



HEV/EV用駆動モータ向け平角線の開発

Rectangular Magnet Wire for Electric and Hybrid Electric Vehicle Inverter-Drive Motors

太田 禎弥*
Shinya Ota

山内 雅晃
Masaaki Yamauchi

溝口 晃
Akira Mizoguchi

吉田 健吾
Kengo Yoshida

田村 康
Yasushi Tamura

近年、モータのインバータ駆動に伴うサージ電圧で発生する部分放電が巻線の絶縁劣化を引き起こし、モータの耐電圧寿命が低下することが問題となっている。寿命を向上させるためには部分放電の抑制が必要であり、低誘電率皮膜を適用した高い部分放電開始電圧 (PDIV) を有する巻線の開発が求められている。当社は、絶縁皮膜の内部に微細な独立気泡を均一に形成する新規技術を開発することで、画期的な低誘電率巻線の開発に成功した。本開発巻線は従来の巻線を遥かに凌駕する優れた耐電圧寿命を示した。

A surge current caused by a high-voltage inverter-drive motor system degrades the insulation performance of magnet wire. Sumitomo Electric Industries, Ltd. has developed a novel magnet wire that has a uniform micro-closed cell structure in the insulation film. This paper discusses the excellent dielectric properties of the new magnet wire.

キーワード：巻線、モータ、部分放電、低誘電率、耐電圧寿命

1. 緒 言

近年、世界各国の環境規制に伴い、ハイブリッド自動車 (HEV) や電気自動車 (EV) などの電動車の市場が急速に拡大している。電動車の駆動モータは、小型化・高効率化による出力密度向上の観点から、インバータ駆動が用いられ、動作電圧の高周波数化、高電圧化が進んでいる。それに伴い、発生するインバータサージが巻線に侵入して部分放電が生じ、絶縁皮膜が劣化してモータの耐電圧寿命が低下することが問題となっている⁽¹⁾。寿命を向上させるには、部分放電を抑制する必要がある、その抑制手法として、低誘電率皮膜を適用した巻線の開発が進められている。

当社は今回、巻線の皮膜内部に微細な独立気泡を均一に形成する新たな技術を開発することで、画期的な低誘電率巻線の開発に成功し、優れた誘電特性を示すことを確認したので、以下に詳細を報告する。

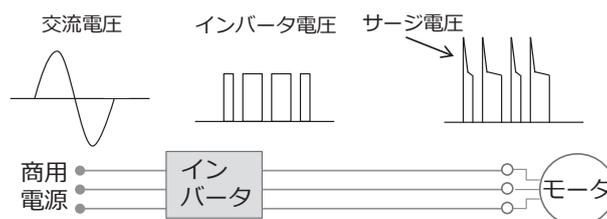


図1 インバータサージ電圧の模式図

電が発生し続けると、皮膜が浸食、劣化し、最終的には絶縁破壊に至る (図2)。そのため、耐電圧寿命を向上させるためには高周波、高電圧下でも部分放電の発生を抑制できる巻線が必要である。一般的にPDIVは、Dakin らが提唱

2. 巻線の部分放電

2-1 巻線に発生するインバータサージ電圧

インバータサージ電圧とは、インバータのスイッチングに伴い、モータの端子に発生する急峻な電圧のことである (図1)。インバータサージは、インバータ、モータ間の配線長が長いほど大きくなり、ピーク値はインバータ電圧の2倍程度に達することもある⁽²⁾。

2-2 部分放電による巻線皮膜の劣化

巻線間に高電圧が印加され、部分放電開始電圧 (Partial Discharge Inception Voltage : PDIV) を超えると、巻線皮膜の表面で微少な放電 (部分放電) が発生する。部分放

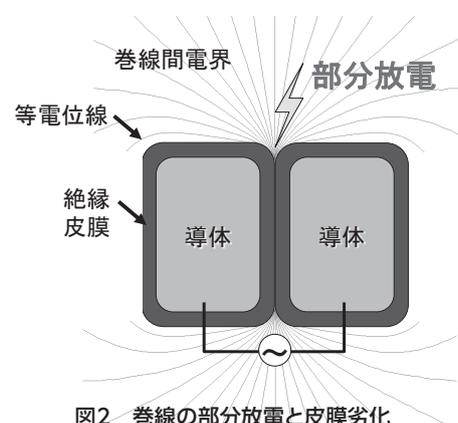


図2 巻線の部分放電と皮膜劣化

しているように比誘電率、膜厚と相関がある(式1)ことが知られている。しかしながら、皮膜を厚膜化すると、背反としてモータスロット内の断面積に対する導体断面積の比率(占積率)が低下し、モータの効率が低下する。そのため、占積率を損なわず、PDIVを向上させるには、皮膜の比誘電率を低下させることが必要となる。

【Dakin式】

$$V = \sqrt{2 \times 163 \times (2 \times t / \epsilon_r)^{0.46}} \dots\dots\dots (1)$$

V : 部分放電開始電圧 (Vp)

ϵ_r : 絶縁皮膜の比誘電率

t : 絶縁皮膜の厚さ (μm)

3. 低誘電率巻線の開発

これまで当社は、高い耐熱性、耐加工性、絶縁性が要求されるHEV/EV向け巻線として、皮膜にポリイミド(PI,比誘電率3.0)を被覆したポリイミド巻線を開発し、上市している⁽³⁾。このPI皮膜の比誘電率の低減を目的に、PIの化学構造との相関を体系的に検討したが、比誘電率は2.7が限界であった。

一方、絶縁皮膜の比誘電率を大幅に下げる手法として、比誘電率が1.0の空気を皮膜に導入することが知られている⁽⁴⁾。今回、巻線のPI皮膜に、気泡を導入することを検討した結果、気泡を均一、かつ、サイズを制御しながら導入する技術の開発に成功した(以下、気泡を導入した巻線を気泡巻線、気泡の導入率を気泡率と記載)。

気泡巻線の気泡率と比誘電率の関係を図3に示す。気泡率の増加に伴い、理論計算通りに比誘電率を低下させることができた。比誘電率3.0のPI内部に気泡を約30vol%導入することで、比誘電率を2.2、約50vol%導入することで1.7にまで低減させることが可能となった。

従来の気泡巻線は気泡同士が連通した構造となる場合があり、気泡が粗大化するため、誘電特性や耐加工性が低下する懸念がある。特に、気泡サイズが大きくなると気泡内

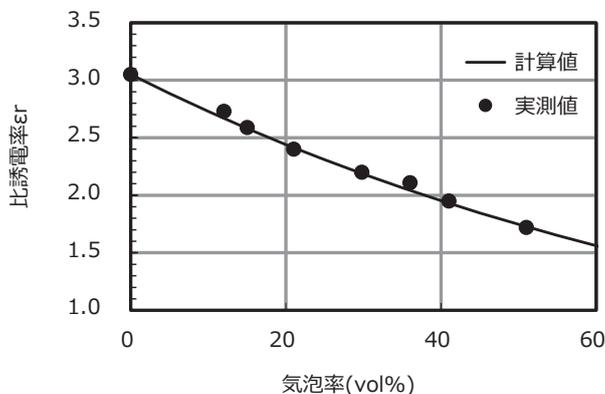


図3 気泡巻線の比誘電率

での放電開始電圧が低下すると推定されることから、気泡は均一にし、かつ、サイズを制御することが望ましい⁽⁵⁾。

今回、当社は巻線の皮膜内部に微細な独立気泡を均一に形成した気泡巻線を開発した(図4)。図5のように巻線の中央部に金属箔を巻き、巻線末端の導体(皮膜剥離部)と金属箔を端子で繋ぎ、交流電圧を印加して絶縁破壊電圧を測定した。結果、従来の気泡巻線は4.9kVで絶縁破壊したのに対し、開発した気泡巻線は10.8kVまで絶縁破壊電圧が向上した。微細な独立気泡の導入による内部放電の抑制によって絶縁性が向上したものと考えられる。

従来気泡巻線 開発気泡巻線

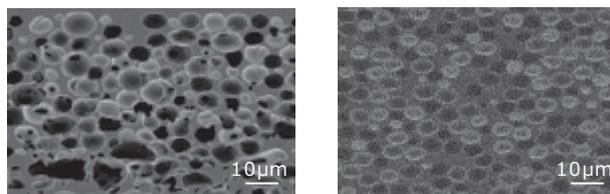


図4 気泡巻線の断面写真

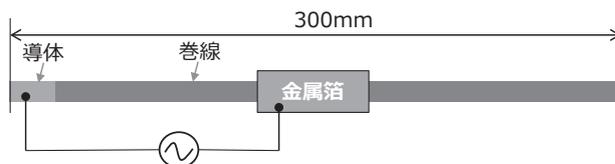


図5 絶縁破壊電圧測定用試料の模式図

4. 気泡巻線の部分放電開始電圧

4-1 部分放電開始電圧の測定

PDIVの測定用試料は、図6のように2本の平角線のフラット面同士を平行に合わせて固定したペアサンプルを使用した。巻線の皮膜厚は60 μm とし、従来のPI巻線と気泡PI巻線(気泡率10、30、50vol%)を測定に供した。

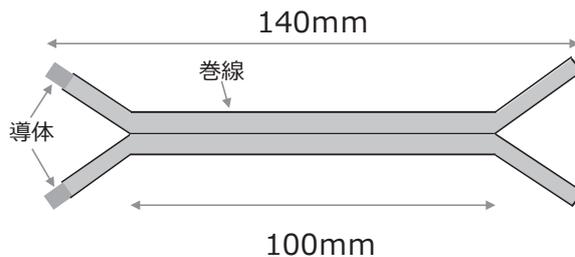


図6 PDIV測定用試料の模式図

測定温度は25℃、相対湿度は50%とし、繰り返し10回測定の平均値を求めた。

図7に部分放電開始電圧の実験回路図を示す。部分放電の電流パルスを測定するために、検出抵抗を試料に直列接続し、電源周波数成分を遮断するハイパスフィルタを介して測定を行った。試料に60Hzの交流電圧を1.0kV/minの速度で上昇させながら印加し、最初に放電電流が検出されたときの瞬時電圧値をPDIVとした。

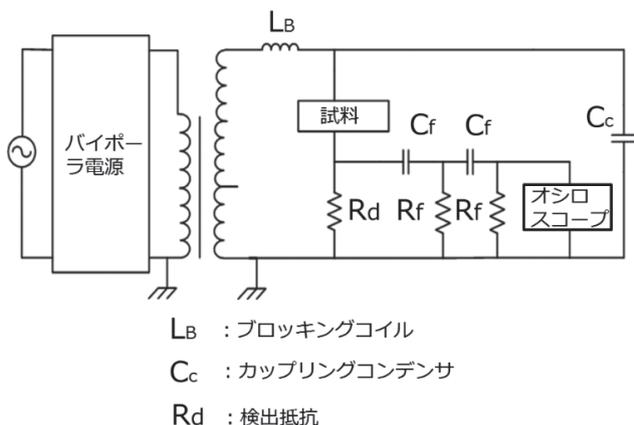


図7 PDIV測定の回路図

25℃でPDIVを測定した結果、図8に示すように気泡PI巻線のPDIVは気泡率が高いほど向上し、気泡率30vol%の気泡PI巻線は、気泡率0%のPI巻線に対してPDIVが200Vp以上向上することを確認した。

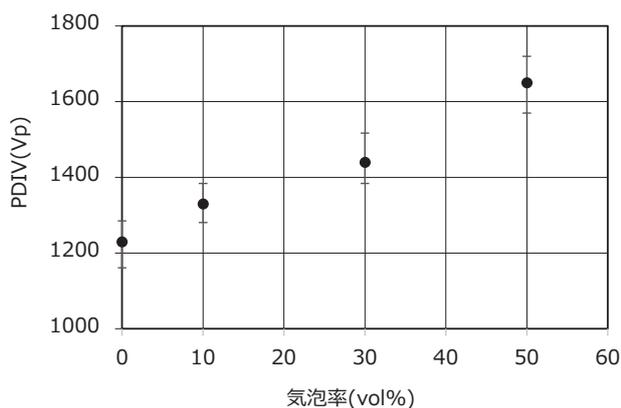


図8 気泡PI巻線のPDIV測定結果 (25℃)

4-2 部分放電開始電圧の温度影響

PDIVの温度依存性を測定した結果を図9に示す。PI巻線、気泡PI巻線ともに温度上昇に伴うPDIVの低下が確認されたが、PI巻線と気泡PI巻線のPDIV低下率に差はないことを確認した。なお、温度上昇に伴うPDIVの低下は巻線間に存在する空気の密度が低下し、放電が発生しやすくなるためと考えられる。

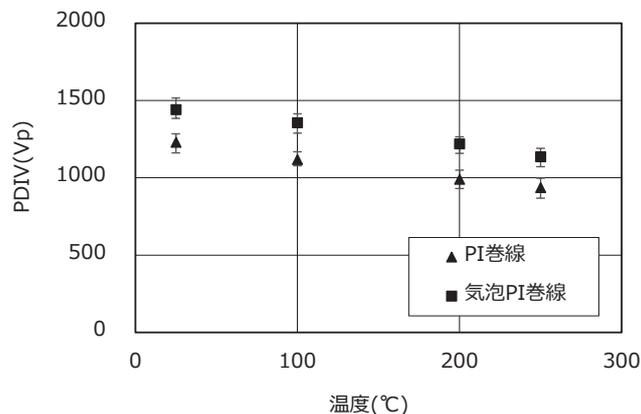


図9 PDIVの温度依存性の測定結果

4-3 部分放電開始電圧の気圧影響

PDIVの気圧依存性を測定した結果を図10に示す。PI巻線、気泡PI巻線ともに気圧の低下に伴いPDIVの低下が確認されたが、PDIVの低下率は、PI巻線と気泡PI巻線で差がないことを確認した。

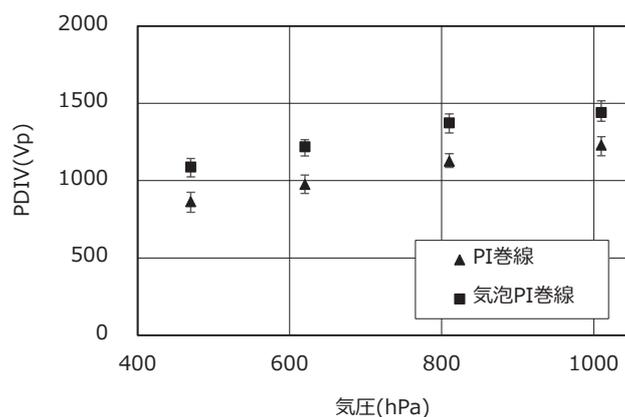


図10 PDIVの気圧依存性の測定結果

5. 耐電圧寿命試験

PDIV以上の電圧を印加すると、前述のように、巻線間に部分放電が発生し、皮膜が劣化して絶縁破壊に至る。各印加電圧において、巻線が絶縁破壊に至るまでの時間を耐電圧寿命と言ひ、4-1項のPDIV測定で使用したPI巻線と気泡率30vol%の気泡PI巻線のペアサンプルを用いて耐電圧寿命を測定した(図11)。測定温度は25℃、相対湿度は50%とし、10kHzの正弦波交流電圧を印加し、印加電圧を変化させて絶縁破壊するまでの時間を測定した。

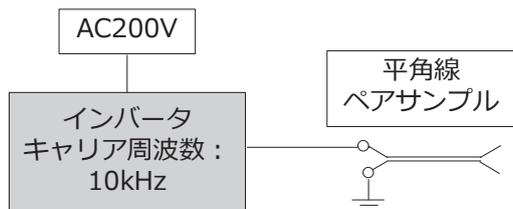


図11 耐電圧寿命測定の様式図

図12に試験電圧とその電圧において巻線が絶縁破壊するまでの時間の関係を示す。なお、白抜きのプロットは、試験終了時の時間を示している。白抜きの試料の試験後の外観を確認したが、皮膜に放電痕はなく、電圧を無限に印加しても絶縁破壊が生じないと考えられる(以下、無限寿命領域と記載)。

試験電圧1600Vpにおいて、PI巻線は25分、気泡PI巻線は402分で絶縁破壊した。また、試験電圧1400Vpにおいては、PI巻線は49分で絶縁破壊したが、気泡PI巻線は3000分経過後も絶縁破壊せず、無限寿命領域に達していると判断した。評価結果を表1にまとめる。この結果より、気泡PI巻線は、PI巻線に対して絶縁破壊しにくく、耐電圧

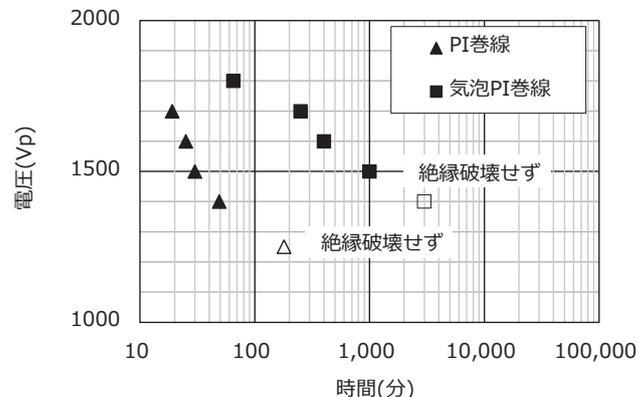


図12 耐電圧寿命の測定結果 (25℃)

寿命が向上していることがわかった。

6. 結 言

巻線の皮膜内部に微細な気泡を多数形成する新たな手法を開発し、画期的な低誘電率巻線の開発に成功した。開発した気泡ポリイミド巻線は、従来の巻線を凌駕する優れた誘電特性を示した。今後も、産業用モータは、小型化・高効率化の観点から動作電圧の高電圧化、高周波数化が進むと考えられ、今回開発した気泡ポリイミド巻線が幅広く適用されることが期待される。

表1 評価結果

	従来品 (PI巻線)	開発品 (気泡PI巻線)
絶縁皮膜材料	ポリイミド	ポリイミド
膜厚 (μm)	60	60
気泡率 (vol%)	0	30
比誘電率	3.0	2.2
PDIV (Vp)	1230	1440
耐電圧寿命 (min)	1600Vp	25
	1400Vp	49
		絶縁破壊せず

用語集

※1 比誘電率

絶縁体の分極のしやすさを示す値。比誘電率が低いと部分放電開始電圧が高くなる。

※2 部分放電開始電圧 (PDIV)

巻線間で放電が開始する電圧。放電が発生した場合、絶縁皮膜が劣化しモータ寿命が短くなる恐れがある。

参考文献

- (1) インバータサージ絶縁調査専門委員会、「特集インバータサージの絶縁システムの影響」、電気学会誌、Vol.126、No.7、pp.419-427 (2006)
- (2) 社団法人日本電機工業会、「400Vインバータで汎用モータを駆動する場合の絶縁影響について」、pp.1-3 (1995)
- (3) 菅原潤 他、「巻線開発の歴史と今後の展望」、SEIテクニカルレビュー 第190号、pp99-104 (2017年1月)
- (4) 上野秀樹、岡田翔、太田慎弥、溝口晃、山内雅晃、「高周波交流電圧印加時におけるエナメル線のV-t寿命特性」、電気学会 プラズマ・放電・パルスパワー合同研究会、ED-15-079 (2015)
- (5) 田中杏樹、岡田翔、上野秀樹、太田慎弥、溝口晃、山内雅晃、「気泡エナメル線の空孔内放電に関する検討」、平成30年電気学会全国大会、1-129 (2018)

執筆者

太田 慎弥* : エネルギー・電子材料研究所



山内 雅晃 : エネルギー・電子材料研究所
グループ長



溝口 晃 : エネルギー・電子材料研究所
主幹



吉田 健吾 : 住友電工ウインテック(株)
グループ長



田村 康 : (株)オートネットワーク技術研究所
主席



*主執筆者