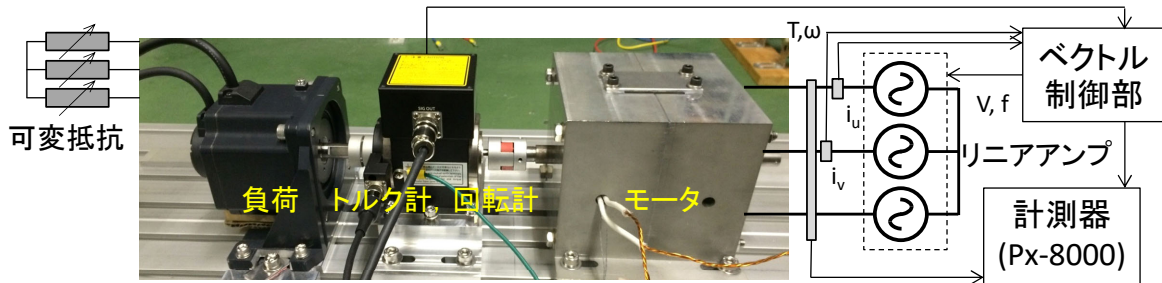


図1. 正弦波励磁でのモータコア損を計測するモータシミュレータ (負荷時)

これにより例えば、負荷時のコア損は次式で与えられる。

$$P_{load} = P_{3\phi} - R_s(I_{urms}^2 + I_{vrms}^2 + I_{wrms}^2) - P_f - \omega T \quad (1)$$

ここで計測したコア損 P_{load} は、モータのステータ損だけではなく、ロータ損、永久磁石損も含まれている。③のインバータ励磁したときのモータ負荷損を P_{load}^{INV} とし、リニアアンプによる正弦波励磁した時のモータ負荷損を P_{load}^{SIN} とすると、両者の差

$$\Delta P = P_{load}^{INV} - P_{load}^{SIN} \quad (2)$$

は、インバータ励磁によって増えたモータコア損、といえる。

更に、図1の計測で得られるコア損はステータ鉄損、ロータ鉄損、永久磁石損を合わせたもので、それらに分類することはできないため、有限要素法の電磁界数値解析を同時に行う。計測したコア損と解析したコア

損との一致を確認し、解析データをもとにステータ鉄損、ロータ鉄損、永久磁石損を分類する。合わせて磁束密度、渦電流や鉄損の空間分布をみることにより、モータコア損の電磁気的な現象を把握し損失現象の解明に繋げていく。

4. 研究成果

(1) モータ BF

モータコア損のビルディングファクタの研究として、リングによる正弦波励磁、インバータ励磁、モータの正弦波励磁、インバータ励磁のコア損を計測した。元来モータコアとして使用される電磁鋼板は、JIS,IECにより時間高調波を含まない正弦波励磁での鉄損計測であった。しかしモータコアとして使用される場合には PWM インバータ励磁となる。このため、モータ形状によるコア損増加要因と、インバータ励磁によるコア損増加要因とは異なるものといえるため、上記でのコア損計測を無負荷損の条件にて系統的に行った。その結果 (図2参照)、インバータ励磁による鉄損増加は 4 %であったが、モータ形状によるコア損増加は 17 %であった。これまでのモータコア損計測評価は、実使用条件のインバータ励磁下でのコア損計測を中心に行われていたが、これにより両者の分離が明確になり、モータの研究、設計の指針といえる。

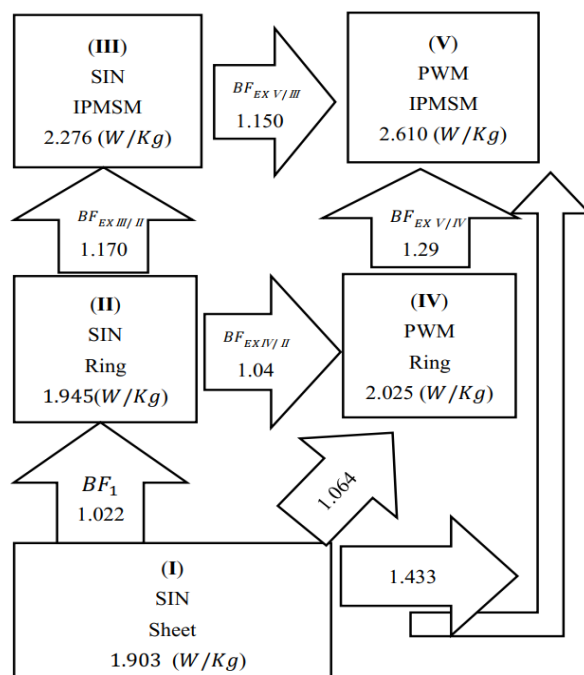


図2. IPM-SM, リングの鉄損によるモータ BF 特性

(2) リンギング鉄損

モータコア損の更なる研究として、将来の半導体とされる WBG 素子励磁時のモータコア損について、ナノ結晶モータコア損およびリンギング鉄損に関する研究を行った。従来の NO モータコア特性は、リング試料の結果と同様であったが、ナノ結晶材のモータでは、リンギング鉄損によるキャリア周波数特性が顕著に表れた (図3参照)。これは、ナノ結晶の極薄鋼板によるコア枚数の増加により、リンギング鉄損の影響が強くと表れたものといえる。次に、インバータ励磁におけるデッドタイムを小さくすることで、キャリア周波数を 500 kHz まで増加させたときにコア損特性について計測を行った (図4参照)。従来のキャリア周波数 20 kHz までは、リンギング鉄損の影響は顕著ではなかったが、500 kHz まで増加させると、リンギング鉄損の割合が全コア損の 4 割程度まで増加することが判明した。スイッチング損としてこれまでインバータ損に加え新たにリンギング鉄損の影響をも考慮すべきであることがいえる。

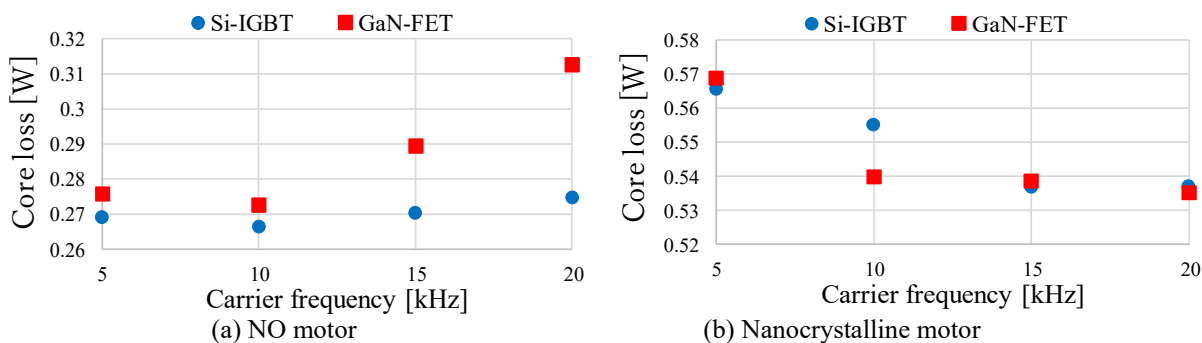


図3. ナノ結晶モータコア損特性

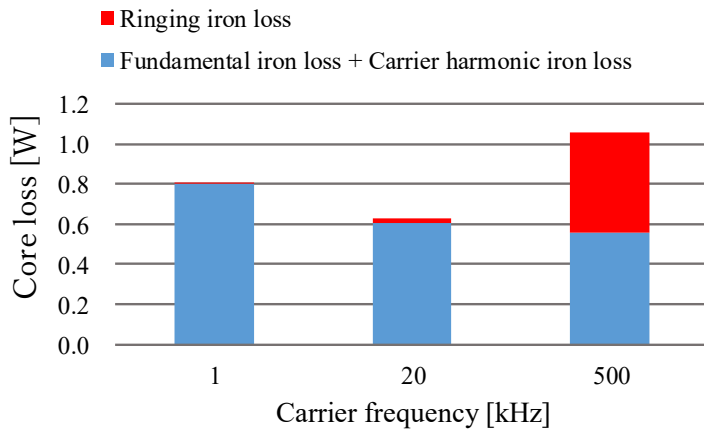


図4. キャリア周波数を変えた時のモータコア損に占めるリングング鉄損の割合.

(3) SiC-INV, PAM 励磁

IPM-SMの損失特性として、通電角 α を変えたときのPAMインバータ励磁時、およびSiCインバータ励磁時のコア損および銅損について計測評価を行った。モータコア損は、インバータからモータへの入力電力から、機械出力、銅損、機械損を差し引いて計測した(図5参照)。今回は、モータコアとしては、NO材(35H300)、永久磁石としては焼結NdFeBを用いている。PAMインバータで励磁し機械トルクを一定の条件でモータを回転させ、通電角 α を120度から180度まで変えた場合、135度の場合が最もコア損および銅損が小さく、また通常のPWMインバータ励磁のコア損よりも小さかった。ステータコアに流れる磁束密度の時間高調波が最も小さいためといえる。次に、SiCインバータ励磁のモータコア損を、通常のSi-IGBTインバータ励磁時のコア損と比較した。SiCインバータの場合、ON電圧低下によるマイナーループの減少があるが、高速スイッチングによるリングング発生によるリングング鉄損増加のため、コア損の際はあまり見られなかったが、インバータ損の低下は確認された。比較のために、IPMSMにおける正弦波励磁時のコア損も計測を行った。

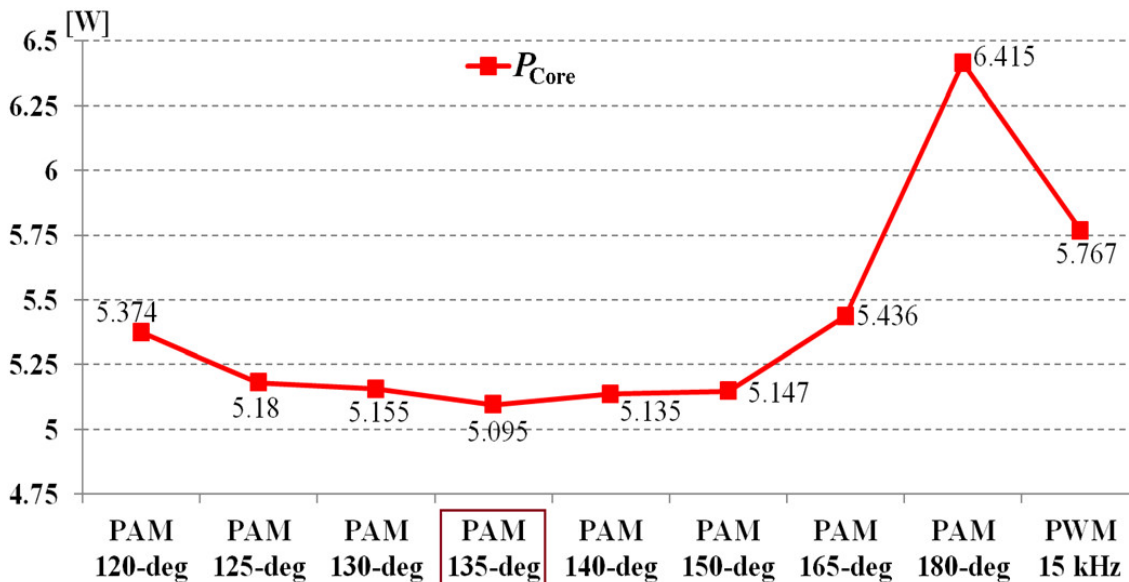


図5. SiC-MOSFETインバータ励磁時のPAM通電角を変えた時のIPM-SMモータコア損特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nguyen Gia Minh Thao, Shungshuang Zhong, Keisuke Fujisaki, Fujiyuki Iwamoto, Tomonori Kimura, Takahiro Yamada	4. 巻 14
2. 論文標題 Assessment of motor core loss, copper loss and magnetic flux density with PAM inverter under dissimilar excitation angles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IET Electric Power Applications	6. 最初と最後の頁 622 - 637
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1049/iet-epa.2019.0164	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 A. Yao, T. Sugimoto, and K. Fujisaki	4. 巻 43
2. 論文標題 Core Losses of a Nanocrystalline Motor Under Inverter and Sinusoidal Excitations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Magnetics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 42-45
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3379/msjmag.1905R001	査読の有無 有
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 杉本昂也、八尾惇、藤崎敬介	4. 巻 141
2. 論文標題 GaN-FETインバータによるリングング現象がナノ結晶モータのコア損特性に与える影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会論文誌D	6. 最初と最後の頁 269-275
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejias.141.269	査読の有無 有
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 内藤治夫、杉本昂也、藤崎敬介	4. 巻 140
2. 論文標題 高速スイッチング素子GaN-FETを適用したインバータで駆動されるモータでの鉄損特性	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電気学会論文誌D	6. 最初と最後の頁 488-494
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejias.140.488	査読の有無 有
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 2件）

1. 発表者名 Nguyen Gia Minh Thao, S.Zhong, K. Fujisaki, F. Iwamoto, T. Kimura, T. Yamada
2. 発表標題 Experimental Assessment of Motor Core Loss, Inverter Loss and Ringing Phenomenon under SiC-MOSFET Inverter Excitaion
3. 学会等名 International Electric Machines & Drives Conference 2019 in SAN DIEGO,CA (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nguyen Gia Minh Thao, Keisuke Fujisaki, Ton That Long
2. 発表標題 A Modified PAM Control with Automatic Angle Excitation for Experimental IPMSM in Consideration of SiC Inverter and Motor Core Loss
3. 学会等名 2019IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference(VPPC) in Hanoi (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 7.Nguyen Gia Minh Thao、Long Ton-That、藤崎 敬介、成瀬 賢哉、内藤 治夫
2. 発表標題 IPMSMのコア損の拡張ビルディングファクタ評価
3. 学会等名 電気学会2021年 産業応用部門大会、
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------