学術論文

ステータ巻線励磁法による製造工程が誘導機用ステータコアの磁気特性に及ぼす影響評価

Influence Evaluation of Manufacturing Processes on the Magnetic Properties of the Actual Induction Motor Stator Core Using the Stator Winding Excitation Method

岡 茂八郎^{*1} (正員), 小笠原 崇人^{*2}, 榎園 正人^{*3} (正員)

Mohachiro OKA (Mem.), Takato OGASAWARA (Stu. Mem), Masato ENOKIZONO (Mem)

Past magnetic property measuring methods such as the single sheet test (SST) and the Epstein method cannot quantitatively evaluate magnetic properties of an actual stator core that shows complex shape. Therefore, we are researching the stator winding excitation method as a new method to evaluate magnetic properties (iron loss and maximum magnetic flux density at a tooth) of an actual stator core after each manufacturing process. This method can directly measure them using a dummy rotor and a three-phase stator winding. To actualize this method, we constructed a new measuring system that consists of an iron loss measurement system and a multichannel data acquisition system. According to our experimental result using the proposed iron loss measurement system, the iron loss of the actual stator core that completed all manufacturing processes was about 2.3 times larger than an iron loss of an unprocessed electrical steel sheet. In addition, the proposed multichannel data acquisition system shows observation results of the magnetic flux density waveform and of maximum magnetic flux density at each tooth of the shrink fitting processed actual stator core. From our observation result, maximum magnetic flux density at each tooth was influenced by the compressive stress of a frame.

Keywords: iron loss, actual stator core, manufacturing process, stator winding excitation method.

1 緒言

近年の科学技術の発展は人々の生活の質の向上に大きく貢献している。一方、生活の質の向上は化石エネルギーに大きく依存していることも事実である。化石燃料によってもたらされる生活の質の向上は、その枯渇の問題や地球温暖化などを深刻化させている。これらの問題を抑制するための一手段として、電気機器の高効率化が注目されている。中でも旧型の効率の悪い回転機は家庭や工場幅広く使用されており、これらの回転機を高効率なものに置換できれば化石燃料消費の削減に大きな効果が得られると考えられている。

一般に、回転機のステータコアの製造工程は、打ち抜き工程、積層工程、巻線挿入工程、ワニス処理工程、フレームへの焼嵌め工程などに大きく分けられる。これらの製造工程を経た回転機のステータコアの鉄損は、その素材である電磁鋼板から見積もった鉄損よりも大きくなる。この原因は、製造工程で電磁鋼板に歪や残

留応力が付加されることである。これは、ビルディングファクター問題として知られており、製造工程によるビルディングファクターの増加が回転機の高効率化を目指すうえで大きな問題となっている[1, 2]。しかし、複雑な形状を持つ実機形状ステータコアの標準的な鉄損評価法は、まだ確立されていないのが現状である[3-6]。そこで、我々はビルディングファクターの評価をいくつかの方法[7-9]で行ってきた。しかし、ステータ巻線励磁法による製造時期等が異なる同じ製造工程のステータコア間の鉄損の比較やフレームからの応力とステータコアの磁気特性の関係は未調査である。

本研究では、実機形状ステータコアの鉄損の相対的な比較法であるステータ巻線励磁法を用いて巻線挿入過程以後の複数のステータコアの鉄損の増加やフレームへの焼嵌め後のステータコアのフレームからの応力による磁気特性変化を調べた。その結果を報告する。

2 ステータ巻線励磁法

2.1 鉄損評価

Fig.1にステータ巻線励磁法を用いての鉄損評価法の概要を示す。ここで、ステータコアの鉄損は励磁系

連絡先：岡茂八郎, 〒870-0152 大分市大字牧 1666 番地, 大分工業高等専門学校情報工学科, e-mail: oka@oita-ct.ac.jp

^{*1} 大分高専 ^{*2} 名古屋工業大学 ^{*3} ベクトル磁気特性技術研究所

から加えられる電力 $P_{in}[W]$ (三相デジタル電力計 WT-3000 (YOKOGAWA)) からステータ巻線の銅損 $P_c[W]$ (式(2)) , 模擬ロータの損失 $P_{dr}[W]$ (式(3)) , その他の損失 $P_{other}[W]$ (他の損失として模擬ロータの渦電流損などが考えられるがそれらは無視できると考え, シャント抵抗の損失のみを考慮した。) を差し引いた電力をステータコアの重さ $M_s[kg]$ で割った値 $W_i[W/kg]$ として算出した。式(2)において, $R_s[0.1\Omega]$ は励磁電流測定用シャント抵抗の値, $v_{su}, v_{sv}, v_{sw}[V]$ は, シャント抵抗に誘起される電圧である。さらに, $R_{wu}, R_{wv}, R_{ww}[約1.1\Omega]$ は各相のステータ巻線の抵抗である。一方, 式(3)の $W_{id}[W/kg]$ および $M_{dr}[kg]$ はそれぞれ模擬ロータの鉄損値とその重さである。なお, W_{id} は, Fig.2(b) および Fig.5 に示すサーチコイルによって測定した模擬ロータ中の平均励磁磁束密度から無方向性の電磁鋼板 (35A360) のメーカーが提供するデータ (50Hz, 1T の場合の損失 $W_{10/50}=1.25W/kg$ と 50Hz, 1.5T の場合の損失 $W_{15/50}=2.95W/kg$) を用いて推定した。

$$W_i = \frac{P_{in} - P_{dr} - P_c - P_{other}}{M_s} \quad (1)$$

$$P_c = \frac{1}{TR_s^2} \int_0^T (R_{wu}v_{su}^2 + R_{wv}v_{sv}^2 + R_{ww}v_{sw}^2) dt \quad (2)$$

$$P_{dr} = W_{id} \cdot M_{dr} \quad (3)$$

Fig. 1 Principle of the stator winding excitation method.

2.2 歯を通過する励磁磁束密度波形

各歯を通過する励磁磁束密度の波形の観測は, Fig.3 に示すように, 各歯の周りにかみ合わせる形で設置されたプリントサーチコイルを用いて行った。プリントサーチコイルは 36 チャンネル分あり, ステータコアの全 36 か所の歯を通過する磁束密度を同時に観測することができる。このサーチコイルの誘起電圧 $v_i[V]$ から各歯を通過する磁束密度 $B_i[T]$ を式(4)を用いて算出し, その周方向の歯ごとの値を調べた。なお, i は歯の番

号であり, $N_s[回]$ および $S[m^2]$ は, プリントサーチコイルの巻き数(1 回)とその断面積である。最大励磁磁束密度 $B_{exmax}[T]$ は, CH1($i=1$)のプリントサーチコイルの出力電圧 v_1 を用いて計算した。

$$B_i(t) = \frac{1}{N_s S} \int v_i dt \quad (i=1 \cdots 36) \quad (4)$$

(a) Actual stator core.

(b) Dummy rotor.

Fig. 2. The actual stator core and the dummy rotor.

Fig. 3. Photograph of printed search coils attached to stator core teeth.

2.3 3D FEM を用いたステータコアの応力解析

フレームからステータコアに加わる圧縮力によるステータコア内の応力分布を市販ソフト(ANSYS)を使って 3D 有限要素法解析によって求めた。使用した解析モデルとメッシュ図を Fig.4 に示す。ステータコアの積層構造やフレームの複雑な形状を再現し

た解析は、メッシュの増加により困難なため、ステータコアは軟鋼(S45C)の塊材、フレームはアルミ材(A2027)の円筒で模擬した。フレームは肉厚を 10mm、軸長を 175.2mm の円筒形、ステータコアの積厚を 65mm とし、フレームの軸方向中央部にステータコアを設置した。また、焼嵌め代は $20\mu\text{m}$ とした。さらに、解析は対称性を考慮して 1/8 モデルとし、全節点数を 166,949、全要素数を 142,295 とした。

Fig. 4 Modeled frame and stator core for stress analysis using 3D FEM.

3 試料および測定システム

3.1 試料として用いたステータコア

Fig.2(a)にステータコアの一例の写真を示す。実験で使用したステータコアの基本規格は、全閉外扇形の三相誘導機 (1.5kW, 200V, 50Hz 及び 60Hz 共用, 4 極) である。また、ステータコアの各部の寸法は、外径 157mm、内径 95mm、積厚 65mm であり、無方向性電磁鋼板を積層したものである。この実験に用いたステータコアは、巻線挿入後のステータコアを 2 個、巻線挿入後にワニス処理を施したステータコアを 2 個、巻線挿入後にワニス処理を施しフレームに焼嵌めされたステータコア 1 個である。なお、2 個ずつ用意したワニス処理前後のステータコアは、同一ロット品ではなく製造年月は異なっている。

3.2 模擬ロータ

Fig.2(b)に模擬ロータの図を示す。模擬ロータは、外径は 94.8mm で、積厚は 65mm である。また、 W_{id} を測定するためのサーチコイルは直径 0.26mm の絶縁単線、を 3 回巻いている。模擬ロータは、締め付けトルク 2.0Nm として 4 本のステンレス製(SUS304)のボルトで固定している。なお、圧延方向による磁気異方性を避けるために圧延方向を 90 度ずつずらしながら積層した。

3.3 測定装置

Fig.5 に測定装置のブロック図を示す。励磁系は、制御用コンピュータ、3 チャンネルの A/D コンバータ、3 チャンネルの D/A コンバータ、3 台のパワーアンプから成り、電力測定系としてデジタル三相電力計、3 台の差動増幅器、3 個のシャント抵抗器(0.1Ω)で構成されている。D/A コンバータを通して三相励磁電圧波形を生成し、シャント抵抗器の両端、及び B_{exmax} を求めるための CH1 のプリントサーチコイルに誘起される電圧を差動増幅器で増幅したのちに A/D コンバータを通して制御用コンピュータに取り込んでいる。なお、本実験では励磁電圧正弦波、励磁周波数(f_{ex}) 50Hz の条件で測定を行った。一方、各歯の磁束密度測定用の多チャンネルデータ収集部は、36 台の差増幅器と A/D コンバータから成っている。これらのシステムを制御用コンピュータで統一して駆動している。なお、模擬ロータ内の磁束密度は、Fig.2(b)に示す模擬ロータのサーチコイルの出力電圧を用いて算出した。

Fig. 5. Measurement system for the stator winding excitation method.

3.4 測定条件

この実験では、三相励磁のため励磁磁束密度を正弦波に制御し、 B_{exmax} を設定することが容易でないため励磁電圧正弦波とし、三相分の励磁電圧の最大値(V_{exmax})を設定して行った。その際、 B_{exmax} は、CH1($i=1$)のプリントサーチコイルの出力電圧 v_1 を用いて式(4)によって計算した。よって、 B_{exmax} の値は、近似値である。 $V_{\text{exmax}}=172\text{V}$ の時、 B_{exmax} は、約 1.2T、 $V_{\text{exmax}}=64\text{V}$ の時 B_{exmax} は、約 0.5T である。

Fig.6は、ステータコアに配置されたプリントサーチコイルの番号とステータコアの圧延方向、さらに、各

歯の角度位置を示している。ステータコアの周辺部の4か所には、形の異なる切り欠きが設けられており、さらにバックヨーク部には8か所のかしめが施されている。

一方、鉄損の比較基準に用いたリング試料は、ステータコアと同じ材質の0.5mm厚の電磁鋼板を、内径50mm、外形60mmにワイヤ放電加工機で10枚切り出し、重ねたものである。磁路長はリング試料幅の中心を通る長さとした。サーチコイルの巻数は5回、励磁コイルの巻き数は208回である。鉄損の測定は、励磁周波数を50Hz、最大励磁磁束密度を0.25Tから1.6Tとし、0.05Tステップで3回測定しその平均を結果とした。

Fig. 6. The arrangement and the numbering of the printed search coil.

4 実験結果と考察

4.1 フレーム挿入によるステータコア内径の変化

Fig.7 に今回の実験に使用したフレームへの焼嵌め後のステータコアの写真を示す。フレームは周囲に放熱用のフィンや固定用の脚、配線用の穴などがありステータコアへの外力が均一でないことが予想される。

Fig.8 にフレーム挿入後の内径測定用のマイクロメータを使用して測定したステータコアの内径の周方向の変化を示す。この図において、実線(95mm)はこのステータコアの設計値であり、破線はフレーム焼嵌め後のステータコアの実測の内径である。フレーム焼嵌め後のステータコアの内径は、角度位置ごとに異なっており、平均半径で約 $13\mu\text{m}$ 小さくなっている。これは、フレームより圧縮応力がステータコアに加わっていることを示し、その応力が場所によって異なっていること示している。このステータコアの内径の縮小がステータコアと模擬ロータ間のギャップを小さくし鉄損等の測定値に影響を与えていることも考えられる。

4.2 応力解析結果

Fig.9 に、2.3 節の条件で、ステータコアのフレームへの焼嵌めによる応力分布を知るための解析を行った結果を示す。この図は、ステータコアの最上面でのミーゼス応力を示しており、最大値を 36MPa として表示している。しかし、ステータコア外周部の切り欠き部で、最大 164MPa という大きな応力となっている。また、この応力は、ステータコア内では圧縮応力となっていると考えられる。この結果から、ステータコアの磁気特性は切り欠きに近いところで影響を受けていると考えられる。

Fig. 7. Photograph of the stator core with the frame.

Fig. 8. Internal diameters of the stator core after the shrink fitting process.

Fig. 9. The Von Mises stress distribution in the stator core after the shrink fitting process calculated by the 3D FEM (ANSYS).

4.3 各製造工程におけるステータコアの鉄損の比較

Table 1 に、今回の実験に用意した 5 個の製造段階が異なるステータコアについてステータ巻線励磁法を用いて鉄損を測定した結果を示す。この時の実験条件は、 B_{exmax} が 1.2T ($V_{\text{exmax}}=172\text{V}$)、 f_{ex} が 50Hz である。2 個の巻線挿入後と 2 個のワニス処理後のステータコアの平均鉄損は、約 8.0W/kg である。よって、ワニス処理工程での鉄損の増加はほとんどない。なお、2 個の巻線挿入後のステータコアの鉄損は、そのロットが異なっているにもかかわらずよく一致している。しかし、ワニス処理後の 2 個のステータコア間での鉄損の差が大きくなっている。この鉄損の個体による差の原因は、製造時期によって使用した電磁鋼板の磁気特性に差があるためと考えている。

一方、ステータコアと同じ材質の電磁鋼板でリングコアを作成し、同じ励磁条件で鉄損を測定すると、 B_{exmax} が 1.2T の時、約 3.7W/kg であった。このリングコアによって測定した鉄損は、素材としての電磁鋼板の鉄損の値に近いと考えられる。この値を基準に考えると巻線挿入後やワニス処理後のステータコアの鉄損は、2.2 倍に増加している。また、フレームへの焼嵌め後のステータコアの鉄損は、2.3 倍となっている。ただし、フレーム焼嵌め後のステータコアと模擬ロータのギャップは小さくなっておりこれは、鉄損改善に働いていると考えられるため、焼嵌め工程による鉄損の増加はこれよりも大きいものと考えられる。

以上のことから、ステータコアのフレームへの焼嵌め工程は、ビルディングファクターの増加に大きく寄与していることが分かる。また、この実験で鉄損の測定に使用しているステータ巻線励磁法は、ステータコアに実機と同じような磁界を作ることができることから交番磁界や回転磁界等を考慮して鉄損を評価しており、より実際の誘導電動機のビルディングファクターの増加の過程を示していると考えている。

Table 1. Iron losses of five actual stator cores ($B_{\text{exmax}}=1.2\text{T}$).

Manufacturing process	W_i [W/kg]			Ring core W_i [W/kg]	Ratio W_i/W_r
	A	B	Average		
After winding	8.0	8.0	8.0	3.7	2.2
After varnishing	8.2	7.8	8.0		2.2
After shrink fitting	8.5	-	-		2.3

4.4 歯を通過する磁束密度波形観測

Fig.10 と Fig.11 に、フレームへの焼嵌め後のステータコアに設置したプリントサーチャコイルの CH1 から

CH9 を用いて観測した歯を通過する磁束密度の波形 $B_i(t)$ を示す。Fig.10 は B_{exmax} が 0.5T ($V_{\text{exmax}}=64\text{V}$) の場合であり、Fig.11 は、 B_{exmax} が 1.2T ($V_{\text{exmax}}=172\text{V}$) の場合である。 B_{exmax} が 0.5T の場合は、波形はほぼ正弦波となっている。しかし、チャンネルによって $B_i(t)$ の大きさが異なっており、各歯を通過する磁束密度が場所によって異なっていることが分かる。また、 B_{exmax} が 1.2T ($V_{\text{exmax}}=172\text{V}$) の場合では、ステータコアの磁気特性の非直線性の影響を受けて $B_i(t)$ が大きく歪んでおり、しかも、チャンネルによって $B_i(t)$ の大きさが異なっている。この原因は、プリントサーチャコイルの構造上、各コイル間の設置状況のばらつきが少なことから、巻線のスロットへの挿入状況の違いの影響が考えられる。

Fig.10. Measured magnetic flux density waveforms ($B_i(t)$) from CH1 to CH9 ($B_{\text{exmax}}=0.5\text{T}$).

Fig.11. Measured magnetic flux density waveforms ($B_i(t)$) from CH1 to CH9 ($B_{\text{exmax}}=1.2\text{T}$).

4.5 $B_i(t)$ の最大値の周方向分布

Fig.12 に、プリントサーチャコイルの CH1 から CH36 を用いて観測された $B_i(t)$ の最大値 (B_{imax}) を周方向に表示したレーダー図を示す。Fig.12 において、内側の線は、 B_{exmax} が 0.5T ($V_{\text{exmax}}=64\text{V}$) の場合であり、外側の線は、 B_{exmax} が 1.2T ($V_{\text{exmax}}=172\text{V}$) の場合である。 B_{exmax} が 0.5T の場合は、Fig.10 と同様に 30 度ごとに B_{imax} が大きくなっていることが分かる。これは、Fig.10 や Fig.11 の場合と同様に巻線のスロットへの挿入状況の違いの

影響だと考えられる。一方、 B_{exmax} が 1.2T の場合は、 B_{exmax} が 0.5T の場合と同様に 30 度ごとに B_{imax} が大きくなっているが、これは、前述と同じ理由であると考えられる。

しかし、 B_{imax} は 90 度-270 度方向が大きく、0 度-180 度方向が小さくなっている。これは、Fig.6 に示すステータコアの圧延方向の影響と Fig.8 に示されるフレームへの圧縮力がこの方向で大きくなっていることの影響だと考えられる。また、図中の破線の小円で囲んだ部分は、小さくなっていることが分かる。これは、Fig.9 と比較すると、フレームによる応力が特に大きくなっている場所と一致し、切り欠きによる応力の集中やかしめによる残留ひずみその原因だと考えられる。

Fig. 12. The locus of B_{imax} and direction and amplitude of magnetic flux at each tooth ($B_{\text{exmax}}=0.5\text{T}$ ($V_{\text{exmax}}=64\text{V}$) and $B_{\text{exmax}}=1.2\text{T}$ ($V_{\text{exmax}}=172\text{V}$)).

6 結言

誘導電動機のビルディングファクターの増加の原因や程度を調べるために、ステータ巻線励磁法を用いて、巻線挿入工程、ワニス処理工程、フレーム焼嵌め工程などを終了した製造時期が異なる誘導電動機の5個の実機形状ステータコアについて鉄損の比較を行った。また、プリントサーチャコイルによって各歯を通過する励磁磁束密度波形も観測し、フレームからの応力の影響を調べた。その結果、以下の知見を得た。

1. ワニス処理前後のステータコアの鉄損は、リングコアで計測した鉄損と比較すると約 2.2 倍増加していた。
2. フレームへの焼嵌め後の鉄損は、リングコアでの鉄損と比較すると約 2.3 倍増加していた。
3. ステータコアをフレームに焼嵌めすると、その内

径が不均一に縮小していた。

4. B_{imax} は、巻線のスロットへの挿入状況やステータコアの応力分布の影響を受けて角度位置によって変化していた。

今後は、さらに、ステータ巻線励磁法などを改良し、ビルディングファクター問題の解明と、回転機の損失低減に取り組みたいと考えている。

謝辞

本報告中の三次元応力解析においては、大分県産業創造機構の城門由人研究員の協力をいただきました。感謝致します。

(2014 年 3 月 20 日受付, 2014 年 11 月 15 日再受付,
2015 年 1 月 4 日再々受付)

参考文献

- [1] 甲斐祐一郎, 槌田雄二, 戸高孝, 榎園正人, 「二軸引張応力下におけるベクトル磁気特性」, 第 18 回 MAGDA コンファレンス in 東京, pp.151-156, 2009.
- [2] 甲斐祐一郎, 槌田雄二, 戸高孝, 榎園正人, 「応力印加時における任意磁束条件下のベクトル磁気特性」, 第 23 回電磁力に関するダイナミクス講演会論文集, pp.221-226, 2011.
- [3] 高林拓真, 石原好之, 戸高敏之, ヨークを用いた環状試料試験法の検討, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-05-112, pp.51-56, 2005.
- [4] 千田邦浩, 河野正樹, 石田昌義, かしめによる鉄心磁気特性劣化の要因解析, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-05-42, pp.21-26, 2005.
- [5] 藤原浩志, 屋鋪裕義, 児嶋浩, 中山大成, 無方向性電磁鋼板の磁気特性に及ぼす打ち抜き・かしめによる応力の影響, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-03-190, pp. 9-14, 2003.
- [6] 藤原浩志, 屋鋪裕義, 児嶋浩, 中山大成, リングコアの磁気特性に及ぼす焼き嵌めの影響, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-05-103, pp. 1-6, 2005.
- [7] K. Shimada, M. Oka, M. Kawano, M. Enokizono, Influence of External Stress on Iron Loss in an Actual Stator Core Using the Excitation Inner Core Method, Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 20, No. 2, pp.319-324, 2012.
- [8] M. Kawano, M. Oka, K. Shimada, M. Enokizono, Examination of the Stator Winding Method for Iron Loss Evaluation in an Actual Stator core, Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 20, No. 2, pp.404-409, 2012.
- [9] 小笠原崇人, 岡茂八郎, 榎園正人, “ステータ巻線法を用いた外力の誘導機ステータコアの磁気特性への影響評価”, 第 22 回 MAGDA コンファレンス in 宮崎 電磁現象および電磁力に関するコンファレンス講演論文集, pp. 161-166, 2013.