学術論文

スキュー形状およびロータスロット数が異なるかご形誘導電動機の横流解析

Effects of Shape of Skew and Number of Rotor Slots on Interbar Current of Squirrel-cage Induction Motor

河瀬 順洋*1(会員), 山口 忠*1(会員), 秋山 弘毅*1, 浅井 啓史*1, 古川 智康*2, 河野 寛*2

Yoshihiro KAWASE (Mem), Tadashi YAMAGUCHI (Mem), Kouki AKIYAMA, Hirofumi ASAI
Tomoyasu FURUKAWA, Hiroshi KAWANO

In this paper, we analyzed the interbar current in the steel sheets of squirrel-cage induction motors using the 3-D parallel finite element method and clarify the influences by the difference in the shape of skew and the number of rotor slot on the interbar current.

Keywords: 3-D finite element method, squirrel-cage induction motor, interbar current, skew

(2016 年 11 月 24 日受付, 2017 年 4 月 6 日再受付, 2017 年 4 月 21 日再々受付)

1. 緒言

かご形誘導電動機の二次導体が回転子の積層鋼板との間で絶縁処理されていない場合, 鋼板中に横流が流れる[1]。横流はスキューを施すことで増加し, その原因はスロット高調波の影響が大きいことが報告されている[2]。これまで我々は三次元並列有限要素法を用いて通常スキューを施したかご形誘導電動機の横流解析を行い, 通常スキューが横流に及ぼす影響についての検討を行った[3, 4]。

本稿では, 回転子に異なるタイプのスキューを施したロータスロット数がステータスロット数に近い値として 45, 99 のかご形誘導電動機を解析対象とし, 三次元並列有限要素法を用いて横流解析を行い, スキューの違いとロータスロット数の違いが横流に及ぼす影響を明らかにする。

2. 解析手法

2.1 有限要素法による磁界解析[5]

渦電流を考慮した磁界解析のための基礎方程式は, マクスウェルの電磁方程式より磁気ベクトルポテンシャル A と電気スカラーポテンシャル ϕ を用いて次式で表される。

ここで, ν は磁気抵抗率, J_0 は強制電流密度, J_e は渦電流密度, σ は導電率である。

$$\text{rot}(\nu \text{rot} A) = J_0 + J_e \quad (1)$$

$$J_e = -\sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \text{grad} \phi \right) \quad (2)$$

$$\text{div} J_e = 0 \quad (3)$$

2.2 電氣的損失の算出方法

本解析では, 鋼板に流れる渦電流は, 鋼板に対して垂直に流れる成分がないものとして取り扱った。鋼板で発生する横流の波形は, 磁性体の非線形性により正弦波でなくひずみ波となることから, 横流損 W は渦電流密度 J_e を用いて次式で計算する[2]。

$$W = \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} \left(\int_{V_e} \frac{|J_e|^2}{\sigma^*} dv \right) dt \quad (4)$$

ここで, τ はひずみ波の周期, V_e は横流の流れる導体の領域, J_e は渦電流密度, σ^* は鋼板に垂直な方向の導電率を 0 とした鋼板面内方向の導電率である。

鋼板で発生するヒステリシス損と渦電流損は, 電磁界解析によって得られた磁束密度 B より近似的に算出する[6]。

3. 解析モデルと解析条件

Fig.1 に解析モデルを, Fig.2 に二次導体を示す。本稿では, Fig.1 で示すようにロータスロット数が 45 と 99 のかご形誘導電動機を用いてスキューを施さない場合, 通常スキューを施す場合, V 形スキューを施す場合の合計 6 通りの解析を行う。ロ

連絡先: 河瀬 順洋, 〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1, 岐阜大学 工学部 電気電子・情報工学科

kawase@gifu-u.ac.jp

*1 岐阜大学 *2 豊田自動織機

ータスロット数はステータスロット数に近い 45 と、その 2 倍強の 99 を検討する。また、45 スロットモデルおよび 99 スロットモデルの二次導体に施すスキューの角度は同じスキューの種類の場合、おおよそ等しい値である。解析領域はモデルの周期性により周方向ではすべての場合で全体の 1/3 としている。一方、軸方向の解析領域は、スキューなしおよび V 形スキューを施す場合では、モデルの対称性により全体の 1/2 とし、通常スキューを施す場合では、1/1 としている。

Fig.3 にスキュー量 θ の定義を示す。同じスロ

Fig. 1 Analyzed model (no-skew).

Fig. 2 Secondary conductor.

Fig. 3 Definition of skew amount.

ト数の通常スキューを施す場合のスキュー量と V 形スキューを施す場合のスキュー量は同じとした。

Fig.4 に解析モデルの三次元分割図を示す。回転子鉄心に流れる横流を求めるために回転子を構成する鋼板 1 枚 1 枚を要素分割すると、要素数が膨大となり多大な計算時間を要するため、本解析では Fig.4(b)に示すように一定間隔ごとにある鋼板を鋼板一枚分 (厚み d) で要素分割して横流を考慮した。なお、横流を考慮した鋼板とロータスロットの接触抵抗は 0Ω とした。また、横流を考慮した鋼板と鋼板の間には、厚みが鋼板の 7 枚分に相当する鉄心があり、導電率は 0 とした。この鉄心部分の渦電流損は磁束密度 B を用いて近似計算している。なお、エンドリングと上端部の鋼板の間にはギャップがあり、それらの間で渦電流が流れることはない。なお、図に示す鋼板 A、鋼板 B は後述の解析結果を示す鋼板を表している。

Table 1 にモータの仕様等を示す。

Fig. 4 3-D finite element mesh.

Table 1 Specification of motor.

Number of rotor slots		45	99
Skew type		no-skew normal skew V-skew	
Exciting current (AT)		640	
Conductivity (S/m)	Secondary conductor	3.14×10^7	
	Steel sheet	6.67×10^6	

4. 解析結果と検討

Fig.5 にトルク波形を、Table 2 にロータスロット数ごとの平均トルクとトルクリプルを示す。なお、値は 45 スロットモデルのスキューなしの平均トルク ($T_{ave, no-skew-45}$) の値で正規化している。図と表から、スキューおよび V 形スキューを施したことで、スキューを施さない場合と比較して平均トルクおよびトルクリプルが小さくなっていることがわかる。また、45 スロットモデルと比較して 99 スロットモデルではスキューを施さない場合および V 形スキューを施した場合に平均トルクが減少するが、スキューを施した場合では大きくなっていることがわかる。

Fig.6 に横流密度ベクトル分布を示す。図から、ロータスロット数に関わらず鋼板 A では、通常ス

キューおよび V 形スキューを施す場合、横流が回転子表面を流れているが、スキューを施さない場合、ほとんど流れていないことがわかる。一方、鋼板 B では、通常スキューを施す場合、横流は回転子表面を流れているが、スキューなしおよび V 形スキューを施す場合、ほとんど流れていないことがわかる。また 45 スロットモデルと比較して 99 スロットモデルでは全ての場合で回転子表面を流れる横流が大きくなっていることがわかる。

Fig.7 に鋼板 A および鋼板 B を流れる横流の波形を、Fig.8 に横流の主要高調波成分を示す。図中で示すように横流波形は隣り合うロータバーの間を流れる横流を P から Q までの断面で積分している。なお、値は 45 スロットモデルの鋼板 A でのスキューなしの波形の最大値 ($I_{max, steel sheet A, no-skew-45}$) で正規化している。図から、ロータスロット数に関わらず鋼板 A では V 形スキュー、通常スキュー、スキューなしの順に波形に含まれるリプル成分が小さくなることがわかる。一方、鋼板 B では通常スキューを施す場合の波形に含まれるリプル成分が大きく、スキューなしおよび V 形スキューを施す場合の波形に含まれるリプル成分はわずかであることがわかる。これはスキューによってロータバーの上部と下部で固定子ティースに対する位相差が発生し、それに伴い鋼板中の横流の流れ方が変化したためだと考えられる。また、45 スロットモデルと比較して 99 スロットモデルでは鋼板 A の波形のリプル成分が大きくなっており鋼板 B の通常スキューを施した場合の高調波成分の変化が小さくなっていることがわかる。

Fig.9 にロータスロット数ごとの横流損分布を示す。なお、値は 45 スロットモデルのスキューなしの各鋼板の横流損の合計値 ($Loss_{sum, no-skew-45}$) で正規化している。図から、ロータスロット数に関わらずスキューを施さない場合、回転子軸方向端部に横流損が集中しているが、通常スキューおよび V 形スキューを施した場合と比較してその値は小さいことがわかる。通常スキューを施す場合、回転子軸方向中央部に横流損が集中していることがわかる。一方、V 形スキューを施す場合、回転子軸方向端部と中央部の横流損が小さく、その中間の鋼板に集中していることがわかる。これは Fig.7 に示した横流の流れ方の変化が原因であると考えられる。また 45 スロットモデルと比較して 99 スロットモデルではすべての場合で各鋼板の横流損が大きくなっており特に V 形スキューを施した場合の横流損が大きいことがわかる。

Fig.10 に電氣的損失を示す。なお、値は 45 スロットモデルのスキューなしの電氣的損失の合計値

Fig. 5 Torque waveforms.

Table 2 Average torque and torque ripple ($T/T_{ave, no-skew-45}$)

(a) 45 slot model			
Skew type	no-skew	normal skew	V-skew
Average torque	1.000	0.894	0.955
Torque ripple	0.158	0.020	0.024
(b) 99 slot model			
Skew type	no-skew	normal skew	V-skew
Average torque	0.970	0.908	0.942
Torque ripple	0.048	0.020	0.024

Fig. 6 Distributions of interbar current density vectors.

Fig. 7 Interbar current waveforms.

Fig. 8 Main harmonic components.

($Loss_{total, no-skew-45}$) で正規化している。Fig.10(a)から、45 スロットモデルの場合スキューを施さない場合と比較して通常スキューを施したモデルの二次銅損はおおよそ 83.7%, V 形スキューを施したモデルはおおよそ 92.6%となっていることがわかる。また、通常スキューを施したモデルの横流損はスキューを施さない場合と比較しておおよそ 8.8 倍, V 形スキューを施したモデルはおおよそ 6.7 倍となっていることがわかる。また、45 スロットモデルと比較して Fig.10(b)の 99 スロットモデルの横流損はスキューを施さない場合および通常スキューの場合おおよそ 1.2 倍, V 形スキューの場合おおよそ 1.3 倍となっていることがわかる。

Table 3 に解析諸元を示す。

5. 結言

本稿では、回転子に V 形スキューを施したロータスロット数が 45 と 99 のかご形誘導電動機を解析対象とし、三次元並列有限要素法を用いて横流解析を行い、スキューの違いとロータスロット数の違いが横流に及ぼす影響を明らかにした。その結果、ロータスロット数に関わらず通常スキューを施すことで回転子軸方向中央部に集中していた横流損が、V 形スキューを施したことで回転子軸方向端部と中央部の中間に集中することがわかった。これはスキューによってロータバーの上部と下部で固定子ティースに対する位相差が発生し、それに伴い鋼板中の横流の流れ方が変化したためだと考えられる。また 45 スロットモデルと比較して 99 ロータスロットモデルでは各鋼板の横流損がすべてのスキューの場合で大きくなっていることがわかった。

参考文献

- [1] 「誘導機と同期機の損失評価技術」, 電学技法 No.967, 2004. (in Japanese)
- [2] 山崎克巳, 渡辺裕太:「三次元有限要素法による誘導電動機の横流解析に関する検討」, 電気学会回転機研究会資料, RM-04-113, pp.95-100, 2004.
- [3] 河瀬順洋, 山口忠, 岩井良樹, 樋田直孝, 古川智康:「三次元並列有限要素法によるスキューを施したかご形誘導電動機の横流解析」, 電気学会静止器・回転機研究会資料, RM-14-106/SA-14-90, pp.57-60, 2014.
- [4] 河瀬順洋, 山口忠, 岩井良樹, 秋山弘毅, 樋田直孝, 古川智康:「かご形誘導電動機のロータスロット数が横流へ及ぼす影響の検討」, 電気学会静止器・回転機研究会資料, RM-15-46/SA-15-54, pp.123-126, 2015.

- [5] 伊藤昭吉・河瀬順洋:「最新有限要素法による電気・電子機器の CAE」, 森北出版, 2000
- [6] 山崎克巳:「固定子及び回転子の高調波磁界を考慮した誘導電動機の損失算定」, 電気学会論文誌 D, vol.123, no.4, pp.392-400, 2003.

(a) 45 slot model

(b) 99 slot model

Fig. 9. Distributions of interbar current loss.

(a) 45 slot model

(b) 99 slot model

Table 3 Discretization data and elapsed time

(a) 45 slot model

Skew type	no-skew	normal skew	V-skew
Number of elements	2,568,390	5,201,208	2,568,390
Number of nodes	441,672	884,136	441,672
Number of edges	3,037,023	6,119,539	3,037,023
Total number of time steps	1,067	1,600	
Elapsed time (hours)	190.8 ^{*1}	464.8 ^{*2}	304.9 ^{*3}

Computer used: ^{*1}Intel Corei7 (3.4GHz)× 8^{*2}Intel Corei7 (3.4GHz)×16^{*3}Intel Xeon (3.5GHz)×16

(b) 99 slot model

Skew type	no-skew	normal skew	V-skew
Number of elements	3,814,014	7,721,424	3,814,014
Number of nodes	654,984	1,309,264	654,984
Number of edges	4,507,335	9,075,061	4,507,335
Total number of time steps	1,067	1,600	
Elapsed time (hours)	184.5 ^{*1}	584.9 ^{*2}	325.1 ^{*3}

Computer used: ^{*1}Intel Corei7 (3.4GHz)× 8^{*2}Intel Corei7 (3.4GHz)×16^{*3}Intel Xeon (3.5GHz)×16

Fig. 10 Electrical loss.