

埋込磁石形電動機の d 軸, q 軸インダクタンスの算出 と誘導起電力の解析

小暮 晴美* 篠原 勝次** 野中 章裕***

CALCULATION of d - q AXIS INDUCTANCES and EMF WAVEFORMS of
INTERIOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Haruyoshi KOGURE, Katsuji SHINOHARA, Akihiro NONAKA

Recently, Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) are very favorite. Nowadays, interior type PMSM (IPMSM) have been under adoption. Authors have been proposed a broadened magnet type IPMSM. In this paper L_{ad} and L_{aq} of two type IPMSM calculated by finite element method are exhibited and EMF waveforms obtained by hand-made finite element method program are also exhibited.

Keywords: Permanent Magnet Synchronous Motor, Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, Finite Element Method

1. まえがき

近年永久磁石式同期電動機(PMSM)は産業の広い分野で活用されており,最近では機械的強度の高い埋込磁石形同期電動機(IPMSM)の開発が急な勢いで行われるようになってきている。

筆者らはこのIPMSMの磁石長を延ばすことにより磁束を増加させ,高い出力トルクを得ることを提案し,その制御法を含めて検討してきた(具体例と

して,磁石長32.2mmの解析モデルを元にその磁石の厚さは変えずに磁石長を38.8mmとした解析モデルを提案している)¹⁾。本稿ではこれら二つのモデルについて有限要素法を用いて漏れインダクタンス分を除いた d 軸インダクタンス L_{ad} , q 軸インダクタンス L_{aq} を算出した結果を比較すると共にフォートランで作成した三角要素の有限要素法のプログラムを用いて誘導起電力の解析を行い良好な結果を得たので報告する。

2. 解析モデルの構造

図1は磁石長32.2mmの解析モデルの固定子とロータの1極当たりの断面図である。図2は磁石長32.2mmの解析モデルと磁石長38.8mmとした解析

2002年8月30日受理

* 博士後期課程システム情報工学専攻

** 電気電子工学科

*** 博士前期課程電気電子工学専攻

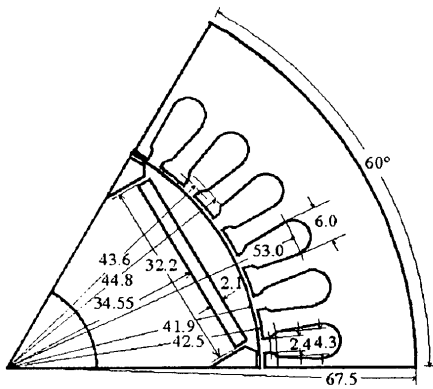


図1 固定子と回転子の断面図

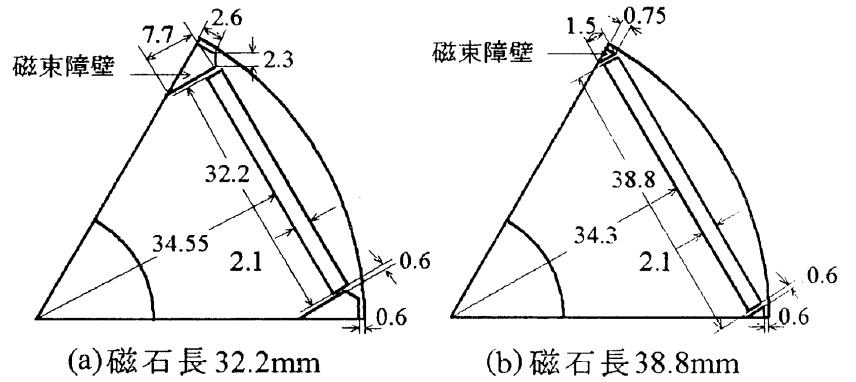


図2 ロータ断面図

要素数 2480
節点数 2542

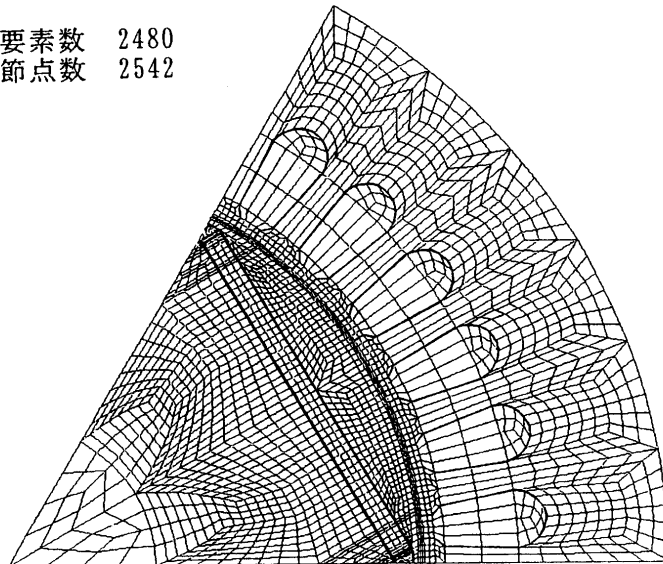


図3 要素分割図(磁石長 38.8mm)

モデルの磁石形状及び、磁束障壁形状の違いを示すロータの1極当たりの断面図である。図3は磁石長 38.8mm 解析モデルの要素分割図である。

3. L_{ad} , L_{aq} の算出方法²⁾

有限要素法の計算に際して、(a) 磁石を空気とし、 q 軸電流のみ流す。(b) 電流は流さずに磁石のみを与える。(c) 磁石を与えると共に d 軸電流を流すそれぞれの場合について、ロータは回さずにギャップ磁束密度を計算し、その基本波成分 B を求め、(1)

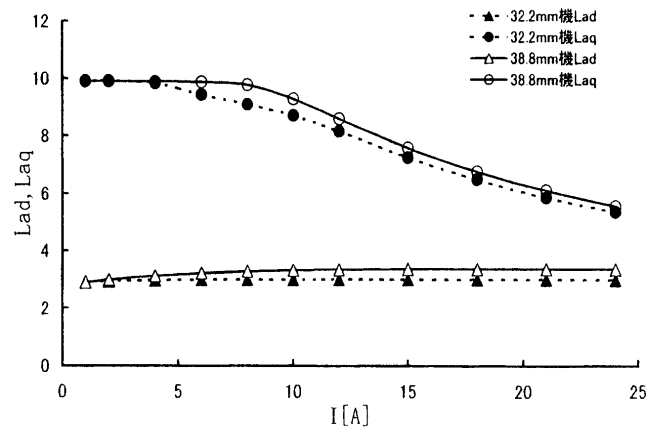


図4 L_{ad} , L_{aq} の特性

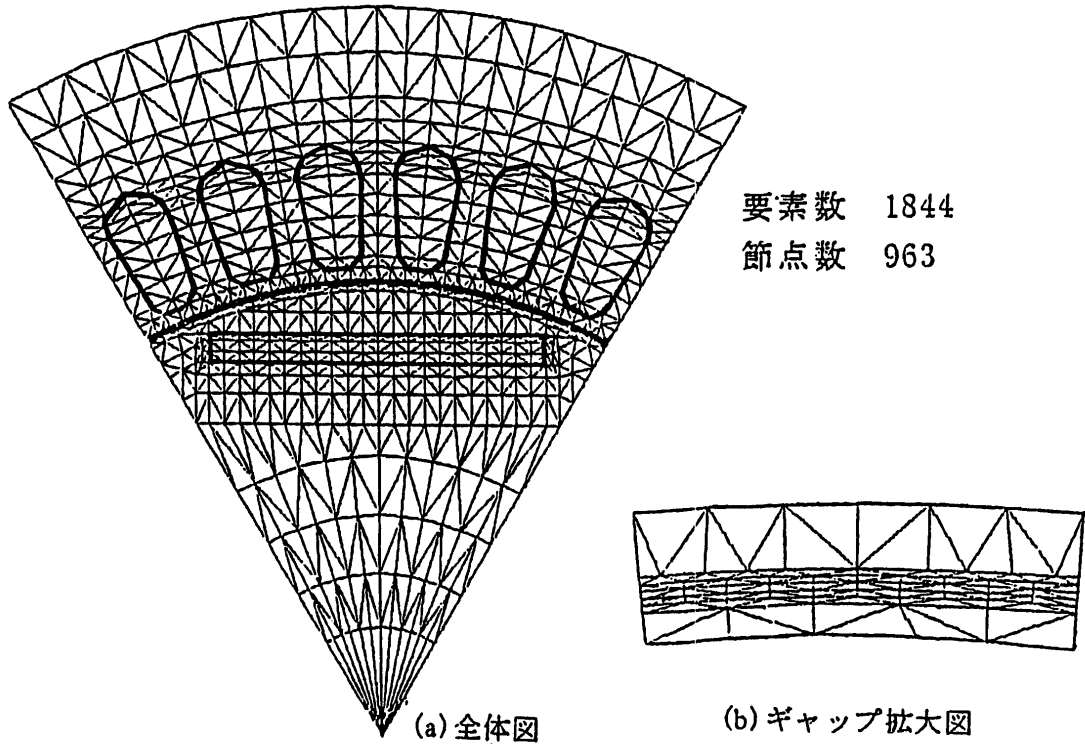


図5 要素分割図

式より起電力の実効値 E_a, E_b, E_c を算出する。

$$E = 2\sqrt{2}\pi N k_w f \frac{D}{P} LB \dots\dots\dots (1)$$

(N : 固定子巻線数, k_w : 巻線係数, f : 周波数,
 D : 回転子外径, P : 極数, L : 固定子鉄心積厚)

この時 L_{aq}, L_{ad} はそれぞれ (2), (3) 式で計算される。

$$L_{aq} = \sqrt{3}E_a / 2\pi f I_q \dots\dots\dots (2)$$

$$L_{ad} = \sqrt{3}(E_c - E_b) / 2\pi f I_d \dots\dots\dots (3)$$

図4に L_{ad}, L_{aq} の算出結果を示す³⁾。

4. 算出結果についての考察

ここで考察している電動機の定格電流としては 8.1[A]を想定しているので d, q 領域における制限電流はその $\sqrt{3}$ 倍に当たる 14.0[A]であることから、電流値のその付近から小さくなる領域において、IPMSM の逆突極性を出力に反映させるリラクタンストルクの前となる d 軸インダクタンス L_{ad} , q 軸インダクタンス L_{aq} の差が磁石長 38.8[mm]解析

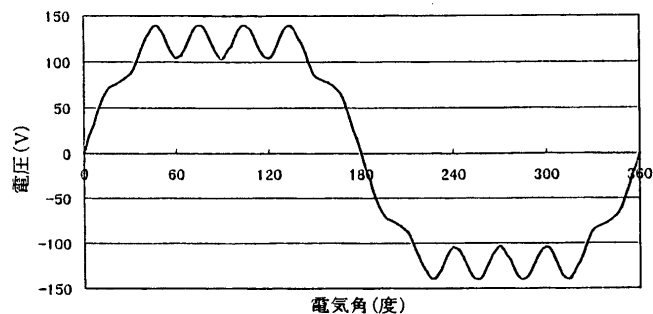
モデルの方が磁石長 32.2[mm]解析モデルよりも大きくなっており提案する方式がこの面でも優れているものと考えられる。

5. 三角要素有限要素法による誘導起電力解析

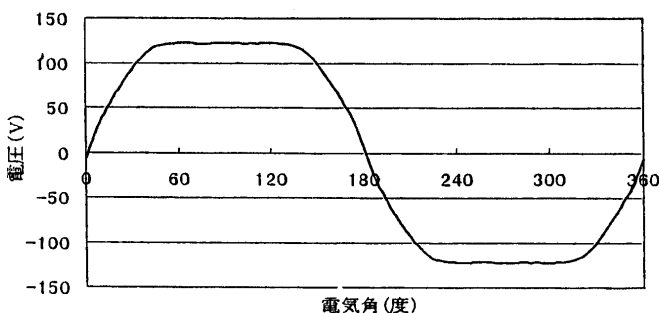
磁石長 32.2[mm]解析モデルについてフォートランを用いて三角要素の有限要素法⁴⁾による解析プログラムを手作りし、誘導起電力の波形を解析した⁵⁾。

図5はこの時の要素分割図であり、(a)は全体図、(b)はギャップ部の拡大図である。要素数は 1844、節点数は 963 である。又、ギャップ部分は半径方向には 5 層、周方向には機械角で 1 度 (電気角で 3 度) を基本とする 60 分割とした。

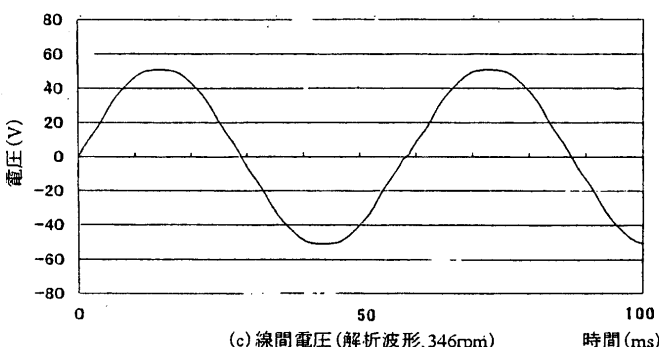
図6にこのプログラムを用いて得られた誘導起電力波形を示した。(a)及び、(b)は夫々、1750[rpm](定格)におけるスキュー無しの場合及び、1 スロットピッチ分のスキューを考慮した場合の相電圧を示し、(c)は 346[rpm]における(b)の波形から求めた線間電圧を示している。又、(d)は実測した 346[rpm]における線間電圧の波形である。



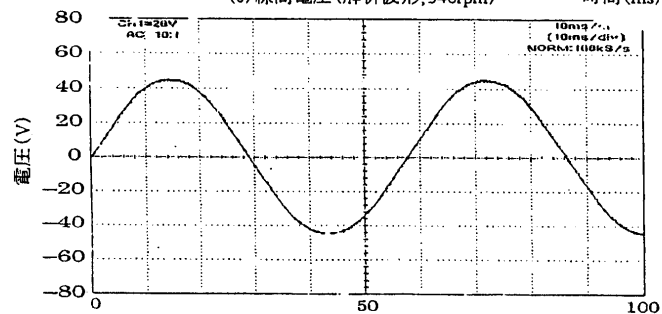
(a) 相電圧(スキュー無し, 1750rpm)



(b) 相電圧(スキュー有り, 1750rpm)



(c) 線間電圧(解析波形, 346rpm)



(d) 線間電圧(実測波形, 346rpm)

図6 誘導起電力波形

6. 解析結果についての考察

図3と図5とを比べると我々が作成したプログラムは要素数で約3/4, 節点数で約1/2.6と言うコンパクトなものであるが図6の(c)の結果が

(d)とかなり良く一致している事から精度的には良好な結果が得られたものと考えられる。

7. まとめ

磁石長 32.2mm の解析モデルと、これを元にその磁石の厚さは変えずに磁石長を 38.8mm とした解析モデルの二つのモデルについて有限要素法を用いて漏れインダクタンス分を除いた d 軸インダクタンス Lad , q 軸インダクタンス Laq を算出した結果を比較すると共に、フォートランで作成した三角要素の有限要素法のプログラムを用いて誘導起電力の解析を行ったが、いずれについても良好な結果を得た。

参考文献

- 1) 小暮・篠原・前田:「磁石長を長くした埋込形永久磁石同期電動機とその駆動法について」電気学会半導体電力変換研究会資料, SPC-02-13 (2002)
- 2) 松延・田島・小林・川又・小原:「電気自動車用埋込磁石型同期電動機のギャップ磁束の基本波成分に着目した特性解析」電学論D, 119 巻, No12, p.p.1500-1506, (1999)
- 3) 小暮・篠原・野中:「埋込磁石形電動機の d 軸, q 軸インダクタンスの算出」, 平成 14 年電気学会九州支部連大 No. 322
- 4) 中田, 高橋:「電気工学の有限要素法」森北出版
- 5) 木下・小暮・篠原:「有限要素法による IPMSM の誘導起電力の解析」, 平成 14 電気学会産業応用部門全大 Y-1