



Title	永久磁石モータの鉄心の製造過程並びに製造ばらつきを考慮したコギングトルク解析に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	山口, 信一
Citation	北海道大学. 博士(工学) 乙第7060号
Issue Date	2018-09-25
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/71920
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Type	theses (doctoral - abstract and summary of review)
Additional Information	There are other files related to this item in HUSCAP. Check the above URL.
File Information	Shinichi_Yamaguchi_abstract.pdf (論文内容の要旨)



[Instructions for use](#)

学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士(工学) 氏名 山口 信一

学位論文題名

永久磁石モータの鉄心の製造過程並びに製造ばらつきを考慮したコギングトルク解析に関する研究
(Study on Cogging Torque Analysis of Permanent Magnet Motor Considering Manufacturing
Process of Magnetic Core and Manufacturing Variation)

産業用や車載用などの分野でサーボ用途に使用される永久磁石モータに対しては、位置決め精度の向上や騒音・振動低減の観点から、コギングトルク低減への厳しい要求がある。しかしながら、近年の小型・高出力密度化要求に伴う高磁束密度設計により、実際に製造されたモータでは、設計段階とは異なる振幅や脈動数成分を有するコギングトルクが発生する。コギングトルクは固定子の鉄心と回転子の永久磁石の相互作用によって発生するため、コギングトルクの低減には、固定子の鉄心の打ち抜きや磁気異方性などの鉄心の製造過程を考慮して鉄心の磁気特性を正確に把握することが必要となる。更に、永久磁石などの部品の製造ばらつきによってもコギングトルクが発生するため、製造ばらつきに起因して発生するコギングトルクを設計段階で定量化することが必要となる。

本論文では、永久磁石モータの製造過程並びに製造ばらつきに起因するコギングトルクに関し、設計段階で定量化する方法を検討し、その妥当性を実験的に検証した結果をまとめたものであり、全6章から構成されている。

第1章は序論として、サーボモータの適用範囲の拡大、永久磁石モータの利点と課題、コギングトルクに関する研究動向について述べている。次に本研究の対象であるコギングトルク解析の動向や製造ばらつきに起因するコギングトルクの研究動向についてまとめると共に、本研究の目的と位置づけを示し、本論文の内容を概説している。

第2章では、永久磁石モータのコギングトルクの発生条件についてまとめている。製造ばらつき等による非対称性がなく理想的に製造された永久磁石モータのコギングトルクの脈動成分は、固定子のスロット数と磁石の極数の最小公倍数に対応した脈動成分が発生することを述べた。一方、固定子に製造ばらつきが生じた場合のコギングトルクの脈動成分は、回転子磁石の極数に対応した成分であり、回転子に製造ばらつきが生じた場合のコギングトルク脈動成分は、固定子のスロット数に対応した成分となることも述べた。固定子のスロット数と回転子の極数に対応したコギングトルク成分は、鉄心形状や磁石形状を最適な形状とすることで最小化が可能となるが、鉄心の磁気特性を正確に把握することが必要であることを述べ、製造ばらつき等による非対称に起因するコギングトルクについては、非対称性を精度良くモデル化することが必要であることを述べている。

第3章では、鉄心の製造過程として鉄心打ち抜きに着目し、鉄心打ち抜き時に発生する加工劣化を考慮する解析手法を提案している。提案手法を用い、打ち抜きにより製作した単板試験片での磁気特性測定結果との比較により、その有用性を検証すると共に、鉄心打ち抜きが永久磁石モータの基本性能に与える影響について検討した。鉄心打ち抜き時に発生する塑性歪は、切断部近傍で大きくなっており、電磁鋼板の板厚のおよそ1/2の範囲に分布している。更に鉄心打ち抜き時に発生する応力は、引張応力と圧縮応力の両応力が発生しており、連携解析時には応力の考慮方法が重要となる。応力を考慮して磁界解析を行う方法について検討した結果、絶対値が最大の主応力成分を用い

ることで試作した試料幅 6~30mm の単板試験片の磁気特性を精度良く表現することが可能であることが分かった。また、永久磁石モータを対象として、鉄心打ち抜き加工を考慮した解析を行うことで、提案手法はモータの磁界解析への適用が可能であることを示している。更に、鉄心打ち抜きによる磁気特性劣化がモータ性能に与える影響について検討した結果、鉄心打ち抜きの影響により鉄心内部の磁束密度分布が変化し、コギングトルクや鉄損が増加することを示している。

第 4 章では、鉄心材料の磁気異方性に着目し、磁気異方性に起因するコギングトルクについて実機および解析により検討を行っている。磁気異方性のモデル化手法としては、従来法および 2 次元磁化法を用いた。鉄心材料として、高グレード材および低グレード材の 2 種類の磁気特性を測定し、これらを用いた磁界解析を行っている。本論文では、円状のコアを用いてモータを製造した場合に磁気異方性の影響が顕在化する一例として、10 極 12 スロットのモータについてコギングトルク解析および実験的に検証を行っている。検証の結果、磁気異方性の影響により、2 次成分のコギングトルクが発生し、その振幅は磁気異方性がない場合に生じる 12 次成分コギングトルクのおよそ 40 倍の大きさとなっている。このコギングトルク 2 次成分は、永久磁石の残留磁束密度の増加に伴い、磁気異方性が顕在化するため、増加することを示した。また、コギングトルク 2 次成分の大きさは、磁気異方性のモデル化手法により異なり、2 次元磁化法を用いることでより高精度に模擬することが可能であることを示している。更に、低グレード材を用いた場合のコギングトルク 2 次成分は、高グレード材を用いた場合よりも小さくなり、磁気異方性がコギングトルクに与える影響に関しては、高グレード材ほど顕在化することを示している。

第 5 章では、製造ばらつきに起因するコギングトルク成分の定量化検討のため、永久磁石モータの回転子および固定子の非対称性 (製造ばらつき) によって発生するコギングトルク成分をトルクベクトルを用いて簡易計算する方法とその発生確率の算出方法の提案を行い、磁界解析結果との比較検証を行っている。検証の結果、製造ばらつきによって発生するコギングトルクは、各磁石および鉄心各部に発生するトルクに着目したトルクベクトルの活用により計算可能であり、製造ばらつきを考慮した 1 ケースの磁界解析により算出したコギングトルク感度係数を用いることで簡易計算が可能であることを示した。また、トルクベクトルを用いた簡易計算手法は、磁石の残留磁束密度ばらつき、磁石中央厚さばらつき、貼り付け位置ばらつき、スロット開口幅ばらつきについても適用可能であり、提案手法の有用性を確認している。更に、トルクベクトルを用いた簡易計算方法を用いることで、一様分布や正規分布等の任意の製造ばらつき条件を考慮したコギングトルクの発生確率分布の算出が可能となることを示し、コギングトルクの発生確率は、ばらつき分布条件や公差範囲によって変化することを確認している。本手法により、モータの設計公差を容易に決定することが可能となることを述べている。

第 6 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約するとともに、今後取り組むべき課題と将来の展望を述べている。