

称号及び氏名	博士（工学） 前谷 達男
学位授与の日付	平成 25 年 3 月 31 日
論文名	「PWM インバータ駆動ブラシレス DC モータのベアリング電食に関する研究」
論文審査委員	主査 森本 茂雄 副査 石亀 篤司 副査 小西 啓治

論文要旨

グローバル規模での環境・省エネルギー問題への意識の高まりとともに、これまで産業分野にて普及してきたインバータによる可変速モータドライブ技術が電気自動車やハイブリッド自動車、家電製品等へ幅広く応用されるようになってきている。

我が国の電力の 50%以上はモータによって消費され、モータの効率を 1%向上することによって、中型の原子力発電所（出力 50 万 kW）一基相当の電力を削減でき、火力発電所の CO2 排出量換算では 398 万トン相当の削減になると言われている。したがって、モータの高効率化は地球環境保護とエネルギー問題の観点から重要な課題となっている。2009 年度における家電製品の主力商品である空調機器（エアコン）の消費エネルギーは家庭用部門で 26.9%、業務部門で 27%と大きな割合を占めている。エアコンに搭載される圧縮機モータと室内・室外ファンモータにブラシレス DC モータを適用し、インバータ化することによって、エアコンの消費電力量を 30%以上削減できる。これまでに地球温暖化防止を背景としたトップランナー方式の省エネ規制を経て、モータのブラシレス化とインバータ化が加速し、その普及率は 100%に至っている。

一方、新興国を中心にエアコンの世界市場は日本市場の 10 倍の 7,000 万台に急拡大しているが、インバータ化率は数十%にすぎない。したがって、グローバルにエアコンのインバータ化を進めていくことが、地球温暖化防止に大きく貢献することができる。グローバル市場におけるインバータエアコンは IPM (Intelligent Power Module) をはじめとするパワーエレクトロニクス技術の進化、モータ制御用マイコンの高性能・低価格化とセンサレス制御に代表されるモータ制御技術の進歩、および、欧州のラベル規制、中国の補助金施策等の行政の取り組みによって着実に増加している。その普及に伴って、従来、クリーンルーム等に使用される産業用モータにて発生していたベアリング電食の問題が空調ファン用ブラシレス

DC モータにおいても報告されるようになってきた。特に、海外においては電源電圧が 200V ~240V 系と高いために発生頻度が高く、今後グローバルにインバータエアコンの普及が加速されていく中でベアリング電食の対策が必要である。

ベアリング電食とは、次のような現象である。電圧形 PWM (Pulse Width Modulation) インバータにてモータを駆動すると、パワー素子のスイッチングによって、コモンモード電圧の変化が生じる。このコモンモード電圧がモータ内部の浮遊容量によって、ベアリングの内輪側と外輪側に分圧され、ベアリングの内外輪間に軸電圧（または、ベアリング電圧）と呼ばれる電位差を生じる。ベアリンググリスの油膜厚さは $0.1\mu\text{m}\sim 1\mu\text{m}$ と非常に薄く、その絶縁破壊電圧は数 V ~ 十数 V である。軸電圧の値がこのベアリンググリスの油膜の絶縁破壊電圧を超えるとベアリング電流（放電電流）が流れる。この放電電流は EDM 電流（Electrostatic discharge machining bearing currents）と呼ばれ、ベアリングの金属表面に損傷を与え、ベアリングの音響性能が悪化し、さらにはベアリング寿命低下に至るといふ現象である。

従来、ベアリング電食はベアリングに流れる電流密度で決まり、産業用モータに使用される大型ベアリングの研究においてベアリングの電流密度と寿命の関係が示され、1A 以上の電流にてベアリング電食が発生すると報告されていた。近年、空調ファン用ブラシレス DC モータに使用される小型ベアリングでの直流電圧印加による電流密度の耐久試験において、数十 mA 程度の微小な電流密度においてもベアリング電食が発生するという研究結果が報告され、微小電流に対するさらなる対策が必要である。

このベアリング電食を抑制する方法として、ベアリング内部に電流を流さない方法、ベアリング電流の原因となる軸電圧を抑制するといった方法がある。ベアリング内部に電流を流さない方法としては、絶縁ベアリングまたはセラミックボールベアリングにてベアリングを絶縁する方法、接地ブラシ等の設置にてベアリングの外部に電流を流す方法が提案されている。軸電圧を抑制する方法として、EMI フィルタの設置等にて軸電圧の発生原因であるコモンモード電圧を抑制する方法と、固定子（ステータ）と回転子（ロータ）の間あるいは巻線のコイルエンドとロータ間に静電シールドを設け、軸電圧そのものを抑制する方法がある。しかし、これらの提案は、モータの外部に部品が必要であったり、高価な材料を必要としたり、特殊なモータ構造となる。空調ファン用モータは民生機器であるために市場からのコスト要求が厳しく、また、空調機器に組み込まれるためにモータサイズは業界で標準化されており、かつ、モータの周辺に部品を追加するスペースに余裕がなく、これらの提案を空調ファンモータに実用化・普及化することは困難である。

以上に述べた課題や問題点を考慮し、本論文では、ステータが樹脂にてモールドされた非接地にて駆動される空調ファン用ブラシレス DC モータにおいて、浮遊容量を考慮したコモンモード等価回路をもとに、軸電圧を計算するための簡易等価回路を提案する。モータ内部の静電容量分布を測定し、提案した簡易等価回路にて軸電圧の計算を行い、軸電圧抑制方法としてロータの鉄心コアを分割し内コアと外コアの間を樹脂にて絶縁したロータ構造「絶縁ロータ」を提案する。また、ベアリングへの印加電圧と音響寿命の関係を求めるために、ベアリングの音響に関する加速耐久試験を提案する。これによりベアリング電食の音響特性に影響を及ぼさない軸電圧の閾値を求める。この絶縁ロータを搭載した、非接地にて駆動される空調ファン用ブラシレス DC モータにて、絶縁ロータの静電容量を小さくしていくと軸電圧の極性がコモンモード電圧の極性と同一極性であったものが反転する現象が生じる。この現象のモデル化のためにブリッジ型等価回路の提案を行う。このブリッジ型等価回路によりベアリンググリスの絶縁破壊が生じないための絶縁ロータの設計指針を導き、実際に絶縁ロータを製作しモータの特性確認を行う。この絶縁ロータにて、外付け部品が不要で、モータ構造及びコストは従来モータと同一であるベアリング電食対策モータが実現できる。さらに、ベアリンググリスの油膜厚さがベアリングのボールの回転数、すなわちモータの回転速度に依存するという知見から、モータの回転速度に対する軸電圧の影響を確認するために、モ-

タの回転数の変化に対するベアリングの静電容量およびベアリンググリスの絶縁破壊電圧の測定方法を提案する。これにより、モータの実使用回転速度範囲においてベアリングの絶縁破壊が起きないことを確認し、絶縁ロータによるベアリング電食対策が有効であることを示す。

第1章では、研究の背景や目的とともに、本論文の概要について述べる。

第2章では、ベアリング電食のメカニズムを明確にし、これまでの対策提案に関して空調ファン用ブラシレス DC モータへの適用検討を行い、課題があることを明確にする。さらに、空調ファン用ブラシレス DC モータのベアリング電食対策として浮遊容量を考慮したコモンモード等価回路を基に、軸電圧計算のための簡易等価回路を導き、モータ内部の静電容量分布を測定し軸電圧の計算と測定を行い、軸電圧抑制方法としてロータ鉄心の内側と外側を樹脂にて絶縁した「絶縁ロータ」にすることによって軸電圧が低減されることを明らかにする。さらに、磁界解析にて絶縁ロータと現行の鉄コアロータの磁気特性の比較を行い絶縁ロータはモータの磁気特性に影響及ぼさないことを示す。

第3章では、ベアリングへの印加電圧と音響寿命の関係を求めるためにベアリングの音響に関する加速耐久試験として、インバータのスイッチング周波数の数倍のパルス電圧をベアリングの内外輪間に印加し、パルス電圧の値を変化させた時のベアリングの振動の変化をアンデロンメータにて測定を行うことで、ベアリング電食の発生の有無を判定する。その結果から実使用運転時間（3万時間相当）においてベアリングの音響特性に影響を及ぼさない軸電圧の閾値が4Vである結果を得た。

第4章では、非接地にて駆動される空調ファン用ブラシレス DC モータにおいて、絶縁ロータの静電容量を小さくしていくと軸電圧の極性がコモンモード電圧の極性と同一極性であったものが反転する現象が生じることを示す。この現象のモデル化のためにブリッジ型等価回路を提案し、この等価回路に基づき、ベアリンググリスの絶縁破壊電圧以下となる絶縁ロータの静電容量の値は2.5pF～18pFであることを明らかにした。さらに、接地駆動モータにおいても軸電圧の抑制が可能であることを確認した。

第5章では、ベアリンググリスの油膜厚さがベアリングのボールの回転数、すなわちモータの回転速度に依存するという知見から、モータの回転速度の変化に対する、ベアリングの静電容量および絶縁破壊電圧の測定と軸電圧の測定を行う。ベアリングの静電容量の変化によって軸電圧の値も変化するがベアリンググリスの絶縁破壊電圧の値も軸電圧の値と同じように変化するため、絶縁ロータ仕様のブラシレス DC モータが、実使用回転範囲（400～1800min⁻¹）においてベアリングの絶縁破壊が起きないことを確認した。さらに、空調機器（エアコン）に絶縁ロータ仕様モータを搭載し軸電圧の測定を行い、ベアリンググリスの絶縁破壊が生じないことを確認し、絶縁ロータがベアリング電食対策に有効であることを確認した。

第6章では、結論として以上の章の総括を行う。

審査結果の要旨

本論文は、インバータ駆動される空調ファン用ブラシレス DC モータにおいて、ベアリングの音響性能の悪化やベアリング寿命の低下を招くベアリング電食の対策法について研究したものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 浮遊容量を考慮したブラシレス DC モータのコモンモード等価回路をもとに軸電圧計算のための簡易等価回路を導出した。

- (2) 軸電圧抑制方法としてロータ鉄心の内側と外側を樹脂にて絶縁した、絶縁ロータにすることによって軸電圧が低減されることを明らかにした。
- (3) 空調ファン用ブラシレス DC モータに使用する小型ベアリンググリスの絶縁破壊電圧の測定と加速耐久試験による軸電圧の設計目標値の検討を行った結果、小型ベアリングのグリスの絶縁破壊電圧が 5.3V であること、実運転時間の 3 万時間相当の音響性能が確保されるパルス印加電圧の閾値は 4V であることを明らかにした。
- (4) 非接地にて駆動される空調ファン用ブラシレス DC モータのモデル化のためにブリッジ型等価回路を提案し、この等価回路に基づき、ベアリンググリスの絶縁破壊電圧以下となる絶縁ロータの静電容量の値は 2.5pF~18pF であることを明らかにした。さらに、接地駆動モータにおいても非接地モータと同様に絶縁ロータにて軸電圧の抑制が可能であることを明らかにした。
- (5) 実使用回転速度範囲において、軸電圧とベアリンググリスの絶縁破壊電圧の検討を行い、モータの回転速度が上昇するにつれて軸電圧は高くなるが、ベアリンググリスの絶縁破壊電圧も高くなるため、実使用回転速度範囲においてベアリンググリスの絶縁破壊が生じないこと、実機搭載時にも絶縁破壊が生じないことより、絶縁ロータがベアリング電食対策に有効であることを明らかにした。

以上の諸成果は、ベアリング電食の対策を、高価な部材や外付け部品を必要とせず、かつ、ロータ部分の構造変更だけ実現するもので、実用面からも非常に有効であり、インバータ駆動される空調ファン用ブラシレス DC モータの高性能化、低騒音化、信頼性向上に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。