

学 位 論 文 の 要 旨

かご形誘導電動機の高精度性能算定に向けた評価技術の研究

(Studies on evaluation techniques for high precision performance prediction of a squirrel - cage induction motor)

氏 名 松下 真琴 印

かご形誘導電動機は産業機器から家電に至るまで非常に幅広いアプリケーションで利用されている。近年、高効率化を始めとし、小形化、低騒音化、低振動化への要求は非常に強く、それら要求に適合させていくためには、かご形誘導電動機全体を捉えた高性能化が必要である。本論文では、かご形誘導電動機を高性能化するにあたり、トルク特性を実用的な精度で予測するための回路定数計算技術と環境負荷を低減するための低騒音化、低振動化に向けた評価技術の研究を行った。

第1章では、本研究の背景となる技術的な動向および目的を述べ、本研究の意義、位置づけを明らかにした。

第2章から第4章では全閉スロット誘導電動機の二次側回路定数（二次側抵抗・二次側漏れインダクタンス）や励磁インダクタンス計算の高精度化について研究した。

第2章では、全閉スロット誘導電動機の回転子ブリッジ部インダクタンスに着目し、回転子バー電流に対する変化を明らかにすると共に、精度よく求めるための研究を行った。まず、3相・4P・0.75kW・200V・50Hzの全閉スロット誘導電動機の回転子単体を利用し、サーチコイルを用いて回転子バー電流に対する回転子ブリッジ部インダクタンスの変化について実測を行った。その結果、全閉スロット誘導電動機のブリッジ部インダクタンスは、鉄心に使用されている電磁鋼板の透磁率曲線（ $\mu - H$ ）カーブと同様に変化することを明らかにした。次に、この実測を有限要素法による磁界解析を用いて模擬し、得られた磁気エネルギーと磁気随伴エネルギーを用いてブリッジ部インダクタンスを計算する手法を新たに提案した。これまで提案されているブリッジ部インダクタンスの計算手法では、回転子バー電流が小さくなる場合、ブリッジ部インダクタンスは無限大となり、実測と大きく異なるが、提案手法を用いると、ブリッジ部インダクタンスは実測と同様な変化が得られる。また、全閉スロット誘導電動機のブリッジ部インダクタンスを簡便で、精度よく計算

できる等価 $B-H$ 法も提案した。これにより求められた等価 $B-H$ 曲線を誘導電動機的设计計算に含めることにより、全閉スロット誘導電動機のブリッジ部インダクタンスをこれまで以上に精度よく求めることができるようになった。

第 3 章では、同全閉スロット誘導電動機を検討対象とし、三次元非線形有限要素法解析を用い、滑りに対する回転子漏れインダクタンスや回転子抵抗の変化について研究した。その結果、回転子漏れインダクタンスは、滑りに対し大きく変化し、滑りが低い領域では、ブリッジ部インダクタンスが大部分を占めていること、第 2 章で述べた磁気エネルギーおよび磁気随伴エネルギーから算出した回転子漏れインダクタンスや、回転子バーとエンドリングに発生する損失から算出した回転子抵抗は、無負荷試験や拘束試験から得られる値とほぼ一致することを示した。

第 4 章でも、第 2 章で扱った全閉スロット誘導電動機を検討対象とし、三次元非線形過渡解析と二次元非線形静解析を用いて、滑りに対する励磁電流や励磁インダクタンスの計算方法やそれらの変化について研究した。その結果、励磁電流は滑りが増加するに従い減少し、励磁インダクタンスは滑りに対しほぼ一定となることを示した。これまでの研究で得られた各滑りにおける二次側回路定数や励磁インダクタンスを利用することにより、従来の回路定数を一定として扱う特性計算よりも実際のトルク特性を精度よく予測することが可能であることを示した。

第 5 章から第 6 章ではかご形誘導電動機の低騒音化、低振動化に向けた電磁力、電磁力空間分布および固定子固有振動数の変化について研究した。

第 5 章では、かご形誘導電動機における高調波電磁力と高調波電磁力空間分布（モード）について飽和を考慮して研究した。4P - 2.2kW - 200V - 50Hz のかご形誘導電動機を検討対象とし、測定、解析および数式による計算結果から、スロット高調波成分の電磁力のモードは数式により算出されたモード数の最小値と一致すること、モード次数は、周波数が増加するに連れて、一様に増加しないことを明らかにした。また、鉄心の飽和による磁束に起因した電磁力の周波数については、基本波の磁束と飽和に関係する奇数次磁束の周波数から計算されることも明らかにした。

第 6 章では、振動・騒音の低減に重要な役割を担うかご形誘導電動機の機械的な固有振動数について、単純なリング形状から鉄心や巻線の入った固定子を経て、電動機に至る各段階での変化について研究した。鉄心の外周部カットや巻線端の付加など形状や構成が複雑になるにつれて、固有振動数の数が増加するとともに、固有振動数が低下することを体系的に明らかにした。低振動や低騒音のかご形誘導電動機を開発するには、固定子鉄心などの構造物の形状を極力単純で対称的なものにすればよいことを示した。

第 7 章では、本研究で得られた結果を要約し、まとめとしている。

Studies on evaluation techniques for high precision performance prediction of a squirrel - cage induction motor

Makoto Matsushita

Squirrel - cage induction motors are used in a wide range of applications from industrial equipment to home appliances. In recent years, the demands for downsizing, noise reduction, and vibration reduction are extremely strong, in addition to high efficiency. In order to meet these requirements, it is necessary to improve both the electrical and mechanical characteristics of squirrel - cage induction motors rather than to improve the electrical and mechanical characteristics respectively. In this thesis, I studied a circuit constant computation technique for predicting their torque characteristics with high accuracy and an evaluation technique to lower noise and vibration of them for reduction of environmental impact in order to improve the performance.

In chapter 1, the technical trends, the technical objectives, the significance, and the position of this research were discussed.

In chapter 2 to 4, I studied some methods to calculate the secondary circuit constants (secondary resistance and secondary leakage inductance) and the magnetizing inductance of a closed - slot induction motor with high accuracy.

In chapter 2, I focused on the bridge leakage inductance of a closed - slot rotor. At first, I examined how the bridge leakage inductance changes with respect to the rotor bar current by a search coil, using an only closed - slot rotor of 3 phases - 4P - 0.75kW - 200V - 50Hz induction motor. It was confirmed that it changes similarly to the permeability - magnetomotive force ($\mu - H$) curve of the iron core. Then, I simulated this experiment by using magnetic field analysis and newly proposed a method to calculate it with magnetic energy and magnetic co - energy obtained from magnetic field analysis. In the bridge leakage inductance calculation method proposed so far, when the rotor bar current is low, it becomes infinite, which is greatly different from the actual measurement results. However, using the proposed method, the bridge leakage inductance has the same change as the actual measurement results. Furthermore, an equivalent B - H method to calculate it easily and accurately was also proposed. By including the equivalent B - H curve obtained from using this method in the design calculation of the induction motor, it could be calculated more accurately than ever.

In chapter 3, I investigated the same closed - slot induction motor as discussed in

chapter 2. I analyzed how the rotor leakage inductance and the rotor resistance change with respect to the slip of the motor by using three - dimensional nonlinear finite element method analysis. The following outcomes were obtained.

- 1) The rotor leakage inductance changes greatly with slip, and in the low slip region, the bridge leakage inductance is dominant.
- 2) The rotor leakage inductance, which is calculated from magnetic energy and magnetic co - energy mentioned in chapter 2, and the rotor resistance, which is calculated from the losses generated in the rotor bars and end rings, are almost the same as those values obtained from the no load test and the locked rotor test.

In chapter 4, the closed - slot induction motor used in chapter 2 was examined again. I studied a calculation method of magnetizing current and magnetizing inductance and calculated their changes with respect to slip by using three - dimensional nonlinear transient analysis and two - dimensional nonlinear static analysis. As a result, it was shown that the magnetizing current decreases as slip increases and that the magnetizing inductance becomes almost constant for slip. In addition, it was indicated that the torque characteristics can be calculated more accurately by using the secondary circuit constants and the magnetizing inductance for each slip obtained in the previous studies rather than using conventional circuit constants.

In chapters 5 to 6, I studied the electromagnetic force and electromagnetic force spatial distribution, and the changes in stator natural frequency to reduce noise and vibration of squirrel cage induction motors.

In chapter 5, I investigated the harmonic electromagnetic force and the harmonic electromagnetic force spatial distribution (mode) of squirrel cage induction motors, taking into account the saturation. From the measurement, analysis and mathematical formula calculations using a squirrel cage induction motor of 4P - 2.2kW - 200V - 50Hz, it was found that the mode of electromagnetic force due to slot harmonic coincides with the minimum value of the number of modes calculated by the mathematical formula. And it was found that the mode order does not uniformly increase as the frequency increases. Furthermore, it was also clear that the frequency of the electromagnetic force caused by the magnetic flux due to saturation of the iron core can be calculated from the frequency of the odd order magnetic flux related to fundamental magnetic flux and its saturation.

In chapter 6, I examined the mechanical natural frequency of the squirrel cage induction motor at each stage from the simple ring shape to the motor through the stator with the iron core and the winding. It was revealed that the number of natural frequencies increases and the natural frequency decreases as the shape and

configuration becomes complicated such as the outer circumference cutting of the stator core and the existence of the end - winding. In order to develop squirrel cage induction motors with low vibration and low noise, it was shown that the shape of the structures such as the stator core should be as simple and symmetrical as possible.

In chapter 7, the results obtained in this thesis were summarized as a conclusion.