同期規制方式による角線の密着巻線*

石上 孝** 長縄 尚** 平松広道*** 眞田一志†

Contact Winding of Square Wire using Synchronized Mechanism

Takashi ISHIGAMI, Takashi NAGANAWA, Hiromichi HIRAMATSU and Kazushi SANADA

This paper reports a high-density coil winding technology that enables to fabricate high efficient and small motors. When a square wire is wound in contact, the density of the coil in the stator core slots can be higher than that when a round wire is wound like piling straw bags. However when the square wire is wound only by the motions of the nozzle and the rotation axis, the alignment of the wire is crumbled due to the gap caused by the slip of the wire. Thus a system that can wind square wire without gaps and crumbling was proposed. The system has guides that restrict the positions of the wire rotating with the coil. An experimental device of this system was driven at 2.5 rotations per second, and the guides were controlled in synchronization with the rotation axis. As a result, concentrated wound plural layer coils were fabricated without gaps by winding square wires in contact. The slot-fill rate of the experimental coil of a square wire is 80%, while the slot-fill rate of the conventional coil of a round wire is 68%. This system can be applied to the motors whose stators are constructed of divided cores, and it makes these motors small and highly efficient.

Key words: motor, winding, square wire, round wire, stator, slot-fill rate, concentrated winding, divided core

1. 緒 言

近年、地球規模での温暖化現象が加速しており、CO₂の排出を抑制する環境対応技術が強く求められている。モータは排ガスを伴わないクリーンなエネルギー変換機関であり、性能の向上と有効活用によって、CO₂の排出量を大幅に削減することができる。例えば、工場の電力の約70%がモータの駆動で消費されており、モータの効率を数%向上することで、年間で数百万トンのCO₂削減に寄与できると言われている。また、内燃機関を電動モータに置き換えたHEV (Hybrid Electric Vehicle)、EV (Electric Vehicle) などの環境対応自動車の普及により、運輸部門でのCO₂排出量を大幅に減らすことが可能である。

ここで、モータの高効率化、自動車への搭載に対応した小型化を飛躍的に進める有効な手段として、ステータに組み込むコイルの角線化がある。図1(a)に示すように、従来の集中巻・分割コアモータでは、丸断面の電線を俵積み(皮膜込み)の電線断面の合計/(スロットの断面積-絶縁物の断面積)×100(%)は、幾何学上70%程度が限界である。これに対して、図1(b)のように四角断面の電線を密着して巻線できれば、占積率は80%前後まで向上し、コイルの抵抗損を減らすことが可能になる。また、コイルの放熱性が向上するため、温度上昇の低減によって、間接的に抵抗損を減らす効果も得られる。

本研究では、モータ用の集中巻コイルを対象として、コイルエンドに相当するコイルの短辺でターン間の移行をおこない、スロット内に相当するコイルの長辺で角線を密着して巻線する

技術を開発した。まず、研究の対象とした集中巻・分割コアステータの構造と研究の目標について述べ、実験用コイルの仕様を説明する。次に、角線の密着巻線の課題を明らかにするため、ノズルと回転軸の動作、及び張力(テンション)の設定により、コイル短辺での電線の移行が実現できるかを実験、検証した結果を報告する。次に、コイル長辺の角線を確実に密着巻線する手法として“同期規制方式”を提案し、巻線システムの構成とその動作方法を説明する。そして、実験装置を用いて、提案方式により、ターン毎に生じる線の隙間を補正し、スロット内の角線を密着巻線できることを確認した。最後に、本方式で巻線した角線集中巻コイルをモータに適用した場合の効果を試算した。本論文では、以上の成果について報告する。

2. 対象製品と研究の目標

2.1 対象製品

本研究では、モータに用いるコイルの中で、分割コアステータに組み込む集中巻コイルを対象とする。図2に分割コアステータの2種類の構造を示す。一つは、ステータコアをバックヨーク部でティース毎に周方向に分割する構造である(図2(a):以下、T形コアと呼ぶ)¹⁾⁶⁾。この場合は、ティースの周りに樹脂性のボビン(Bobbin)を装着して、その上に電線を巻き付ける。もう一方は、ステータコアを各個ティースと環状のバックヨークに分

Fig.1 Concentrated wound coils with square wire and round wire

* 原稿受付 平成22年4月1日

** 正会員 ㈱日立製作所生産技術研究所
(神奈川県横浜市吉田町292番地)

*** 正会員 ㈱日立製作所モノづくり技術事業部
(東京都千代田区外神田1-18-19秋葉原ダイビル)

† 横浜国立大学大学院工学研究院
(神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

Fig.2 Motor stators with divided cores

割する構造である (図 2(b) : 以下, I 形コアと呼ぶ) の 8). こちらは, 空芯のボビンに巻線したコイルをティースと組み合わせ, ティースとバックヨークを軸方向に嵌合させる. 巻き付け対象である分割コアとボビン, 或いはボビンのみを回転して巻線するため, 回転軸と直行する方向から電線を繰り出すことができ, 電線の振れが生じない 9). この結果, 一体型のステータコアの内側でノズルを動作させ, ティースに電線を巻き付ける方法よりも整列性に優れた高密度な巻線ができる.

2.2 研究の目標

本研究では, 従来より小型で効率の高いモータを実現するため, 分割コアステータに用いる集中巻コイルの素線を丸線から角線に変更し, 導体面積の増加によって抵抗損を減らすことを目的とする. モータ用の集中巻コイルは, スロット内 (通常, コイルの長辺) の導体の本数と面積で電気的な性能が決定し, コイルエンド (通常, コイルの短辺) の電線は電流の通路にすぎない. このため, モータの効率を高めるには, 図 3 に示すように, ターン間の電線が移行する部分をコイルエンドに集中させ, スロット内の角線は平行に並べて隙間なく巻線したい. 本研究では, モータ用の集中巻コイルを角線で構成するにあたり, スロット内の電線を密着巻線することを目標とする.

2.3 実験用コイル

本報で提案する巻線技術は, 2 種類の分割コアの形態の両方に適用できるものだが, 実験は T 形コアで推進した. 図 4 に実験用のコイルを示す. 使用する角線は, 幅を W_c , 厚さを H_c とすると, $W_c/H_c=1.19$ で断面は正方形に近い. コイルを巻き付けるボビンの短辺の長さを W_b , 長辺の長さを H_b とすると, $W_b/H_b=0.27$ であり, 短辺がコイルエンド, 長辺がスロット内に相当する. また, ボビンの角 R は $R_b=0.87W_c$ である. コイルは折り返して 5 層に積み上げ, 合計 46 ターンの巻線をする.

3. 角線の密着巻線の課題

3.1 丸線と角線の巻線の相違点

従来の丸線コイルでは, 樹脂性ボビンの角部に電線を位置決めする溝を形成するのが一般的である. この溝によってスロット内の 1 層目の電線の位置が拘束され, ターン間をコイルエンドで斜めに渡らせることができる. 2 層目以降は, 下層の丸線が構成する凹部が溝の役目を果たし, 1 層目と同様にコイルエンドでの電線の移行が可能となる. ところが, 素線を角線に変更すると, 線間に谷間がないため, ボビンに溝を構成することはできない. このため, コイルエンドで電線を移行させようとして

Fig.3 Ideal concentrated wound coil for motor stators

Fig.4 Experimental coil

Fig.5 Slip of square wire in coil

も, スロット内の電線が滑り, 最も悪い場合は 1 層あたりコイルの長辺に電線 1 本分の隙間が生じてしまう (図 5) .

3.2 ノズルと回転軸の動作による巻線状態の確認

図 6 に示すように, コイルの回転角度 θ が 0 度を越えると, スロット内に相当するボビンの平面 A, 及びボビンの角部 B と電線の間に摩擦が働く. この摩擦力により, 電線の滑りを抑制し, スロット内で隙間なく巻線できるかを実験で確かめることにした. ここで, 実験に使用した電線とボビンの静摩擦係数の実測値は 0.200 である (電線同士の静摩擦係数は 0.170) .

3.2.1 張力の変更実験

ノズルのピッチ送りを開始する時のコイルの角度 θ を変更して, ピッチ送り量 W_c で 1 ターンを巻線し, 移行開始側のボビンの角部 B に生じる電線の隙間 W_g を測定する. 先ず, 電線に加える張力の影響を見るため, ノズルとコイル短辺との距離 l を H_b に固定し, 電線に加える張力を平均 56N, 87N, 106N (各々 $\pm 10N$ 程度のばらつきあり) の 3 条件に変化させて実験をおこなった. ここで, コイルの片側膨らみ量 S_c が $0.5W_c$ 以上になると, 隣接するコイル同士が干渉する. 張力が 50N 近傍で $S_c < 0.5W_c$ となるため, $56 \pm 10N$ は組立に支障のないコイルが得られる下限の張力設定である. また, 110N の近傍に電線の降伏点があるため, $106 \pm 10N$ は張力設定の上限である (図 7) .

実験結果を図 8 に示す. グラフには各ピッチ送り開始角度 θ において発生した隙間 W_g を 3 回測定した最大値をプロットした. 全ての張力設定において, ピッチ送り開始時のコイルの角度 θ が 0 度を越えると, ターン間に生じる隙間 W_g が減少しており, 摩擦力による滑りの抑制効果がある程度得られている.

Fig.6 Friction between wire and bobbin

Fig.7 Relation between swelling of coil and wire tension

Fig.8 Winding experiment (1)

Fig.9 Accumulation of gaps between wires

しかし、 θ を増加させても、 $0.1W_c$ 程度の微細な隙間が残る、張力の変更による違いはみられなかった。1ターンで生じる隙間は僅かだが、数ターン分の隙間により線位置のずれ量が蓄積し、スロット内に所望の本数の電線を配置できなくなる(図9)。

なお、ノズルとボビンの間に距離 l を設けているため、 θ が0度以下の時、 W_g/W_c は1以下の数値となる。

3.2.2 ノズルとコイルの距離の変更実験

次に、ノズルとコイルの距離の影響をみるために、コイルの巻き膨らみ量が規定値($0.5W_c$)以下となり、電線の伸びの発生しない 87 ± 10 Nに張力を固定し、ノズルとコイル間の距離 l を $0.5H_b$ 、 H_b 、 $1.35H_b$ ($1.35H_b$ は巻線機の構造による l の上限値)の3段階に変化させて、同様の実験をおこなった。

Fig.10 Winding experiment (2)

Fig.11 Effect of nozzle position

結果を図10に示す。先の実験と同様に、グラフにはピッチ送り開始角度 θ において発生した隙間 W_g を3回測定した最大値をプロットした。コイルの角度が0度から20度の間では、ノズルとコイルの距離 l が増加するに従って隙間 W_g が減少する傾向がみられた。これは、図11に例を示すように、ノズルとコイル短辺との距離 l が増えると、電線の角度 β が小さくなるためと推察する。しかし、角度 θ が20度を越えると、距離 l の設定値によらず、張力の実験と同様に $0.1W_c$ 前後の微細な隙間が残った。

これらの実験により、以下のことを明らかにした。

- (1) 本稿で対象としたコイルの寸法形状、電線とボビンの接触条件においては、ノズルのピッチ送り開始角度、張力、ノズルとコイルの距離を変化させても、移行時に発生するターン間の角線の滑りを完全に抑制することはできない。
- (2) 角線の滑りによって各ターン間に生じる隙間は $0.1W_c$ 前後と微細だが、複数ターンの巻線で電線の位置ずれが蓄積し、スロット内に所要の本数の巻線ができなくなる。

4. 同期規制方式

前章の実験の結果を受け、モータに用いる角線集中巻コイルのスロット内の電線を安定して密着巻線するため、

- (1) ノズル以外に、軸方向に線の位置を拘束する機械的手段を設け、移行部の角線の滑りを補正する。
- (2) ターン毎に滑りを補正し、電線の位置ずれを蓄積させない。

を基本方針とした“同期規制方式”を考案した。

Fig.12 Contact winding using synchronized mechanism

Fig.13 Synchronized movement of nozzle and guide

図12に同期規制方式の概念図を示す。分割コアの回転軸にL字形状をしたガイドを搭載し、コアとガイドは一体で回転可能とする。また、ガイドは回転軸方向に移動できるようにし、これを用いてコイル長辺（スロット内に相当）の電線の軸方向の位置を規制する。まず、既に巻き付けられた角線とガイドの間に、 $Wc + \alpha$ の隙間を設け、ここに次のターンの角線を配置する（図12(a)）。次に、角線をコイル長辺に巻き付けた後で、隙間 α がなくなるようにガイドを角線に押し付ける（図12(b)）。そして、次のターンの巻き付けまでに、先ほど巻き付けた電線とガイドの隙間を $Wc + \alpha$ に戻す（図12(c)）。以下、ターン毎にこの動作を繰り返す。

図13にコイル1回転あたりの、ノズルとガイドの相対位置を示す。電線がコイルエンドの角部Bに接触を開始してから、角部Cに接触を開始するまでの間（ $\theta = 0 \sim 80$ 度）に、ノズルを線幅 Wc だけ移動させる。一方、 θ が $0 \sim 80$ 度の間にガイドを巻線の進行方向と逆に α 移動させて、電線同士を密着させる。そして、 θ が $80 \sim 180$ 度の間で、ガイドを巻線の進行方向に線幅+隙間（ $Wc + \alpha$ ）分移動させて、次のターンの巻線に備える。同一の層の巻線では、この動作を繰り返す。その後、巻線を折り返す際に、同一形状をし、逆方向に移動するガイドに切り替える。この時、コイルの層が上がるので、ガイドの先端は回転中心から離れる方向に電線の厚み Hc だけ移動する（図14）。巻線の方法を折り返す度に、左右のガイドを交換し、電線の位置規制に用いる。

Fig.14 Change in guides

以上のように、コイルの回転と同期してガイドを動かすことで、角線の滑りを補正する。その結果、コイルエンドで電線を斜めに移行させ、スロット内の電線が密着した角線集中巻コイルを得ることができる。

5. 提案方式の検証

5.1 実験装置

同期規制方式の効果を検証するため、実験装置を製作した。図15にその外観を示す。実験装置の母体は4軸の巻線機であり、分割コアの回転、及びノズルの移動（XYZの直行3方向）はサーボモータで位置制御する。そして、巻線の進行方向、及びコイルの積層方向に駆動するガイド（巻線の進行方向別、左右対称に2つ）を回転軸の上に搭載し、分割コアと一体で回転させ、これらのガイドもサーボモータで位置を制御する。また、ノズルは、角線の振れを防止するために、角線の対向する辺を挟む2方向をローラで拘束する構造とした。

5.2 ターン間の密着巻線の確認

実験装置は、4章で説明したシーケンスに従って動作させた。図16(a)は、既に巻き付けた電線とガイドの間に $Wc + \alpha$ の隙間を設け、その間に角線を巻き落とす直前の様子である。電線を隙間に巻き落としたり、コイルを回転（ $0 \sim 80$ 度）させながらガイドを電線に押し付けて密着させる（図16(b)）。ノズル、回転軸、ガイドを同期運転し、平均 2.5 sec^{-1} の回転速度でターン間の巻線動作ができることを確認した。略同一のコイル寸法で、同じ断面積の丸線を整列巻線する場合、回転数 5 sec^{-1} 程度が一般的であり、動作の高速化は今後の課題である。

5.3 層上がり部での巻き崩れ防止効果

角線を多層のコイルに巻線するにあたり、コイルを折り返して層上がりをする時に、電線の巻き崩れが多発した。これは、図17(a)に示すように、下層の最終ターンから上層の第1ターンに移る部分でコイルの表面に凸部が生じ、上層の最初の移行部の電線と接触するためである。そこで、この問題の解決にも、同期規制方式のガイドを活用した。図17(b)に示すように、コイルの回転角度 θ が $0 \sim 270$ 度の間、ガイドで電線を固定した。これにより、各層の最初の移行部の電線の崩れを防止できた。

5.4 巻線結果

実験装置を用いて、46ターン、5層の角線コイルを巻線した。ここで、張力は隣接コイルが接触しない巻き膨らみ量 $Sc < 0.5 Wc$ となる $87 \pm 10 \text{ N}$ に設定した。図18に巻線したコイルの外観、図19にスロット内に相当する部位の切断面の写真を示す。ガイドによる位置規制により、角線の滑りを抑制し、スロット内の電線を密着させ、崩れなく多層に巻線することができた。

Fig.15 Experimental device

Fig.16 Control of wire position using guide

Fig.17 Prevention of crumbling of wires when coil returns

6. モータへの適用効果

最後に、角線コイルのモータへの適用効果を試算した。

6.1 銅損の低減

実験で用いた T 形コアにおいて、スロット内の空間に角線コイルと同じ 46 ターンで丸線を配置すると直径は $0.95 W_c$ となる (図 20 (a))。同一ターン数で丸線の断面積をこれ以上増やすには、1 層のターン数を 10→9 に減らし、コイルの直径を $1.05 W_c$ にするしかない。しかし、図 20 (b) に示すように、幾何学的に隣接コイルとの接触が生じるため、前述の直径が最大である。

同一ターン数 (46T) で最大断面積の丸線コイルと、本研究で製作した角線コイルを比較した (表 1)。角線コイルは丸線よりも導体面積が 1.17 倍となり、占積率は丸線の 68% に対して角線は 80% となる。この結果、角線コイルの方が銅損を 15% 低くできる。実験のモデルにしたモータの場合は、出力トルクが 200Nm で、角線コイルは丸線コイルよりも損失が 550~590W 小さくなり、モータの効率は 0.8~1.4% 高くなると試算した。

6.2 モータの小型化

一方、角線コイルを用いたモータの入力電流を 7% 増加させれば、ステータのコアの積厚を 7% 短縮しても、丸線コイルのモー

Fig.18 Photograph of sample coil

Fig.19 Cross section of sample coil

Fig.20 Arrangement of round wire in the slot

Table 1 Comparison between square wire coil and round wire coil

Wire	Square wire	Round wire
Cross section of sample coil
Slot-fill rate	80%	68%
Resistance	0.111 Ω	0.131 Ω

Fig.21 Miniaturization of model motor

タと同等の出力が得られる。ステータコアの積厚の削減により、モータを軸方向に小型化できる。この結果、ステータやロータのコア材、ロータに取り付ける磁石の量を減らし、材料費の削減にも大きく貢献できる (図 21)。

7. 結 言

本研究では、モータの小型高効率化を目的として、集中巻・分割コアステータのコイルの角線化に取り組んだ。実験により、モータ用集中巻コイルの角線巻線の課題を明確にし、移行部をコイルエンド（コイルの短辺）に集め、スロット内（コイルの長辺）の角線を密着して巻線するシステムを提案した。そして、実験装置を用いてシステムの動作検証をおこなった。

本論文の成果をまとめると次のようになる。

- (1) 本稿で対象としたコイルの寸法形状、電線とボビンの接触条件において、ノズルと回転軸の動作、及び張力の設定により角線の滑りを抑制できるかを実験により検証した。ノズルのピッチ送り開始角度、張力、ノズルとコイルの距離を変化させたが、滑りによる隙間を完全に抑制する条件は見出せなかった。
- (2) スロット内の角線を密着巻線するには、ノズル以外の機械的手段を用いてスロット内の電線の位置を規制し、滑りにより発生する隙間をターン毎に補正する必要があり、これを実現する同期規制方式を考案した。
- (3) 同期規制方式を検証するための実験装置を作成し、縦横比 1.19 の四角線を平均回転数 2.5sec^{-1} で巻線し、ターン間の密着巻線ができることを確認した。
- (4) 多層のコイルの巻線では、層上がり部での角線の崩れが問題となったが、提案システムのガイドを用いることで、崩れのない巻線を可能にした。

- (5) 本研究で試作した角線コイルは、同一ターン数で最大直径の丸線コイルと比較して、高いスロット占積率（丸線：68% → 角線：80%）が得られ、銅損を 15% 小さくできる。この結果、モータの効率を 0.8~1.4% 高くできる。また、入力電流を 7% 増やせば、出力同等でコアの積厚を 7% 短くでき、モータの小型化に貢献できる。

参 考 文 献

- 1) 中原裕治, 橋本 昭, 三瓶利正, 花崎進作: 分割鉄心による中小型モータ製造技術に関する研究 (第 1 報), 精密工学会誌, **66**, 1 (2000) 102.
- 2) 中原裕治, 米谷晴之, 池田洋一, 岩間俊樹, 花崎伸作: 分割鉄心による中小型モータ製造技術に関する研究 (第 2 報), 精密工学会誌, **66**, 7 (2000) 1125.
- 3) 中原裕治, 秋田裕之, 三宅展明, 川口 仁, 川口 進, 花崎伸作: 分割鉄心による中小型モータ製造技術に関する研究 (第 3 報), 精密工学会誌, **67**, 3 (2001) 456.
- 4) 秋田裕之, 中原裕治, 吉岡 孝, 三好隆志: トルク脈動を低減するためのモータ鉄心製造方法に関する研究, 精密工学会誌, **73**, 6 (2007) 711.
- 5) 山本一之, 中原裕治: ポキポキモータの開発事例紹介, 電気学会研究会資料, **RM07-143**, (2007) 121.
- 6) 石上 孝, 北村正司, 眞田一志: EPS 用モータのステータコア構造と巻線工法の考察, 電気学会 D 部門誌, **128**, 12 (2008) 1411.
- 7) T.Ishigami, K.Yamazaki, K.Ohara, and T.Aoki: Manufacturing technology for continuous high-density coils for brushless motors, Precision Eng, **31**, 3 (2007) 260.
- 8) M.Kitamura, Y.Enomoto, J.Kaneda, and M.Komuro: Cogging torque due to roundness errors of inner stator core surface, CEF2002, No.013-4(2002).
- 9) 竹内 豊, 大木 弘: 新型巻線機「インナー巻線機」, 「ワーク回転式巻線機」の開発, Sanyo Denki Technical Report, **5**, May(1998) 17.