

インバータ機器用エナメル線の開発

Development of a Magnet Wire with Superior Inverter Surge Resistance

小比賀亮介*
Ryousuke Obika

石井 禎*
Tadashi Ishii

立松義伯*2
Yoshinori Tatematsu

長田克巳*2
Katsumi Osada

概要 近年、電気機器や産業用モータは、省エネルギーの推進および小型高性能化に伴い、インバータ制御によって使用される傾向にある。しかしながら、インバータ化による過大なサージ電圧がモータ絶縁システムに対して悪影響を及ぼすことが指摘されている。巻線に関しても例外ではなく、このようなサージ電圧下に曝された場合、線間に十分な絶縁性と沿面距離がないと、コロナ放電によって絶縁層の劣化が促進されるため、従来よりもインバータサージ特性に優れた巻線が要求されている。さらに、EV（電気自動車）、EHV（ハイブリッド自動車）に使用される駆動モータに関しても、モータ設計によっては同様の現象が見られ、インバータ機器用に対応した巻線が望まれている。

今回、我々はこれらの要求に応えるために、インバータサージ特性の優れた電線の開発を行った。本報告では、高周波課電時の寿命を従来以上に向上させた電線の特性について述べる。

1. はじめに

電気機器や産業用モータなどは、省エネルギーの推進および小型化高性能化の要求に伴い、高電圧でのインバータ制御によって使用される傾向にある。しかし、インバータ制御の場合、インバータから発生する高いサージ電圧がモータに侵入し、モータ絶縁システムに悪影響を及ぼすことが指摘されている。これらのモータに使用される巻線に関しても例外ではなく、このようなサージ電圧下に曝された場合、線間に十分な絶縁性と沿面距離がないと、コロナ放電によって絶縁層の劣化が促進される。サージ電圧によるコロナ放電劣化を防止するために、周辺回路の変更等のモータ設計により、サージ電圧を下げる試みも行われている。一方、これらのモータの小型化や低コスト化のために、巻線間の絶縁相間紙を省略するといったモータの製造効率を向上させることが望まれている。したがって、巻線絶縁に対して従来以上にインバータサージ特性に優れた巻線が要求される。さらに、EV（電気自動車）、EHV（ハイブリッド自動車）に使用される駆動モータに関しても、モータ設計によっては同様の現象が見られ、インバータ機器に対応した巻線が望まれている。

今回、我々はこれらの要求に応えるために、インバータサージ特性の優れたエナメル線（以下電線）の開発を行った。本報告では、高周波課電時の寿命を従来以上に向上させたインバータ用エナメル線の特性について述べる。

2. 開発の考え方（耐インバータサージ性）

インバータ駆動モータの場合、サージ電圧は、入力電圧の1.5～2倍の程度に達する。これは、インバータとモータ間のケーブル長さに大きく依存する。このようなサージ電圧はモータ内の巻線のコロナ開始電圧以上に達するため、十分な絶縁補強がなされていない場合、巻線間でコロナ放電が発生し、絶縁皮膜の減耗等の悪影響をもたらす。したがって、インバータ駆動モータでのサージ電圧に対する絶縁信頼性の向上が非常に重要である。

電線の耐インバータサージを向上させるのには2つの手法がある。1つは、コロナ開始電圧を高くすることである。コロナ開始電圧を向上させると、高周波課電時のインバータサージ電圧に対して、電線皮膜のコロナ開始電圧がサージ電圧以上であればコロナ放電が発生せず寿命が長くなる。エナメル線のコロナ開始電圧 V は、ダーキンの実験式（1）により与えられる¹⁾。

$$V = 163(t/\epsilon)^{0.46} \quad (1)$$

t ：絶縁層厚さ（ μm ）、 ϵ ：誘電率

したがって、コロナ開始電圧を高くする方法としては、絶縁皮膜の誘電率を可能な限り低くすること、もう一つは絶縁皮膜の厚さを可能な限り厚くすることである。低誘電率化に対しては、利用可能な樹脂が限定され、また誘電率の低減にもある程度限界があり、また、皮膜厚を厚くした場合には、占積率の関係からモータの設計を変更する必要がある。

2つめは、サージによるコロナ放電が発生した場合でも寿命を長くする手法である。寿命を向上させる手法としては、耐コロナ放電劣化性のある絶縁層を設けることである。一般に、有機材料であるエナメル樹脂に無機フィラーを添加させることに

* 研究開発本部 環境・エネルギー研究所

*2 巻線事業部技術部

より、このような耐インバータサージ性を付与する例が多数報告されている。しかしながら、このような手法の場合、絶縁層の可とう性が低下し、過酷な巻線加工によるストレスが加えられた場合、絶縁性が低下するといった問題が発生する。

今回、我々は後者の手法である耐インバータサージ性を有する絶縁層について、絶縁層の材料開発および電線への適用検討を行った。耐インバータサージ性を向上させることにより、インバータサージによる絶縁劣化を抑制し、インバータ機器での課電時の過大なサージ電圧に曝されても、絶縁信頼性が向上させることができる。エナメル樹脂に無機粒子を特殊な処理方法によって分散させることにより、耐インバータサージ特性を向上させることに成功し、従来、問題であった過度な機械的ストレス後のインバータサージ特性の低下についても、改善することが可能となった。

3. 本開発電線の特性

今回評価を行った電線サンプルの皮膜構成を表1に示す。

3.1 コロナ開始電圧

コロナ開始電圧は、ツイスト片について、周波数 50 Hz、検出電荷 10 pC にて測定を行った。結果を表2に示す。本開発電線のコロナ開始電圧は、通常電線とほぼ同レベルであり、新規開発樹脂の使用による低下などは見られない。

3.2 高周波特性評価

モータ組み込み時の電線の伸びやスロット挿入による変形などの機械的ストレスを模擬するには、電線を 5 %、10 %、20 % 伸長させる方法がある。今回は、導体破断伸びの約半分程度である 20 % 伸長後の電線を撚り合わせたツイスト片を試験片とした。

3.2.1 正弦波寿命特性

高周波特性の評価として、20 % 伸長させたツイスト片に、周波数 10 kHz の正弦波を印加し、絶縁破壊に至るまでの時間（寿命）を測定した。通常電線および本開発電線について、コロナ開始電圧以上の電圧を印加し測定を実施した。結果を図1に示す。その結果、本開発電線は、通常電線と比較して印加電圧が 1.5 kV の場合、寿命が約 100 倍となった。皮膜厚さ、およびコロナ開始電圧がほぼ同じであるにもかかわらず、寿命が大幅に向上した要因として、コロナ放電劣化による減耗の速度が、本開発電線の場合は新規開発樹脂層で抑制されたため、絶

縁破壊までの時間が大幅に長くなったと推定される。

3.2.2 インバータ寿命特性

インバータ寿命の評価は、市販の産業用インバータを使用し、インバータ出力端子とツイスト片間に約 100 m のケーブルを介し、インバータ入力電圧を 480 V、キャリア周波数 15 kHz とし、電圧を印加し、絶縁破壊に至るまでの時間（寿命）を測定した（試験時のツイスト片間に印加される電圧は最大 1.5 kV）。その結果を図2に示した。本開発電線は、通常電線と比較し、大幅に寿命が向上しており、約 30 倍程度の寿命の向上が見られた。これらの寿命の向上は 20 % 伸長下でのストレスを加えた試験片について向上が見られており、従来懸念されていた巻線工程での機械的ストレスが加わった場合でも耐インバータサージ特性を維持できると考えられる。

3.2.3 高周波寿命特性に及ぼす皮膜厚さの影響

図3に本開発電線に使用している新規開発樹脂の厚さを変えた全皮膜厚さの異なる電線に対して、10 kHz 正弦波寿命に及ぼす印加電圧の影響を示した。印加電圧が低くなると、寿命が長くなる傾向を示しているが、特に皮膜厚さが厚くなるに従い、その寿命が顕著に長くなる傾向を示している。

実際のインバータ機器において使用される場合、インバータの種類によって周波数、パルス頻度、サージ電圧などが大きく変わるため、その絶縁信頼性も使用環境によって大きく左右される。皮膜厚に対する正弦波寿命、インバータ寿命の関係を図4に示した。正弦波寿命に関しては、同じ印加電圧の場合、皮

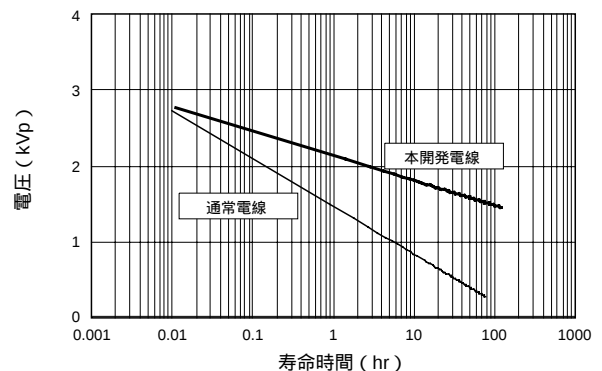


図1 V-t特性 (at 10 kHz)
Comparison of V-t characteristics between developed and conventional wires

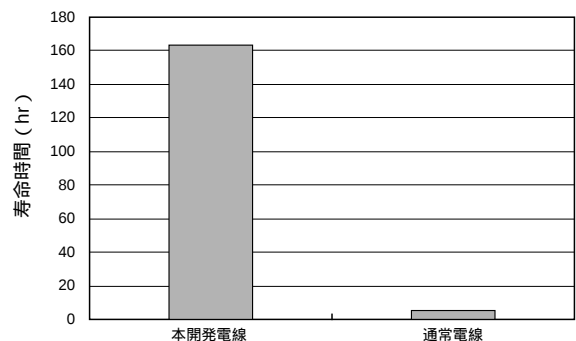


図2 インバータ特性 (at 15 kHz)
Lifetime under inverter surge voltage

表1 電線サンプル
Insulation structure of wire samples

本開発電線	通常電線 (AIHPW)
0.9 mm 皮膜厚 30 μm	0.9 mm 皮膜厚 30 μm
上層: ポリアミドイミド樹脂	上層: ポリアミドイミド樹脂
下層: H種樹脂 (含新規開発樹脂)	下層: H種ポリエステル

表2 コロナ開始電圧
Corona inception voltage

	本開発電線	通常電線
コロナ開始電圧 (Vp) 50 Hz 検出電荷: 10 pC	805	798

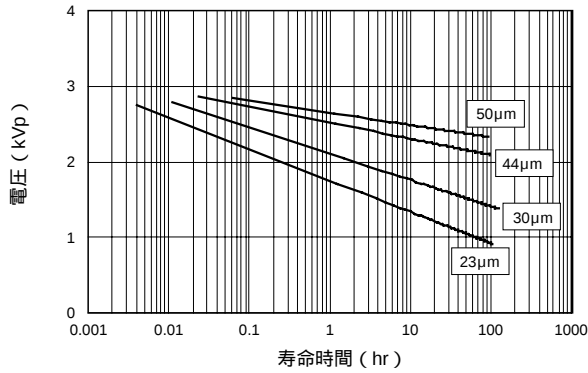


図3 V-t特性 (at 10 kHz)
Comparison of V-t characteristics between with different insulation thicknesses

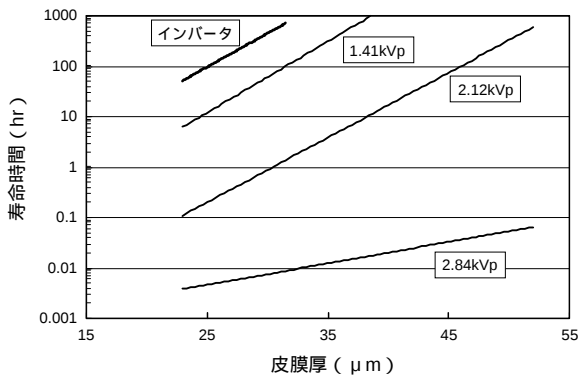


図4 皮膜厚の影響
Effect of insulation thickness on lifetime

膜厚さに対する寿命の対数プロットはほぼ直線関係にあることが分かる。同様に、インバータ寿命に関しても同様の傾向が見られる。したがって、正弦波寿命の関係から、インバータ寿命をある程度予測することが可能と考えられる。

3.3 耐加工特性

表3に耐加工特性を示した。モータ製造時の巻線加工においては、自動巻線機が使用された場合、強いテンションが加わりながら、伸長、屈曲、摩擦等を受けて巻線加工されるため、皮膜が損傷しやすい。本開発電線は、通常電線と比較して、摩擦特性はより良好であり、20%伸長後可撓性についても、大きく低下することなく、また、NEMAヒートショック特性についても満足している。したがって、従来手法である無機フィラーを添加した電線で問題とされていた巻線加工時の絶縁性の低下等に対しては、本開発電線の場合、問題は生じていない。

3.4 一般特性

本開発電線の一般特性を表4に示す。本開発電線は、絶縁破壊電圧、摩擦性、密着性共に、H種クラスの通常電線と同等の特性を有しているため、産業用モータ、自動車用モータなどでの使用が可能である。したがって、本開発電線は、インバータ駆動によって絶縁信頼性の低下が懸念されるこれら用途に適用することによって高い信頼性を付与することが可能と考えられる。

表3 耐加工特性
Windability properties

項目	本開発電線 1種0.9mm	AIHPW 1種0.9mm
20%伸長可撓性	2D	1D
NEMAヒートショック 220 × 30 min	OK	OK
一方向摩擦性 (N)	20.0	15.5
往復摩擦性 (回)	210	205

表4 一般特性
General properties

項目	本開発電線 1種0.9mm	AIHPW 1種0.9mm
仕上寸法 (mm)	0.956	0.956
導体寸法 (mm)	0.896	0.896
皮膜厚 (μm)	0.030	0.030
可とう性	1D良好	1D良好
密着性	良好	良好
耐摩擦性 (N)	20.0	15.5
絶縁破壊電圧 (kV)	13.5	13.3
軟化温度 (°C)	410	408
熱衝撃 220 × 1h	1D良好	1D良好

4. おわりに

- (1) 本開発電線は、通常電線と比較して、高周波寿命が向上しており、インバータサージ特性に優れている。
- (2) また、20%伸長のストレスを加えた場合でもインバータ寿命が向上している。
- (3) 本開発電線の基本特性は通常電線と同等であり、産業用モータ、自動車などのインバータ機器用途に使用可能である。

参考文献

- 1) Dakin: IEEE, 5(1959), 155