

三相かご形誘導電動機の漏れインダクタンスと 誘導起電力の算出について

柿木 稔男* 篠原 勝次** 福丸 伸吾***

Calculation of Leakage Inductance and Induced Voltage of
Three-Phase Squirrel Cage Induction Motor

Toshio KAKINOKI, Katsuji SHINOHARA and Shingo FUKUMARU

Three-Phase Squirrel Cage Induction Motor is widely used in Industry. In case of induction motor, leakage inductance is important for deciding characteristic of machine. Therefore, if leakage inductance is able to calculate accurately, calculated characteristic and actual characteristic become approximation. As calculation method of leakage inductance, sum of primary and secondary leakage inductance are able to calculate from measurement. However, it is difficult to separate. Leakage inductance can be calculated from calculation formula. And there is the method that calculates it from finite element method (FEM). In addition, Induced voltage of a Rotor is important to calculate leakage inductance. Result is compared with the value that calculated from calculation formula and experiment. The calculated results by FEM agreed well with the experimental values than the conventional calculation results and the effectiveness of the calculation method by FEM was confirmed.

Keywords : Three-Phase Squirrel Cage Induction Motor, Leakage Inductance, Induced Voltage, Finite Element Method (FEM)

1. まえがき

誘導電動機は年々、小型・高出力化してきており、また信頼性・運転・制御性能に優れていることから、様々な分野で多く用いられている電動機の一つである。その中でもかご形誘導電動機は、丈夫で使いやすく安価であるので産業用として多用され、インバータ駆動の普及に伴ってその応用範囲も広がっ

てきている。近年は、環境問題の観点から効率の向上、騒音や振動の低減を考慮した電動機設計および過渡状態における特性解析など、電動機内部の詳細な特性解析が求められている。

前回の報告¹⁾で三相かご形誘導電動機を詳細に解析する為に必要な多くのパラメータと従来の漏れインダクタンスの計算および有限要素法での漏れインダクタンスの計算を述べた。本論分では誘導電動機の励磁インダクタンスを求め、また、定格速度時において、スキューを考慮した場合とスキューを無視した場合の誘導起電力を算出し、さらに検討を行ったので報告する。漏れインダクタンスの計算は、実測による場合、一次と二次の漏れインダクタンスを別々に求めることが困難であり、また従来の計算式

2006年8月31日受理

* 博士後期課程システム情報工学専攻(社会人)
(崇城大学)

** 電気電子工学科

*** 博士前期課程電気電子工学専攻

では、漏れ磁束の経路が複雑であり、導体内の電流分布が一様でないため多くの仮定が必要となる。有限要素法を用いる場合には、磁気飽和や表皮効果、高調波等を考慮することができ細かく分類し算出することができる。漏れインダクタンスに関する分類及び従来の計算式は文献2)～6)に述べられているが、本論文における漏れインダクタンスの分類および、計算は前回と同様、文献2)を参考にしている。

表-1 三相かご形誘導電動機の仕様

定格出力	1.5[kW]	定格電圧	180[V]
定格電流	6.7[A]	周波数	60[Hz]
極数	4	ギャップ長	0.3[mm]
固定子		回転子	
外径	190.0[mm]	外径	119.4[mm]
鉄心長	105.0[mm]	鉄心長	100.6[mm]
スロット数	36	スロット数	28
1スロットあたりの巻数	34	スキュー	9.69°
コイル端長	118.0[mm]	エンドリング長	5.6[mm]
		エンドリング幅	20.8[mm]

2. 解析モデル

表-1 に三相かご誘導電動機の仕様を示す。定格出力は 1.5[KW]、極数は 4 極、7/9 短節重ね巻である。図-1 に今回用いた三相かご誘導電動機の寸法図を示す。固定子コイルスロット内に巻線分布を示した。図-2 にスロットの寸法図を示し、図-3 に端部拡大図を示す。

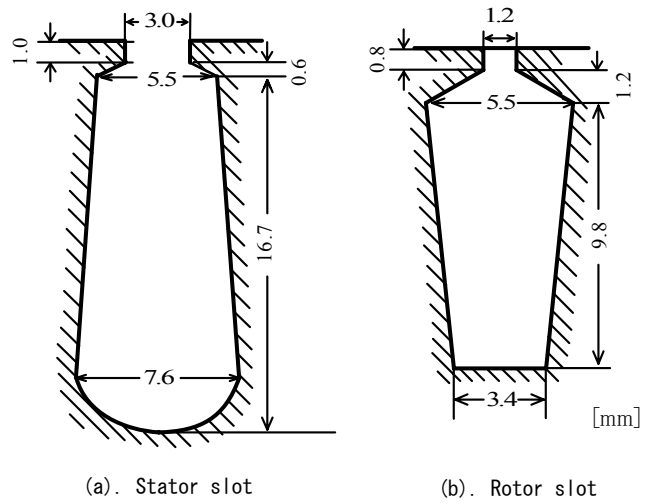


図-2 スロットの寸法図

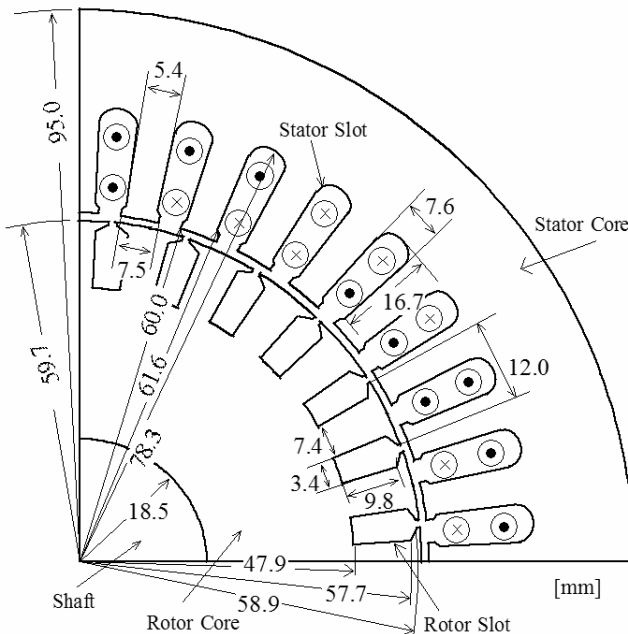
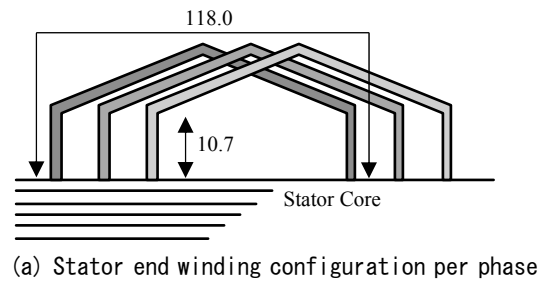
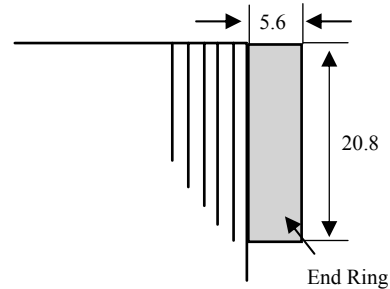


図-1 三相かご形誘導電動機の寸法図



(a) Stator end winding configuration per phase



(b) Rotor end ring configuration

図-3 端部拡大図

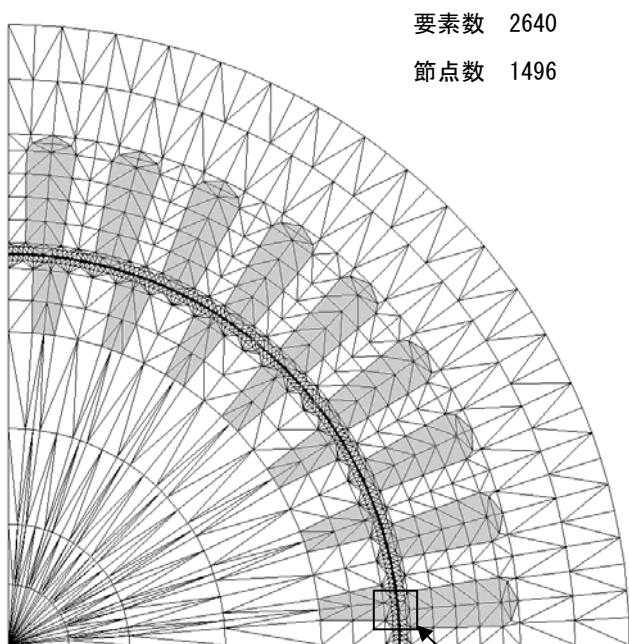
本論文では漏れインダクタンスをスロット漏れインダクタンス、コイル端漏れインダクタンス、エンドリング漏れインダクタンス、空間高調波漏れインダクタンス、スキュー漏れインダクタンスのように分類した。スロット漏れと空間高調波漏れインダクタンスは二次元有限要素法により、コイル端漏れインダクタンスは三次元有限要素法よ

り求めた。簡単化のため鉄心の積厚は、固定子、回転子ともに同一として回転子の値を使用した。また、従来の計算式および実験より漏れインダクタンスを算出した。いずれもスキューを施した場合とそうでない場合の値を求めた。

3. 誘導起電力の算出

図-1 のモータ寸法図をもとに、二次元有限要素法を用いて磁界解析を行った。解析は効率と対称性を考慮して 1/4 モデルとした。図-4 に二次元要素分割図を示す。要素数は 2640、節点数は 1496 である。図-5 は図-4 において四角で囲んでいるギャップ部を拡大表示したものである。ギャップ部は径方向に 4 分割、周方向に 126 分割されており、径方向の 4 分割のうち、上 2 層を固定子側ギャップ、下 2 層を回転子側ギャップとした。

解析は、固定子コイルに実効値 1.29A の三相正弦波電流を強制電流として与え、定格速度 1750rpm(すべり 0.0278)、1 ステップ当たりの刻み時間を 0.068ms で行った。また、要素の歪みを避けるため、回転子をギャップ要素毎に回転させ解析を行っている。このため、スキューを考慮する際には、固定子に対して回転子位置をそれぞれギャップ 2 要素分 (1.43 度) ずつずらすことで、8 個の断面を考え、実



ギャップ拡大図 (図-5)

図-4 二次元要素分割図

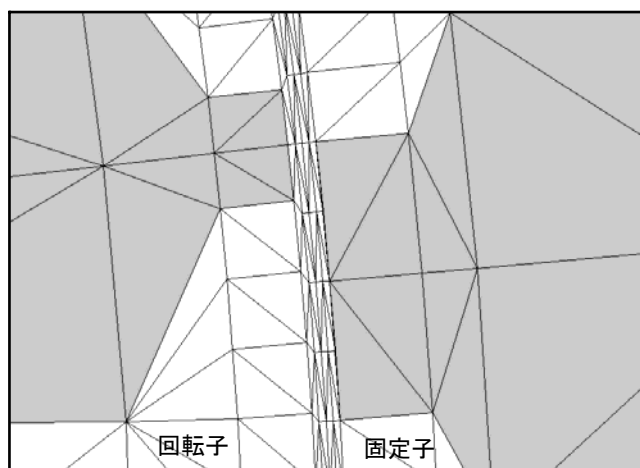


図-5 ギャップ部拡大図

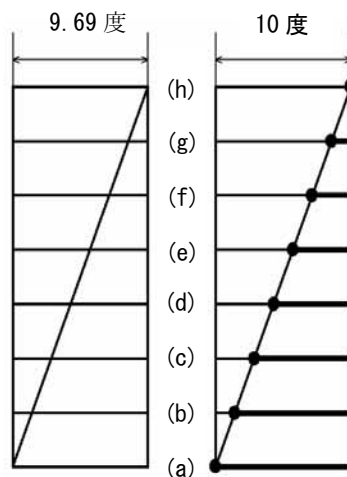
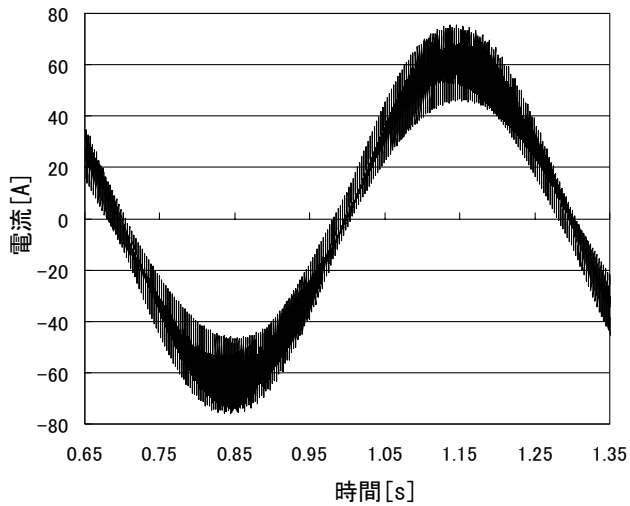


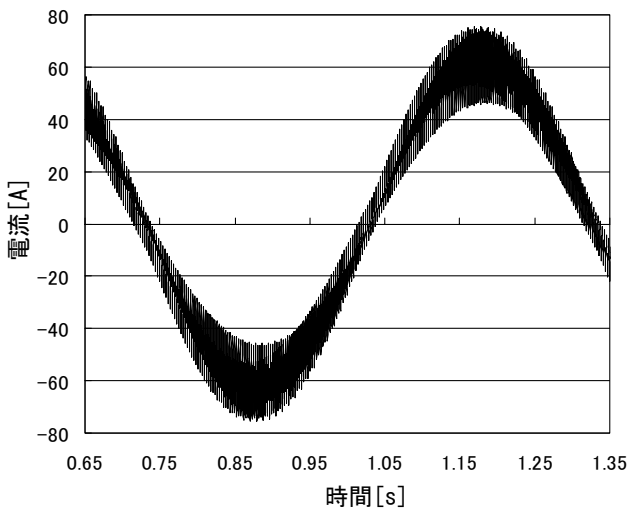
図-6 スキューの考慮

表-2 誘導起電力の計算に使用したパラメータ (L 形等価回路定数)

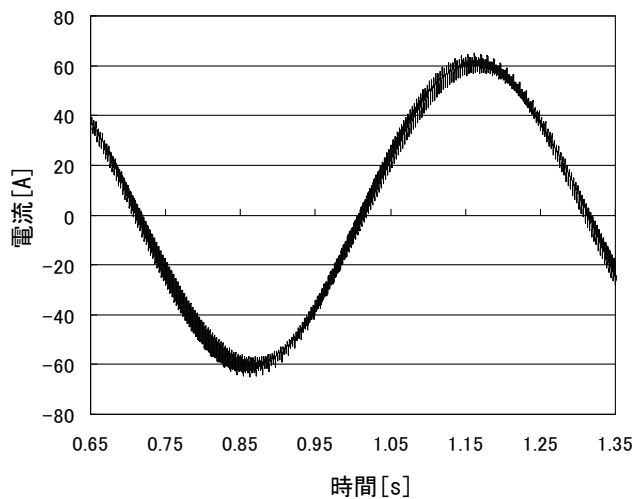
一次抵抗 r_1 [Ω]	0.664
二次抵抗 r_2' [Ω]	0.572
リアクタンス $x_1 + x_2'$ [Ω]	1.71
励磁コンダクタンス g_0 [S]	0.00412
励磁サセプタンス b_0 [S]	0.0302



(a) スキュー無視時 (断面 (a))



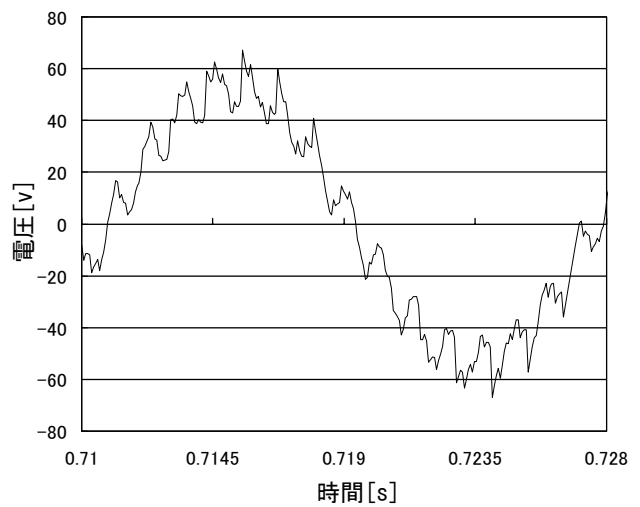
(b) スキュー無視時 (断面 (h))



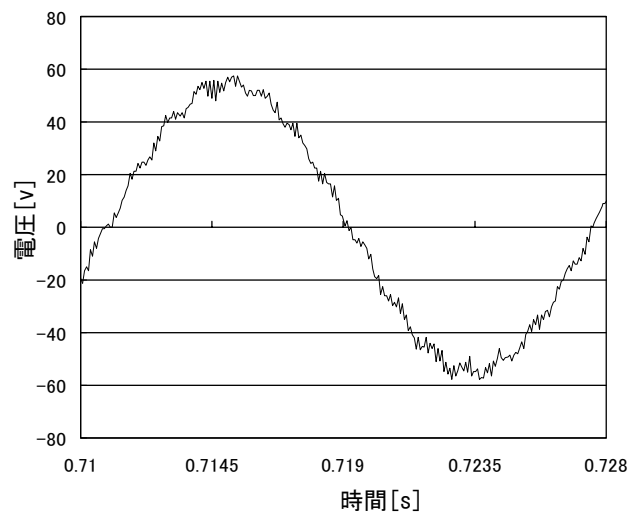
(c) スキュー考慮時

図-7 回転子電流波形

機のスキュー角 9.69 度に最も近いスキュー角 10 度のモデルを作成した。図-6 に二次元でのスキューの考慮を示す。各モデルより回転子電流を求め、それらの積分平均をスキューを考慮したときの回転子電流とし、これを強制電流として再び各モデルに与え、解析を行った。得られた結果を積分平均することでスキューを模擬した。図-7 に図-4 における断面(a)、(h)より得られた回転子電流波形およびスキューを考慮した場合の回転子電流波形を示す。回転子電流は固定子に対して、回転子位置を 10 度ずらす



(a) スキュー無視時 (断面 (a))



(b) スキュー考慮時

図-8 誘導起電力波形の比較

ことにより、位相が20度遅れていることがわかる。

誘導起電力は電流の往路スロットおよび復路スロットのベクトルポテンシャルより鎖交磁束を求め、これを解析ステップの時間変化分で割り、スロットの巻数を掛けることにより求めた。算出した誘導起電力波形を図-8 に示す。図-8 より誘導起電力の実効値は37.3Vであった。また、L形等価回路から求めた誘導起電力は35.29Vであった。表-2 にL形等価回路定数を示す。

4. むすび

三相かご形誘導電動機の漏れインダクタンスを有限要素法及び従来の計算式から算出し、実験値と比較検討を行った。さらに、定格速度における三相かご形誘導電動機のスキュー無視時及びスキュー考慮時の誘導起電力値を算出した。

回転子電流は8個の断面の個々の計算結果の積分平均をとることで、脈動が抑えられた波形となった。よって、スキューによって脈動が抑えられていることが確認できた。図-8の誘起電圧波形は各相とも回転子スロットの通過毎に高調波成分が基本波に重畳していることがわかる。誘起電圧値は等価回路より求めた計算値とほぼ等しい値となった。

表-3に漏れインダクタンスの比較表を示す。回転子側はスキューを施すことにより、回転子バーの長さが長くなるので漏れインダクタンスの値が増加している。励磁インダクタンスの実験値は計算値より小さくなっている。これらは鉄心の局所的な磁気飽和が原因だと考えられる。

表-3 漏れインダクタンス及び励磁インダクタンスの比較

[mH]

	有限要素法		従来の計算式		実験値
	スキュー無	スキュー有	スキュー無	スキュー有	
固定子スロット漏れ	0.343	0.343	0.286	0.286	
固定子コイル端漏れ	0.290	0.290	0.281	0.281	
固定子空間高調波漏れ	1.26	1.27	1.26	1.26	
スキュー漏れ		1.68	0	0.207	
回転子空間高調波漏れ	1.58		1.47	1.49	
回転子スロット漏れ	0.41	0.42	0.432	0.439	
回転子エンドリング漏れ	0.168	0.168	0.138	0.138	
全漏れインダクタンス	4.05	4.17	3.87	4.1	4.54
励磁インダクタンス				107.1	87.8

参考文献

- 1) 柿木稔男, 篠原勝次, 福丸伸吾: 「三相かご形誘導電動機の漏れインダクタンスの算出について」 鹿児島大学工学部研究報告 第47号, pp.35-39 (2005)
- 2) T.A.Lipo: "Introduction to AC Machine Design", Wisconsin Power Electronics Research Center University of Wisconsin(2004)
- 3) 広瀬敬一: 「電気機器設計 第二次改訂版」, 電気学会, pp.170-177,347-350(1982)
- 4) P.L.Alger: "Induction Machines", Gordon and Breach Science Pub.(1970)
- 5) 執行岩根: 「電気機械設計論 1」, 「電気機械設計論 2」 丸善 (1950)
- 6) 岡村忠雄, 和田重暢, 三好義太郎 共訳: 「電気機械 第3巻」(M.Liwschitz 原著), 修教社書院 (1940)