

学位被授与者氏名	窪田 涼介 (Ryosuke Kubota)
学位の名称	博士 (工学)
学位番号	博 (一) 第 5 4 号
学位授与年月日	平成 3 1 年 3 月 2 0 日
論文題目	高周波電圧信号重畳時の誘導機における磁気飽和突極性と回転子スロット高調波の一次インピーダンス特性に与える影響の考察
論文題目 (英訳または和訳)	Study on Influence of Magnetic Saturation Saliency and Rotor Slot Harmonics on Stator Impedance Characteristics of Induction Machine with High-frequency Voltage Signal Injection
論文審査委員	論文審査委員会 委員主査 : 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻教授 大山 和宏 同審査委員 : 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻教授 井上 昌睦 同審査委員 : 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻教授 倪 宝荣 同審査委員 : 福岡工業大学大学院知能情報システム工学専攻教授 盧 存偉
論文審査機関	福岡工業大学大学院工学研究科
論文内容の要旨 (和文)	<p>誘導機 (IM) は安価かつ堅牢という特長を有することから、鉄道車両、電気自動車及び鉄鋼プラント等の産業用電動機として幅広く利用されている。可変速制御を必要とする用途においては、IM 本来の特長を損なうことなくベクトル制御駆動を実現する技術として速度センサレスベクトル制御法 (センサレス制御法) が考案され実用に供されている。</p> <p>センサレス制御法における技術課題の一つは、零周波数駆動における高精度かつ安定な動作を実現することである。その解決策として高周波電圧信号を重畳した場合に検出可能となる磁気飽和やスロット高調波等の突極性を利用する方式が報告されているが、回転子スロット構造による制約があり、また制御に不要な高周波信号を重畳するために、騒音や高調波電力損失の増大が想定され、これらの課題に対する低減が望まれる。</p> <p>二次磁束推定に利用される磁気飽和に関しては、主磁束位置に加えて漏れ磁束位置においても生じることが知られているが、閉スロット構造の IM を対象とした場合の漏れ磁束飽和突極性を検出し得る重畳信号レベルについての検討は見当たらない。また速度推定に利用されるスロット高調波に関しては、その振幅特性を強める重畳信号レベルに関する詳細な検討は見当たらない。</p> <p>そこで、本論文では閉スロット構造の IM を対象として高周波電圧信号重畳によるセンサレスベクトル制御系において必要となる磁気飽和及び回転子スロットの突極性について、主磁束及び漏れ磁束に起因する磁気飽和のインピーダンス特性への影響を検討するとともに、回転子スロットに起因するスロット高調波の影響を強める高周波電圧信号重畳レベルについて実験的に検討する。また、主磁束及び漏れ磁束に起因する磁気飽和突極性について、その物理現象を解析的に検討するために有限要素法による 2 次元過渡応答磁場解析を実施する。</p> <p>以下に本論文の構成ならびに概要を記す。</p> <p>第 1 章では、本研究の背景として IM の可変速制御技術に関する変遷について述べ、また、これまでに報告されている種々の制御法を記し、本研究の目的を述べる。</p> <p>第 2 章では、IM の回転子スロット構造に対する磁気飽和ならびにスロット高調波の影響について述べるとともに、実機実験によって主磁束及び漏れ磁束に起因する磁気飽和のインピーダンス特性への影響を検討する。また、重畳する高周波電圧信号のスロット高調波への影響を検討し、その影響を強める重畳信号レベルを明らかにする。</p> <p>第 3 章では、第 2 章において実験的に観測された主磁束及び漏れ磁束に起因する磁気飽和突極性について解析的に検討するために磁場解析を実施し、その解析結果から得られるインピーダンス特性を評価するとともに基本波磁束密度に対する重畳信号レベルにおける高周波磁束密度から検討することで、重畳信号レベルと各磁気飽和との関係を明らかにする。</p> <p>第 4 章では、本研究で得られた主要な成果の総括を述べ、また今後の研究課題について記す。</p>

<p>論文内容の要旨 (英文)</p>	<p>Induction machines (IM) are widely used as industrial motors in such applications as electric railways, electric vehicles, and industrial plants due to their low cost and sturdiness. In applications requiring variable speed control, the speed sensor-less vector control method (sensor-less control method) has been devised as technique to realize vector control drive without impairing the original features of the IM. Furthermore, it is practically used in industrial fields.</p> <p>One of the technical problems in the sensor-less control method is realizing high precision and stable operation in zero stator frequency. As a solution to that problem, the method utilizing magnetic saturation and slot harmonics, which can be detected by injecting the high frequency voltage signal, has been proposed. However, in the mentioned method, it is restricted by the rotor slot structure. Also, it is necessary to inject a high frequency signal; therefore, problems such as an increase of harmonic power loss and noise are assumed and the reduction of these problems is desired.</p> <p>The magnetic saturation utilized for the rotor flux estimation is known to occur in the leakage flux position in addition to the main flux position. However, the injected signal level that can detect the leakage flux saturation saliency in the case of the IM with a closed slot structure has not been discussed. Also, for the slot harmonics to be utilized for the rotor speed estimation, the injected signal levels to enhance the amplitude characteristics have not been discussed.</p> <p>In this thesis, the influence of the magnetic saturation and the slot harmonics on the stator impedance characteristics of the IM with a closed slot structure is investigated. The influences on impedance characteristics for magnetic saturations of main and leakage fluxes are investigated, and the high frequency voltage signal injection levels to enhance the slot harmonics caused by rotor slots are investigated. In addition, the 2-D transient magnetic analysis using the finite element method is carried out in order to analytically investigate the magnetic saturation saliency caused by the main and leakage fluxes.</p> <p>In the first chapter, as a background of this research, the transition of variable speed control techniques of the IM and the various control methods are described, and the purposed of this research is described.</p> <p>In the second chapter, the influences of magnetic saturations and slot harmonics on the rotor slot structure of the IM are described. Then, the influences of the magnetic saturations caused by the main and leakage fluxes on the impedance characteristics are investigated. Furthermore, the injected signal levels which enhance the influence of slot harmonics are investigated.</p> <p>In the third chapter, the 2-D transient magnetic analysis is carried out to clarify the relationship between the injected signal level and magnetic saturation saliency caused by main and leakage fluxes.</p> <p>In the fourth chapter, the main results of this research are summarized, and future works are described.</p>
<p>論文審査結果</p>	<p>窪田涼介氏の学位論文の審査及び最終試験の結果について報告する。</p> <p>誘導機 (IM) の基本波モデルを用いて演算する二次磁束の推定位置に基づく速度センサレスベクトル制御系は、零周波数運転時において不安定になることが知られている。そこで高周波電圧信号を重畳することで検出可能となる磁気飽和による突極性やスロット高調波を利用して二次磁束位置を検出する方式が提案されているが、負荷条件や回転子スロット構造により検出精度が変化するので十分な制御性能が得られていない。また重畳される高周波電圧信号によって引き起こされる騒音や電力損失が問題となっている。そこで本学位論文では、磁気飽和の突極性及びスロット高調波の性質を実験的に検証し、理論解析と併せて考察することで、前述の問題を解決するための知見を得ることを目的としている。</p> <p>先行研究において、磁気飽和による突極性は、主磁束位置だけでなく漏れ磁束位置にも生じることが報告されている。しかしながら、閉スロット IM の漏れ磁束による磁気飽和突極性やスロット高調波を強める重畳電圧信号レベルは明らかにされていない。そこで本学位論文では、閉スロット IM を対象として、主磁束及び漏れ磁束</p>

	<p>による磁気飽和のインピーダンス特性への影響を検討するとともに、回転子スロットに起因するスロット高調波の影響を強める高周波電圧信号重畳レベルを実験的に検証している。更に、有限要素法 2 次元過渡応答磁場解析を実施し、実験で明らかにした主磁束及び漏れ磁束に起因する磁気飽和突極性の特性を考察している。</p> <p>本学位論文の構成は、次の通りである。第 1 章において、研究背景として IM の可変速制御技術に関する変遷、先行研究による各制御法の特徴を概説し、本研究の目的を述べている。第 2 章において、IM の回転子スロット構造に対する磁気飽和ならびにスロット高調波の影響について述べ、実機実験によって主磁束及び漏れ磁束に起因する磁気飽和のインピーダンス特性への影響を検討している。更に、重畳する高周波電圧信号のスロット高調波への影響を検討し、スロット高調波を強める重畳電圧信号レベルを明らかにしている。第 3 章において、実験的に観測された主磁束及び漏れ磁束に起因する磁気飽和突極性について解析的に検討するために有限要素法過渡磁場解析を実施し、その解析結果から得られるインピーダンス特性を検討している。また基本波磁束密度に対する重畳信号レベルにおける高周波磁束密度を検討することにより、重畳電圧信号レベルと各磁気飽和との関係を明らかにしている。第 4 章において、得られた研究成果を総括し、今後の研究課題について述べている。</p> <p>本学位論文で述べられた研究成果は、博士後期課程在学期間において、査読付き学術論文 1 編（第 1 著者 1 編）、査読付き国際会議プロシーディングス 2 編（第 1 著者 2 編）として公表されている。</p> <p>学位論文審査委員会は、以上の学位論文における研究成果が十分な新規性と有用性を有しているか慎重に審査し、学位論文として適合していると判定した。</p> <p>学位論文公聴会では、論文内容に関する種々の工学的及び技術的な質問があったが、窪田涼介氏は何れも適切に回答できた。最終試験における質疑応答においても、同氏が学位論文に関連する分野の学識を有し、十分な研究能力を備えていることが確認できた。</p> <p>以上の結果から、学位審査委員会は本学位論文が博士（工学）の学位に適格であると判定した。</p>
<p>主な研究業績</p>	<p>参考論文 9 編 1 冊 査読付論文</p> <ol style="list-style-type: none"> 「高周波電圧信号重畳による誘導機センサレスベクトル制御系で利用する磁気飽和と回転子スロットが一次インピーダンスに与える影響の実験的検証」, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), 139 巻, 3 号 (掲載決定) 著者: <u>窪田涼介</u>, 大山和宏 <p>国際会議論文 (査読有り)</p> <ol style="list-style-type: none"> “Investigation of Impedance Characteristics on Main and Leakage Flux Saturation by High Frequency Voltage Signal Injection for Induction Machines”, International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST), (2018) Authors : <u>Ryosuke Kubota</u>, Kazuhiro Ohyama “Investigation of Impedance Characteristics for Induction Machines with High Frequency Voltage Signal Injections”, International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), (2018) Authors : <u>Ryosuke Kubota</u>, Kazuhiro Ohyama <p>国内学会論文</p> <ol style="list-style-type: none"> 「負荷試験による誘導機基本波モデルの検証」, モータドライブ/回転機/自動車合同研究会, (2016) 著者: <u>窪田涼介</u>, 大山和宏 「ベクトル制御駆動時における誘導機の基本波モデルの検証」, 電気学会産業応用部門大会講演論文集, (2016) 著者: <u>窪田涼介</u>, 大山和宏

- | | |
|--|---|
| | <ol style="list-style-type: none">6. 「零周波数運転時における誘導機基本波モデルの評価」,
電気学会産業応用部門大会講演論文集, (2017)
著者: 窪田涼介, 大山和宏7. 「誘導機の高周波電圧重畳による磁気飽和時のインピーダンス特性」,
電気・情報関係学会九州支部連合大会講演論文集, (2017)
著者: 窪田涼介, 大山和宏8. 「高周波電圧信号重畳時の誘導機インピーダンス特性への磁気飽和と回転子スロットの影響」,
マグネティックス/モータドライブ/リニアドライブ合同研究会, (2017)
著者: 窪田涼介, 大山和宏9. 「2次元過渡応答磁場解析による磁気飽和が誘導機の一次インピーダンスに与える影響の考察」,
マグネティックス/モータドライブ/リニアドライブ合同研究会, (2018)
著者: 窪田涼介, 大山和宏 |
|--|---|