

インパルス巻線試験器 ST4030A

北澤 正美^{*1}

要 旨

インパルス巻線試験器 ST4030A は、高速サンプリングかつ高分解能な測定機能を備え、微小なショート状態も検出できる試験器である。従来の波形比較による判定に数値比較による判定を加え、より高精度な良否判定を実現した。ここに製品の概要、機能・特長、および計測事例について解説する。

1. はじめに

近年の自動車の電動化および自動運転技術の開発により、走行性能と安全性に大きく関わる車載モーターは、高い信頼性が要望されている。特に電気自動車では、駆動用モーターをはじめ各種モーターの小型化が求められ、固定子巻線の占積率（コイル断面積に占める電線の割合）が増加している。

駆動用モーターは駆動電圧が高いため、インバーター制御によるサージ電圧が発生する。モーター巻線の絶縁不良があると、サージ電圧によって部分放電が発生し、絶縁劣化が進行する。巻線間の短絡（レイヤーショート）や絶縁破壊に至ると、モーターの焼損や重大な事故につながる危険性がある。

モーターの高信頼性への要望に応えるためには、長期にわたって巻線間の絶縁性能を維持する必要がある。しかし、従来の応答波形の比較によるインパルス試験では、微小なレイヤーショートの場合は良品との差が小さく、良否判定が難しいという問題があった。

この問題を解決するため、インパルス巻線試験器 ST4030A を開発した。図 1 にその外観を示す。

2. 概要

一般的にモーター巻線の品質を評価する試験には、巻線抵抗試験、耐電圧試験、絶縁抵抗試験、インパルス試験、および部分放電試験がある。今回開発した ST4030A は、インパルス試験を行う試験器である。

インパルス試験では、巻線の両端にインパルス電圧を印加し、そのときの両端電圧波形（応答波形）を観測する。その応答波形を、良品の



図 1 外観

巻線で得た応答波形と比較し、良否を判定する。巻線の断線、相間での短絡、およびインダクタンスの変化を検出できる優れた検査方法である。

一方で、不良品であっても応答波形と良品の波形との差が小さい場合は、検出が難しいという欠点がある。より確実に検査するには、微小な波形の変化を捉える高い検出精度と分解能を備える試験器が必要である。

ST4030A では、従来の波形比較に加え、判定特徴量である LC および RC の値（LC・RC 値）による数値比較も採用した。応答波形を数値化して定量的に扱うことにより、波形比較では選別が難しい巻線の 1 ターンショートなどの応答波形の微小な変化も検出できるようになった。

また、高精度な波形検出と新開発のデジタル信号処理技術を融合することにより、当社独自の放電検出機能 ST9000（出荷時オプション）を開発した。ST9000 では、放電検出用アンテナなどの装置を追加することなく、微弱な放電を検出できる。これにより、モーター巻線間の絶縁不良を高精度に検出できるようになった。さら

*1 イノベーションセンター DB ユニット

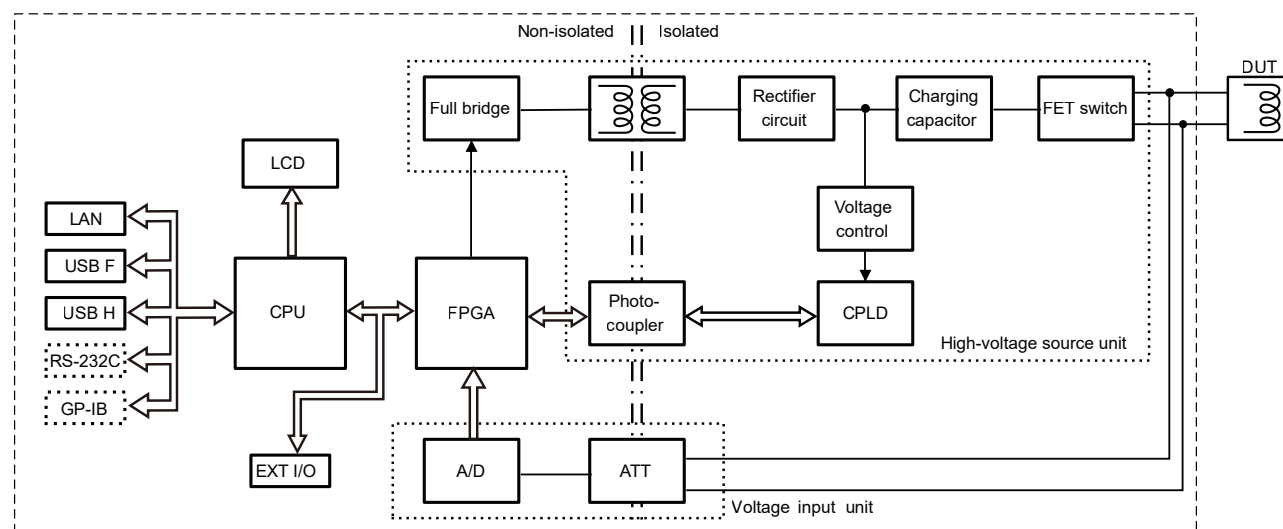


図 2 全体ブロック図

に、絶縁破壊電圧（BDV）試験機能も搭載した。

ST4030A の概略仕様は以下のとおりである。

- 印加電圧：100 V ～ 4200 V
(設定分解能：10 V)
- 試験可能インダクタンス：10 μ H ～ 100 mH
- 最高サンプリング周波数：200 MHz
- サンプリング分解能：12 ビット

3. 機能・特長

3.1 構成

図2にST4030Aの全体ブロック図を示す。設定した試験電圧で充電用コンデンサを充電する。そして高速のFETスイッチでパルス電圧を測定対象（コイル）に印加すると、コイルのインダクタンスと寄生容量により減衰振動波形を得ることができる。これを高速でサンプリングし、良品データと比較して良否を判定する。

3.2 出力波形特性

ハイブリッド車や電気自動車の駆動用モーターの部分放電開始電圧 (PDIV) は、インパルス電圧の立ち上がり時間などに依存することが報告されている。IEC 規格では、立ち上がり時間が $t_r = 300 \text{ ns} \pm 200 \text{ ns}$ と規定されている。ST4030A の出力波形は全電圧範囲において立ち上がり時間が 100 ns から 500 ns までの範囲になるよう設計している (ただし、無負荷開放時)。図 3、図 4 に ST4030A のインパルス電圧の立ち上がり波形を示す。

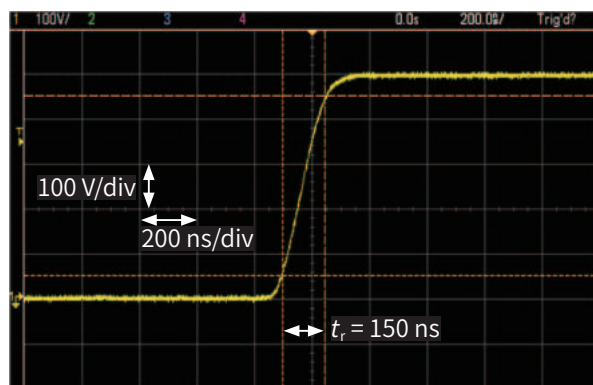


図3 立ち上がり波形の例 (500 V)

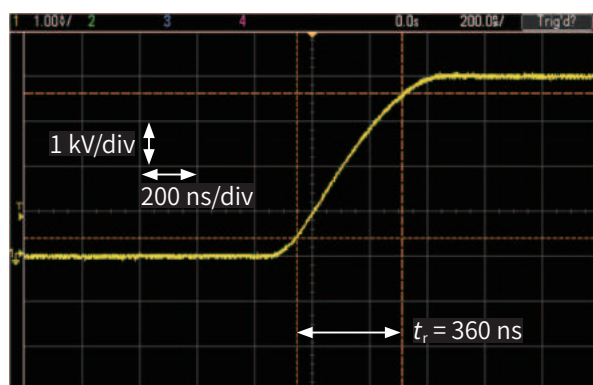


図4 立ち上がり波形の例 (4.2 kV)

3.3 高速サンプリング・高分解能

電圧入力部には、200 MS/s の高速サンプリングで 12 ビットの高分解能 A/D コンバーターを採用した。フロントエンドには 4200 V_p のインパルス電圧を直接入力でき、インパルス応答波形に生じた僅かな変化を捉えることができる。また、複数の検出レンジを用意し出力電圧

に応じた適切なゲイン回路の選択をすることで、高分解能の維持を実現した。インパルス発生部には、試験電圧を精細に設定できるよう専用の16ビット D/A コンバーターを採用し、出力電圧は10 V の分解能で調整できる。

3.4 応答波形の数値化

ST4030A は、インパルス応答波形を数値化して判定に使用できる機能を搭載している¹⁾。測定対象と ST4030A の測定部を LCR 直列等価回路に置き換えた場合の LC および RC の値を、応答波形から求めている (図 5)。求めた値を LC 値と RC 値の 2 次元平面にマッピングすると、良品のモーターとレイヤーショートが発生しているモーターとでは、LC・RC 値の分布に違いがある。従来のインパルス応答波形の波形比較とともに、LC・RC 値の数値比較で判定することで、単一パラメータによる比較よりも判定できる範囲が広がり、判定精度が向上している。また、モーターの固定子と回転子の回転角により応答波形が変化する場合の判定にも利用できる。

インダクターやモーターのコア材や構造により鉄損が多い場合は、共振波形が急速に減衰するため、LC および RC の値を求めることが困難である。この場合は、インパルス電圧印加時の電圧波形を利用して LC および RC の値を自動で算出している。これらの値は LCR の直列等価回路の値としての意味はなくなるが、これらの値を利用して良否を判定できる。

3.5 高い繰り返し精度

高圧発生部に独自の充電回路と高圧スイッチ回路を採用することで、インパルス出力波形の高い繰り返し精度を実現した。図 6 に出力端子開放時にインパルス電圧 1000 V を 100 回出力したときのピーク値のばらつきを示す。

3.6 ST9000 放電検出機能

図 7、図 8 に ST9000 の画面例を示す。部分放電検出回路を用いることなく、応答波形をハイパスフィルターで処理している。これにより、応答波形から印加信号成分を除去し、放電成分を分離して検出している。独自のフィルター処理をすることで、従来のフラッター演算やラプシアン演算では検出が難しい部分放電を高精度に検出できる。部分放電試験器には及ばない

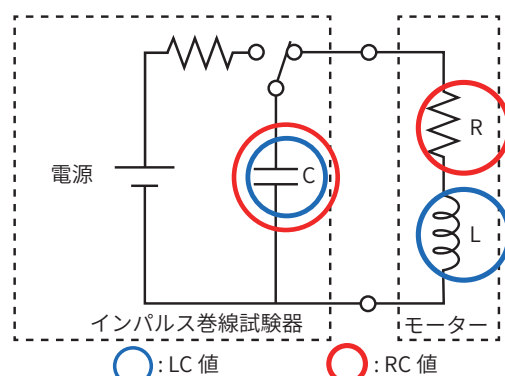


図 5 LC・RC 値

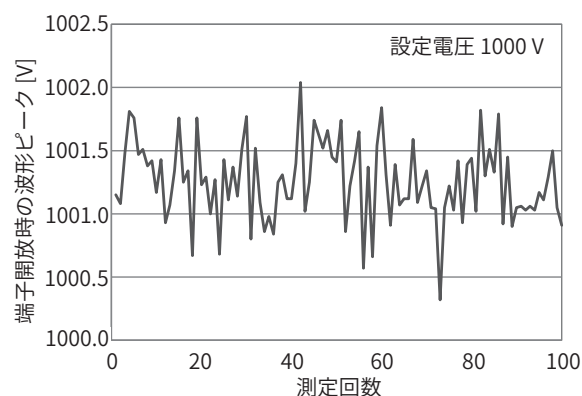


図 6 インパルス波形ピーク値のばらつき



図 7 波形グラフ表示画面（放電あり）



図 8 波形グラフ表示画面（放電なし）

インパルス巻線試験器 ST4030A

が、インパルス電圧印加時にある程度の部分放電の有無を検出でき、スクリーニングに適している。

ST4030A の測定対象としているインダクタンスでは、インパルス波形に最大で数百 kHz から数 MHz までの周波数成分がある。ST4030A は印加信号成分を完全に除去せず、インパルス波形の周波数成分も残しつつフィルター処理をしている。これにより、単純なフィルター処理の場合と比べ、検出感度が向上している。さらに、フィルター出力を回路で発生する熱ノイズ量の標準偏差で標準化することで、しきい値の設定を不要にした。

3.7 絶縁破壊電圧 (BDV) 試験機能

図 9 に BDV 試験の画面例を示す。インパルス電圧を徐々に上昇させながら応答波形を測定する。放電検出機能のハイパスフィルターで除去されるような低周波帯域でも、部分放電や火花放電による波形には変動が生じる。そのため、各電圧における放電量に加えて LC・RC 値、波形面積値、波形面積差分値、応答波形の振動周期、波高値なども併用することで放電を検出し、破壊電圧を測定している。

良品の巻線で得た応答波形（マスター波形）を必要としないアルゴリズムとなっているため、測定対象の良品がない場合でも試験ができる。

3.8 判定エリアの作成をサポート

LC・RC 値の分布から良品判定を行う場合は、判定エリアを作成する必要がある。そのためのサポート機能として、良品データから自動で判定エリアを作成する機能を搭載した。LC・RC 値が一定に分布する場合だけでなく、帯状に分布する場合などにも有効な機能である。

3.9 生産ラインの構築を短時間で

(1) EXT. I/O テスト

図 10 に EXT. I/O テストの画面例を示す。外部制御端子 (EXT. I/O) の入力信号と出力信号の動作を簡単に確認でき、生産ライン構築時のデバッグ作業の工数を削減できる。

• I/O OUT

I/O 出力ピンから信号を出力する信号名 (PASS, ERR など) を選択する。出力信号が正常に出力されるかを確認できる。



図 9 BDV 試験画面

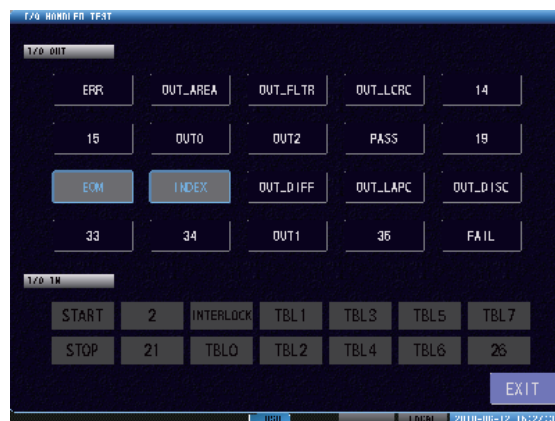


図 10 EXT. I/O テスト画面

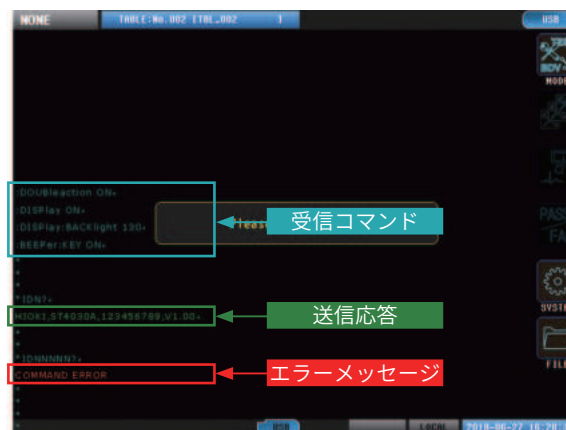


図 11 通信モニター画面

• I/O IN

I/O 入力ピンに信号が入力されると、EXT. I/O テスト画面の対応する信号名 (START, STOP など) が緑色に点灯する。ST4030A が入力信号を正常に認識するかを確認できる。

(2) 通信モニター

図 11 に通信モニターの画面例を示す。通信コマンドおよびクエリーの応答を画面に表示できるので、検査ライン構築時にリアルタイムに動

作状況を確認しながら作業できる。

通信モニターに表示されるコマンドやメッセージは色分けされるので、検証作業が容易である。

3.10 機構

ST4030A の外形寸法はハーフラックサイズとし、検査システムの占有スペースの削減を実現した。

特長は以下のとおりである。

- 電圧入出力コネクタは、耐圧仕様を満足しつつコンパクトな形状を実現
- タッチパネル付き 8.4 型カラー TFT 液晶を採用し、高い操作性と視認性を実現
- ハードキーは 3 種類（電源、電圧発生、電圧停止）でシンプルな構成
- 放熱用の開口部は背面だけとし、設置の自由度を向上

4. 計測事例

4.1 回転子を組み付けた状態での検査

通常のモーターには回転子が組み付けられていて、モーターの固定子と回転子は相互に作用し、両者の間には容量性の結合が存在する。そのため、インパルス試験を行う場合は、回転子の位置によって波形が変化してしまい、従来の波形比較による判定はできなかった。図 12 にモーターの回転子の位置を変えたときのインパルス応答波形を示す。回転子の位置によって、応答波形が変化することがわかる。図 13 に W 相を短絡したモーターの各相間（U-V、U-W、V-W）の LC・RC 値の分布を示す。回転子を回しても、健全な相と短絡がある相では LC・RC 値の分布が異なることがわかる。ST4030A は、応答波形を数値（LC・RC 値）で判定することにより、回転子を組み付けた状態でも良否を判定できる。システムの一部として組み込まれているモーターを分解することなく検査できるため、メンテナンスでは非常に有効である。

4.2 低電圧でのインパルス試験

波形比較によるインパルス試験では、高い電圧を印加しないと応答波形における良否の差が現れにくい。一方、応答波形を数値化して得られる LC・RC 値では、低い印加電圧でも良否の

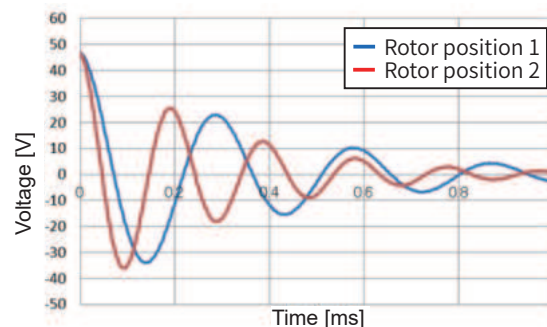


図 12 回転子を回転したときの電圧波形変化

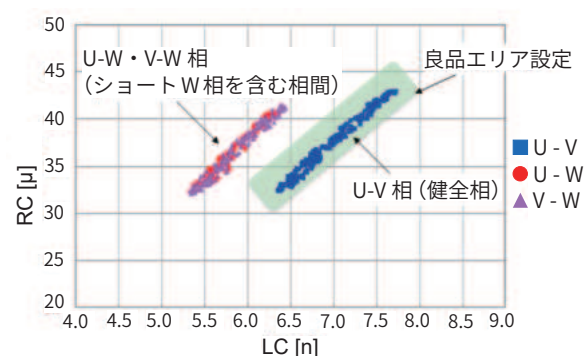


図 13 W 相短絡モーター各相間の LC・RC 値分布

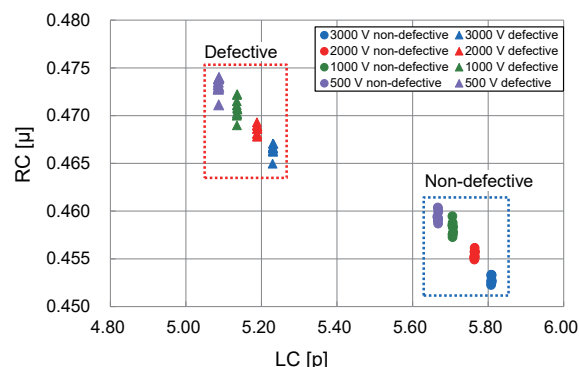


図 14 LC・RC 値の印加電圧による違い

分布に違いがある。図 14 に印加電圧を変化させたときの LC・RC 値の分布を示す。印加電圧が低い 500 V でも、良品・不良品の分布が明確に異なることがわかる。よって数値比較によるインパルス試験では印加電圧を低く設定できるため、測定対象へのダメージを低減できる。

4.3 データ蓄積による検査品質の向上

応答波形を数値化することにより、データを定量的に管理でき、統計処理もできる。データを蓄積することで、試験で得たデータ（LC・RC値）から測定対象のショート状態（傾向）を推定できる。図 15 に正常品と数ターン短絡した不良品の LC・RC 値の分布を示す。1 ターン短絡、2 ターン短絡、3 ターン短絡で分布が異なるため、不良品のショート状態を把握できる。これにより、不具合再発の防止や検査品質の向上につなげることができる。

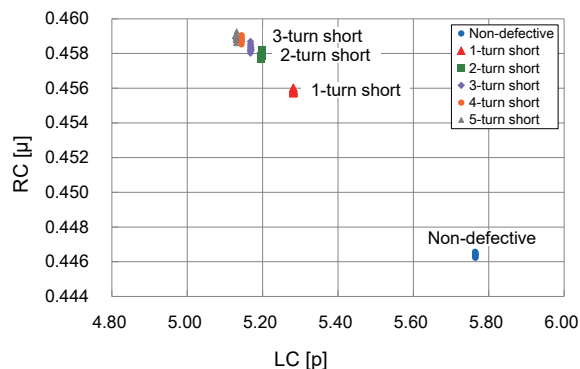


図 15 正常品・数ターン短絡品の LC・RC 値分布

5. おわりに

ST4030A の特徴量である LC・RC 値を使用した数値判定は、従来の波形判定では検出が難しい 1 ターンショートも検出できる。さらに、ST9000 により、従来の数値演算方法では検出できなかった放電成分を明確に検出できる。自動車の電動化と自動運転技術の進歩にともない、車載モーターの需要がますます増加する。ST4030A がこれら車載部品の信頼性の向上に貢献できることを期待する。

飯島 匡史^{*2}，櫻井 裕徳^{*2}，林 幸則^{*2}，
米田 佑樹^{*2}，宮本 俊一^{*2}，小川 恒夫^{*3}，
佐藤 雄亮^{*4}，結城 恵^{*5}

参考文献

- 1) 特許第 5721581 号 特許権者：株式会社トーエネック

*2 イノベーションセンター DB ユニット

*3 イノベーションセンター MN ユニット

*4 イノベーションセンター フィールドデザイン課

*5 製造部 生産技術課