

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：33910  
研究種目：基盤研究(C) (一般)  
研究期間：2020～2022  
課題番号：20K04427  
研究課題名(和文) 誘導モータの回転子電流の測定と高効率化

研究課題名(英文) A Study for Rotor Current of Induction Motor

研究代表者  
廣塚 功 (Hirotsuka, Isao)  
中部大学・工学部・教授

研究者番号：20228844

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)： かが形誘導電動機(以下、IMと略記)は産業用動力として多数用いられており、さらなる高性能化が求められている。しかし、IMの回転子電流には不明瞭な点が残存するため、ギャップ中の高調波磁束の検討が十分に行えていないのが現状である。

そこで、研究代表者は、アウターロータ構成で、かが形回転子を固定し、固定子を回転させる回転固定子形IM(以下、FOR-IMと略記)を試作し、回転子電流を直接測定できる試作機を試作した。当該研究期間中に第2試作FOR-IMを製作し、その基本特性および回転子バー電流の発生の特徴などを、理論的・実験的に明らかにすることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

試作したFOR-IMの基本的な特性は、汎用IMと同様に検討できることから、FOR-IMを用いて測定・検討した回転子電流の特徴などは、IM全般に適用できるものと考えている。特に、IMの回転子電流を直接かつ詳細に実測した例は国内外に見当たらず、当該研究成果は、IMの更なる研究の基礎として寄与できるものと考えている。また、回転子電流を具体的に知ることにより、回転子電流に含まれる高調波成分の発生原因を明確にすることができ、今後のIMの設計などにも応用できるものと考えている。

研究成果の概要(英文)： Squirrel-cage induction motors (IMs) are widely used as industrial power supply, and there is a demand for even higher performance. However, since the rotor current of IM remains unclear, the study of the harmonic flux in the air-gap has not been sufficiently carried out at present.

Therefore, I made a prototype IM (FOR-IM), which is outer rotor configuration with rotating stator and fixed cage-rotor. The rotor current can be directly measured using FOR-IM. During the research period, the second prototype FOR-IM was made, and its basic characteristics and the feature of rotor bar current were clarified theoretically and experimentally.

研究分野：電気機器

キーワード：誘導電動機 回転子電流 高調波 高調波磁束 滑り周波数 特性改

### 1. 研究開始当初の背景

誘導モータ (以下、IM と略記) は各種動力用機器として幅広く用いられている。国内外では、永久磁石同期モータの研究が盛んであるが、日本の総発電電力の約 50% がいまだ IM に供給されている。世界的に見ても IM は多数用いられており、国際規格 IEC では高効率規制がさらに厳しくなっている。

図 1 に汎用 IM の鉄心例を示す。固定子鉄心の溝 (固定子スロット) には巻線が納められ、電源に接続されて回転磁界を発生する。回転子鉄心にも溝 (回転子スロット) があり、中小形 IM では、アルミダイカストにより電流路が形成されている。この回転子の電流路には、固定子の回転磁界から電磁誘導により電流が流れ、固定子の回転磁界と回転子の電流との作用で回転する。その際、回転力 (トルク) を発生するのは基本波成分であるが、図 1 のように、固定子および回転子スロットの存在などにより、固定子と回転子との隙間 (ギャップ) には多くの高調波磁束を発生し、IM の損失の原因となっている。IM のさらなる高効率化・高性能化には、この高調波磁束をいかに減らすかが重要であるが、その実態についてはいまだ不明瞭な点がある。特に、回転子に流れる電流を実測することは極めて困難であり、実測例は極めて少なく、十分な検討が成されているとは言い難い。そこで、従来の研究では、固定子電流の測定結果から推定する方法、有限要素法などの電磁界解析により理論的に算出する方法などで検討されてきた。しかし、いずれの場合も回転子電流の推定であり、その実態は不明である。

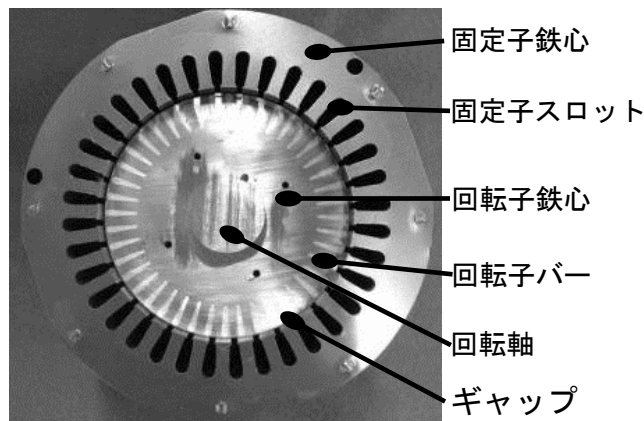


図 1 汎用誘導モータの鉄心例

IM は、高効率化の目的から固定子と回転子とのギャップが極めて狭く、固定子巻線から回転子への電磁誘導を生じやすくしている。このため、IM のギャップ中の磁束には基本波成分の他に多くの高調波成分が含まれる。図 2 に、IM のギャップ磁束密度の解析例を示す。図 2 より、ギャップ中の磁束密度には基本波成分以外に多くの高調波成分が含まれており、効率低下の要因となっている。

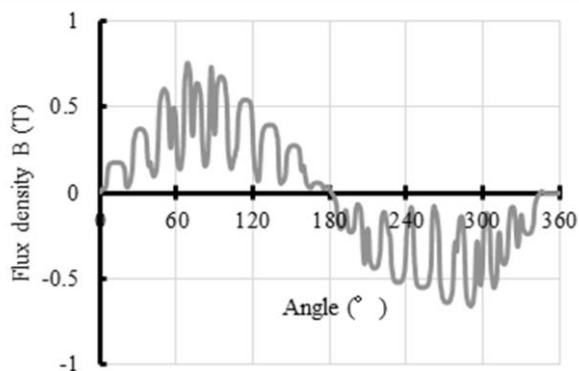


図 2 ギャップ磁束密度の解析例

以上のような現象を、現在では固定子側からの測定により求めたり、図 2 のように解析的に検討したりしているのが現状である。

### 2. 研究の目的

前述のように、回転子導体一本一本に流れる電流を詳細に測定・検討すれば、従来の「推定」を検証できるとともに、IM のさらなる高効率化・高性能化に極めて有効であると考えている。そこで、世界的にも類を見ない回転固定子形 IM (Fixed Outer Rotor Induction Motor, 以下、FOR-IM と略記) を製作し、詳細に回転子電流を実測することが当該研究の特色である。図 3 に試作した FOR-IM の鉄心形状を示す。また、試作機の外観を図 4 に示す。固定子への給電はスリップリングとブラシを介して行っている。この試作機においては、回

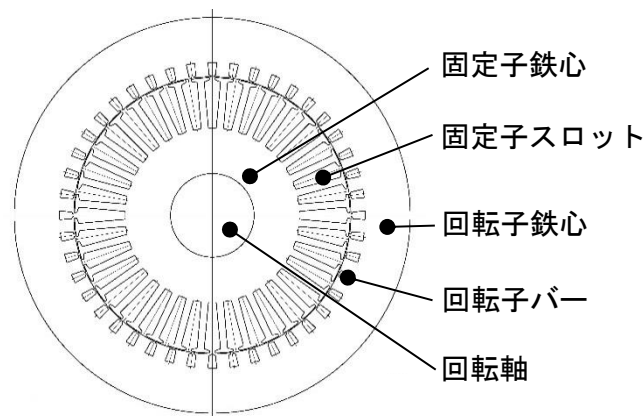


図 3 回転固定子形誘導モータの鉄心

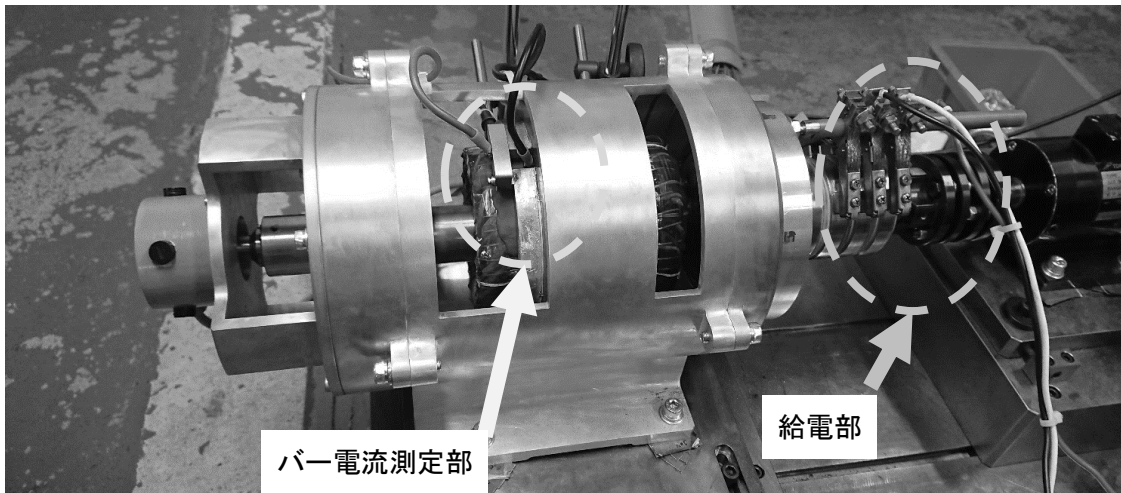


図4 第1試作 FOR-IM の外観

回転子バー1本とエンドリングとを切り離し、回転子バーと同じ材質のアルミニウム製ブリッジで回転子バー電流を測定しようとした。しかし、回転子バー抵抗に比べ、ブリッジ部分での接触抵抗が著しく大きく、回転子バー電流は測定できず、回転子バーに誘起する電圧の測定のみにとどまった。そこで、回転子バーおよびエンドリングをタフピッチ銅 C1100 とし、回転子鉄心とエンドリングとの隙間を空け、そこにログスキーコイルを入れて回転子バー電流を直接測定できる第2試作機を試作した。当該研究では、第2試作機を製作すること、第2試作機により回転子バー電流を直接測定すること、測定により得られた回転子バー電流の周波数解析結果より、IM 内部での現象を実験的に求めること、これらの検討結果より IM の高効率化および高性能化の手法の確立などが目的である。

### 3. 研究の方法

図5に第2試作 FOR-IM の外観、図6に回転子バー電流の測定部の寸法などを示す。外観は第1試作機と変わらないが、主な変更点は、回転子バーをアルミダイキャストから銅バーに、回転子スロット数を44からログスキーコイルが入りやすいように28にしている。

図7に実験装置の構成図を示す。電源はNF回路設計ブロック製シグナルジェネレータ4591Aと3台の電力増幅器4520を組み合わせたものであり、三相平衡正弦波電圧を出力する。供試機への入力諸量はクランプメータ等を介し、ヒオキ製パワーアナライザPW3390(以下、PW3390と略記)によって測定している。供試機の出力軸にはトルク検出器および回転検出器を取付け、PW3390に直接取り込んでいる。供試機の負荷として直流機を接続し、レオナード方式で制御し、定常状態の特性を測定している。回転子バー電流を、ログスキーコイルで検出し、小野測器製FFTアナライザCF-7200に取り込み、周波数解析を行った。

試験を行う際は、温度状態を一定とするため、定格電圧200V/60Hzを印加し、無負荷で約2時間暖機をしたのち、実負荷試験を行う。各測定において、1回の測定ごとに無負荷で約10分のインターバルを設けて、FOR-IMの温度状態を極力一定に保つように配慮している。

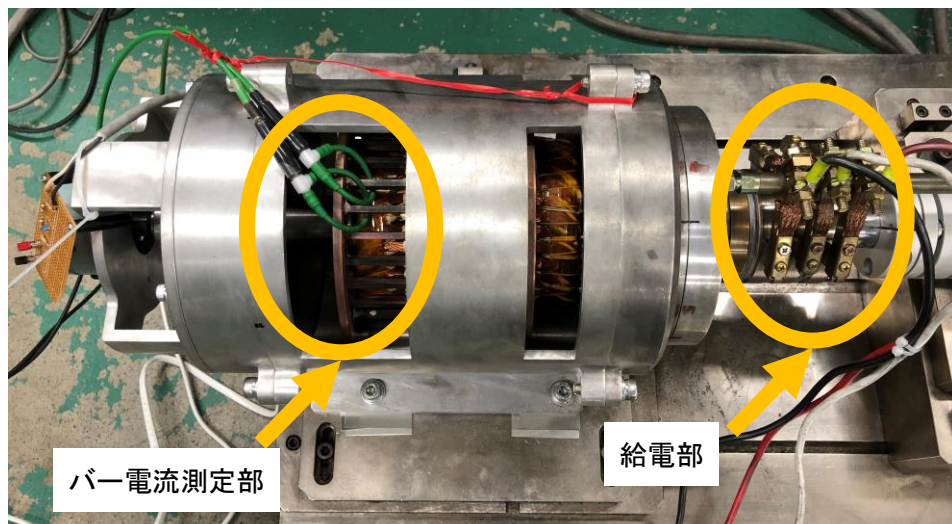


図5 第2試作 FOR-IM の外観

#### 4. 研究成果

第2試作 FOR-IM が通常の汎用 IM と同様な特性であるかの検証を行った。汎用 IM に対して良好な特性算定を行うことができる T 形等価回路直接法を用いて、実負荷試験結果と特性算定結果とを比較した。その一例を図8に示す。同図より明らかなように、通常運転範囲において、実測と算定結果とは極めて良好に一致していることから、第2試作 FOR-IM は汎用 IM と同等に検討できるものと考えている。

図9に回転子バー電流の波形測定例として、滑り  $s=0.05$  および  $0.20$  の場合を示す。 $s=0.05$  の場合、同期速度に近く、回転子電流の基本波成分である  $sf$  成分は  $3\text{ Hz}$  で、その大きさは比較的小さい。また、 $sf$  成分はややひずんでおり、高調波成分が相対的に大きい。ほぼ定格出力時である  $s=0.20$  の場合、 $sf$  成分が優勢となり、波形も正弦波に近く、相対的に高調波成分が小さい。

図10に回転子バー電流の周波数解析結果を示す。図9より、回転子バー電流には極めて多くの高調波成分を含んでいることは明らかである。本供試機の場合、理論的に回転子電流には  $sf$  成分、 $(7s-6)f$  成分、 $(13s-12)f$  成分および  $(19s-18)f$  成分が流れる。これらは、例えば、 $s=0.2$  の場合、それぞれ  $12\text{ Hz}$  成分、 $300\text{ Hz}$  成分、 $564\text{ Hz}$  成分および  $851\text{ Hz}$  成分として観測されている。

いずれの電流成分も滑りの増加とともに増大している。しかし、滑りのごく小さい範囲では、滑りに対して単純に増大していない。これは、滑りの小さいときに多くの高調波成分が近接した周波数に発生しており、解析精度が不十分で、他の高調波電流成分との分離ができていないためと考えている。また、滑りの増加に対して一様に増大していないのは、特定の滑りで異なる電流成分が同一周波数で発生するため、その分離を十分に行えていないためである。理論的に予測されている回転子電流成分以外の成分も多数散見されているが、回転子バー電流の高調波成分の大きさも含め、詳細については今後の課題としたい。

以上のように、当該研究はほぼ予定通り遂行され、当初予定した成果が得られたものと考えている。しかし、理論的検討、さらに詳細な実験データの取得、有限要素法による解析など、実施すべきことが山積している。また、これらの成果を IM の設計に活かす工夫などにも必要である。今後、第2試作 FOR-IM を用いてさらに詳細に IM の回転子バー電流について検討を行う予定である。

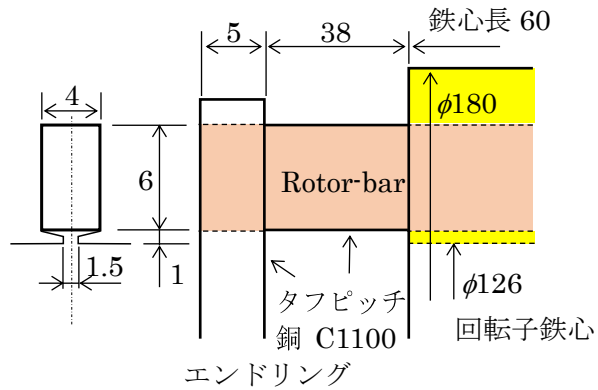
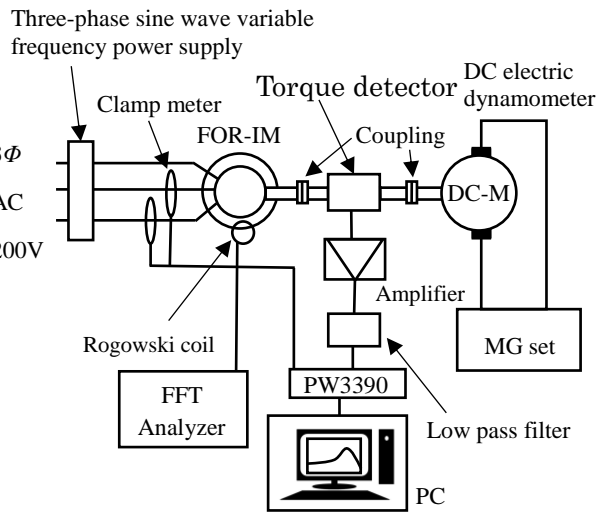


図6 回転子バー電流測定部の寸法など



PW3390 : Digital power Analyzer

図7 実験装置の構成図

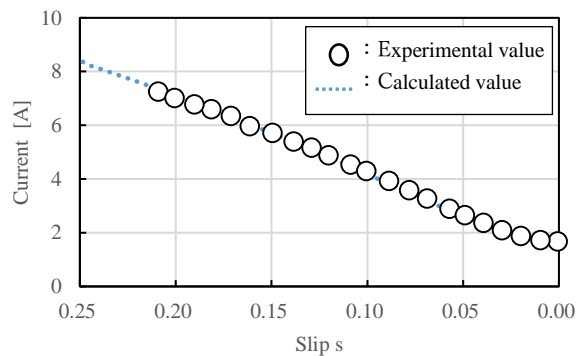


図8 電流特性



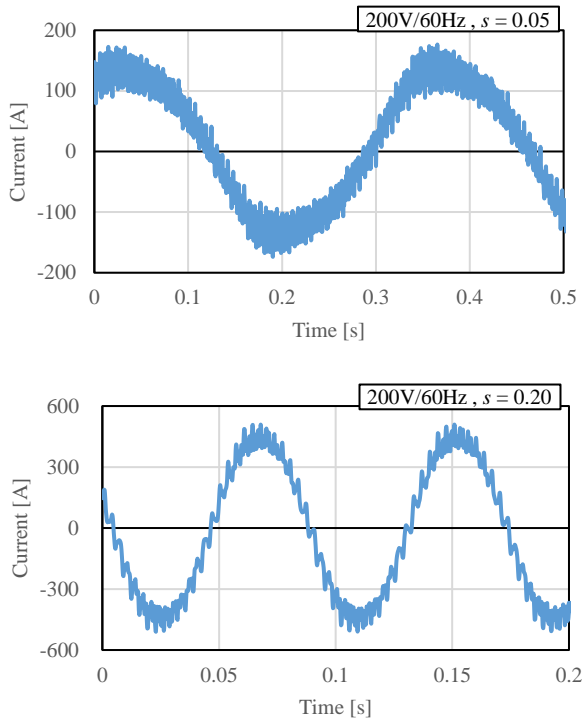


図9 回転子バー電流の波形例

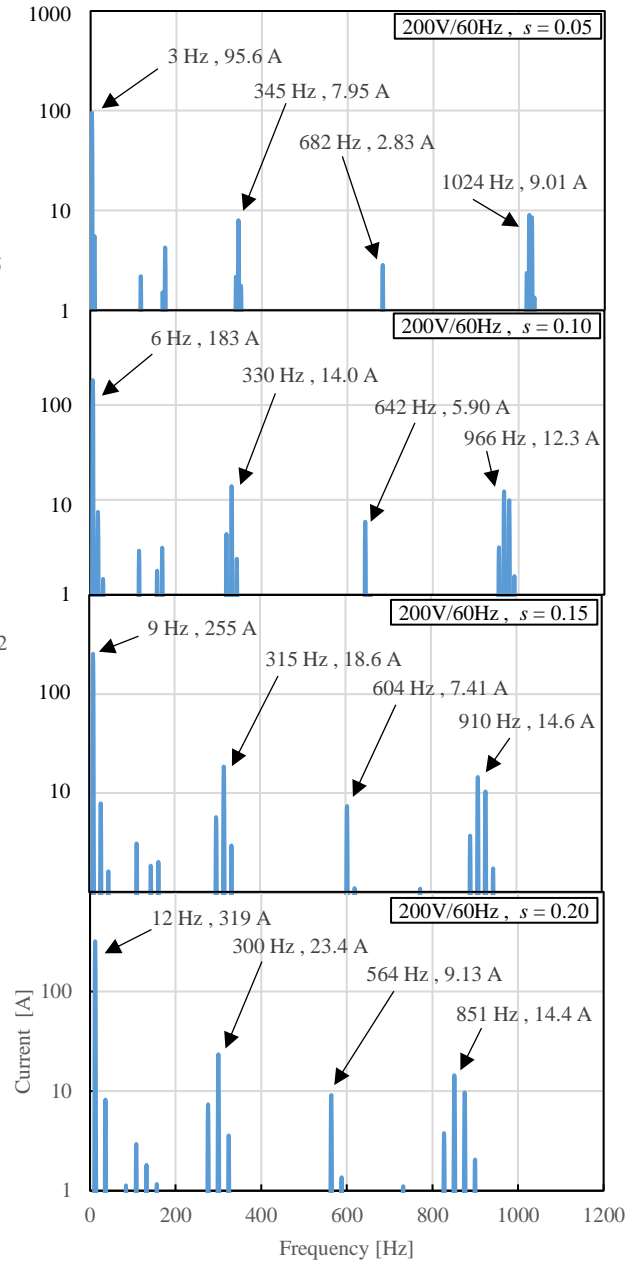


図10 回転子バー電流の周波数解析結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 廣塚功, 中村雅憲, 杉本英久
2. 発表標題 アウターロータ固定形三相かご形誘導電動機の回転子バー電流の周波数分析結果
3. 学会等名 電気学会全国大会 No.5-064
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 間ショウナン, 廣塚功, 中村雅憲
2. 発表標題 市販三相かご形誘導電動機の特性に関する実験的検討
3. 学会等名 電気学会回転機研究会資料 RM-21-135
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 廣塚功, 赤木勇輝, 福田真之
2. 発表標題 アウターロータ固定形三相かご形誘導電動機の第2試作機の基本特性
3. 学会等名 電気学会回転機研究会資料 RM-22-109
4. 発表年 2022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
---------	---------