

インバータ駆動電動機におけるサージ対策の基礎検討

🔗 絶縁技術, インバータサージ, 耐部分放電電線, 部分放電, V-t特性

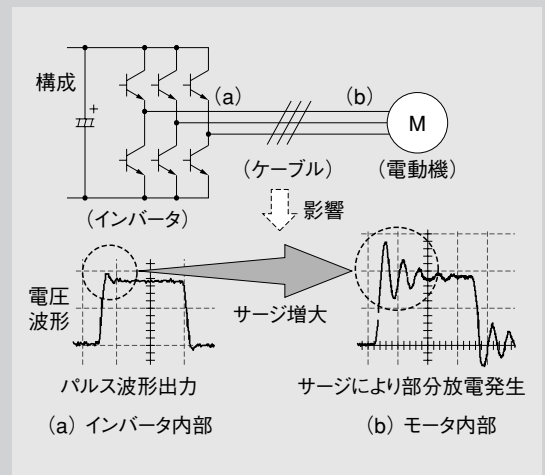
* 大石和城 Kazuki Oishi

* 吉岡靖浩 Yasuhiro Yoshioka

概要

インバータ駆動電動機は、省エネルギー対策や小形化・高性能化といった市場要求に伴い、過酷な使用条件への対応が必要になっている。その中で、インバータサージが電動機絶縁システムへ悪影響を及ぼすことが懸念されている。

当社は、インバータサージが電動機に及ぼす影響を把握すると共に、耐部分放電特性に優れたエナメル線を使用した絶縁システムの適用に向けた検討を実施している。



インバータサージの発生模式図

1. ま え が き

近年の産業用電動機は、適切な運転制御により省エネルギーが図れるインバータを使用した可変速駆動が増えている。これらインバータ駆動電動機は、更なる小形化や駆動電圧の高電圧化による高出力・高効率化などに対する要求が強く、過酷な使用条件への対応が必要になっている。特に、インバータの高速スイッチングに伴い生じるサージに起因して電動機の巻き線間で部分放電が発生し、絶縁に悪影響を及ぼすことが懸念されている。従来、インバータサージにより部分放電の発生が予測される場合は、サージアブソーバなどによる部分放電対策がとられている。しかし、これらの対策は軽量化を妨げ、コスト高となることから、その代替として電線メーカーから耐部分放電性に優れたエナメル線（耐部分放電電線）が開発され一部は市販され

*基盤技術研究所 材料研究部

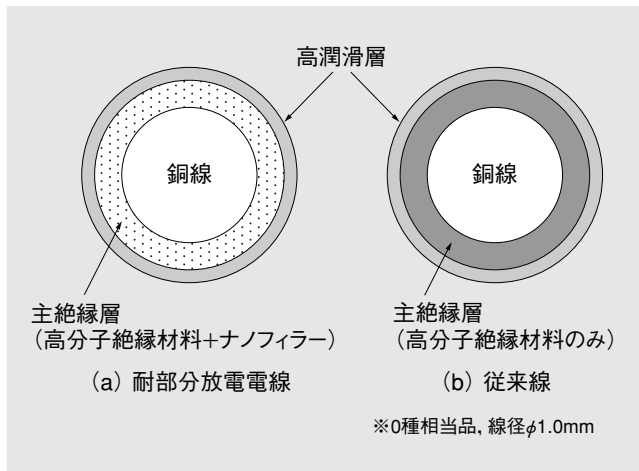
ている。

当社では、インバータ駆動電動機の課題対策の一環として、耐部分放電電線の適用に向けた検討を実施している。本稿では、耐部分放電電線のインバータサージによる部分放電特性及び寿命評価試験の結果について紹介する。

2. インバータ駆動電動機の課題と対策

2.1 インバータサージによる部分放電発生メカニズム

現在主流のインバータ制御（PWM制御：Pulse Width Modulation control）における出力電圧波形は、正極側パルス列と負極側パルス列を交互に繰り返している。このパルス電圧の立ち上がり（正負極共）は急峻（数十ns）なため、オーバーシュートによるサージが発生する。このインバータサージは、電源ケーブルを介して電動機に印加され



第1図 耐部分放電電線と従来線の断面構造例
耐部分放電電線の代表的な構造例を示す。主絶縁層にナノフィラーを混入していることが大きな特長である。

るが、電源ケーブルが持つインダクタンスの影響や電動機と電源ケーブルのインピーダンス不整合による反射などによってインバータ出力電圧の2倍程度まで増大する。増大した電圧が電動機に印加されると巻き線間で部分放電が発生し、エナメル線の絶縁被膜が徐々に劣化侵食され、絶縁破壊に至る場合もある。また、インバータサージ（繰り返しインパルス）による部分放電測定技術も十分に確立されていない。従って、電動機絶縁システムの部分放電対策や部分放電発生メカニズムの究明及び部分放電測定技術の確立が重要な課題である。

2.2 インバータサージ対策

現在、市販されている代表的な耐部分放電電線の特長を以下に示す。

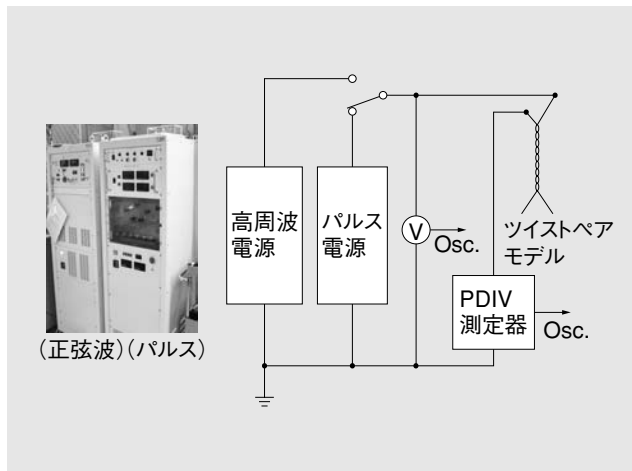
- (1) 第1図に示すように、表層に高潤滑層、内部に主絶縁層を有する構造が主流である。
- (2) 主絶縁層はポリエステルイミドなどの高分子絶縁材料を主体に、耐部分放電特性向上を目的として、シリカなどのナノフィラーを均一に分散させている。

今回、耐部分放電電線の評価試料として、各電線メーカーが市販しているものから数種類を入手し、部分放電特性と寿命特性試験を実施した。第1図に代表的な耐部分放電電線と従来線の断面構造例を示す。

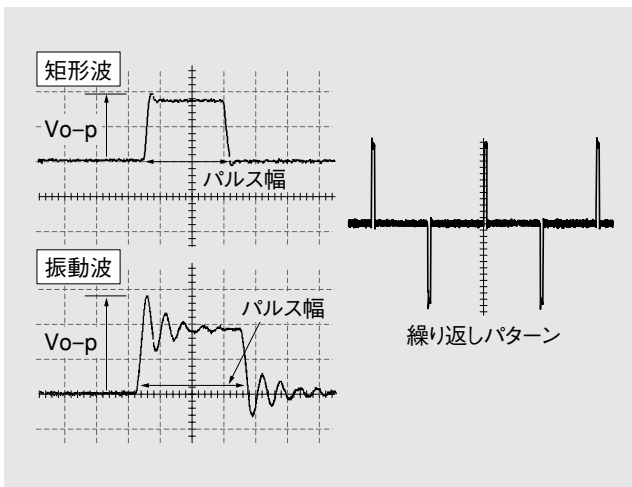
3. インバータサージによる基礎特性実験

3.1 試験装置及び試料形状

第2図にエナメル線の寿命特性〔V-t特性



第2図 V-t特性試験と部分放電測定試験の装置構成
数kHz～数十kHzの正弦波・模擬インバータパルス波形を出力できる電源にPDIV測定器を付帯した構成である。



第3図 パルス波形及び繰り返しパターン例

模擬インバータパルス電源では、矩形波のほかにインダクタンスの影響を受けて大きく振動した波形も模擬できる。

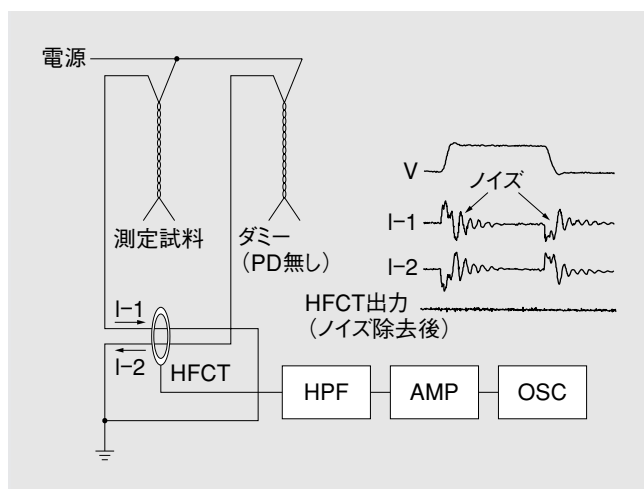
(V：試験電圧，t：絶縁破壊に至るまでの時間)] 試験と部分放電測定試験の装置構成を示す。試験装置は、数k～数十kHzの正弦波電圧を出力できる高周波電源装置とインバータパルス電圧を模擬した正負パルス波の設定ができるインバータパルス電源装置、これに部分放電測定用の高周波変流器(HFCT)及び計測器類を付帯した構成を基本とする。試験は、JIS C 3003に規格されている2本のエナメル線をより合わせたツイストペア試料を使用して実施した。

3.2 部分放電特性

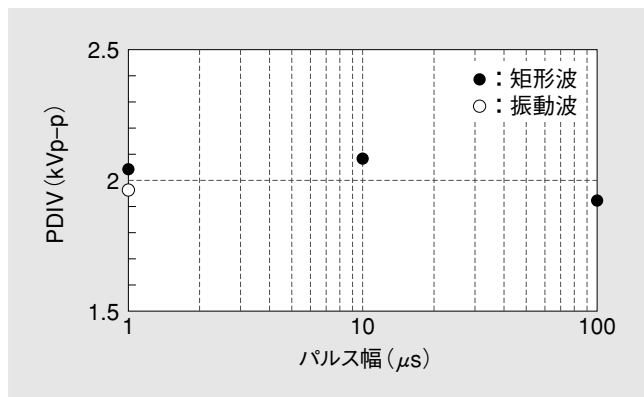
インバータパルス電圧波形に対する部分放電開始電圧(PDIV: Partial Discharge Inception Voltage)の挙動について調べた。第3図に試験で使用した模擬インバータパルス電圧の波形と繰

り返しパターン例を示す。試験では、オーバーシュートが小さい矩形波とオーバーシュートが大きい振動波の2波形を基本として、繰り返しパターン数(N：キャリア周波数模擬)を設定した試験電圧を試料に印加し、各PDIVを測定した。第4図にHFCT差動法によるPDIV測定構成を示す。電源装置が発生するノイズをHFCTによる差動法とフィルタ(HPF)により除去し、アンプ(AMP)で増幅した信号(接地線パルス電流を電圧変換した信号)をオシロスコープ(OSC)に取り込む。あらかじめ確認した部分放電発生レベルにオシロスコープのトリガを設定し試験を実施する。試験電圧(印加電圧)を昇圧していきトリガ出力された時の電圧をPDIVとして評価した。

(1) インバータパルス電圧波形の影響 第5図に矩形波と振動波のPDIV(パルス幅1μs)を示す。両者の試験結果に大差のないことを確認した。以



第4図 HFCT差動法によるPDIV測定構成
2本のツイストペア試料を用いてノイズをキャンセルさせる方法を示す。



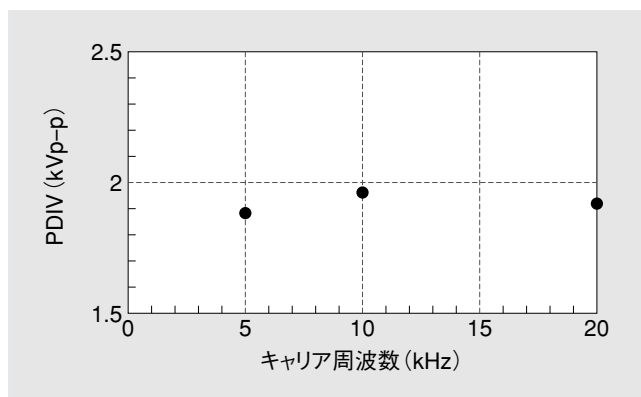
第5図 PDIVのパルス幅依存性
第3図に示したパルス波形・繰り返しパターンでのPDIV測定結果を示す。

下は矩形波を主体として測定、評価した結果を紹介する。

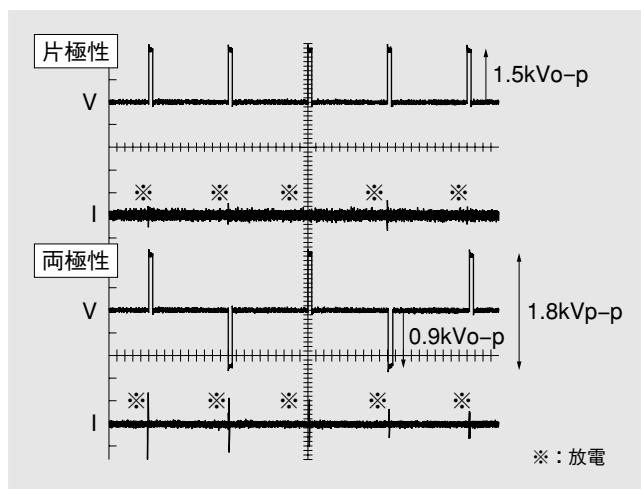
(2) パルス幅の影響 第5図に矩形波のパルス幅を1μsから100μsまで変化させたときのPDIV測定結果を示す。PDIVは1.8~2.1kVp-pの範囲であり、本試験条件においてPDIVのパルス幅依存性は認められなかった。なお、試験電圧波形の立ち上がり時間は約60nsである。

(3) キャリア周波数の影響 第6図にインバータパルス電圧のキャリア周波数を模擬し変化させた時のPDIV測定結果を示す。PDIVは1.8~2.0kVp-pの範囲であり、キャリア周波数とPDIVの間に顕著な傾向は認められなかった。

また、実際のインバータ出力電圧波形のパターンを想定し、同じ極性で複数のパルスを出力する(片極性)パターンと極性を反転して出力する(両極性)パターンを組み合わせ、各パターンとPDIV



第6図 PDIVのキャリア周波数依存性
インバータパルス電圧のキャリア周波数の変化を模擬した時のPDIV測定結果を示す。



第7図 パルスの極性とPDIV
極性反転部を模擬している両極性パターンでは、低い電圧で放電しやすいことを示す。

の関係について検討した。第7図に出力パターンに対するPDIV測定結果を示す。片極性パターンでのPDIVは1.5kVo-pであるのに対し、極性反転部を模擬した両極性パターンでのPDIVは0.9kVo-pであった。

第8図にインバータパルス電圧とPDIV発生状況を示す。インバータの出力電圧が低い状態(第8図①:PDIV未満)では、部分放電が生じないか非常に微小であるため、印加電圧に対するV-t特性は非常に長い。出力電圧を徐々に昇圧(第8図②:PDIV以上)していくと、出力電圧の極性反転部で部分放電が発生する。更に電圧を昇圧していくと(第8図③)極性反転部に加え片極性のパルス電圧立ち上がり部でも部分放電が発生する。このように、インバータ電圧(印加電圧)の値により部分放電の発生状況が異なり、①②③の順で印加電圧に対する寿命が短くなると推測する。特に、③ではエナメル線絶縁被膜の劣化侵食が加速され、早期に絶縁破壊に至ると考えられるため印加電圧と部分放電の発生状況の把握が重要となる。

(4) インバータパルス電圧波形と交流電圧波形の比較 寿命特性試験の簡易化などから、交流電源(50Hz)を使用した試験を実施した。模擬インバータパルス電源とHFCTを組み合わせたPDIV測定及び交流電源と結合コンデンサを組み合わせたPDIV測定の結果を比較した。第9図に交流電源による測定結果例(部分放電電荷量50pC時の検出

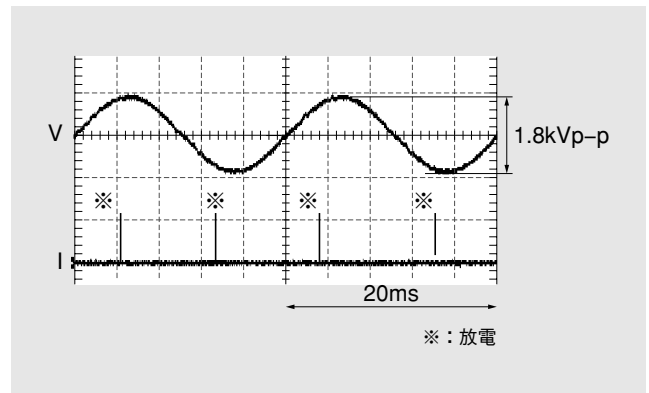
感度で測定)を示す。交流電源を使用した場合のPDIVは約1.8kVp-pであった。これは、インバータパルス電源によるPDIV測定結果(第7図両極性)と同等であった。

以上から、エナメル線(ツイストペア試料)のPDIVはインバータパルス波形や正弦波など波形の違いによらず、印加される電圧のピーク値に依存することが分かった。

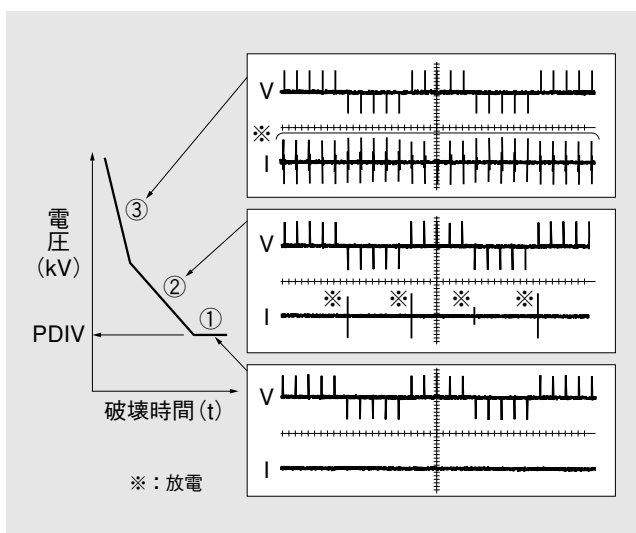
3.3 課電圧寿命(V-t)特性

評価試料として3種類(A, B, C)の耐部分放電電線をを用いてV-t特性試験を実施した。試験装置は第2図に示したものと同一である。

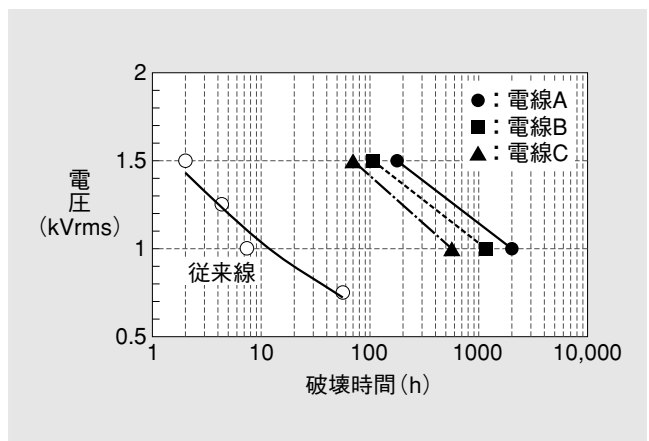
(1) 高周波交流電源によるV-t特性(室温) 0種相当の従来線と耐部分放電電線を試料として試験を実施した。第10図に室温下での試験結果を示す。試験周波数10kHzで電圧1.0kVrms及び1.5kVrmsの2条件で試験を実施したが、いずれも従来線に比べ耐部分放電電線の方が50~200倍長寿命であること



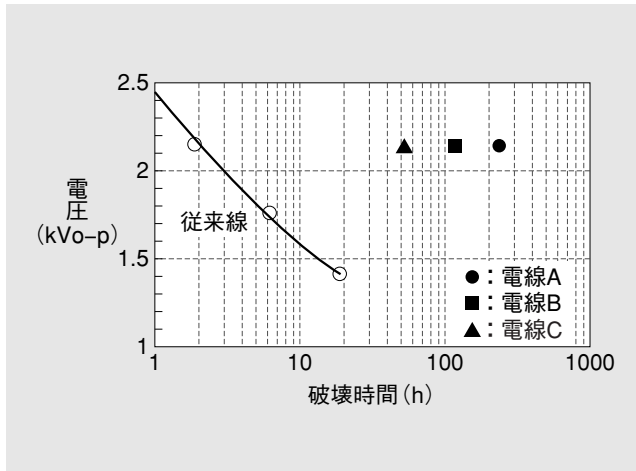
第9図 交流電源を用いたPDIV測定結果例
交流電源を使用したPDIV測定結果を示す。模擬インバータパルス電源のPDIVと同等であった。



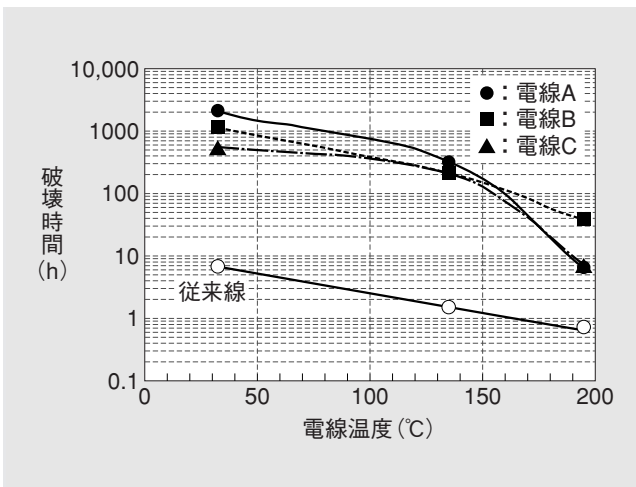
第8図 インバータパルス電圧とPDIV発生状況
電圧を上げていくと極性反転部で部分放電が発生する。更に電圧を上げると片極性のパルス電圧立ち上がり部でも発生する。



第10図 V-t特性(正弦波, 室温)
室温下で正弦波電圧を印加した時のV-t特性を示す。従来線に比べて50~200倍長寿命である。



第11図 V-t特性 (同極性パルス, 室温)
模擬インバータパルス電圧を印加した時のV-t特性を示す。従来線と比べて25~100倍長寿命である。

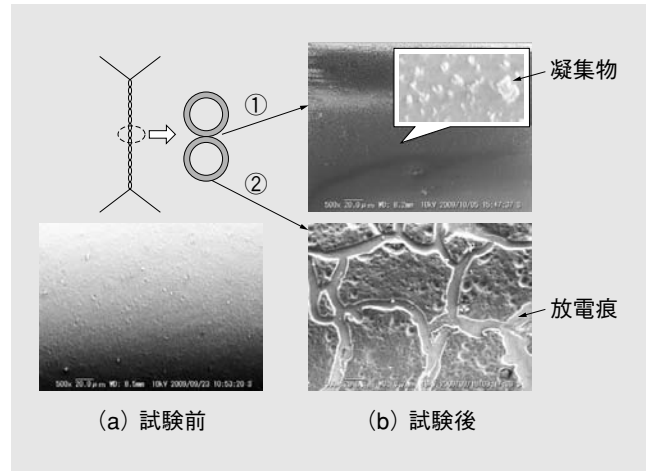


第12図 V-t特性 (正弦波, 高温)
高温下でのV-t特性を示す。電線温度が上がると寿命の低下が見られる。

を確認した。

(2) 模擬インバータパルス電源によるV-t特性
同様に0種相当の従来線と耐部分放電電線を試料として、キャリア周波数20kHz模擬 (5パルス/同極)、電圧2.15kVo-pで試験を実施した。第11図に試験結果を示す。従来線に比べ耐部分放電電線の方が25~100倍長寿命であることを確認した。

(3) 高周波交流電源によるV-t特性 (高温) 実運転時の温度を想定して、V-t特性の温度依存性を検討した。第12図に高温下でのV-t特性を示す。耐部分放電電線A, Bは室温下、印加電圧1kVrmsで1000時間超の寿命を示したが、試験温度 (電線温度) を135℃まで上げると約300時間の寿命となり、明らかに寿命の低下が認められた。但し、従来線の破壊時間は約2時間であることから、従来線



第13図 耐部分放電電線の表面観察 (V-t特性試験, 135℃, 1kVrms)

135℃でV-t特性試験を実施した試料の表面観察 (SEM) を示す。ナノフィラーの凝集物と放電痕が見られ、放電によって表面が侵食されている様子が分かる。

と比較すると約150倍の寿命を確保できる。更に温度を195℃まで上げると、評価試料電線すべてが100時間未滿で絶縁破壊した。従来線の破壊時間が約1時間であることから、この温度では従来線との優位性は無いと考える。

3.4 耐部分放電電線の表面観察

第13図に試験温度135℃でV-t特性試験を行った耐部分放電電線の表面観察 (SEM) を示す。ツイストペア試料で2本の電線が接触している箇所①は部分放電により絶縁被膜が侵食され、侵食部への凝集物付着を確認した。この凝集物は絶縁被膜中の有機物が劣化・分解し、ナノフィラーが表面に析出し凝集したものと推測され、その大きさは約1μmに達していた。

電線同士が接触していない箇所②では無数の放電痕が見られた。これは2本の電線間で発生した放電が電線全体に回り込み絶縁被膜表面を侵食させたものと推測する。但し、②での侵食度は電線が接触している①よりも少なく、絶縁被膜表層のみの侵食にとどまっている。

4. ま と め

- (1) 部分放電開始電圧は波形, パルス幅, 周波数による影響は少なく, ほぼ波高値に依存する。
- (2) インバータサージによるPDIVは繰り返し部 (片極性) と極性反転部で発生する領域に分けられ, 実際に採用する電圧パターンの把握が重要である。
- (3) 耐部分放電電線のV-t特性は, 従来線の100倍

以上の寿命を確認したが、実際の電動機適用にあたっては運転温度の考慮が必要である。

5. む す び

インバータサージが電動機の巻き線絶縁に及ぼす影響を把握するために、インバータサージによる部分放電特性試験を実施した。また、インバータ駆動における課題対策の一環として耐部分放電電線の寿命試験を実施し、耐部分放電電線の実用化に向けた基礎的な知見を得ることができた。今後もインバータ駆動電動機の課題解決に向けた検討を継続し、より多くのお客様に高性能且つ信頼性の高い電動機を提供することを目指していく所存である。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《執筆者紹介》



大石和城 Kazuki Oishi
電気設備・機器の絶縁材料関連技術
の研究開発に従事



吉岡靖浩 Yasuhiro Yoshioka
電気設備・機器の診断技術と絶縁材
料関連技術の研究開発に従事

