中型回転電機用連続コイルの巻線支援システムの開発*

石 上 孝** 森 義 和***

Development of Coil Winding Support System for Midsized Rotating Machinery

Takashi ISHIGAMI and Yoshikazu MORI

This paper reports on a study on the winding technology of continuous diamond coils for the stators of midsized rotating machinery. The winding support system has a 3-DOF nozzle drive unit, a winding form that can turn and roll, and a tensioner. It forms the rough shapes of the coils automatically on behalf of the worker. The worker finishes the coils according to the instructions on the display of this system. Moreover, the winding form has guides actuated both automatically and manually. They help the worker to put the wire in order and maintain the complicated shape of the coil. As a result, the rate of production has been tripled, and the workers don't need a lot of skill as they needed before this development.

Key words: rotating machinery, diamond coil, winding support system, winding form

1. 緒 言

中型の回転電機用の固定子コイルは、図1に示す立体的な形状のものが多く、亀甲形コイルと呼ばれる。この形状は、コイルエンドを干渉させずに複数のコイルを周方向に重ねて配置でき、回転磁界を正弦波に近づけて滑らかな回転特性を得ることができる。

亀甲形コイルはコイルエンドに凹部と反転部があり、単純な機械巻き^{1)~3)}で形状を生成するのは不可能である。そこで、図2に示す“引き曲げ”と呼ばれる製法が広く用いられている。

素材電線に平角線を用い、これを単純な小判形に整列巻線する(①)。次に、コイルの両直線部、及び両コイルエンドの電線を、整列を保った状態で把持し、把持を移動してコイルエンドを捻り変形させる(②)。そして、最後に絶縁テープを巻き付ける(③)。①~③の手順で単体のコイルを製造し、複数のコイルを固定子コアに組み込んで、端末線の溶接と絶縁処理を施す。

以上の方式により、一般的な亀甲形コイルの生産は自動化されている。しかし、研究対象の水中ポンプ用モータのコイルは、高い防水性と絶縁信頼性を実現するために、特有の素材電線と巻線仕様を採用しており、“引き曲げ”では製造できない。このため、従来は工芸的な手作業に製造を頼るしかなかったが、重労働で生産性が悪く、また、熟練者しか作業できないという問題があった。

本論文では、特殊仕様の亀甲形コイルの生産性向上を目的として、作業者を補助、誘導する巻線支援システムを開発した結果を報告する。まず、研究対象である水中ポンプ用モータと、固定子コイルの仕様を述べる。次に、一般的な製法である“引き曲げ”が適用できない理由と、従来用いていた製法を説明する。そして、従来製法の分析結果から、新しい生産システムの開発方針と全体構想を立案した経緯を述べる。更に、構想を実現させるために考案した巻枠の構造と動作メカニズムの詳細を説明する。最後に、完成したシステムを紹介し、考案した諸機能の検証結果とシ

ステムの導入効果について述べる。

2. 研究対象

表1に研究対象である水中ポンプ用モータの概略仕様を示す。貯水槽の中にモータを浸水させ、動力で水を汲み上げる。図3に対象モータの固定子に用いる連続巻コイルを示す。コイル単体の形状は一般的な亀甲形であるが、モータを浸水させるため、コイル自体とその接続回路に高い絶縁性能が求められる。このため、以下の特殊な素材と巻線仕様のコイルを採用している。

- (1) 水中でのコイルの絶縁を確保するため、素材電線を丸線とし、導体の外周に厚肉の樹脂絶縁層を設けている(平角線では、厚肉の樹脂絶縁層の安定生成が不可能)。
- (2) 高い絶縁信頼性を持たせるため、同相の複数のコイルを渡り線を介して連続巻線し、コイル間の接続と絶縁処理をなくしている。

Fig.1 Diamond coils for midsized rotating machinery

Fig.2 Popular production method of diamond coils

* 原稿受付 平成 17 年 3 月 8 日

** 正 会 員 (株)日立製作所日立研究所(日立市大みか町 7-1-1)

*** (株)日立製作所日立事業所(日立市白金町 1-1-1)

Table 1 Specification of the target motor

Motor type	3-phase cage induction motor
Output	Around 800kW
Synchronous speed	1500min ⁻¹

Fig.3 Diamond coils for the pump motor

3. 従来の製法

3.1 従来の製法

以下(a)~(c)の理由により、対象の連続巻コイルには、亀甲形コイルの一般的製法である“引き曲げ”が適用できない。

- (a) 丸線は捻れがあり、塑性変形した形状が安定しない。
- (b) コイルの把持部の反力により、樹脂絶縁層を損傷する。
- (c) 連続した複数のコイルは、複雑な機構を有する引き曲げ装置に搭載が不可能。

そこで、従来は図4に示す工芸的な手作業により対象の連続巻コイルを製造していた。木製の巻枠をフットスイッチで縦回転させ、作業者が素材電線を成形しながら巻枠表面の溝に押し込んでいく。コイル1個の巻線が終了したら、巻枠の側部に取り付けられた雇（巻枠と共に回転）に完成したコイルを縛り付け、次のコイルを続けて巻線する。作業は重労働であり、単独のコイル1個の巻線に1hr以上を要していた。また、高度な技能が必要であり、熟練者のみしか作業できなかった。

3.2 従来作業の分析

従来製法の問題点を明らかにするため、作業の分析をおこなった。図5は作業の内容を分類し、工数の比率を調べた結果である。

核となるのは、素材電線を成形し、巻枠に巻き付ける作業で、全作業工数の約半分を占める。巻枠の回転は、その姿勢変更の役割しかもたず、素材電線の成形と巻き付けは全て人力である。また、巻枠の回転に伴って素材電線の高さが200~1600mmの間で変化する。このため、作業姿勢を大きく変化させる必要があり、作業者の負担が大きい。

残り半分の作業内容は、電線の固定作業と、巻枠の段取り作業の二つに分類できる。

電線の固定作業の様子を図6に示す。木製のコマをボルトで巻枠に着脱し、巻線途中の電線の位置を規制する。ボルトの着脱に時間と労力がかかり、ターン毎に使用するコマの種類や取り付け位置が異なるため、習熟が必要である。

一方、巻枠の段取り作業は、更に、下記の二つに分けられる。これらは二人作業が必要なため、工数が多い。

(A)巻枠の分解・再組立

巻枠の一部を分解してコイルを取り出し、元に組立てる作業である(図7)。分解するパーツはボルトで固定しており、ボルトの締結、解除によりパーツを着脱する。

(B)巻枠の交換

回転電機の極数に応じて、コイルを巻き付ける方向(以下、巻回方向と呼ぶ)を変更する。従来は、対象な形状の2種類の巻枠全体を交換して対応していた(図8)。巻枠の質量は約20kgで、一人作業はできない。

Fig.4 Previous winding method

Fig.5 Analysis of the previous method

Fig.6 Wire Clamping

Fig.7 Separation and Rebuilding of the winding form

Fig.8 Change of the winding forms

従来製法の問題点を、以下のように整理した。

- (1) 主要作業である素材電線の成形、巻き付けを人力に頼っており、作業者の負担が大きい。
- (2) ボルトを用いた電線の固定作業に、労力がかかっている。また、数種類のコマを使い分けるため、習熟が必要。
- (3) 巻枠の段取りが二人作業のため、工数が多い。

4. 巻線支援システムの構想

従来の製法は、人間の柔軟な判断力と優れた技能に多くを頼っている。作業の全自動化は技術的な飛躍が大きく、得策ではない。逆に、優れた人手作業は積極的に残すべきと考えた。そこで、作業者の負担軽減と必要技能の簡易化を目的とし、巻線作業を補助、誘導するシステムの検討を進めた。

まず、前章で抽出した従来製法の問題点に基づき、システムの開発方針を以下のように定めた。

方針 1: 主要作業である素材電線の成形、巻き付けを機械で代替し、作業者の負担を軽減する。

方針 2: 巻枠にアクチュエータを搭載し、自動もしくは手動でワンタッチ動作するガイドで電線の巻順や形状を規制する。

方針 3: 段取り（巻枠の分解・再組立、及び交換）を一人作業化する機能を巻枠に付与する。

方針 1 を実現するため、図 9 に示すシステムの全体構成を考案した。システムは巻枠を回転、ローリングする巻枠駆動部、ノズルを三方向に移動して素材電線を引き回すノズル駆動部、テンションの 3 ユニットで構成し、大まかなコイル形状はこれらの機械が生成する。作業者は、操作盤に表示されるメッセージに従い、機械の動作の合間にコイル形状の補正、仕上げをおこなう。また、巻枠を水平回転させることで、素材電線の高さを略一定に保ち、作業姿勢の変更を小さくする。

一方、方針 2、方針 3 を達成するには、所望の機能を搭載した巻枠の開発が必要になった。

5. システム対応の巻枠構造

5.1 巻順、形状の規制機能

巻枠に搭載し、コイルの巻順と形状を規制するガイドの構造を検討した。

(1) 巻順の規制機能

図 10 にコイルの口出し線の状態を示す。固定子コアへの組み込み作業、渡り線の整線作業を容易にするため、巻始めと巻き終りの電線をコイルの外側に配置している。このため、巻き始めはコイルの外側から内側に巻線を進め、途中でコイルの内側から外側に巻順を変更する必要がある。

Fig.9 Design of the winding support system

特殊な巻順の巻線を実現し、コイル巻線の進行に合わせて巻順を管理するため、図 11 に示す機構を考案した。巻枠のコーナー部 4 箇所にガイドを配置し、内蔵したシリンダーで、巻枠の側面に沿って動作させる。図 12 を用いてガイドによる巻順の規制機能を説明する。(a)コイルの外側から内側に巻線する時は、まず、ガイドを下降させた状態で、その外側に素材電線を巻き付ける (①)。次に、ガイドを上昇させ (②)、直前に巻いた電線から 1 ターン分位置をずらして巻枠の側面に電線を巻き付ける (③)。そして、再びガイドを下降させ、外側の電線と巻枠の間の空隙に内側の電線を押し込む (④)。巻順を変更しない間は、この動作を繰り返す (⑤)。一方、(b)コイルの内側から外側に巻線する時は、ガイドを上昇させた状態に保ち、巻枠の回転を繰り返す (⑥、⑦、⑧)。ガイドの動作を巻線の途中で変更することで、内側から外側、外側から内側に巻順を変更できる。

(2) コイルエンドの形状規制機能

図 13 にコイルエンドの形状とスロット内の電線配置の一例を示す。直線部の電線は、整列を保ちながらコイルエンドで 180 度配列が反転する。“引き曲げ”では、成形時に自動的にこの形状が得られるが、巻枠に電線を巻き付ける本方式では、電線の整列と形状を維持する規制手段が必要である。

Fig.10 Wires connected to subsequent coils

Fig.11 Guides for controlling winding arrangement

Fig.12 Control of winding arrangement

これを実現するため、図14に示す機構を考案した。巻棒の両頭部に左右一対のガイドを配置し、巻棒に内蔵したシリンドラによってコイル頭部の電線と平行に動作させる。

図15を用いてガイドによるコイルエンドの形状規制機能を説明する。まず、両ガイドを上昇させた状態で1ターン目の電線を巻き付ける(①、②)。この時、ガイドDのD2面、ガイドCのC1面で電線の位置が拘束され、コイルの外側の電線が頭部の右側を通過し、コイルの内側に移行する。次に、両ガイドを下降させて2ターン目の電線を巻き付ける(③、④)。今度は、ガイドDのD1面、ガイドCのC2面で位置が拘束され、コイルの内側の電線が頭部の左側を通過し、コイルの外側に移行する。3ターン目以降は、1～2ターンのガイドの動作を繰り返す(⑥)。

ガイドが形成する拘束面に沿って電線を巻き付けると、自動的に180度配列が反転したコイルエンドの形状が得られる。

巻線の進行に合わせて、2種類のガイドをプログラム動作させることで、作業者の記憶と技術に頼らずに所望の巻順と形状のコイルを再現できる。

Fig.13 Example of winding arrangement

Fig.14 Guides for keeping the shape & arrangement of the coil ends

Fig.15 Keeping the shape & arrangement of the coil ends

5.2 簡易段取り機能

段取り作業を簡易化する巻棒の構造を検討した。

(1)巻棒の簡易分解・再組立

巻棒にアクチュエータを内蔵し、巻棒の一部をワンタッチで分解、再組立する構造を考案した(図16)。駆動源にエアシリンダーを使用し、ガイドに沿って巻棒の一部を動かす。分離したパーツの間を潜らせてコイルを取り出す。

(2)巻棒の簡易交換

従来方式では、巻棒全体を交換していたが、新システムでは巻棒を180度反転し、両巻回方向で同一の巻棒を兼用することにした。ローリング軸への巻棒の固定を簡易着脱式とし、ローリング軸周りに僅かな力で反転可能にする。

6. 開発システム

システムの全体構想と、巻棒の構想に基づいて、巻線支援システムを開発した。

6.1 全体システム

図17に巻線支援システム全体の外観を示す。ノズル(3自由度)、巻棒(回転、ローリング)、テンションをモータ駆動でプログラム運転し、主要な巻線作業を自動でおこなう。機械の動作中、作業者はエリアセンサの外で待機する。機械では不可能な形状の生成や補正が必要な部分で機械の動作を停止し、操作盤に作業へのメッセージを表示する。作業者は、指示に従ってコイルの補助成形、ガイドの操作による電線の固定や解除をする。作業者が所定の作業を実施した後、スタートボタンを押すと、機械のプログラム運転が再開する。なお、巻線後のコイルは、巻棒の斜め下に位置し、巻棒と一体で回転するコイルストッカーに搭載し、連続して次のコイルの巻線を進める。

Fig.16 Structure of the winding form for automatic separation & rebuilding

Fig.17 Winding support system

Fig.18 Winding form

Fig.19 Motion of the corner guide

Fig.20 End guides

Fig.21 Automatic separation of the winding form

Fig.22 Turning of the winding form

Table 2 Comparison between the two methods

	Previous method	New system
Forming & winding	Hand work	Semi-automated
Wire clamping	Bolting by hand	Built-in cylinders
Separation of the form	Hand work	Operation with SW
Number of the worker	2	1
Rate of ST	1	0.3

6.2 巻枠の諸機能の検証

(1)巻順、形状の規制機能

図 18 にシステムに搭載した巻枠を示す。5.1 節で説明した 2

種類のガイド、合計 8 個を搭載した。ガイドは巻枠に組み込んだエアシリンダーを駆動源とし、機械の自動運転の時はシステムのプログラム指令、人手作業時は操作盤のスイッチで動作させる。

図 19 にコーナー部のガイドの実機動作を示す。構想通り、外側から内側、内側から外側への巻順の規制と変更ができた。また、図 20 に巻線途中のコイルエンド部のガイドを示す。ガイドの二つの拘束面を利用して電線の位置を規制し、整列を保ちながら 180 度反転したコイルエンドの形状を生成できた。

(2)簡易段取り機能

(2-1)巻枠の簡易分解・再組立

図 21 に操作盤のスイッチを操作して巻枠を分解し、コイルを取り出す様子を示す。1 s 程度で巻枠の分解、再組立ができた。

(2-2)巻枠の簡易交換

巻枠は 2 分割し、ローリング軸の両端に回転可能に取り付け、ピンの抜き差しで両者を固定、解除する構造とした。図 22 に巻枠反転の様子を示す。一人作業で容易に交換ができた。

6.3 開発の効果

主要な巻線作業を機械が代替することで、作業者の負担が大幅に軽減された。また、シリンダー駆動式のガイドにより、力と時間を要した電線の固定作業を簡易化できた。更に、巻枠に簡易分解機能と交換機能を付与することで、コイルの取り出し、巻回方向の変更を一人作業、短時間で実行可能になった。

一方、巻線の進行はプログラムで管理され、作業者は操作盤の指示メッセージに従って作業すればよい。複雑な手順の記憶が不要になり、非熟練者も作業できるようになった。

表 2 に従来製法と開発システムの比較を示す。全ての改善効果により、従来作業と比して工数を 1/3 に削減できた。

7. 結 言

本論文では、丸線の連続巻き亀甲形コイルを対象として、作業者を補助、誘導する巻線支援システムの全体構成と、システムに対応した巻枠の構造を考案し、開発した実機の機能検証の結果と導入効果について述べた。

- (1) 従来作業の問題点を明らかにし、①主要な巻線作業の機械化、②電線固定の簡易化、③巻枠の段取りの一人作業化を新システムの開発方針に定めた。
- (2) 巻枠駆動部、ノズル駆動部、テンションの 3 ユニットからなる巻線支援システムの全体構想を考案した。
- (3) コイルの巻順を規制するコーナー部のガイド、コイルエンドの形状を規制するエンド部のガイドの構造と動作方法を考案した。また、分解・再組立、及び交換が容易な巻枠の構造を考案した。
- (4) 実機巻枠により、ガイドによる巻順と形状の規制機能、簡易分解機能、簡易交換機能を確認した。
- (5) 新システムの導入により、従来方式と比して工数を 1/3 に削減できた。また、必要な習熟度を下げ、非熟練者の作業を可能にした。

参 考 文 献

- 1) 石上 孝, 酒井俊彦, 大原光一郎, 山崎克之: 高密度連続コイルの生産技術, 2001 年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, (2001) 368.
- 2) 石上 孝, 柴 光明, 柳瀬裕康: 適応制御を用いた円柱への精密巻線, 精密工学会誌, 69, 8 (2003) 1165.
- 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.