

高周波交流電圧に対する耐電圧寿命に優れる巻線

Magnet Wire with Enhanced Tolerance for High Frequency Voltage

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過電圧により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、部分放電の発生を抑制することが必要であり、絶縁被膜に低誘電率材料を適用し、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、絶縁材料内部に微小な気泡を形成する手法を巻線の薄い絶縁皮膜に適用することで、画期的な低誘電率巻線の開発に成功した。また気泡を導入した開発巻線は、従来の巻線より優れた耐電圧寿命を示した。

Overvoltage, resulting from the application of a high frequency voltage, and its subsequent steep surge on an inverter-fed motor can significantly deteriorate an insulated system due to partial discharge. Therefore, magnet wire that has a higher tolerance for surges and lower dielectric permittivity is needed. This paper describes our new magnet wire coated with a porous insulator for higher surge resistance.

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、産業用モータは小型化・高効率化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、発生する過電圧・インバータサージが巻線に進入して絶縁皮膜が部分放電により浸食され、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⁾。寿命を向上させるためには、部分放電の発生を抑制する必要があり、放電抑制を可能にする手法として、低誘電率材料を適用した巻線の開発が進められている。当社は、これまで絶縁皮膜内部に微小な気泡を多数形成させ、絶縁体の比誘電率^{*1}を小さくする手法を適用した同軸ケーブル等を開発し、上市してきた。今回、絶縁材料内部に微小な気泡を形成する手法を巻線の薄い絶縁皮膜に適用することで、画期的な低誘電率巻線の開発に成功した。また、高周波交流電圧印加時の耐電圧寿命を調査した結果、気泡を導入した巻線は従来の巻線と比較して優れた耐電圧寿命を確認したので以下報告する。

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内の直流電圧の2倍程度に達することもある⁽²⁾。

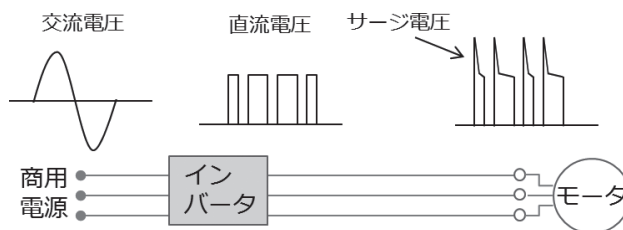


図1 インバータサージ電圧の模式図

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、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小な放電 (部分放電) が発生する。部分放電が発生し続けると絶縁皮膜は浸食され、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らが提唱するように比誘電率、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、絶縁皮膜を厚膜化すると、背反としてモータスロット内の面積に対する導体面積の比率(占積率)が低下し、モータの効率が低下する。従って、占積率を低下させず、PDIVを向上させるには、絶縁皮膜の比誘電率を低減させることが必要となる。

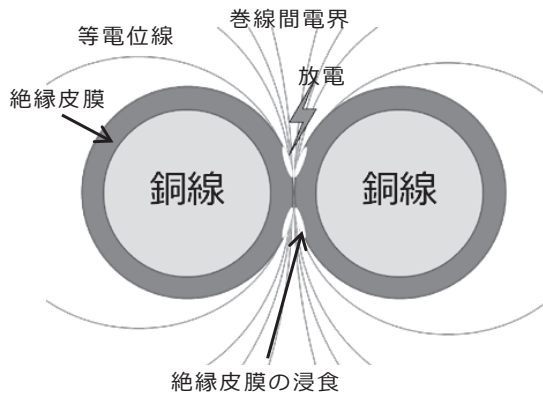


図2 巻線の部分放電と絶縁皮膜の浸食

【Dakin式】

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

V : 部分放電開始電圧*2 [Vp]

ϵ_r : 絶縁皮膜の比誘電率

t : 絶縁皮膜の厚さ [μm]

3. 低誘電率発泡巻線の巻線

絶縁皮膜の比誘電率を低減させる手法の一つとして、比誘電率が1.0の空気を導入することが知られている^{(3),(4)}。当社は、これまで絶縁皮膜内部に微小な気泡を多数形成し、絶縁皮膜の比誘電率を低くする手法を適用した同軸ケーブル等を上市してきた。今回、新たに巻線の薄い絶縁皮膜に、気泡を導入することを検討した(図3)。ポリイミド(PI)の絶縁皮膜へ気泡を導入した結果、大幅に比誘電率を低減させることに成功した(以下、気泡を導入した巻線を発泡巻線、絶縁被膜に対する気泡(空気)の体積比率を発泡率と記載)。

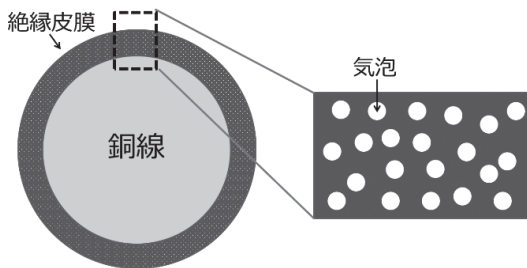


図3 発泡巻線の模式図

発泡巻線の発泡率と比誘電率の関係を図4に示す。発泡率の増大に伴い、理論計算通りに比誘電率を低減すること

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まで下げることが可能となった。

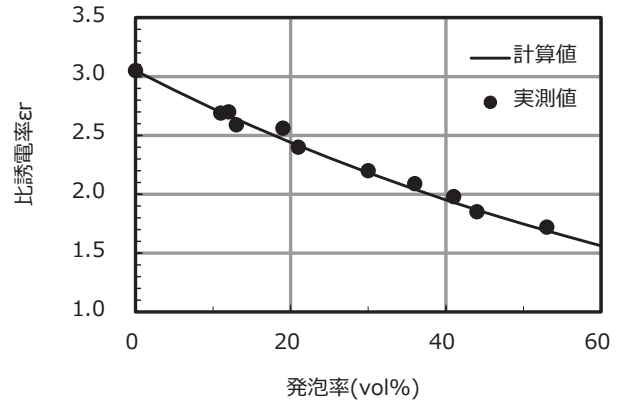


図4 発泡巻線の比誘電率

4. 部分放電開始電圧 (PDIV) の測定

PDIV測定用試料は、導体直径 $\phi 1.0\text{mm}$ 、絶縁皮膜厚 $30\mu\text{m}$ のPI巻線、及び、発泡PI巻線(発泡率10、20、30vol%)を用いた。部分放電開始電圧の測定では、JISC3216-5で規定された2個撚り法により作製したツイストペア線を用いた。図5にツイストペア線の試料形状を示す。

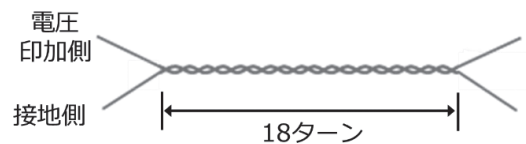


図5 ツイストペア線の模式図

測定温度は 25°C 、相対湿度は50%とし、繰り返し10回測定の平均値を求めた。また、高温下での部分放電特性も確認すべく、PI巻線と発泡率30vol%の発泡PI巻線については、 100°C 、 200°C でのPDIV測定も実施した。図6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。

また、PDIVは試料に60Hzの交流電圧を $1.0\text{kV}/\text{min}$ の速度で上昇させて印加し、最初に放電電流が検出されたときの瞬時電圧値とした。

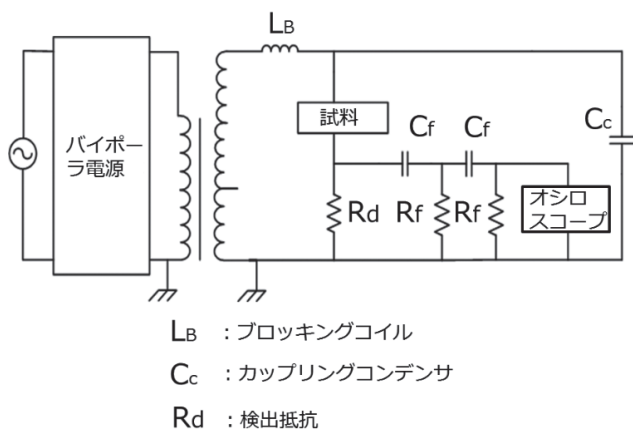


図6 PDIV測定回路図

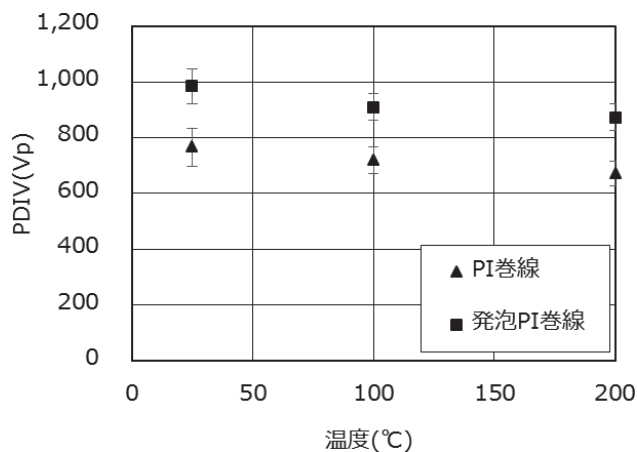


図8 発泡PI巻線の高温下PDIV測定結果

25℃でPDIVを測定した結果、図7に示すように発泡PI巻線のPDIVは、PI巻線に対し、大幅に向上した。また、PDIVは発泡率が大きくなるほど向上し、発泡率30vol%の発泡PI巻線においては、PDIVが985VpとPI巻線の770Vpに対して200Vp以上の向上を確認した。

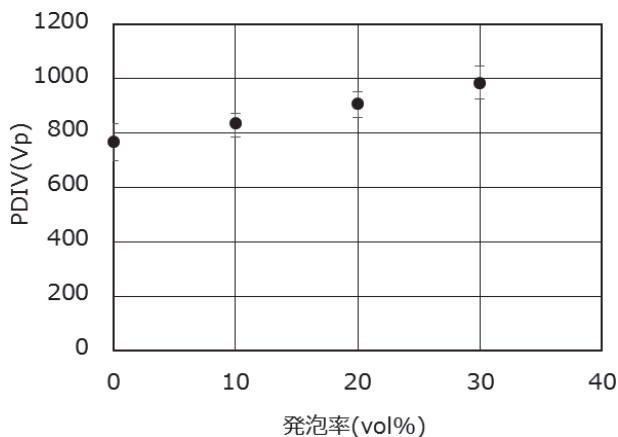


図7 発泡PI巻線のPDIV測定結果 (25℃)

100℃、200℃の高温下でPDIVを測定した結果、図8に示すようにPI巻線、発泡PI巻線ともにPDIVの低下が確認された。これは、温度上昇に伴って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ったためと考えられる。一方、室温下PDIVに対する高温下PDIVの低下率は、PI巻線と発泡PI巻線に差はなく、温度変化による影響は小さいことが確認された。

5. 耐電圧寿命の測定

PDIV以上の電圧を印加した場合、巻線間に部分放電が発生し、絶縁皮膜が徐々に浸食されて最終的には絶縁破壊に至る。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呼ぶ。巻線の耐電圧寿命の測定は、先のPDIV測定で使用したPI巻線と発泡率30vol%の発泡PI巻線のツイストペア線を用いた。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、絶縁破壊するまでの時間を測定した。高温下での耐電圧寿命においては、200℃下で同様の測定を実施した。耐電圧寿命の測定は、図9の装置を用いて測定を行った。

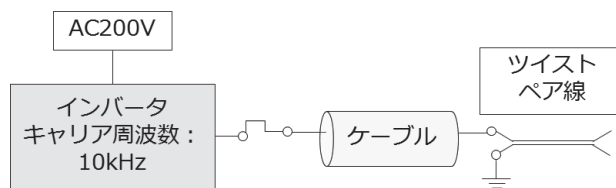


図9 耐電圧寿命測定の様式図

図10に測定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。尚、白抜きのプロットは、試料が絶縁破壊しなかったため、測定終了時の時間を示している。測定後の絶縁破壊試料の外観を確認したが、絶縁皮膜に放電痕は確認されなかった。測定電圧1200Vpにおいて、PI巻線は36分、発泡PI巻線は80分で絶縁破壊した。測定電圧900Vpにおいては、PI巻線は78分で絶縁破壊したが、発泡PI巻線は2500分経過後も絶縁破壊しなかった。以上の結果より、絶縁皮膜を発泡させて気泡を導入した発

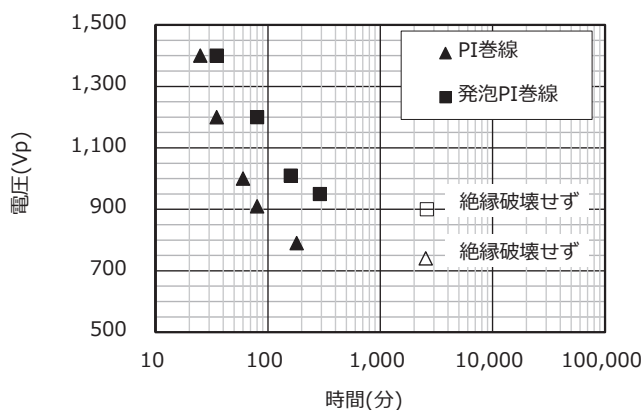


図10 耐電圧寿命の試験結果 (25°C)

泡PI巻線は、PI巻線に対して絶縁破壊しにくく、耐電圧寿命が向上していることがわかった。

200°C下での耐電圧寿命の試験結果を図11に示す。測定電圧1200Vpにおいて、PI巻線は25分、発泡PI巻線は43分で絶縁破壊した。測定電圧900Vpにおいては、PI巻線は42分、発泡PI巻線は205分経過後に絶縁破壊した。発泡PIは、25°C下の測定電圧900Vpでは絶縁破壊しなかったが、高温下ではPDIVが低下し、部分放電により絶縁皮膜の浸食が発生したと考えられた。尚、発泡PI巻線では測定電圧800V、PI巻線では測定電圧650Vを2500分以上印加したが絶縁破壊しなかった。以上の結果より、発泡PI巻線は、室温25°C、高温200°CのいずれにおいてもPI巻線に対して優れた耐電圧寿命を示すことがわかった。

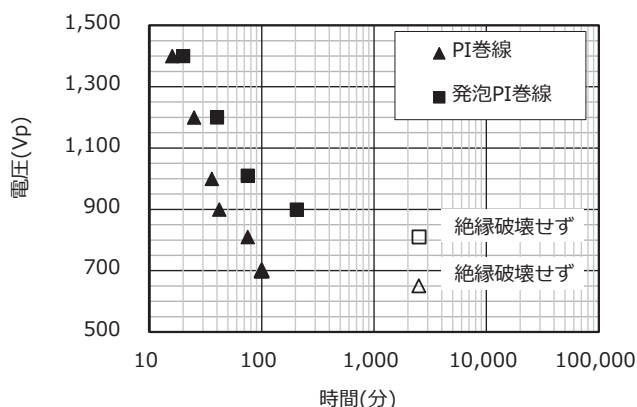


図11 耐電圧寿命測定の結果 (200°C)

7. 結 言

絶縁材料内部に微小な気泡を形成する手法を巻線の薄い絶縁皮膜に適用することで、画期的な低誘電率発泡巻線の開発に成功した(表1)。また気泡を導入した開発巻線は、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。産業用モータは、小型化・高効率化の観点から今後も動作電圧の高周波数化、高電圧化が進むと考えられ、耐電圧寿命電圧に優れた開発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 (発泡PI巻線)
絶縁皮膜材料		ポリイミド	ポリイミド
発泡率 (vol%)		0	30
比誘電率		3.0	2.2
PDIV (Vp)		770	985
耐電圧寿命 (min)	25°C	1,200Vp	35
		900Vp	80
	200°C	1,200Vp	25
		800Vp	75

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 (PDIV) 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) 河添千里、「膨潤押出法による発泡高密度ポリエチレン絶縁電線の製造」、住友電気第102号、pp.26-31 (1970)
- (4) 上野秀樹、岡田翔、太田禎弥、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)

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㈱ 主査



田村 康 : 住友電工ウインテック㈱ 主席



*主執筆者