

氏名	たかはた りょういち 高畑 良一
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成27年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)電気エネルギーシステム専攻
学位論文題目	圧縮機用埋め込み磁石形同期モータの損失低減技術に関する研究
指導教員	東北大学教授 一ノ倉 理
論文審査委員	主査 東北大学教授 一ノ倉 理 東北大学教授 松木 英敏 東北大学教授 石山 和志

論文内容要旨

空調機器（以下エアコン）の圧縮機用モータでは、埋め込み磁石形（以下 IPM）構造の回転子、希土類磁石、集中巻固定子、二相変調方式の PWM インバータの採用により、駆動システムとしての小形・高効率化を図っている。しかしながら、一方ではモータの小形化により出力密度が増加し、鉄心の磁気飽和が生じて時間、ならびに空間高調波磁束が増大するという問題が顕在化している。

本研究では、PWM インバータで駆動されるエアコン圧縮機用の集中巻 IPM モータを対象に、高効率・低振動化を図るため、電機子反作用による磁気飽和に起因する空間高調波磁束、固定子巻線ならびに永久磁石の配置に起因する空間高調波磁束、PWM インバータのキャリア周波数および変調方式に起因する時間高調波磁束など、各種の高調波磁束がモータの損失や振動に及ぼす影響を磁界解析に基づいて明らかにしている。さらに、これらの損失および振動の低減策を提案し、試作モータにより提案手法の効果を検証している。本論文は、これらの研究成果をまとめたものであり、全6章からなる。

第1章は緒言であり、本研究の背景と目的を述べている。

第2章では、現状の圧縮機用モータの構造と課題について整理している。すなわち、IPM モータの場合、電機子反作用によって回転子磁極部に磁気飽和が生じるため、空間高調波磁束によってモータの損失が増加すること、固定子巻線が集中巻の IPM モータの場合、固定子巻線ならびに永久磁石の配置に起因する空間高調波磁束によってモータの損失、コギングトルク、トルクリプルおよび電磁加振力が生じ、モータ効率の低下や、振動および騒音が増大する原因になること、PWM インバータのキャリア周波数および変調方式に起因する時間高調波磁束によってモータの損失、振動および騒音が大きく変わることを述べている。

第3章では、磁界解析に基づいて、電機子反作用による磁気飽和に起因する空間高調波磁束がモータ

損失に及ぼす影響を明らかにしている。次いで、電機子反作用によって生じる損失を低減するため、図1に示す回転子のフラックスバリアの最適な形状と配置を提案している。さらに、回転子がフラックスバリア構造のIPMモータを試作し、実測により提案手法の有用性を実証している。また、PWMインバータのキャリア周波数に相当する時間高調波磁束がモータ損失に及ぼす影響を明らかにし、固定子巻線の高インダクタンス化による損失低減を提案するとともに、試作IPMモータによりその効果を検証している。

以上の考察を通じて、電機子反作用による磁気飽和に起因する空間高調波磁束よりもPWMインバータのキャリア周波数に相当する時間高調波磁束の方がモータの損失に及ぼす影響が大きいことを明らかにしている。さらに、PWMインバータで駆動した場合、フラックスバリアなしのIPMモータにおいて、正弦波交流電源で駆動した場合と比較して、PWMインバータのキャリア周波数に相当する時間高調波磁束が増大し、固定子鉄心の渦電流損、ならびに永久磁石の渦電流損が増加することを明らかにしている。さらに、これらの損失は、固定子巻線の巻数を増やして高インダクタンス化することで低減可能であることを指摘している。

また、正弦波交流電源で駆動した場合、フラックスバリアなしのIPMモータは、電機子反作用によって5次および7次の空間高調波磁束が増大し、固定子鉄心および回転子鉄心の鉄損、ならびに永久磁石の渦電流損が増加することを明らかにしている。さらに、これらの損失は、回転子のフラックスバリアの最適な形状と配置によって低減可能であることを指摘している。

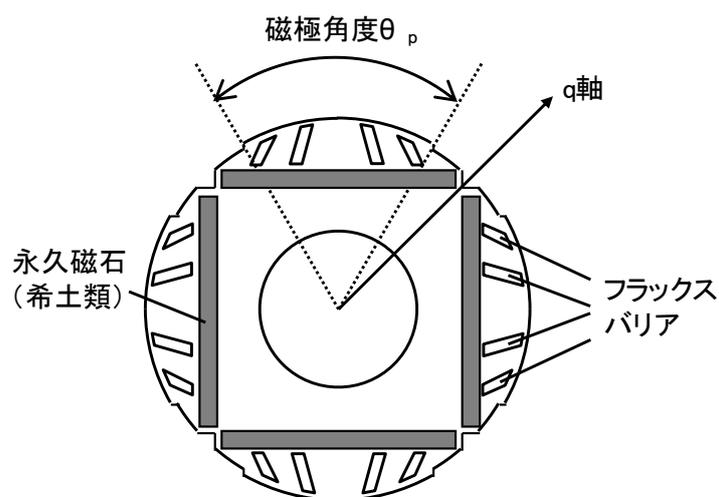


図1 提案する回転子のフラックスバリア構造

第4章では、磁界解析に基づいて、固定子巻線および永久磁石の配置に起因する空間高調波磁束がモータの損失、コギングトルク、トルクリプルおよび電磁加振力など振動要因に及ぼす影響を明らかにしている。次いで、効率改善と、振動・騒音の抑制を図るため、モータ性能を維持しながら製作の容易な回転子のスキュー構造を提案している。すなわち、図2に示す回転子断面が異なる2種類の回転子鉄心を軸方向に3段組み合わせることで、永久磁石回転子がスキュー構造となるIPMモータを提案し、三次元磁界解析によって回転子断面の最適形状を明らかにしている。さらに、永久磁石回転子がスキュー構造のIPMモータを試作し、実測により提案手法の有用性を実証している。

さらに、これらの考察から、スキューを有するモータは、スキューなしモータと比較して、電機子電流が僅かに増加するものの、5次および7次の高調波電流に起因する損失が減少するため、モータ効率が低下しないこと、コギングトルクおよびトルクリプルの6次および12次の空間高調波成分が低減されること、可聴域の1 kHz~3 kHzに相当する電磁加振力が減少するため、振動加速度の総合的な値を約2.1 dB小さくできることを明らかにしている。

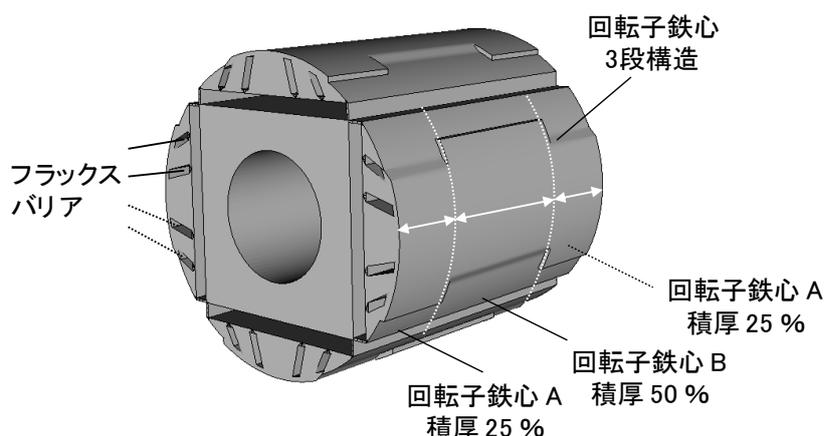


図2 提案する回転子のスキュー構造

第5章では、駆動システムの最適化を図るため、PWMインバータの変調方式による時間高調波磁束がモータの損失および振動に及ぼす影響を明らかにしている。まず、実測により二相変調方式と三相変調方式でモータを駆動した場合の効率および振動を評価している。さらに、実測の端子電圧を入力とした磁界解析に基づいて、PWMインバータの変調方式による時間高調波磁束がモータの損失および振動に及ぼす影響を考察している。

その結果、三相変調方式で駆動した方がPWMインバータのキャリア周波数に相当する時間高調波磁

束が減少するため、モータの銅損および鉄損が減少することを明らかにしている。さらに、二相変調方式と比べて、三相変調方式で駆動した方がモータ効率は高くなり、低速は最大で 0.8 %の差が生じることを指摘している。

また、モータの振動要因について考察した結果、二相変調方式と比べて、三相変調方式で駆動した方が PWM インバータのキャリア周波数に相当する時間高調波磁束が減少し、モータの電磁加振力が減少するため、振動が小さくなることを明らかにしている。

第 6 章は結言であり、本研究によって得られた成果をまとめている。

以上より、本研究により得られた知見は、PWM インバータで駆動されるエアコン圧縮機用の集中巻 IPM モータの損失および振動の低減に寄与するものと考えられる。

論文審査結果の要旨

一般家庭における消費電力の内、空調機器（以下エアコン）の消費電力の割合は 25 % に達することから、エアコンにはエネルギー効率のさらなる改善が求められている。エアコンの消費電力の低減には、圧縮機、熱交換器、送風機の効率向上が必要であるが、これらの中でも圧縮機用モータの消費電力は全体の 8 割を占めるため、圧縮機用モータの高効率化が重要な課題になる。回転子鉄心の内部に永久磁石を配置する埋め込み磁石形同期モータ（以下 IPM モータ）は、小型軽量で高効率であることから、圧縮機用モータへの適用が増えている。しかしながら、IPM モータの明確な設計指針はなく、集中巻を採用するとモータの損失と振動・騒音が増大するなどの問題が指摘されている。本研究は、圧縮機用モータの高効率化と低騒音化を目的として、集中巻 IPM モータの損失と振動について詳細に分析し、その改善方法を提案したもので、全編 6 章からなる。

第 1 章は緒言であり、本研究の背景と目的を述べている。

第 2 章では、現状の圧縮機に使用されている集中巻 IPM モータの構造について詳述し、回転子鉄心の磁気飽和による空間高調波磁束、巻線および永久磁石の配置に起因する空間高調波磁束、モータ駆動用の PWM インバータのキャリア周波数相当の時間高調波磁束の各高調波磁束が、モータ損失ならびに振動に及ぼす影響が無視できないことを指摘している。

第 3 章では、まず、磁界解析に基づいて、磁気飽和による空間高調波磁束がモータ特性に与える影響について考察し、電機子反作用によって回転子磁極部に磁気飽和が生じること、これによる空間高調波磁束がモータのコギングトルクと鉄損を増大させる要因になることを指摘している。ついで、この磁気飽和を緩和する手段として、回転子鉄心にフラックスバリアと呼ばれる空隙を設けることを提案し、磁界解析によってフラックスバリアの最適な形状と配置を決定している。さらに、PWM インバータのキャリア周波数に相当する時間高調波磁束成分がモータ固定子のうず電流損失の原因になることを明らかにするとともに、固定子巻線の高インダクタンス化による損失低減を提案している。以上の考察に基づいて集中巻 IPM モータを試作し、考察結果の妥当性と提案手法の有効性を実証している。これは集中巻 IPM モータの最適構造と最適設計指針を明らかにするもので、優れた成果である。

第 4 章では、集中巻ならびに永久磁石の配置に起因する空間高調波磁束がモータ特性に及ぼす影響について考察し、その改善策を与えている。まず、磁界解析に基づいて、モータの鉄損、コギングトルク、トルクリプルに及ぼす空間高調波磁束の影響を定量的に分析している。ついで、回転子を軸方向に 3 分割し、中央部を機械角で 5 度転移させることによって空間高調波磁束を低減させる構造を提案し、試作機によりコギングトルクとトルクリプルの低減効果を検証している。本手法は、回転子構造の簡易な工夫によってモータの振動と騒音を低減させるもので、実用上有用な成果である。

第 5 章では、IPM モータを駆動する PWM インバータの変調方式について考察している。まず、二相変調方式および三相変調方式で駆動した場合のモータの損失と振動を実測している。ついで、変調方式と時間高調波磁束の関係、時間高調波磁束とモータ損失ならびに振動周波数の関係を、磁界解析に基づいて定量的に分析している。その結果から、二相変調方式と比較して三相変調方式のほうが、キャリア周波数相当の時間高調波磁束成分が小さいため、モータ損失ならびに振動の低減に有効であることを明らかにしている。これは有用な知見である。

第 6 章は結言である。

以上要するに本論文は、巻線や回転子の構造によって生じる空間高調波磁束、ならびに PWM インバータ駆動によって生じる時間高調波磁束が、集中巻 IPM モータの損失と振動に及ぼす影響を定量的に明らかにし、その改善策を提案したもので、電気機器工学およびパワーエレクトロニクスの発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。